



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS URBANOS
DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS
SANITARIOS**

Del 06 al 17 de Noviembre del 2000

APUNTES GENERALES

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez
Delegación Iztacalco
Noviembre/2000



11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20



11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

11/10/20

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RELLENOS SANITARIOS

1. Planeación del relleno sanitario (RS)
2. Macro legal (NOM-083)
3. El relleno como método de evacuación de resultados de residuos sólidos
4. Clasificación de rellenos, tipos y métodos
5. Clasificaciones en la localización de rellenos
6. Composición y carteristas, generación, movimiento y control de genes de relleno
7. Composición, formación, movimiento y control de lixiviado en rellenos
8. Gestión de aguas superficiales
9. Características estructurales y de asentamiento de rellenos
10. Supervisión de la calidad ambiental en los rellenos
11. Diseño y trazado de rellenos

12. Operación y rellenos

13. Cláusula y mantenimiento de postclausura de rellenos

14. Cálculos de procesos de rellenos

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RELLENOS SANITARIOS

1.- PALNEACION

como en todas las actividades importantes, el diseño y construcción de rellenos sanitarios, requiere propiamente de un proceso de planeación muy bien estructurada a efecto de aprobar estrictamente el éxito del proyecto.

La planeación forma parte de proceso de gestión o administrativo, dependiendo de la administración como un método por medio del cual un grupo de personas en cooperación persigue la satisfacción de objetivos, mediante cierto mecanismo de operación.

Las funciones de proceso de administración en su sentido ejecutivo, en el presente son esencialmente las mismas que presentó Henri Fayol por primera vez en el año de 1916, y que son las siguientes:

- planeación
- organización
- integración
- dirección
- control

En la Fig. 1, se muestra un esquema de proceso administrativo y a continuación, se hará una breve discusión de la función de planeación en términos generales las actividades que se requieren desarrollar en la función de planeación, son las siguientes:

Identificación de:

- a) Oportunidades
- b) Necesidades
- c) Problemas
- Elaboración de pronósticos para determinar hacia donde llevará el curso actual.

Figura I. El Proceso administrativo

- fijar objetivos para precisar los resultados finales deseados, que pueden ser en términos de:
 - a) Resultados, terminaciones
 - b) Productividad
 - c) Estándares de comportamiento
 - d) Proyectos de desarrollo
 - e) Desarrollo organizacional
- Buscar las acciones mas adecuadas para alcanzar los objetivos.
- Seleccionar la acción más eficaz, teniendo en cuenta los recursos disponibles hoy y los previsibles en el futuro
- Desarrollar estrategias, para decidir como y cuando alcanzar las metas fijas
- Elaboración de programas, estableciendo prioridades, secuencias y sincronización de los pasos a seguir
- Requerimientos, justificación y asignación de recursos para presupuestar, en:
 - a) Facilidades
 - b) Equipo
 - c) Materiales
 - d) Personal

e) Programas de tiempo

- Establecer procedimientos para normalizar métodos, como por ejemplo.

a) Estándares

b) Programas de plan de acción táctico

c) Requerimientos de control, con necesidades de información

d) Lista de tareas

e) Programas de trabajo

f) Criterios y procedimientos para revisión de los planes

g) Interrelaciones con otras funciones

- Formulación de políticas, es decir, tomar decisiones sobre asuntos importantes y recurrentes.

La Matriz de responsabilidades y relaciones funcionales. - Es una herramienta muy valiosa que se define al inicio de proyecto y que se emplea en la elaboración de manual de proyecto y procedimientos de proyecto así como el plan de mismo; en la Tabla 1 se muestra un ejemplo de esta anotándose en los renglones las partes de proyecto, en las columnas las áreas funcionales y en el cruce de los ejes se anota la actividad que le corresponde, clasificada en la siguiente forma:

Responsabilidad primaria y

aprobación final = 1

Información = 2

Aprobación = 3

Trabajo en detalle = 4

El grado de interrelación y responsabilidad se define en el manual de gestión y en los procedimientos.

Finalmente, aún cuando la programación es parte de la planeación, debido a la gran importancia que tiene, un capítulo especial para su estudio y análisis. Las interrelaciones de la programación con las demás partes de la planeación, se pueden observar en la Fig. 2 de proceso de planeación.

TABLA I. MATRIZ DE RELACIONES FUNCIONALES

FIGURA

La planeación de los rellenos sanitario se lleva a cabo aplicando los principios de ingeniería de acuerdo a las necesidades, capacidades y obstáculos de la comunidad; para emprender la analogía de la planeación es como un pasatiempo tener en cuenta:

- El marco en el que normalmente se llevan a cabo las actividades de planeación.
- El efecto del tiempo de planeación.
- Los niveles jurisdiccionales en la que se realiza la estadística de planeación.
- Las difusiones de programa y mes

En muchas ocasiones, el proyectar y el responsable de la toma de decisiones no tienen la oportunidad de decidir la totalidad de RSM y de demandar un conocimiento total sobre la comunidad bajo todas las inmediaciones por instrucciones de tiempo y limita comunica realmente de necesidades sociales y políticas a decidir bajo poca o ninguna implicación; bajo esta circunstancia se recomienda que la planeación se realice de acuerdo a los siguientes paros.

Paro 1.- Definición y explicación del problema

Paro 2.- Inventario y acumulación de datos

Paro 3.- Evaluación y desarrollo de alternativas; análisis económico, variación del impacto

Paro 4.- Solución de plan y programa.- Obtención del apoyo de la comunidad demostrar compatibilidad en los objetivos comunes del tema.

Paro 5.- Desarrollo de programación de implantación.- organización, gestión fiscal, normatividad, accesoria y del plan.

La identificación y evaluación de datos para la localización del sitio se lleva a cabo por un equipo multidisciplinario de especialidades en diseño y operaciones, ambientales geólogos, hidrólogos, geotécnicos y especialista en valoración ambientales.

La localización de valles provocan fuertes reacciones negativas en la comunidad por que las instalaciones residuo, salida, en el pasado no ha sido buenos vecinos, aunque e

la actualidad los problemas ocasionado embalado hasta niveles aceptables.- los anteriores para evaluación de sitio incluyen las siguientes categorías.

- Marco político
- Regulaciones
- Ambientales
- Aguas superficiales
- Aguas subterráneas
- Habitat natural
- Utilización del terreno
- Calidad del aire
- Sociales/culturales
- Estéticos
- Tecnológicos
- Económicos

Estas instalaciones de residuos sólidos municipales requieren permisos que para su obtención se recomienda incluir en estrategia.

- Identificación de los permisos y de las instalaciones expedidoras
- Implicación de la instalación expedidora
- Respuesta cabal a las condiciones fijadas durante el proceso de calidad de permiso.

2.0 MARCO LEGAL

Todas las personas, en la actualidad cotidiana guardan residuos o desechos, conocidas comúnmente como basura.- estos desechos o residuos son la causa principal de contaminación del suelo, son pocos de reproducción de fauna nociva, causa de olores desagradables, contaminación de agua y fuentes de riego, tanto para el ser humano como para el ecosistema en general.- de acuerdo en la legislación , residuo es:

“Cualquier material guardado en el proceso de estación, beneficio, transformación, producción, consumo utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo genero”.

También la legislación define los residuos sólidos municipales (RSM) como:

“Los que se generan en casas habitación, mercados, comercios, bienes muebles, demoliciones, construcciones, instalaciones, establecimientos de servicios, y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieren técnicos especiales para su control excepto las peligrosas o potencialmente peligrosas de hospitales, clínicas, habitaciones y centros de investigación”.

El artículo 137 de la LGEEPA establece que las entidades de los municipios o del distrito federal serán las que atiendan, conforme a las leyes locales en la materia y a las NOM que resaltan aplicables, el funcionamiento de los sistemas de relación, almacenamiento, transporte, alojamiento, rehusó, tratamiento y disposición final de los RSM.

Todos los derechos como son frutas, verduras, carnes, plantas, excreta, etc., se descomponen naturalmente. Esta propiedad puede aprovecharse tanto en forma doméstica como municipal para reducir los volúmenes de basura y al mismo tiempo convertir esas desechos en abono orgánico (composteo) que ayuda a mejorar la fertilidad de los suelos.

En los basureros a cielo abierto, la materia orgánica al descomponerse, desprende líquidos contaminantes conocidos como lixiviados, que se filtran a través del suelo hacia los mantos acuíferos) contaminando el agua.

En ningún caso se puede autorizar la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en territorio nacional. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación, sólo pueden otorgarse cuando existe previo consentimiento de ésta.

Los gobiernos de los estados y los municipios son los responsables de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales-, esto no incluye los residuos peligrosos, La SEMARNAP está promoviendo acuerdos con los estados y municipios para la identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos y sus inventarios.

RELLENOS SANITARIOS

Para controlar algunos de los efectos dañinos de los residuos sólidos municipales la ley establece que se deben depositar en **rellenos** sanitarios. Éstos son obras de ingeniería planeada y ejecutada, previendo los efectos adversos al ambiente, para la disposición final de los residuos sólidos municipales.

De 1984 a la fecha se han venido publicando una serie de normas que describen los métodos para medir y caracterizar una serie de sustancias presentes en los residuos sólidos municipales. El propósito de estas normas es dar una disposición adecuada a los residuos para evitar contaminación al suelo. Las sustancias y factores que describe la ley para su análisis son- materia orgánica, nitrógeno, pH, poder calorífico, humedad, relación carbono nitrógeno, hidrógeno, oxígeno en materia orgánica, azufre y fósforo.

En las normas se establecen las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios y la construcción de obras complementarias para la disposición final de los residuos sólidos municipales.

Estos deben estar a una profundidad mayor de 10 m arriba del nivel de los mantos freáticos o aguas subterráneas, a más de un kilómetro de zonas de recarga de acuíferos, cuerpos y corrientes de agua, y a más de 100 m de fallas geológicas.

El debe tener una pendiente no mayor de 30 %, recurrir ciertas características de impermeabilidad y vida útil de mas de 7 años.

Se deben ubicar a una distancia mayor de 500 m de áreas urbanas, 70 m. De candieres, 3 km de areas protegidas y aeropuertos y 150 m. De áreas de almacenamiento de hidrocarburos.

En el anexo 1 se incluye la NOM-083-ECOL-1996 que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a las disposición final de los RSM.

3.0 EL RELLENO SANITARIO (RS) DE EVACUACION DE RESIUIOS DE SOLIDOS

Históricamente, los RS han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en Estados Unidos y en todo el mundo. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, de reciclaje y de las tecnologías de transformación, la evacuación en RS de los rechazos procedentes de los residuos sólidos sigue siendo un componente importante dentro de una estrategia para la gestión integral de residuos sólidos. La gestión de RS implica la planeación, diseño, explotación, clausura y control postclausura de RS. Los propósitos de este capítulo son:

- Introducir a los temas de procesos de RS.
- Repasar las principales reacciones que se producen en los RS.
- Identificar las inquietudes ambientales asociadas a los RS, y
- Pasar brevemente algunas de las normativas que regulan la evacuación de residuos sólidos en RS

Más adelante en otros capítulos se examinan de una forma más amplia muchos de los temas introducidos en este capítulo.

Método

El propósito de la exposición siguiente es introducir al lector en el tema de vertido de residuos sólidos mediante

- 1) la definición de algunos términos que son comúnmente utilizados cuando se trata el vertido de residuos sólidos,
- 2) el repaso de operaciones y procesos,

- 3) la descripción de la vida de un RS, y
- 4) el repaso de algunas de las reacciones que se producen en los RS.

Definición de términos. RS son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. En el pasado, el término «RS sanitarios controlados» se utilizaba para denominar un RS en el que se cubrían los residuos puestos en el RS al finalizar cada día de operación. Actualmente, *relleno sanitario controlado* se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSM, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública. Los RS para la evacuación de residuos peligrosos son conocidos como *de seguridad*. Un RS sanitario controlado a veces se identifica como una *unidad para la gestión de residuos sólidos*. *Vertido en el proceso mediante* se depositan los residuos sólidos en un RS. El vertido incluye la supervisión de flujo de residuos entrante, la colocación y compactación de los residuos, y la implantación de instalaciones para el control y la supervisión ambiental.

El término *celda* se utiliza para describir el volumen de material depositado en un RS durante un período de explotación, normalmente un día. Una celda incluye: los residuos sólidos depositados y la materia de cubrimiento. *diaria* normalmente consiste en 15 o hasta 30 cm de suelo natural o materiales alternativos, como compost, que se aplican a los frentes de trabajo de RS al final de cada período de operación. Los objetivos de la cubrimiento diario son: controlar el vuelo de materiales residuales; prevenir la entrada o salida de RS de vectores sanitarios, tales como ratas, moscas y otros, y controlar durante la operación la entrada de agua en el RS.

El nivel es una capa completa de celdas sobre una zona activa del RS (figura 3). Normalmente, los RS se conforman en una serie de niveles. La *berma (o terraza)* se utiliza frecuentemente cuando la altura de RS excede de 125 cm a 2 m. Las bermas se utilizan para mantener la estabilidad de la pendiente de RS, para la localización de canales para el drenaje de agua superficial, y para la localización de tuberías

destinadas a la recuperación del gas de RS. El *nivel final* incluye la capa de cubrimiento. *Capa final de cubrimiento* se aplica a toda la superficie del RS después de concluir todas las operaciones de vertido. el cubrimiento final normalmente consiste en múltiples capas de tierra y/o materiales como geomembranas diseñadas para facilitar el drenaje superficial, interceptar aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial.

FIGURA 3

Vista en sección de un relleno sanitario controlado.

El líquido que se acumula en el fondo de un RS se conoce como *lixiviado*. En RS profundos, frecuentemente se recoge el lixiviado en puntos intermedios. En general el lixiviado es el resultado de la precipitación, de la escorrentía no controlada y del agua de irrigación que entra en el RS. El lixiviado también puede incluir aguas inicialmente contenidas en los residuos, así como aquellas procedentes de aguas subterráneas que se infiltren. El lixiviado contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados en el RS y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del RS.

Gas de RS es la mezcla de los gases que se encuentran dentro de un RS. La mayor parte del gas de RS está formado por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), productos principales de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica biodegradable de los RSM en el RS. Otros componentes del RS son nitrógeno y oxígeno atmosféricos, amoníaco y compuestos orgánicos en cantidades traza.

Recubrimientos de RS son materiales (naturales y fabricados) que se utilizan para recubrir el fondo y las superficies laterales del RS. Los recubrimientos suelen estar formados por capas de arcilla compactadas y/o geomembranas diseñados para prevenir la migración del lixiviado y del gas de RS. Las *instalaciones para el control del RS*

incluyen recubrimiento, sistemas para la recolección y extracción del lixiviado, sistemas de extracción y recolección del gas de RS, y capas diarias y finales de cubrimiento.

La supervisión ambiental implica actividades, asociadas con la recolección y el análisis de muestras de agua y de aire, que se utilizan para supervisar el movimiento de los gases y del lixiviado del RS en la zona de vertido. *Clausura de RS* es el término utilizado para describir los pasos que se deben seguir para cerrar y asegurar la zona del RS una vez completada la operación de relleno. *Mantenimiento postclausura* se refiere a las actividades asociadas con la supervisión y mantenimiento a largo plazo del RS completado (normalmente 30 a 50 años).

Exposición general de la planeación, diseño y explotación de RS. En la Figura 11.3 se identifican los elementos principales que se deben considerar en la planeación, diseño y explotación de RS, que incluyen:

- 1) trazado y diseño de RS;
- 2) explotación y gestión de RS
- 3) reacciones que se producen en los RS;
- 4) gestión de gases de RS;
- 5) gestión del lixiviado;
- 6) supervisión ambiental,
- 7) clausura del RS y mantenimiento postclausura. Se considera cada uno de los ciernen- tos más ampliamente en este capítulo.

Vida de un RS moderno. La siguiente descripción de la vida de un RS moderno es genérica. Los detalles específicos de explotación variarán según el tipo de material que se vierte y según la configuración del RS. En capítulo 4 se presentan los tipos y configuraciones de RS, donde se resaltan algunas desviaciones significativas del

esquema genérico de explotación. En la Figura 5 se ilustra el desarrollo de un RS moderno.

Preparación de la zona de vertido. El primer paso en el proceso implica la preparación de la zona para la construcción del RS. Se debe modificar el drenaje existente para canalizar el escurrimiento fuera de la zona elegida para el RS. La recanalización del drenaje natural es particularmente importante para los RS tipo barranco, donde puede drenarse a través de la zona una importante cuenca. Además, el drenaje natural debe mortificarse para canalizar el agua fuera de la zona inicial de relleno. Otras tareas de preparación incluyen la construcción de carreteras de acceso y de instalaciones de pesaje, además de la instalación de vallas.

El siguiente paso en el desarrollo de un RS es la excavación y preparación del fondo del RS y de las superficies laterales. Los RS modernos normalmente se construyen en secciones. El trabajo por secciones permite, en cualquier momento, la exposición a la precipitación de solamente una pequeña parte de la superficie no protegida del RS. Además las excavaciones se llevan a cabo gradualmente, no preparando todo el fondo del RS en una sola vez. Se puede almacenar el material excavado sobre el suelo no excavado cerca de la zona activa, minimizándose así el problema de la precipitación que pueda acumularse en la excavación. Cuando se recubre de una sola vez todo el fondo del RS, se debe hacer provisión para separar la escorrentía de aguas de tormenta fuera de la porción del RS que está siendo utilizada.

Para minimizar costos, es deseable conseguir en el mismo lugar los materiales de cubrimiento de la zona del RS. La zona de trabajo inicial del RS se excava hasta la profundidad diseñada, y se almacena el material excavado para su utilización posterior. La zona aireada (zona entre la superficie del suelo y las aguas subterráneas permanentes) y el equipamiento para supervisar las aguas subterráneas se instala antes de colocar el recubrimiento

FIGURA 4

Esquema de operaciones y procesos en RS.

FIGURA 5

Desarrollo y clausura de un RS de residuos sólidos: (a) excavación e implantación de recubrimiento del RS, (b) vertido de residuos sólidos en el RS y (c), sección del RS clausurado.

Del RS. El fondo del RS se prepara para proporcionar drenaje para el lixiviado y se instala un recubrimiento de baja permeabilidad. Las instalaciones para la recolección y extracción del lixiviado se localiza dentro o encima del recubrimiento. Normalmente, el recubrimiento se extiende por las paredes excavadas en los, laterales de RS.

Pueden instalarse zanjas horizontales para la recuperación del gas en el fondo del RS, particularmente si se piensa que van a ser problemáticas las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los residuos recientemente colocados. Para minimizar el escape de COV, se aplica un vacío y el aire se aspira a través de las áreas ya utilizadas del RS. El gas que se separa tiene que quemarse en condiciones controladas para destruir los COV. Antes de empezar el relleno, se construye una berma de suelo en el lado a favor del viento dentro de la zona planificada de relleno. La berma sirve como cortavientos para controlar el vuelo de materiales y también sirve para compactar contra ella los residuos. Para los RS excavados, la pared de excavación normalmente sirve como cara inicial de compactación.

Colocación de residuos. Una vez preparada la zona de vertido, el siguiente n el proceso implica la colocación de los residuos. Como se muestra en la Figura 5b, los residuos se colocan en celdas empezando a lo largo de la cara de compactación, y siguiendo hacia afuera y hacia arriba a partir de dicha cara. Los residuos depositados en cada período de operación, normalmente un día, forman una celda individual. Los

residuos depositados por los vehículos de recolección y transferencia se esparcen en capas de 45-60 cm y se compactan. Las alturas normales de las celdas varían de 240 a 360 cm. La longitud del frente de trabajo varía con las condiciones de la zona y la magnitud de la operación. El frente de trabajo es la zona del RS donde se descargan, colocan y compactan los residuos sólidos durante un período dado de operación. La anchura de la celda varía de 3 a 9 m, de nuevo según el diseño y la capacidad del RS. Se cubren todas las superficies externas de la celda con una delgada capa de tierra (15-30 cm) o con otro material apto, al final de cada período de operación.

Después de colocar uno o más niveles, pueden excavarse zanjas horizontales para la recuperación de gas en las áreas ya completadas (Figura 4). Las zanjas excavadas se rellenan con grava, y se instalan en ellas tubos de plástico perforados. Se extrae el gas de RS a través de los tubos durante el período de tiempo que se esté produciendo el gas. Se colocan niveles sucesivos, uno encima de otro, hasta llegar al nivel final previsto en el proyecto. Según la profundidad del RS, se pueden colocar instalaciones adicionales para la recolección del lixiviado en distintos niveles. Se aplica una capa de cubrimiento a cada sección completa del RS. El cubrimiento final se diseña para minimizar la filtración de la precipitación atmosférica y para conducir el drenaje fuera de la sección activa del RS. Por otra parte, se hace una restauración de la cubrimiento para controlar la erosión. En este momento se pueden instalar chimeneas verticales para la extracción del gas, y éste puede quemarse en una antorcha o en instalaciones para recuperación de energía, según lo que se considere apropiado.

Se construyen, progresivamente y hacia afuera de las secciones ya completadas, secciones adicionales repitiendo los pasos de construcción anteriormente descritos. A medida que se descompongan los materiales orgánicos depositados en el RS se asentarán las secciones llenas. Las actividades de gestión de RS deben incluir el relleno y la recuperación de las superficies asentadas de los RS para mantener el drenaje y el grado final deseado. También deben extenderse y mantenerse los sistemas para el control del gas y del lixiviado. Cuando han finalizado todas las actividades

asociadas con el relleno, se arregla la superficie y se mejora con la instalación de un cubrimiento final. Se restaura el lugar apropiadamente y se prepara para otros usos.

Gestión postclausura. La supervisión y mantenimiento del RS lleno debe continuar, según la ley, durante algún tiempo después de la clausura (30 a 50 años). Es de especial importancia que se mantenga y se arregle la superficie del RS para aumentar el drenaje, que se mantengan y operen los sistemas para el control del lixiviado y del gas, y que se supervise el sistema para la detección de posibles contaminaciones.

Reacciones que se producen en RS. Los residuos sólidos colocados en un relleno sanitario controlado sufren simultáneamente algunos cambios biológicos, químicos y físicos que están interrelacionados y que se presentan en esta sección. En capítulos subsiguientes son consideradas con más amplio detalle algunas reacciones.

Reacciones biológicas. Las reacciones biológicas más importantes que se producen en los RS son aquellas que afectan a la materia orgánica de los RSM, que evolucionan produciendo gas de RS y, eventual, líquidos. El proceso de descomposición biológica normalmente sucede aerobiamente durante un corto período de tiempo, inmediatamente después de la evacuación de los residuos, hasta que se agota el oxígeno inicialmente presente. Durante la descomposición aerobia el gas principal producido es CO_2 . Una vez consumido el oxígeno, la descomposición pasa a ser anaerobia y la materia orgánica se convierte en (CO_2 , CH_4 , y cantidades traza de amoníaco y sulfuro de hidrógeno). También se producen un gran número de reacciones bioquímicas. Por el número de interrelaciones, es difícil determinar las condiciones que existen en cualquier RS o porción de RS para un momento dado.

Reacciones químicas. Las reacciones químicas más importantes que se producen dentro de un RS incluyen:

- la disolución y arrastre en suspensión de los materiales de los residuos y de productos de conversión biológica en los líquidos que se filtran a través de los residuos;
- la evaporación de compuestos químicos y de agua en el gas de RS,
- la absorción de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en el material vertido,
- la desilusión y descomposición de compuestos orgánicos, y
- reacciones de oxidación-reducción que afectan a metales y a la solubilidad de las sales metálicas.

La disolución en el lixiviado de productos de conversión biológica y de otros compuestos, particularmente compuestos orgánicos, es de especial importancia porque estos materiales pueden salir del RS con el lixiviado. Estos compuestos orgánicos, a continuación, pueden entrar en la atmósfera, bien a través del suelo (cuando el lixiviado ha salido de un RS sin revestimiento) o bien a través de instalaciones descubiertas para el tratamiento del lixiviado. Otras reacciones químicas importantes incluyen aquellas que se producen entre ciertos compuestos orgánicos y los revestimientos de arcilla, que pueden alterar la estructura y la permeabilidad del material de revestimiento. Las interrelaciones de las reacciones químicas que se producen dentro del RS no se conocen bien.

Reacciones físicas. Entre los cambios físicos más importantes que se producen en los RS están: la difusión lateral de los gases en el RS y la emisión de gases de RS al ambiente circundante, el movimiento del lixiviado dentro y hacia abajo del RS, a través del suelo, y el asentamiento causado por la consolidación y descomposición del material vertido. El movimiento y las emisiones de gas de RS necesitan una especial e importante consideración en la gestión de RS. Mientras se está produciendo gas dentro de un RS, la presión interna puede crecer, causando roturas en el cubrimiento del RS y, por lo tanto, escapes. El agua que entra en el RS a través del cubrimiento roto puede

aumentar la velocidad de producción del gas, causando todavía más roturas. El gas de RS que consiga escapar podría llevar al ambiente circundante oligocompuestos cancerígenos y teratogénicos. Como el gas de RS suele tener un alto contenido de metano, existe el peligro de combustión y/o explosión. Otra inquietud importante es la migración del lixiviado. Como el lixiviado migra hacia abajo, puede llevar compuestos y materiales hasta nuevos puntos donde puedan reaccionar con facilidad. El lixiviado se introduce en los poros de aire del RS, interfiriendo así en la migración del gas de RS.

Problemas ambientales en el relleno de residuos sólidos

estos problemas están relacionados con:

- el escape incontrolados de los gases del RS, que pueden migrar fuera del lugar y causar olores y otras condiciones potencialmente peligrosas;
- el impacto de la descarga de los gases del RS sobre el efecto invernadero en la atmósfera;
- la salida incontrolada del lixiviado, que puede migrar hacia aguas subterráneas o superficiales,
- la reproducción de vectores sanitarios en RS incorrectamente gestionados, y
- los impactos sobre la salud y el ambiente relacionados con el escape de gases en cantidades traza que surgen a partir de materiales peligrosos, que fueron colocados en el pasado dentro del RS. La finalidad del diseño y del funcionamiento de un RS moderno es eliminar o minimizar los impactos asociados a estos problemas.

Normativas federales y estatales para RS

Cuando se planifica la ubicación de un nuevo RS, deben tenerse en cuenta las múltiples normativas federales y estatales que están en vigor para mejorar el rendimiento de los RS controlados.

4.0 CLASIFICACION DE RS, TIPOS Y METODOS

- El propósito de esta sección es presentar al lector
- un sistema comúnmente utilizado para la clasificación de RS
- los distintos tipos de RS que se utilizan actualmente, y los distintos métodos de vertido utilizados

Clasificación de Herederos

Aunque se han propuesto a lo largo de los años algunos sistemas para la clasificación de RS, el sistema de clasificación adoptado en el estado de California en 1984 quizás sea el más ampliamente aceptado. En el sistema de California, presentado a continuación, se utilizan tres clasificaciones:

Clasificación	Tipo de residuo
I	Residuos peligroso
II	Residuos singulares
III	Residuos sólidos municipales (RSM)

Los residuos designados son residuos no peligrosos que pueden emitir constituyentes en concentraciones que sobrepasan las normativas en vigor sobre calidad de agua, o son aquellos residuos que han sido clasificados como singulares por el Departamento de Estado de Servicios de Salud (DOHS). Hay que resaltar que este sistema de clasificación está enfocado principalmente hacia la protección de aguas superficiales y subterráneas, en vez de hacia la migración de gas de RS o hacia la calidad de aire.

Tipos de RS

Los principales tipos de RS pueden clasificarse como:

- convencionales para RSM no seleccionados, 2)
- RS para residuos triturados, y 3)
- monoRS para residuos singulares o especiales.
- También se tratarán otros tipos de RS y operaciones de RS, incluyendo el reciclaje del lixiviado.
-

RS para RSM no seleccionados. La mayoría de los RS en Estados Unidos se diseñan para RSM no seleccionados. En muchos de estos RS de clase 111, también se aceptan cantidades limitadas de residuos industriales no peligrosos y de lodos de plantas para el tratamiento de aguas residuales. En muchos estados se aceptan lodos de plantas para el tratamiento de aguas residuales si están deshidratados hasta un contenido en sólidos de 51 por 100 o más. Por ejemplo, en California, la evacuación de lodos en RS para RSM está restringida a una relación de cinco partes de residuos sólidos por una parte de lodos en peso. Muchos municipios han adoptado limitaciones aún más restrictivas sobre la cantidad de lodos que se pueden aceptar.

En muchos casos, se utiliza el suelo natural como material de cubrimiento Final e intermedio. Sin embargo, en lugares como Florida y New Jersey, donde la cantidad de suelo natural disponible para ser utilizado como cubrimiento intermedio es limitado, se emplean materiales alternativos, como compost producido a partir de RSM y residuos de jardín, espuma, alfombras y moquetas viejas, dragados y residuos de demolición. Para conseguir una mayor capacidad, en algunos lugares se están reutilizando RS elausurados o abandonados excavando el material descompuesto para recuperar los metales, y utilizando los restos descompuestos como cubrimiento diaria de los nuevos residuos. En algunos casos, los residuos descompuestos son excavados y almacenados, instalándose un revestimiento antes de reactivar el RS.

RS para residuos sólidos triturados. Un método alternativo de vertido, que está probándose en varios lugares de Estados Unidos, es aquel que implica la trituración de los residuos sólidos antes de colocarlos en el RS. Los residuos triturados pueden colocarse en una densidad de hasta el 35 por 100 mayor que los residuos no triturados, y sin cubrimiento diario, en las normativas de algunos estados. El vuelo de papeles, los olores, las moscas y las ratas no han causado problemas significativos. Como se pueden compactar los residuos triturados formando una superficie más apretada y uniforme, puede ser suficiente una pequeña cantidad de suelo u otro material de cubrimiento para controlar la infiltración de agua durante la operación de relleno.

Las desventajas de este método son: la necesidad de una planta de trituración y la necesidad de operar una sección de vertido convencional para residuos no fácilmente triturables. El método con residuos triturados tiene un uso potencial en zonas donde la capacidad de los RS es pequeña (por la mayor compactación que se puede conseguir), cuando no hay material de cubrimiento fácilmente disponible, y cuando la precipitación atmosférica es muy baja o altamente estacional. También se pueden utilizar materiales triturados para producir compost, que después puede utilizarse como material de cubrimiento intermedio.

RS para constituyentes individuales de residuos. Los RS que se utilizan para constituyentes individuales de residuos son conocidos como *monoRS*. Las cenizas de incineración, el amianto y otros residuos similares, a menudo identificados como residuos especiales, se colocan normalmente en *monoRS* para aislarlos de los materiales colocados en los RS para RSM. Como las cenizas de incineración contienen pequeñas cantidades de material orgánico no quemado, la producción de olores procedentes de la reducción de sulfatos (ver Ecuación 4.12) ha sido un problema en los *monoRS* utilizados para cenizas de incineración. Por ello se recomienda la instalación de sistemas para la recuperación del gas, de forma que se puedan controlar los problemas de olor.

Otros tipos de RS. Además de los métodos convencionales de descritos, se están desarrollando otros métodos de vertido especializados, diseñados para mejorar los distintos objetivos de gestión de RS. Los métodos de explotación alternativos que están utilizándose actualmente incluyen:

- RS diseñados para maximizar la producción de gas dentro de RS, y
- RS funcionando como unidades para el tratamiento integral de residuos sólidos.

También, se discute la práctica de vertido en zonas húmedas, que actualmente está prohibida.

RS diseñados para maximizar la producción de gas. Si se va a maximizar la cantidad de gas producido y recuperado de la descomposición anaerobia de residuos sólidos, harán falta diseños de RS especializados. Por ejemplo, el uso de celdas profundas individualmente recubiertas, en las que se depositen los residuos sin capas intermedias de material de cubrimiento y se recicle el lixiviado para intensificar el proceso de descomposición biológica, es una opción viable. Una posible desventaja de un RS así es que finalmente es imprescindible evacuar el lixiviado en exceso.

RS como unidades de tratamiento integral. En este método de explotación, los constituyentes orgánicos se separarían y se colocarían en un RS apartado, donde se intensificarían las tasas de biodegradación incrementando el contenido en humedad de los residuos, bien mediante el reciclaje del lixiviado o bien mediante la siembra con lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales o con estiércol animal. El material degradado se recuperaría y se utilizaría como material de cubrimiento en las nuevas zonas de relleno, y la celda excavada se rellenaría con nuevos residuos.

RS en zonas húmedas. En el pasado, el vertido en zonas húmedas, tales como ciénagas, pantanos y marismas, se consideraba aceptable si se proporcionaba un

drenaje adecuado y si no se desarrollaban condiciones insalubres. Bajo las normativas federales actuales, se prohíbe tal destrucción de zonas húmedas, aunque la expansión de un RS existente puede permitirse bajo condiciones especiales. Ya que existen algunos RS en estas zonas, se presenta una breve descripción de los métodos normalmente utilizados en estos rellenos.

La práctica normal para rellenar zonas húmedas era dividir la zona en celdas o lagunas y controlar las operaciones de relleno para que fuese rellenada una célula o laguna cada año. A menudo se colocaban los residuos sólidos directamente en el agua. Una alternativa consistía en añadir material de relleno limpio hasta el nivel de agua o un poco más, antes de comenzar el relleno con residuos. Para contener las olas de barro y para incrementar la estabilidad estructural, se construyeron diques con piedras sueltas, árboles, ramas de árboles, madera, residuos de demolición, o materiales similares además de material de relleno limpio, para dividir las celdas o lagunas. En algunos casos, para prevenir el movimiento de lixiviado y de los gases de las celdas o lagunas completadas, se ha utilizado arcilla y pilotaje entrelazado de chapa de acero o madera.

Métodos de vertido

Los principales métodos utilizados para el vertido de RSM son: 1) celda/zanja excavada, 2) zona y 3) vaguada/depresión. Los rasgos principales de estos tipos de RS, ilustrados en la Figura 6, se describen a continuación. Los detalles sobre el diseño de los RS se presentan más adelante dentro de este capítulo.

Método celda/zanja excavada. El método de vertido celda/zanja excavada (ver Figura 6a) es idóneo para zonas donde se dispone de una profundidad adecuada de material de cubrimiento y donde el nivel freático no se encuentra cerca de la superficie. Normalmente, se colocan los residuos sólidos en celdas o zanjas excavadas en el suelo. La tierra excavada se utiliza como material para el cubrimiento diario o final. Usualmente, las celdas o zanjas excavadas se revisten con membrana sintética o con arcilla de baja permeabilidad, o con una combinación de los dos, para limitar el

movimiento de los gases de; RS y de la lixiviación (ver Figura 11.8). Las celdas excavadas son normalmente cuadradas, de hasta 300 m de largo y ancho, con pendientes laterales de 1,5:1 a 2:1. Las zanjas varían desde 60 a 300 m de largo, de 1 a 3 m de profundidad, y de 4,5 a 15 m de ancho.

En algunos estados, se permiten RS contruidos por debajo de nivel freático, si se toman medidas especiales para prevenir la entrada de aguas subterráneas en el RS, y para contener o eliminar el movimiento de; lixiviado y de los gases de las celdas llenas. Normalmente se deseca el lugar, se excava, y después se reviste según las normativas locales. Las instalaciones de desecado funcionan hasta que el lugar está relleno, para evitar la creación de presiones que puedan causar que el revestimiento se levante y se rompa. En el capítulo 7 se trata más extensamente el uso de revestimientos de arcilla y de membranas.

FIGURA 6

Metodos de vertido comúnmente utilizados: (a) celda/zanja excavada, (b) zona, y (c) vaguada/depresión

Método en zona. El método en zona se utiliza cuando el terreno es inapropiado para la excavación de celdas o zanjas donde colocar los residuos sólidos (ver Figuras 6b). Las condiciones de alto nivel freático, que se producen en muchos lugares de Florida y también en otras partes, precisan del uso de RS de tipo zona. La preparación de; lugar implica la instalación de un revestimiento y de un sistema para el control del lixiviado. El material de cubrimiento tiene que llevarse en camión desde terrenos adyacentes o desde zonas de fosas de relleno suplementario. Como anteriormente se ha resaltado, en los lugares con una disponibilidad limitada de material para ser utilizado como cubrimiento se ha empleado con éxito compost producido a partir de residuos de jardín y RSM como material para la cubrimiento intermedia. Otras técnicas que se han utilizado incluyen el uso de materiales portátiles de cubrimiento temporal, tales como

tierra y geomembranas. La tierra y las geomembranas colocadas temporalmente sobre una celda completa se pueden quitar antes de comenzar el siguiente nivel.

Método vaguada/depresión. Se han utilizado vaguadas, barrancos y fosas de relleno suplementario, y canteras como zonas de vertido (Figura 6c). Las técnicas para colocar y compactar residuos en RS de vaguada/depresión varían según la geometría del lugar, las características del material de cubrimiento disponible, la hidrología y geología del lugar, los tipos de instalaciones para el control del gas y del lixiviado que van a utilizarse, y el acceso al lugar.

El control del drenaje superficial a menudo es un factor crítico en el desarrollo de las zonas de vaguada/depresión. Normalmente, se comienza el relleno de cada nivel por la cabeza de la vaguada (ver Figura 6c) y se termina por la boca, para prevenir la acumulación de agua en la parte de atrás del RS. Se rellenan los lugares de vaguada/depresión en múltiples niveles. El método de explotación es esencialmente el mismo que para el método en zona anteriormente descrito. Si el suelo de la vaguada es razonablemente plano el vertido inicial puede realizarse utilizando el método celda/zanja excavada argumentado previamente.

Una de las claves para la utilización con éxito del método vaguada/depresión es la disponibilidad del material adecuado para cubrir cada nivel mientras se completa y para proporcionar un cubrimiento final sobre la totalidad del RS cuando se ha alcanzado la altura final. El material de cubrimiento se excava de las paredes o del suelo de la vaguada antes de instalar el sistema de revestimiento. Quizás las fosas de relleno suplementario y las canteras abandonadas no contengan suficiente tierra para cubrimiento inmediata; en ese caso, quizás será necesario importar el material de cubrimiento. Para las capas intermedias de cubrimiento se puede utilizar compost producido de residuos de jardín y RSM

5.0 CONSIDERACIONES EN LA LOCALIZACIÓN

Una de las tareas más difíciles afrontadas por la mayoría de las comunidades en la implantación de un programa de gestión integral de residuos sólidos es la localización de los RS. En esta sección se presentan los factores que hay que tener en cuenta en la localización de un nuevo.

Los factores que tienen que considerarse en la evaluación de potenciales ubicaciones para la evacuación de residuos sólidos a largo plazo incluyen: 1) distancia de transporte, 2) restricciones en la localización, 3) cantidad de terreno disponible, 4) acceso al lugar, 5) condiciones y topografía del lugar, 6) condiciones climatológicas, 7) hidrología del agua superficial, 8) condiciones geológicas e hidrológicas, 9) condiciones ambientales locales y 10) usos potenciales para el lugar tras la clausura. La selección Final de un en los resultados de un estudio detallado del lugar, de estudios de ingeniería de diseño y de costos, y en una valoración del impacto ambiental. Es interesante el hecho de que los costos de entrada para el desarrollo de nuevos RS en California actualmente varían de 10 millones de dólares hasta 20 millones de dólares, antes de realizar el primer vertido de residuos en el RS.

Distancia de transporte

La distancia de transporte es una de las variables importantes en la selección de un lugar de evacuación. A partir de los cálculos presentados en los Capítulos 8 y 10, está claro que la distancia de transporte puede afectar significativamente al diseño y a la operación global de un sistema para la gestión de residuos. Aunque son deseables distancias mínimas de transporte, también se deben tener en cuenta otros factores. Como la localización de RS normalmente se determina por necesidades ambientales y políticas, el transporte a larga distancia, actualmente está llegando a ser muy común.

Restricciones en la localización

Restricciones en la localización hace referencia a los lugares donde se pueden situar los RS. Actualmente hay restricciones en vigor con respecto a la localización de RS cerca de aeropuertos, terrenos aluviales, zonas húmedas, zonas con fallas conocidas, zonas de impacto sísmico y zonas inestables. Todas las restricciones actuales tienen que estudiarse cuidadosamente durante el proceso preliminar de localización para evitar gastos de tiempo y dinero, evaluando un lugar que no cumplirá los requisitos regulatorios.

Disponibilidad de terreno

En la selección de lugares potenciales de evacuación en la tierra es importante asegurar que hay suficiente terreno disponible. Aunque no hay normas estrictas, es deseable tener suficiente terreno, incluyendo una zona adecuada de vallado, para el funcionamiento durante por lo menos siete años en un lugar determinado. Para períodos de tiempo más cortos, la operación de evacuación llega a ser considerablemente más cara, especialmente respecto a la preparación del lugar, aprovisionamiento de instalaciones auxiliares tales como báscula, e instalaciones de almacenamiento, y operaciones de cubrimiento final. En la valoración inicial de los lugares potenciales de evacuación, es importante calcular la desviación de residuos que va a producirse en el futuro, y determinar el impacto que tendrá tal desviación sobre la cantidad y la condición de los materiales que se van a evacuar. Para satisfacer los propósitos de planeación preliminar, la cantidad de terreno necesario se puede estimar como se ilustra en el Ejemplo 1.

Ejemplo 1 Estimación de área requerida para un RS. Estimar el área necesaria para un RS que sirve una comunidad con una población de 31.000 habitantes. Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

1. Generación de residuos sólidos = 2,9 kg/hab.día
2. Peso específico de residuos compactados en el RS = 474,64 kg/m³
3. Profundidad media de residuos compactados = 6 m.

Acceso al lugar

Como el número de RS en operación sigue reduciéndose, los nuevos RS que se están utilizando están incrementando su tamaño. Ya que los terrenos de tamaño deseado a menudo no están cerca de carreteras existentes adecuadas, la construcción de carreteras de acceso y el uso de equipamiento para el transporte a larga distancia se ha convertido en una realidad, y una parte importante en la localización de RS. Las vías de ferrocarril a menudo pasan cerca de lugares distantes que se pueden utilizar como RS; por lo tanto, hay un renovado interés por el uso del ferrocarril para transportar los residuos a estas zonas distantes.

Condiciones del suelo y topografía

Al ser necesario cubrir los residuos colocados en el RS cada día y proporcionar una cubrimiento final después de completar la operación de vertido, se deben obtener datos sobre las cantidades y las características de los suelos de la zona. Si se va a utilizar como material de cubrimiento el suelo del lugar propuesto para el RS, deben obtenerse datos sobre sus características geológicas e hidrológicas. Si el material de cubrimiento va a proceder de una fosa suplementaria de relleno, habrá que hacer sondeos para caracterizar el material. Se debe tener en cuenta la topografía local porque afectará al tipo de operación de vertido utilizada, a las necesidades de equipamiento y al trabajo necesario para hacer que el lugar sea utilizable. Si el material de cubrimiento adecuado es limitado y se está haciendo un esfuerzo para alargar la vida útil del RS, puede que sea necesario considerar el uso de compost o de otros materiales para la cubrimiento intermedia.

Condiciones climatológicas

También deben tenerse en cuenta las condiciones de clima local en la evaluación de lugares potenciales. En muchas localizaciones, las condiciones durante el invierno afectarán al acceso al lugar. Un tiempo húmedo hará necesario el uso de lugares de vertido separados. Cuando la congelación es severa debe disponerse de material de cubrimiento almacenado, por ser impracticable la excavación. La fuerza y las formas de viento también deben considerarse cuidadosamente. Para evitar el vuelo de materiales residuales, hay que construir cortavientos. La forma exacta de los cortavientos dependerá de las condiciones locales.

Hidrología de aguas superficiales

La hidrología local de las aguas superficiales de la zona es importante para determinar las características de drenaje natural y el escurrimiento existentes que hay que tener en cuenta. Deben identificarse también otras condiciones de inundación (por ejemplo, los límites de inundación en 100 años). Como hay que desarrollar medidas para desviar el escurrimiento superficial fuera de lugar del RS, los planificadores deben tener mucho cuidado en el momento de definir los canales de flujo existentes y el área y las características de la cuenca.

Condiciones geológicas e hidrogeológicas

Estos quizás sean los factores más importantes para establecer la idoneidad ambiental de un lugar para instalar un RS. Se necesitan datos sobre estos factores para valorar la contaminación potencial del lugar propuesto y para establecer lo que hay que hacer en el lugar, para asegurar que el movimiento del lixiviado o de los gases procedentes del RS no dañarán la calidad de las aguas subterráneas locales o contaminarán otros

acuíferos superficiales o lechos de roca. En la valoración preliminar de lugares alternativos, se pueden usar los mapas de Sondeo Geológico USA e información geológica local o estatal. También se pueden usar archivos de perforación de pozos cercanos para la valoración preliminar.

Condiciones ambientales locales

Aunque ha sido posible construir y explotar RS próximos a zonas residenciales e industriales, hay que operarlos con muchas precauciones, considerando si van a ser ambientalmente aceptables respecto al tráfico, ruidos, olores, polvo, residuos volantes, impacto visual, control de vectores sanitarios, peligros para la salud, y valores de la propiedad. Para minimizar el impacto de las operaciones de vertido, actualmente se sitúan los RS en lugares distantes, donde se pueden establecer y mantener zonas adecuadas de vallado alrededor del RS.

Uso final de RS llenos

Una de las ventajas de un RS es que, una vez completado, queda disponible para otros usos una superficie de terreno bastante grande. Como la utilización final de este terreno influye en el diseño y el funcionamiento del RS, se debe resolver esta cuestión antes de comenzar con el trazado y el diseño del RS. Las posibilidades para el uso final de RS completados son cada vez más limitadas por las normativas estatales y federales que tratan sobre la clausura y el mantenimiento postclausura de RS. Si el RS municipal se va a utilizar para funciones municipales, se debería iniciar un programa de plantación por etapas que continúe mientras se completan las distintas porciones del RS

6.0 COMPOSICION Y CARACTERISTICAS, GENERACION, MOVIMIENTO Y CONTROL DE LOS GASES DE RS

Se puede conceptualizar un RS de residuos sólidos como un reactor bioquímico, con residuos y agua como entradas principales, y con *gases de RS* y *lixiviado* como principales salidas. El material almacenado en el RS incluye: material orgánico parcialmente biodegradado y otros materiales inorgánicos de los residuos originalmente colocados en el RS. Se emplean los sistemas de control de los gases del RS para prevenir el movimiento indeseable hacia la atmósfera de los gases del RS, o el movimiento lateral o vertical a través del suelo circundante. Se puede utilizar el gas recuperado del RS para producir energía, o se puede quemar, bajo condiciones controladas, para disminuir la emisión de constituyentes dañinos a la atmósfera.

Composición y características del gas de RS

El gas de RS está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (gases principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (oligogases). Los gases principales proceden de la descomposición de la fracción orgánica de los RSM. Algunos de los oligogases, aunque presentes en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y podrían presentar riesgos para la salud pública.

Constituyentes principales del gas de RS. Los gases que se encuentran en los RS incluyen amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). En la Tabla 2 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un RS de RSM. En la Tabla .3 se presentan datos sobre el peso molecular y la densidad. En el Apéndice F se presentan datos que pueden utilizarse para determinar la solubilidad de estos gases en agua (lixiviado). El metano y el dióxido

de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos.

TABLA .2

Constituyentes típicos encontrados en el gas de RS de RSM,

Componente	Porcentaje (base volumen seco)^b
<u>Metano</u>	45-60
45-60 Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
<u>Oxígeno</u>	0,1-1,0
<u>Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, cte</u>	0-1,0
<u>Amoniaco</u>	0,1-1,0
<u>Hidrógeno</u>	0-2,0
<u>Monóxido de carbono</u>	0-2,0
Constituyentes en cantidades traza	0,01-0,6
Características	Valor
Temperatura	37-60°C
Densidad específica	1,02-1,06
<u>Contenido en burnedad</u>	Saturado
Saturado Poder calorífico superior Kcal/m ³	890-1.223

^b La distribución porcentual exacta variará según la antigüedad de] RS.

TABLA .3

Peso molecular, densidad y peso específico de los gases encontrados en un RS controlado en condiciones estándar (0°C, 1 atm)

Gas	Fórmula	Peso molecular	Densidad g/l	Peso, específico kg/m³
Aire		28,97	1,2928	1,293
Amoniaco	NH ₃	17,03,	0,7708	0,771

Dióxido de carbono	CO ₂	44,00	1,9768	1,977
Monóxido de carbono	CO	28,00	1,2501	1,250
Hidrógeno	H ₂	2,016	0,0898	0,089
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	34,08	1,5392	1,538
Metano	CH ₄	16,03	0,7167	0,717
Nitrógeno	N ₂	28,02	1,2507	1,251
Oxígeno	O ₂	32,00	1,4289	1,428

Nota: Para un comportamiento de gas ideal, la densidad es igual a $\frac{mp}{RT}$, donde m es el peso molecular del gas, p es la presión, R es la constante de gas *universal*. Y T es la temperatura utilizando una serie de unidades consistente.

orgánicos en los RSM. Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones de entre el 5 y el 15 por 100, es explosivo. Como en el RS sólo están presentes cantidades limitadas de oxígeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de que el RS vaya a explotar. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo si el gas del RS migra fuera del lugar y se mezcla con el aire. La concentración de los gases que pueden escaparse en el lixiviado dependerá de su concentración en la fase gas cuando se pone en contacto con el lixiviado, ésta se estima utilizando la ley de Henry, Fayol. Como el dióxido de carbono afectará al pH del lixiviado, se requieren datos sobre el equilibrio carbónico, que pueden utilizarse para estimar el pH del lixiviado.

Constituyentes del gas de RS en cantidades traza. La Junta para la Gestión integral de Residuos de California ha llevado a cabo un programa extensivo para realizar ensayos sobre los gases del RS, como parte de un estudio para su caracterización. En la Tabla 4 se presentan.

TABLA 4

Concentraciones típicas de compuestos en cantidades traza encontrados en el gas de RS en 66 RS de RSM en California

Compuesto	Concentración, ppbV ^b		
	Mediana	Media	Máxima
Acetona	0	6 038	240.000
Benceno	932	2.057	39.000
Clorobenceno	0	82	1.640
Cloroformo	0	245	12.000
1,1-dicloroetano	0	2.801	36.000
Diclorometano	1.150	25.694	620.000
1,1-diclorodietileno	0	130	4.000
Clorodietileno	0	2.835	20.000
Tras-1,2 dicloroetano	0	36	850
2,3-dicloropropano	0	0	0
1,2-dicloropropano	0	0	0
Bromuro de etileno	0	0	0
Dicloroetileno	0	59	2.100
Oxido de etileno	0	0	0
Etilenceno	0	7.334	87.500
Metil-etil-cetona	0	3.092	130.000
1,1,2-tricloroetano	0	0	0
1,1,1-tricloroetano	0	615	14.500
Tricloroetano	0	2.079	32.000
Tolueno	8.125	34.907	280.000
1,1,2,2-tetracloroetano	0	246	16.000
Tetracloroetileno	260	5.244	180.000
Cloruro de vinilo	1.150	3.508	32.000
Estrenos	0	1.517	87.000
Acetato de vinilo	0	5.663	240.000
Xileno	0	2.651	38.000

ppbV = partes por billón (mil millones) por volumen.

datos resumidos sobre las concentraciones de los oligocompuestos encontrados en las muestras de los gases de RS procedentes de 66 RS. Los datos que se presentan en la Tabla 11.4 son representativos de los oligocompuestos encontrados en la mayoría de los RS. La presencia de estos gases en el lixiviado que se separa del RS dependerá de sus concentraciones en el gas del RS cuando se pone en contacto con el lixiviado. Se pueden estimar las concentraciones de estos constituyentes en el lixiviado utilizando la ley de Henry. Hay que resaltar que la frecuencia de concentraciones significativas de COV en el gas del RS está asociada a RS antiguos, que aceptaban residuos industriales y comerciales que contenían COV. En los RS más modernos, donde está

prohibida la evacuación de residuos peligrosos, las concentraciones de COV en el gas del RS han sido extremadamente bajas.

Generación del gas de RS

En la siguiente exposición se tratan estos temas: la generación de los principales gases del RS, la variación en la tasa de generación frente al tiempo, y los orígenes de los oligogases en los RS.

Generación de los principales gases del RS. Como se ilustra en la Figura 7, se considera que la generación de los principales gases del RS se produce en cinco o menos fases secuenciales. A continuación se describe cada una de estas fases.

Fase 1: Ajuste inicial. La fase 1 es la de ajuste inicial, en la que los componentes orgánicos biodegradables de los RSM sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un RS y poco después. En la fase 1, se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del RS. La fuente principal de organismos, ambos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cubrimiento diario y final. Otras fuentes de organismos son los lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales evacuados en muchos RS de RSM, y el lixiviado reciclado.

Fase II: Fase de transición. En la fase II, identificada como fase de transición, desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el RS se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones

FIGURA 11.11

Fases generales en la generación de gases de RS (I = ajuste inicial, II = fase de transición, III - fase ácida, IV = fermentación del metano y V - fase de maduración).

de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación /reducción que tiene el residuo. Las condiciones de reducción suficientes para producir la reducción del nitrato y del sulfato se dan aproximadamente entre - 50 a - 100 milivoltios. El metano se produce cuando los valores del potencial de oxidación/reducción están dentro del rango de - 150 a - 300 milivoltios. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los RSM en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III. En la fase II, el pH del lixiviado, si es que éste se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO₂ dentro del RS (ver Figura 7).

Fase III: Fase ácida. En la fase III, fase ácida, se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH₃COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fulvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas generado durante la fase III. También se producirán cantidades más pequeñas de gas de hidrógeno (H₂). Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metano- génicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas. A menudo se identifican estos microorganismos en la literatura de ingeniería como acidogénicos o formadores de ácido.

El pH del lixiviado, si se forma, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del RS. La demanda de bioquímica de oxígeno (DOB_5), la demanda química de oxígeno (DOQ) y la conductividad del lixiviado se incrementará significativamente durante la fase III debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado. También se solubilizarán durante la fase III algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, debido a los bajos valores del pH en el lixiviado. Muchos nutrientes esenciales también se separan con el lixiviado en la fase III. Si no se recicla el lixiviado, se perderán del sistema nutrientes esenciales. Es importante resaltar que si no se forma lixiviado, quedarán dentro del RS productos de conversión producidos durante la fase III como constituyentes absorbidos en el agua contenida por los residuos, como se define en la capacidad de campo (capítulo 7).

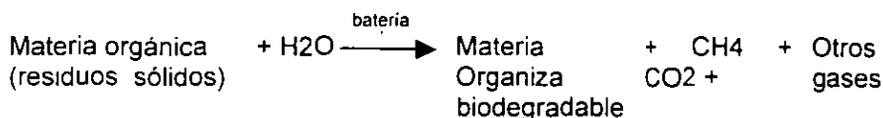
Fase IV: Fase de fermentación del metano. En la fase IV, la fase de fermentación del metano, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH_4 y CO_2 , llegan a ser más predominantes. En algunos casos, estos organismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. Colectivamente, se identifican en la literatura como metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

Como los ácidos y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH_4 y CO_2 en la fase IV, el pH dentro del RS subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DOB_5 y DOQ y el valor de conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

Fase V: Fase de maduración. La fase V, *fase de maduración*, se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH₄ Y CO₂ durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, se convierten porciones de material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación del gas de RS disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el RS son de una degradación lenta. Los principales gases de RS que han evolucionado en la fase V son CH₄ Y CO₂. Según las medidas de sellado del RS, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del RS. Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmico y fúlvico, que son difíciles de degradar biológicamente.

Duración de fases. La duración de las fases individuales de producción del gas de RS variará según la distribución de los componentes orgánicos en el RS, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial. Por ejemplo, si se comparten juntos varios cargamentos de matorrales la relación carbono/nitrógeno y el balance de nutrientes puede que no sea favorable para la producción del gas de RS. De forma similar, se retardará la generación del gas de RS si no hay suficiente humedad disponible. Incrementando la densidad del material colocado en el RS, descenderá la posibilidad de que la humedad llegue a todas las partes de los residuos y, por lo tanto, reducirá la velocidad de bioconversión y la producción de gas. En la Tabla 5 se presentan datos típicos sobre la distribución porcentual en función del tiempo de los principales gases encontrados en un RS recientemente agotado.

Volumen del gas producido. La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



Hay que resaltar que la reacción requiere la presencia de agua. Se han encontrado RS que carecen de un contenido de humedad suficiente en un estado «momificado», con papel de periódico de hace décadas en condiciones legibles. Entonces, aunque la cantidad total del gas que se produce a partir de residuos sólidos se derive directamente de una reacción estequiométrica, las

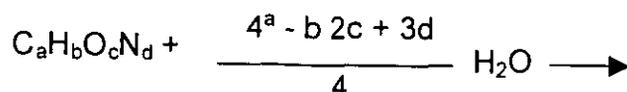
TABLA 11.5

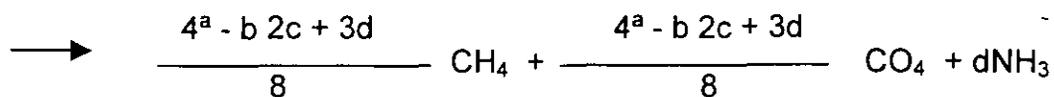
Distribución porcentual de los gases de RS observados durante los primeros 48 meses después de la clausura de una celda de RS'

Intervalo temporal desde el llenado de la celda, meses	Medio, porcentaje por volumen		
	Nitrógeno, N ₂	Dióxido de carbono, CO ₂	Metano, CH ₄
0-3	5	88	5
3-6	3,8	76	21
6-12	0,4	65	29
12-18	1,1	52	40
18-24	0,4	53	47
24-30	0,2	52	48
30-36	1,3	46	51
36-42	0,9	50	47
42-48	0,4	51	48

condiciones hidrológicas locales afectan significativamente a la velocidad y al período de tiempo en el que tiene lugar la producción del gas.

El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias formas. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales encontrados en los RSM (con la excepción de plásticos) se representan de una forma generalizada con la fórmula C_aH_bO_cN_d, entonces se puede estimar el volumen total del gas utilizando la Ecuación (2), suponiendo la conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en CO₂ Y CH₄.





En general, se pueden dividir los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos en dos clasificaciones: 1) aquellos materiales que se descomponen rápidamente (tres meses a cinco años) y 2) aquellos materiales que se descomponen lentamente (hasta 50 años o más). En la Tabla 6 se identifican los componentes de la fracción orgánica de los RSM de descomposición lenta y rápida.

TABLA 6

Constituyentes orgánicos rápidamente y lentamente biodegradables en los RSM

Componente de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	si	
Periódicos	si	
Papel de oficina	si	
Cartón	si	
Plásticos ^a		si
Textiles		si
Goma		si
Cuero		si
Residuos de jardín	si ^b	si ^c
Madera		si
Orgánicos misceláneos		si

^a Los plásticos generalmente son considerados no biodegradables.

^b Hojas y recortes de césped. Normalmente 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como rápidamente biodegradables,

^c Porciones leñosas de los residuos de jardín

La fracción biodegradable de los residuos orgánicos depende en gran medida del contenido de lignina de los residuos. En la Tabla 7 se presenta la biodegradabilidad de

varios constituyentes orgánicos basándose en su contenido de lignina. Como se puede observar, el papel de periódico es solamente un 22 por 100 degradable.

TABLA 7
Biodegradabilidad de los constituyentes orgánicos en los RSM

Componente de residuos orgánicos	Contenido de lignina, porcentaje SV	Fracción biodegradable ^a , porcentaje SV
Residuos de comida	0,4	0,82
Papel de periódicos	21,9	0,22
Papel de oficina	0,4	0,82
Cartón	12,9	0,47
Residuos de jardín	4,1	0,72

^a Fracción biodegradable = 0,83 (0,028). LC, donde LC = porcentaje SV (sólidos volátiles).

Variación de la producción de gas en relación al tiempo. En condiciones normales, la velocidad de descomposición, medida por la producción de gas, llega a su cima dentro de los primeros dos años y después baja lentamente, continuando en muchos casos durante períodos de hasta 25 años o más. Si no se añade humedad a los residuos en un RS bien compactado, no es infrecuente encontrar, materiales en su forma original años después de enterrarlos.

La variación en la tasa de producción del gas a partir de la descomposición anaerobia de los materiales orgánicos de los RSM rápidamente biodegradables (cinco años o menos -algunos residuos altamente biodegradables se descomponen después de algunos días-) y lentamente biodegradables (5 a 50 años) puede moderarse. Las tasas anuales de descomposición para materiales rápidamente y lentamente descomponibles se basan en un modelo triangular de producción del gas en el que la tasa punta de producción del gas se produce en uno y cinco años, respectivamente, después de comenzar la producción de gas. Se supone que la producción de gas se inicia a finales del primer año de la puesta en funcionamiento del RS.

Corno se ha resaltado anteriormente, en muchos RS la humedad disponible es Insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos biodegradables de los RSM. El contenido en humedad óptimo para la conversión de la materia orgánica biodegradable de los RSM es del orden del 50 al 60 por 100. También en muchos RS la humedad presente no se distribuye uniformemente. Cuando el contenido en humedad del RS es limitado, la curva representando la producción de gas es más plana y se extiende por un período de tiempo más largo. En la Figura 8 se presenta un ejemplo del efecto que tiene un contenido de humedad reducido sobre la producción del gas de RS. La producción del gas de RS durante períodos de tiempo amplios es de gran importancia respecto a la estrategia de gestión que se va a adoptar para e mantenimiento postclausura.

Fuentes de otigogases. Los oligoconstituyentes en los gases de RS tienen dos orígenes. Pueden llegar al RS con los residuos entrantes o pueden producirse mediante reacciones bióticas y abióticas que tienen lugar dentro del RS. De los oligocompuestos encontrados en los gases del RS, muchos están mezclados con los residuos entrantes en forma líquida, pero tienden a volatilizarse. La tendencia a la volatilización es directamente proporcional a la presión de vapor del líquido, e inversamente proporcional al área de una esfera del líquido volátil dentro del RS

FIGURA 8

Efecto de un contenido de humedad reducido sobre la producción de gases de RS.

En la Tabla 8 se ilustran los diversos tiempos de volatilización que se pueden esperar para algunos líquidos volátiles seleccionados encontrados en los RS. En RS más recientes, donde se ha prohibido la evacuación de residuos peligrosos, se han reducido significativamente las concentraciones de COV en el gas de RS.

TABLA 8

Tiempos estimados para la volatilización completa de líquidos volátiles seleccionados encontrados en los RS,

Compuesto	Tiempo de evaporación, d ^b
Clorocteno	0,0
Diclorometano	1,2
Triclorometano	4,4
Benceno	6,4
Tetraclorometano	9,6
Tricloroeteno	13,6
Tolueno	23,4
Tetracloroeteno	62,6
Clorobenceno	76,0
1,2-Dibromoetano	128,2
o-Diclorobenceno	497,6

^b En base a una esfera de 10 mm de líquido volátil a 25°C, en un RS con una porosidad de 0,5.

Pueden darse diferentes caminos bioquímicos complejos para la producción o consumo de cualesquiera de los constituyentes en cantidades traza. Por ejemplo, el cloruro de vinilo es un subproducto de la degradación de di y trieloroeteno. Por la naturaleza orgánica de estos gases, pueden ser absorbidos por los constituyentes de los residuos en el RS. Actualmente, se puede decir muy poco que sea definitivo acerca de las tasas de transformación bioquímica de los oligocompuestos. Las vidas medias varían de una fracción de año hasta más de mil años para algunos compuestos.

Movimientos de gas de RS

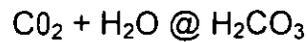
En condiciones normales, los gases producidos en el suelo se emiten a la atmósfera mediante difusión molecular. En el caso de un RS activo, la presión interna normalmente es mayor que la presión atmosférica, y el gas de RS saldrá mediante difusión y flujo convectivo (conducido por presión). Otros factores que influyen en el movimiento de los gases del RS incluyen la absorción de los gases en componentes líquidos o sólidos [47] y la generación o consumo de un componente gaseoso a través de reacciones químicas o de la actividad biótica.

Movimiento de los principales gases de RS. Aunque la mayor parte del metano escape a la atmósfera, ambos, metano y dióxido de carbono, se han encontrado en concentraciones de hasta el 40 por 100 en distancias laterales de hasta 150 m de los bordes de RS sin recubrimiento. En RS sin ventilación, la extensión de este movimiento lateral varía según las características del material de cubrimiento y del suelo circundante. Si se escapa el metano de una forma incontrolado, puede acumularse (porque su peso específico es menor que el del aire) debajo de edificios o en otros lugares cerrados, próximos o dentro de un RS controlado. Con una extracción correcta, el metano no debe suponer un problema (excepto por el hecho de que es un gas que influye en el efecto invernadero). Por otro lado, el dióxido de carbono es problemático por su densidad. Como se muestra en la Tabla 11.3, el dióxido de carbono tiene aproximadamente 1,5 veces la densidad del aire y 2,8 veces la densidad del metano; por lo tanto, tiende a moverse hacia el fondo del RS. Como resultado, las concentraciones de dióxido de carbono en las porciones más bajas del RS pueden ser altas durante años.

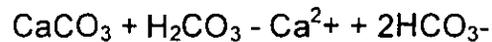
Migración ascendente del gas de RS El metano y el dióxido de carbono pueden emitirse a través de la cobertura del RS mediante la convección y la difusión.

Migración descendente del gas de RS. Finalmente, el dióxido de carbono, por su densidad, puede acumularse en el fondo del RS. Si se utiliza un recubrimiento de

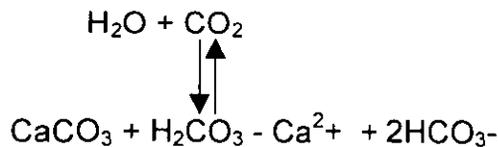
suelo, el dióxido de carbono puede moverse desde allí hacia abajo, principalmente mediante la difusión a través del recubrimiento hasta que llega al agua subterránea (hay que resaltar que se puede limitar el movimiento de CO₂, utilizando un recubrimiento geomembrana). El dióxido de carbono es fácilmente soluble en agua y puede reaccionar con ella para formar ácido carbónico, o



Esta reacción baja el pH, que más tarde puede incrementar la dureza y el contenido mineral del agua subterránea mediante disolución. Por ejemplo, si el carbonato cálcico está presente en la estructura del suelo, el ácido carbónico reaccionará con él para formar bicarbonato cálcico soluble, según la siguiente reacción:



Reacciones similares se producen con carbonatos de magnesio. Para una concentración dada de dióxido de carbono, la reacción mostrada en la Ecuación del ácido carbónico procederá hasta que llegue al equilibrio, como se muestra en la Ecuación.



Entonces, cualquier proceso que incremente el dióxido de carbono libre causará la disolución de más carbonato cálcico. El incremento de la dureza resultante es el efecto principal de la presencia de dióxido de carbono en el agua subterránea. La solubilidad en agua de los principales gases encontrados en los RS puede calcularse utilizando la

Ley de Henry. El efecto del dióxido de carbono sobre el pH del lixiviado puede estimarse utilizando la primera constante de disociación para el ácido carbónico.

Control pasivo de los gases del RS

Se controla el movimiento de los gases del RS para reducir las emisiones atmosféricas, para minimizar la salida de emisiones olorosas, para minimizar la migración subsuperficial del gas, y para permitir la recuperación de energía a partir del metano. Los sistemas de control se pueden clasificar como pasivos y activos. En los sistemas pasivos de control del gas se utiliza energía en forma de vacío inducido para controlar el flujo del gas- Se puede lograr el control pasivo para ambos gases, principales y oligogases, mientras se están produciendo los gases principales a altas velocidades, proporcionando caminos de más alta permeabilidad para guiar el flujo del gas en la dirección deseada. Por ejemplo, una zanja de grava puede servir para conducir el gas hasta un sistema de ventilación con quemador. Cuando la producción de los principales gases es limitada los controles pasivos no son muy eficaces, porque la difusión dominante. Sin embargo, en esta molecular será el mecanismo de transporte predominante. Sin embargo, en esta etapa de la vida del RS quizás no sea tan importante controlar la emisión residual del metano presente en el gas del RS. El control de las emisiones de COV puede necesitar del uso de ambas instalaciones, pasivas y activas.

Ventilación para rebajar la presión quemadores en la cobertura de RS. Uno de los métodos pasivos más comunes para controlar los gases de RS se basa en el hecho de que se puede reducir la migración lateral de los gases del RS rebajando la presión del gas dentro del interior del RS. Para este propósito, se instalan chimeneas a través de la cobertura final, extendiéndose hacia abajo en la masa de residuos sólidos (Figura 9). Si el metano en el gas que está escapando es de una concentración suficiente, se pueden conectar varias chimeneas y equiparlas con un quemador de gas (Figura 10a). Cuando se utilizan quemadores del gas residual, la chimenea debe penetrar en las celdas de residuos. La altura del quemador de residuos puede variar de 3 a 6 m por encima. Se

puede encender el quemador manualmente o con una llama piloto continua. Para conseguir el máximo beneficio de la instalación de un quemador de gas de residuos se debería utilizar la llama piloto (Figura 10b). Hay que resaltar, sin embargo, que las chimeneas pasivas con quemadores quizás no lograrán una destrucción eficaz de los olores y de los COV, no alcanzando las exigencias para el control de la calidad del aire de muchas agencias urbanas, y, por lo tanto, no se considera su utilización como una buena práctica. Más adelante, en esta sección, se tratan los quemadores de gas.

FIGURA 9

Chimeneas de gas utilizadas en la superficie de un RS para el control pasivo del gas de RS: (a) chimenea de gas para un RS que no contiene un recubrimiento con geomembrana, y (b) chimenea de gas para un RS que contiene un recubrimiento de membrana sintética.

Zanjas perimetrales de intercepción. Para interceptar el movimiento lateral de los gases del RS puede utilizarse un sistema de zanjas perimétricas, que consiste en zanjas interceptaras llenas de grava que contienen tuberías

FIGURA 10

Quemador típico tipo candelabro para gas de residuos, utilizado para quemar el gas del RS procedente de un pozo de ventilación o de varios pozos de ventilación interconectados: (a) sin llama piloto y (b) con llama piloto.

horizontales de plástico perforado (normalmente policloruro de vinilo, PVC, o polietileno, PE) (Figura 11a). La tubería perforada está conectada a chimeneas verticales a través de las cuales el gas del RS que se acumula en el relleno del fondo de la zanja puede dirigirse hacia la atmósfera. Para facilitar la recolección del gas en la zanja frecuentemente se instala un recubrimiento de membrana en su pared hacia la parte exterior del RS.

Zanja perimétrica barrera. Las zanjas barrera (Figura 11b) normalmente se llenan con materiales relativamente impermeables, como bentonita o pastas de arcilla. En este caso, la zanja se convierte en una barrera física para el movimiento lateral subsuperficial. El gas de RS se separa de la cara interna de la barrera con chimeneas para la extracción del gas o con zanjas llenas de grava. Sin embargo, las zanjas

pueden sufrir rotura por desecación, y por lo tanto se utilizan más frecuentemente en proyectos para interceptar aguas subterráneas. La eficacia a largo plazo de las zanjas de barrera para controlar la migración de los gases de RS es dudosa.

FIGURA 11

Instalaciones pasivas utilizadas para controlar el gas del RS: (a) zanja interceptora rellena con grava y con tubería perforada; (b) zanja barrera perimétrica, y (c) uso de recubrimiento impermeable en el RS. Hay que destacar que las zanjas interceptoras perimétricas se utilizan para controlar la migración del gas del RS en RS sin recubrimientos.

Barreras impermeables dentro de los RS. En los RS modernos, el movimiento de los gases del RS a través de las formaciones adyacentes del suelo se controla, antes de comenzar las operaciones de relleno, con la construcción de barreras de materiales que son más impermeables que el suelo (Figura 11c). Algunos de los materiales usados para esta finalidad se identifican en la Tabla 11. 11. Para controlar el lixiviado, lo más común es el uso de arcillas compactadas y geomembranas de varias clases, sencillas o en configuraciones multilaminares. Como los principales gases, los oligogases se difundirán a través de los recubrimientos de arcilla, actualmente muchas agencias exigen el uso de geomembranas para limitar el movimiento de los gases del RS.

TABLA 8

Materiales de sellado de RS para el control del movimiento de gas y lixiviado

Sellador		
Clasificación	Tipos representativos	Comentarios
Suelo compactado		Debería contener algo de arcilla y lodo fino
Arcilla compactada	Bentonitas, ilitas, caolinitas	El material de sellado más frecuentemente utilizado para los RS; el espesor de la capa varía de 0,15 a 1,2 m; la capa debe ser

		continua, no permitiendo que se seque o agriete
Químicas inorgánicas	Carbonato de sodio, silicato o pirofosfato	Su uso depende de las características del suelo local.
Químicas sintéticas	Polímeros, goma látex	Experimental; su utilización en campo no está bien establecida
Recubrimientos de membrana sintética	Polieloro de vinilo, goma butilo, polietileno, recubrimientos reforzados de nylon	Frecuentemente utilizado para el control del lixiviado; utilización incrementada para controlar el gas de RS
Asfalto	Asfalto modificado, asfalto impregnado de goma, tejido de polietileno recubierto de asfalto, hormigón asfáltico	La capa debe ser lo suficientemente espesa como para mantener la continuidad bajo diferentes condiciones de consolidación
Otros	Hormigón gunita, cemento de suelo, cemento plástico de suelo	No utilizado frecuentemente para controlar el movimiento de gas y lixiviados por grietas de contracción después de la construcción.

Uso de barreras absorbentes para oligogases dentro del RS. En base a los resultados de los programas de muestreo llevados a cabo por la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos, es patente que los oligogases están presentes en los RS en concentraciones muy variables. Gradientes de alta concentración ocasionan un componente de flujo de oligogases de gran difusión, incluso cuando hay muy poco transporte por convección de la mezcla del gas principal en forma de flujo. La utilización de material absorbente, tal como compost, puede retrasar la salida de oligogases. De esta forma, los mecanismos de transformación bióticos y/o abióticos pueden contar con más tiempo para degradar los oligocompuestos absorbidos.

Control activo del gas de RS con instalaciones perimétricas

Se puede controlar el movimiento lateral del gas de RS mediante el uso de chimeneas y zanjas perimétricas para la extracción del gas, creando un vacío parcial que origina un gradiente de presión hacia la chimenea de extracción. El gas extraído se quema para controlar las emisiones de metano y COV, o se utiliza para producir energía. El uso de chimeneas con inyección de aire también se explica en la siguiente exposición.

Chimeneas perimétricas para la extracción del gas y para el control de olores. Normalmente las chimeneas perimétricas se utilizan (Figura 12a) en RS con profundidades de residuos sólidos de por lo menos 8 m, cuando la distancia entre el RS y la urbanización más cercana es relativamente pequeña. Se trata de una serie de chimeneas verticales instaladas o bien dentro del RS a lo largo de su borde o bien en la zona localizada entre el borde del RS y el vallado del lugar. Cada chimenea se conecta a un tubo recolector común que después está conectado a un compresor eléctrico centrífugo, que produce vacío (presión negativa) en el colector y en las chimeneas individuales. Cuando se aplica el vacío, se crea una *zona o radio de influencia* que se extiende a la masa de residuos sólidos alrededor de cada chimenea y dentro de la cual el gas generado es aspirado hacia la chimenea. Normalmente se ventila o se quema el gas extraído del RS, de una forma controlada, en la estación del compresor. También se puede utilizar el gas extraído como fuente de energía si la cantidad que se puede recoger y la calidad son suficientes.

El diseño de la chimenea de extracción consiste en una tubería de 10 a 16 cm (a menudo de PVC o PE) colocada en una perforación de 45 a 90 cm (ver Figura 11.20). Del tercio a la mitad inferior, la funda se perfora y se coloca sobre un relleno de grava. El resto de la funda no se perfora y se coloca en un relleno de tierra (preferentemente) o de residuos sólidos. Se espacian las chimeneas para que sus zonas de influencia se traslapan. A diferencia de los pozos para agua, la zona de influencia para las chimeneas verticales es esencialmente una esfera extendida en todas las direcciones a

partir de la chimenea de extracción (ver Figura 11.19a). Por esta razón, se debe tener mucho cuidado para evitar una *sobrecarga* en el sistema. Tasas de extracción excesivas pueden

FIGURA 12

Instalaciones activas utilizadas para el rol subsuperficial de la migración de gas de RS: (a) chimeneas perimétricas para la extracción de gas de RS y (b) zanja perimétrica para la extracción del gas del RS.

RS

causar que el aire procedente del suelo circundante se infiltre en la masa de residuos. Para prevenir la entrada de aire, la tasa de flujo de gas para cada chimenea debe controlarse cuidadosamente. Para esta finalidad se equipan las chimeneas con tomas para el muestreo del gas y válvulas para controlar el flujo. Según la profundidad del RS y otras consideraciones locales, el espacio entre las chimeneas perimétricas variará de 8 a 16 m, aunque se han utilizado distancias mayores.

FIGURA 11.20

Detalle representativo de una zanja para la extracción de gas de RS.
(Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

En RS grandes, también se utilizan chimeneas perimétricas verticales para la extracción del gas localizado en el interior del RS conjuntamente con chimeneas horizontales y verticales más grandes. Las chimeneas perimétricas verticales se utilizan para controlar la migración fuera del lugar de los gases del RS en los bordes y superficies del RS. Cuando se utilizan chimeneas perimétricas para controlar las emisiones olorosas a través de las superficies del RS, se mantienen las superficies del RS con un ligero vacío.

Zanjas perimétricas para la extracción del gas. Las zanjas perimétricas de extracción (ver Figura 11.19b) normalmente se instalan en el suelo original adyacente del perímetro del RS. Se utilizan normalmente en RS poco profundos, con profundidades

de 8 m o menos. Las zanjas están llenas de grava y contienen tuberías de plástico perforadas que se conectan lateralmente a un colector y compresor centrífugo de extracción. Las zanjas de extracción pueden extenderse verticalmente desde la superficie del RS hasta la profundidad total de los residuos o hasta el agua subterránea, y pueden sellarse adicionalmente en la superficie con un recubrimiento de membrana. El compresor crea una zona de presión negativa en cada zanja que se extiende hacia los residuos sólidos. El gas de RS migrando en esta zona es aspirado por la tubería perforada y es recolectado, y subsiguientemente emitido o quemado en la estación del compresor. Se pueden hacer ajustes en el flujo mediante válvulas de control en cada zanja.

Chimeneas perimétricas con inyección de aire (sistema de cortina de aire). Las chimeneas perimétricas con inyección de aire son una serie de chimeneas verticales instaladas en el suelo original entre los límites del RS y las instalaciones que hay que proteger contra la intrusión del gas del RS. Normalmente se instalan las chimeneas con inyección de aire cerca de RS con profundidades de residuos sólidos de 7 m o más, en zonas de suelo inalterado entre el RS y las propiedades potencialmente afectadas.

Control activo del gas de RS con chimeneas verticales y horizontales para la extracción del gas

Se han utilizado chimeneas verticales y horizontales para la extracción del gas de RS. En algunas instalaciones se han utilizado los dos tipos de chimenea. La gestión del condensado que se forma cuando se extrae el gas del RS también es un elemento importante en el diseño de sistemas para la recuperación del gas.

Chimeneas verticaler, para la extracción del gas. En la Figura 14 se ilustra un sistema típico para la recuperación de gas que utiliza chimeneas verticales para la extracción. Se separan las chimeneas para que sus zonas de influencia se complementen (Figura 15). En los RS clausurados, sin instalaciones para la recuperación de gas, la zona de influencia de las chimeneas se determina, a veces,

llevando a cabo pruebas de aspiración sobre el terreno. Normalmente se instala una chimenea de extracción conjuntamente con sondas de gas a distancias regulares de la chimenea, y se mide el vacío dentro del RS mientras se aplica el vacío a la chimenea de extracción. Se pueden realizar pruebas de extracción de gas a largo y corto plazo. Como el volumen del gas producido disminuye con el tiempo, algunos diseñadores prefieren utilizar un espaciamiento uniforme de las chimeneas y controlar la zona de influencia de las chimeneas ajustando el vacío en la cabecera de cada chimenea. Puesto que la zona de influencia de una chimenea vertical es esencialmente una esfera, su extensión dependerá también de la profundidad del RS y del diseño de cubrimiento del RS. En RS

S Cobertura impermeable de RS (no existe en RS antiguos) **FIGURA** Unidad de RS o celda completada
 eración del gas del RS utilizando chimeneas verticales.

FIGURA 15

Distribución en Red de tubos para el gas de RS Contorno del RS tracción
 del gas. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

profundos con una cobertura mixta, que contiene una geomembrana (ver Sección 11.6), es común para las chimeneas un espaciamiento de 50 a 65 m. En RS con coberturas de arcilla y/o suelo, quizás se necesite, dentro del sistema par la recuperación del gas, un espaciamiento menor (por ejemplo, 30 m) para evitar la salida de gases a la atmósfera.

RSM compactado
 Aislamiento impermeable de RS (no existe en RS antiguos)
 Las chimeneas verticales normalmente se ~~instalan~~ el RS o ciertas zonas del mismo. En RS más antiguos se instalan las chimeneas verticales para recuperar energía y para controlar el movimiento de los gases a propiedades de terrenos adyacentes. El diseño de una chimenea de extracción consiste en una funda de tubería de 10 a 16 cm (a menudo de PVC o PE) puesta en una perforación de 45 a 90 cm (Figura 13). Del tercio a la mitad inferior de la funda se perfora y se coloca sobre un relleno de grava. El resto de la funda no se perfora y se coloca sobre un relleno de tierra, y se sella con arcilla. Normalmente las chimeneas para la recuperación del gas

del RS se diseñan para penetrar hasta el 80 por 100 de la profundidad de los residuos, ya que su zona de influencia se extenderá hasta el fondo del RS. Sin embargo, para calmar el miedo del público acerca de los escapes de los gases del RS, actualmente algunos diseñadores colocan las chimeneas para la recuperación del gas de forma que lleguen hasta el fondo del RS. El vacío disponible en el colector en la cabecera de la chimenea normalmente es de 25 cm' de agua.

Chimeneas horizontales para la extracción del gas. Una alternativa al uso de chimeneas verticales es el uso de chimeneas horizontales. Esta utilización fue explorada y desarrollada por los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles (Figuras. 16 y 17). En las Figuras 16 y 17 se ilustra también el uso de chimeneas perimétricas verticales conjuntamente con chimeneas horizontales para la extracción del gas. Las chimeneas horizontales se instalan después de completar dos o más niveles. Se excava en los residuos sólidos una zanja horizontal para la extracción del gas, con una retroexcavadora. Después se rellena la mitad de la zanja con grava y se instala una tubería perforada conjuntas abiertas (Figura 18). Se procede a rellenar la zanja con grava y se cubre con residuos sólidos. Con el uso de una zanja llena de grava y de una tubería perforada con juntas abiertas, la zanja sigue funcionando incluso con el asentamiento diferencial que se produce en el RS con el paso del tiempo. Las zanjas horizontales se instalan en intervalos verticales de aproximadamente 25 m y en intervalos horizontales de 65 m.

Gestión del condensado en sistemas para la recuperación del gas. El condensado se forma cuando se enfría el gas del RS mientras se transporta en el colector camino del compresor. Los colectores de gas normalmente se instalan con una pendiente mínima del 3 por 100, para compensar e asentamiento diferencial-Como los colectores son construidos en secciones que se inclinan hacia arriba y hacia abajo a través de toda la extensión del

FIGURA 16

Plano de las instalaciones para la recolección del gas en el RS de Puente Hillis.

(Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

FIGURA 17

Perfil del RS de Puente Hills mostrando las zanjas horizontales recolectoras de gas. (Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

FIGURA 18

Detalles de una zanja horizontal para la extracción del gas: (a) perfil de zanja y (b) vista lateral. (Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

Se instalan trampas para el condensado en los puntos bajos de la línea. En la Figura 19 se muestra una trampa típica para el condensado, en la que éste se devuelve al RS. En los estados donde no se permite devolver el condensado al RS, las trampas para el condensado se conectan a depósitos de almacenamiento (Figura 19). El condensado se bombea periódicamente fuera del depósito y se transporta a una instalación autorizada de evacuación, o bien se trata *in situ* antes de evacuarlo o desecharlo a la alcantarilla local.

Gestión del gas de RS

Normalmente, los gases de RS que se han recuperado de un RS activo o se queman o se utilizan para la recuperación de energía en forma de electricidad, o ambos. Recientemente, se ha sugerido la separación del dióxido de carbono del metano en el gas del RS, como una alternativa a la producción de calor y electricidad.

incineración de los gases de RS. Un método común para tratar los gases del RS es la destrucción térmica, es decir, se queman el metano y cualquier otro oligogás (incluyendo COV) en presencia de oxígeno (contenido en el aire), produciéndose dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno y otros gases relacionados. La destrucción térmica de los gases del RS normalmente se lleva a cabo

en una instalación de combustión especialmente diseñada (Figuras 20 y 21). Por las inquietudes existentes acerca de la contaminación del aire, las instalaciones modernas se diseñan para cumplir rigurosas especificaciones de operación, que aseguren la destrucción total de COV y de otros compuestos similares que puedan estar presentes en el gas del RS. Por ejemplo, un requisito típico podría ser una temperatura de incineración mínima de 815°C y un tiempo de residencia de 0,3 a 0,5 s, así como diversos controles y una instrumentación adecuada en la estación de combustión. En la Tabla 11.12 se resumen las especificaciones para una instalación moderna de combustión.

FIGURA 19

Trampas para el condensado: (a) el líquido se devuelve al RS (cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos Sólidos) y (b) el líquido se almacena en depósitos de almacenamiento.

FIGURA 20

Esquema de una estación compresor/quemador, para la incineración del gas del RS. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.)

FIGURA 21

Vista de un conjunto de antorchas de gas utilizadas para quemar el gas de RS.

-tudes existentes acerca de la contaminación del aire, las instalaciones modernas se diseñan para cumplir rigurosas especificaciones de operación, que aseguren la destrucción total de COV y de otros compuestos similares que puedan estar presentes en el gas del RS. Por ejemplo, un requisito típico podría ser una temperatura de incineración mínima de 815°C y un tiempo de residencia de 0,3 a 0,5 s, así como diversos controles y una instrumentación adecuada en la estación de combustión. En la Tabla 11.12 se resumen las especificaciones para una instalación moderna de combustión.

TABLA 9

Elementos de diseño importantes para los quemadores de gas de RS cerrados a nivel de suelos

Artículo	Observaciones
Indicador y registrador de temperatura	Utilizado para medir y registrar la temperatura del gas en la chimenea del quemador. Cuando el quemador está funcionando, debe mantenerse una temperatura de 815°C o más en la chimenea según el indicador de temperatura, 0,3 s después de pasar a través del quemador.
Sistema de re arranque del piloto automático.	Para asegurar un funcionamiento continuo.
Alarma de mal funcionamiento con sistema automático de aislamiento.	Se utilizan la alarma y el sistema de aislamiento para aislar al quemador del suministro de gas, cortar el ventilador y notificar a alguien responsable sobre la interrupción.
Rejillas de aire de combustión automáticamente controladas	Utilizadas para controlar la cantidad de aire de combustión y la temperatura de la llama.
Escotillas de muestreo en la fuente, con un acceso seguro	Utilizadas para supervisar el proceso de combustión y para el muestreo de las emisiones atmosféricas.
Ventanillas de inspección	Debe haber suficientes ventanillas de inspección para permitir un reconocimiento visual de la localización del sensor de temperatura dentro de la llama.
Pantalla de calor de la llama	Debería proporcionarse una pantalla de calor alrededor del punto más alto del aro de refuerzo para su utilización durante el muestreo.

Sistemas para recuperación de energía a partir del gas de RS. Normalmente, el gas de RS se convierte en electricidad (Figuras 22 y 23). En instalaciones pequeñas (hasta

5 MW), es común utilizar motores de combustión interna para dos combustibles (Figuras 22 y 23) o turbinas de gas (ver Figura 11.30b). Cuando se utilizan motores tipo émbolo, se debe procesar el gas de RS para separar toda la humedad posible, de forma que se minimicen los daños a las cabezas de los cilindros. Si el gas contiene H_2S , la temperatura de combustión debe controlarse cuida-

FIGURA 22

Diagramas de flujo esquemáticos para la recuperación de energía a partir de combustible gaseoso: (a) utilizando motor de combustión interna, y (b) utilizando turbina de gas.

FIGURA 23

Vistas de instalaciones para la conversión del gas: (a) utilizando motores de combustión interna para dos combustibles y (b) utilizando calderas y una turbina de vapor

dosamente para evitar problemas de corrosión. Alternativamente, se puede hacer pasar el gas de RS a través de una depuradora que contiene limaduras de hierro, o a través de depuradoras patentadas, para separar el H_2S antes de quemar el gas.

Las temperaturas de combustión también serán de gran importancia cuando el gas del RS contenga COV procedentes de los residuos colocados en RS, antes de que se prohibiera la evacuación de residuos peligrosos en los RS municipales. El ciclo típico de los motores para dos combustibles que funcionan con gas de RS varía de 3.000 a 10.000 horas, antes de tener que reacondicionar los motores. En la Figura 23a el gas del RS de bajo poder calorífico se comprime a altas presiones, para aprovecharlo mejor en la turbina de gas. El ciclo de servicio normal para turbinas que queman gases de RS es aproximadamente de 10.000 horas.

purificación y recuperación del gas. Si hay una utilización potencial para el CO_2 contenido en el gas del RS, se pueden separar el CH_4 y el CO_2 en el gas del RS. La separación de CO_2 y de CH_4 puede realizarse mediante absorción física, absorción química, y mediante separación por membrana. En las absorciones física y química, un

componente se absorbe preferencialmente utilizando un disolvente adecuado. La separación mediante membrana implica el uso de una membrana semipermeable que dejan pasar CO_2 , H_2S y H_2O , mientras se retiene el CH_4 . Hay membranas en láminas planas o en fibras huecas. Para incrementar la eficacia de la separación, las láminas se retuercen en forma de espiral sobre un medio de soporte, mientras las fibras huecas están agrupados juntas en haces.

7.0 COMPOSICION, FORMACION, MOVIMIENTO Y CONTROL DEL LIXIVIADO EN RS.

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. En la mayoría de los RS el lixiviado está formado por el líquido que entra en el RS desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos, si hay. En esta sección se hace una exposición sobre la composición, formación, movimiento y control del lixiviado.

Composición del lixiviado

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la Tabla 10 se presentan datos representativos sobre las características de los lixiviados en RS nuevos y antiguos. Como el rango de los valores de concentración observados para varios constituyentes presentados en la Tabla 10 es bastante grande, especialmente en RS nuevos, se debe tener mucho cuidado en la utilización de los diversos valores que se presentan. En la Tabla 11 se resumen los parámetros físicos, químicos y biológicos a supervisar.

TABLA 10

Datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de RS nuevos y maduros

Constituyente	Valor, mg/l ^b		
	RS nuevo (menos de 2 años)		RS maduro (mayor de 10 años)
	Rango ^c	Tipico ^d	
DOB, (demanda de oxígeno bioquímico de 5 días)	2.000-30.000	10.000	100-200
COT (carbono orgánico total)	1.500-20.000	6.000	80-160
DOC (demanda de oxígeno químico)	3.000-60.000	18.000	100-500
Total de sólidos en suspensión	200-2.000	500	100-400

Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Total fósforo	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total como CaCO ₃	300-10.000	3.500	200-500
Calcio	200-3.000	1.000	100-400
Magnesio	50-1.500	250	50-200
Potasio	200-1.000	300	50-400
Sodio	200-2.500	500	100-200
Cloro	200-3.000	500	100-400
Sulfatos	50-1.000	300	20-50
Total hierro	50-1.200	60	20-200

^b Excepto el pH, que no tiene unidades.

^c Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura del tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^d Los valores típicos para los RS nuevos variarán según el estado metabólico del RS.

TABLA 11
Parámetros de muestreo de los lixiviados^a.

Físicos	Constituyentes orgánicos	Constituyentes inorgánicos	Biológicos
Aspecto	Químicos orgánicos	Sólidos en suspensión (SS), sólidos totales disueltos (STD)	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos volátiles en suspensión (SVS), sólidos volátiles disueltos (SVD).	Bacterias coliformeg (total, fecal, fecal es treptococo).
Potencial de reducción oxidación	Demanda química de oxígeno (DQO)	Cloruros	Recuento sobre placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico total (COT)	Sulfatos	
Color	Acidos volátiles	Fosfatos	
Turbiedad	Taninos, ligninas	Alcalinidad y acidez	
Temperatura	N-Orgánico	N-Nitrato	
Olor	Solubles en éter(aceite @ grasa) Sustancias activas al azul de metileno(SAAM)	N-Nitrito N-Amoníaco	

Grupos funcionales orgánicos según sean requeridos	Sodio
Hidrocarburos clorados	Potasio
	Calcio
	Magnesio
	Dureza
	Metales pesados (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag)
	Arsenio
	Cianuro
	Flúor
	Selenio

Variaciones en la composición de los lixiviados. Hay que resaltar que la composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del RS y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del rango de 6,5 a 7,5, y los valores de concentración de DBO₅, COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO₂ en el gas de RS que está en contacto con el lixiviado. En el ejemplo 11.4, a continuación, se ilustra el efecto del CO₂ en el gas de RS.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación

DBO₅/DQO. Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0,5 o más. Las relaciones en el rango de 0,4 a 0,6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los RS antiguos, la relación DBO₅/DQO está a menudo en el rango de 0,05 a 0,2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de RS antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

Ejemplo 11.4. Estimar el pH de los lixiviados en contacto con el gas de RS.

Suponer que la composición del gas de RS que está en contacto con el lixiviado es del 50 por 100 de dióxido de carbono y del 50 por 100 de metano, que el gas de RS está saturado con vapor de agua a una temperatura de 50°C y que la presión dentro del RS es la atmosférica. La alcalinidad del lixiviado es de 500 mg/l, como el CaCO₃.

Como resultado de la diversidad en las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del lixiviado es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar un lixiviado con las características presentadas por un RS nuevo sería bastante diferente de una diseñada para tratar el lixiviado procedente de un RS antiguo. El problema de interpretación de los resultados analíticos es todavía más complicado, por el hecho de que el lixiviado que está generándose en un momento dado es una mezcla del lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades.

Oligocompuestos. La presencia de oligocompuestos (algunos de los cuales pueden plantear riesgos para la salud) en el lixiviado dependerá de la concentración de estos compuestos en la fase gas dentro del RS. Las concentraciones esperadas pueden estimarse utilizando la ley de Henry y las constantes de la ley de Henry dadas en la Tabla 5.8. Al mismo tiempo que las comunidades y los operadores de RS implantan programas que limitan la evacuación de residuos sólidos mezclados procedentes de los RSM, la calidad del lixiviado procedente de los nuevos RS está mejorando respecto a la presencia de oligoconstituyentes.

Balance de aguas y generación del lixiviado en los RS

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del RS. El balance hidrológico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el RS y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el RS.

Descripción de los componentes del balance de aguas para una celda de RS. Los componentes que conforman el balance de aguas para una celda de RS se identifican en la Figura 24. Las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cubrimiento y la humedad de los lodos, si se permite la evacuación de lodos. Las principales salidas son: el agua que abandona el RS formando parte del gas de RS (es decir, el agua utilizada para la formación del gas), el vapor de agua saturado en el gas de RS y el lixiviado. Cada uno de estos componentes se considera a continuación.

Agua filtrada superiormente. En la capa superior del RS, el agua que entra desde arriba procede de la precipitación atmosférica que se ha filtrado a través del material de cobertura. En las capas por debajo de la capa superior, el agua que entra desde arriba procede del agua que se ha filtrado a través de los residuos sólidos situados sobre la capa en cuestión. Uno de los

FIGURA 24

Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación del lixiviado en un RS.

aspectos más críticos en la preparación de un balance hidrológico para un RS es determinar la cantidad de lluvia que realmente se filtra a través de la capa de cobertura del RS. Cuando no se utiliza una geomembrana, se puede determinar la cantidad de lluvia que se filtra a través del cubrimiento del RS. En el capítulo 8 se presenta un método simplificado para estimar la cantidad de filtración que se puede esperar.

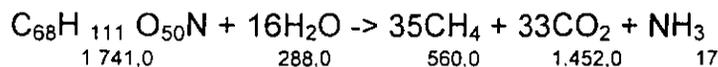
Agua aportada por los residuos sólidos. El agua que entra al RS con los materiales residuales es tanto el agua intrínseca de los residuos como la humedad que se ha absorbido de la atmósfera o de la lluvia (cuando los contenedores de almacenamiento no están correctamente cerrados). En climas secos, se puede perder algo de la humedad intrínseca contenida en los residuos por las condiciones de almacenamiento. El contenido en humedad de los RSM domésticos y comerciales es aproximadamente del 20 por 100. Sin embargo, por la variabilidad del contenido en humedad durante las estaciones húmedas y secas, puede ser necesario llevar a cabo una serie de ensayos durante los períodos húmedos y secos.

Agua aportada por el material de cubrimiento. La cantidad de agua que entra con el material de cubrimiento dependerá del tipo y del origen del material de cubrimiento y de la estación del año. La cantidad máxima de humedad que el material de cubrimiento puede contener se define como capacidad de campo (CC) del material, o sea, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad. Los valores para suelos varían de 6 al 12 por 100 para arena, y de 23 al 31 por 100 para marga arcillosa. En el capítulo 8 se argumenta más extensamente la CC de los suelos en conexión con el almacenamiento de agua en las coberturas de los RS.

Agua perdida inferiormente. El agua que sale desde el fondo de la *primera* celda del RS se llama *lixiviado*. Como se ha resaltado anteriormente, el agua que sale del fondo de la segunda y de las subsiguientes celdas procede del agua que entra desde la celda superior a la celda en cuestión. En los RS donde se utilizan sistemas intermedios para la recolección del lixiviado, el agua que sale desde el fondo de la celda colocada directamente por encima del sistema para la recolección del lixiviado intermedio también se llama lixiviado.

Agua consumida en la formación del gas de RS. Se consume agua durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los RSM. La cantidad de agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la

fórmula para el material de descomposición rápida. La masa de agua absorbida por kilogramo de residuos orgánicos secos consumidos puede estimarse de la forma siguiente:



La masa de agua consumida por kilogramo de residuos sólidos volátiles rápidamente biodegradables (SVRB) secos y destruidos es:

$$\text{Agua consumida} = \frac{288,0}{1.741,0} = 0,165 \text{ kg H}_2\text{O/kg SVRB destruidos}$$

Utilizando un valor de 223.61 kg/m³ SVRB destruidos para la producción del gas, el valor correspondiente para la cantidad de agua consumida por metro cúbico de gas producido es

$$\text{Agua consumida} = \frac{(0,165 \text{ kg H}_2\text{O/kg SVRB destruidos})}{(223,61 \text{ kg/M}^3 \text{ SVRB destruidos})} = 7,3789 \text{ kg H}_2\text{O/m}^3$$

Agua perdida como vapor de agua. El gas de RS normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad del vapor de agua que se escapa del RS se determina suponiendo que el gas del RS está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases perfectos de la forma siguiente:

$$p_v V = nRT \quad (11.16)$$

donde:

p_v = Presión de vapor del H₂O a una temperatura T, en atm.

V = Volumen, l.

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases = 0.082 atm - l/°K.

$T =$ Temperatura, °K.

El valor numérico para la masa de vapor de agua contenida por litro de gas de RS a 32°C se obtiene de la forma siguiente:

$$p_v = 4.82 \text{ KN/M}^2$$

$n =$ Número de moles.

$R =$ Constante universal de los gases = 0.082 atm -]/°K.

$T = 305$ °K.

$$n = \frac{(p_v) (V_g)}{RT} = \frac{(4.82)(1,0)}{(0.082)(305)} = 0.0019 \text{ mol}$$

$$0.0019 \text{ mol} \cdot 18 \text{ kg/kg} \cdot \text{mol} = 0.0352 \text{ kg H}_2\text{O/m}^3 \text{ gas de RS}$$

Otras pérdidas y ganancias en agua. Habrá alguna pérdida de humedad por evaporación durante el vertido de los residuos. Las cantidades no son grandes y a menudo se desprecian. La decisión de incluir estas variables en el balance hidrológico dependerá de las condiciones locales.

Capacidad de campo del RS. El agua que entra en el RS, que no se consume y que no sale como vapor de agua, puede mantenerse en el RS o puede aparecer como lixiviado. El material residual y el material de cobertura, ambos, son capaces de retener agua. La cantidad de agua que se puede retener, en contra de la gravedad, se denomina capacidad de campo. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de humedad dentro del RS por encima de la CC del RS. La CC, que varía con el peso de sobrecarga, puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$cc = 0,6 - 0,55 \left(\frac{W}{10,000 + W} \right)$$

donde:

CC = Capacidad de campo (o sea, la fracción de agua en los residuos basándose en el peso seco de los mismos)

W= Peso de sobrecarga calculado en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión.

Preparación del balance de aguas del RS. Los términos que componen el balance de aguas pueden colocarse en forma de ecuación de la forma siguiente-

$$AS_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_E + W_{F(L)}$$

donde:

AS_{RS} = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el RS kg/m^3 .

W_{RS} = Agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes, kg/m^3 .

W_{FT} = Agua (humedad) en los fangos de plantas de tratamiento entrantes, kg/m^3 .

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura, kg/M^3 .

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (para la capa superior del RS el agua desde arriba procede de la lluvia o del agua de nieve), kg/m^3 .

W_{GV} = Agua perdida en la formación del gas de RS, kg/m^3 .

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas de RS, kg/m^3 .

W_E = Agua perdida debido a la evaporación superficial, kg/M^3 .

$W_{F(L)}$ = Agua que sale interiormente (en la celda localizada directamente por encima de un sistema para la recolección del lixiviado, el agua del fondo se corresponde con el lixiviado), kg/m^3 .

Se prepara el balance hidrológico del RS añadiendo la masa del agua entrante por unidad de área de una capa concreta del RS, para un incremento de tiempo dado, al contenido en humedad de esa capa al final del incremento del tiempo anterior, y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el período de tiempo actual. El resultado se conoce como agua disponible en el incremento de tiempo actual para

una capa particular del RS. Para determinar si se formará lixiviado, se compara la capacidad de campo del RS con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se formará lixiviado.

Por lo general, la cantidad de lixiviado está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el RS. De hecho, si se construye correctamente un RS, se puede eliminar la producción de cantidades medibles de lixiviado. Cuando se añaden fangos de plantas de tratamiento de aguas residuales a los residuos sólidos para incrementar la cantidad de metano producida, deben proporcionarse instalaciones para el control del lixiviado. En algunos casos pueden necesitarse instalaciones para el tratamiento del lixiviado.

Movimiento del lixiviado en sin aislamiento

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los RS. Desde allí su movimiento en RS sin aislamiento es hacia abajo a través del estrato inferior, aunque también puede producirse algún movimiento lateral, según las características del material circundante. Por la importancia que tiene la filtración vertical en la contaminación de aguas subterráneas, se trata más este tema en la exposición siguiente.

Ley de Darcy. La velocidad de filtración de los lixiviados del fondo del RS puede estimarse utilizando la ley de Darcy, que puede expresarse de la forma siguiente:

$$Q = KA \frac{Dh}{DL}$$

donde:

Q = Descarga del lixiviado por unidad de tiempo, m³/año.

K = Coeficiente de permeabilidad m³/M² año.

A = Área en perfil a través de la cual corre el lixiviado, m².

dh/dl = Gradiente hidráulico, m/m.

h = Pérdida de carga, m.

l = Longitud del camino del flujo, m.

El signo negativo en la ley de Darcy viene del hecho de que la pérdida de carga, dh, siempre es negativa. El coeficiente de permeabilidad también se conoce como conductividad hidráulica, permeabilidad efectiva o coeficiente de filtración. En unidades USA, el coeficiente de permeabilidad se expresa en galones/día/pie cuadrado, o pies/día. La conversión entre estos factores se hace resaltando que 7.48 gal/ft² -año = 1 ft/año. En la Tabla 12 se dan valores típicos del coeficiente de permeabilidad para varios suelos.

TABLA 11.15

Coefficientes típicos de permeabilidad para varios suelos'

Material	Coeficiente de permeabilidad, K	
	mld	Vm ² - d
Arena gruesa uniforme	406	405,779
Arena mediana uniforme	100	101,343
Arena y grava bien graduadas y limpias	100	101,343
Arena fina uniforme	4	4,074
Arena de lodo y grava bien graduadas	0,4	392
Arena de lodo	0,1	89.54
Lodo uniforme	0,04	48.84
Arcilla arenosa	0,004	4,8
Arcilla de lodo	10 ⁻⁴	8,9 10 ⁻²
Arcilla (tamaños de arcilla del 30 al 50 %)	10 ⁻⁵	8,9 10 ⁻³
Arcilla coloidal	10 ⁻⁶	8,9 10 ⁻⁴

Estimación de la filtración vertical del lixiviado. Antes de aplicar la ley de Darcy para estimar las tasas de filtración de un RS, es útil revisar las condiciones físicas del problema refiriéndose a la Figura 25. En ésta, se ha colocado una celda de RS dentro

de un acuífero superficial formado por un material de una permeabilidad moderada, que yace sobre un acuífero

RS

FIGURA 11.32

Esquema de definición de la filtración a partir de los RS y de acuíferos superficiales hasta subsuperficiales.

de lecho de roca. En esta situación es posible tener dos niveles piezométricos de agua si se colocan los pozos dentro de acuíferos superficiales y del lecho de roca. Con respecto al movimiento del lixiviado, hay dos problemas de interés. El primero es la velocidad con que el lixiviado se filtra desde el fondo del RS hasta el agua subterránea en el acuífero superficial. El segundo es la velocidad con que las aguas subterráneas procedentes del acuífero superficial entran en el acuífero sobre lecho de roca. Estos dos problemas son tratados en el análisis siguiente, pero la cuestión de cómo se produce la mezcla del lixiviado con las aguas subterráneas dentro del acuífero superficial va más allá del alcance de este trabajo.

En el primer problema, la tasa de flujo de lixiviación del RS al agua subterránea superior se calcula suponiendo que el material que se encuentra entre el fondo del RS y la cima del nivel freático está saturada, y que existe una pequeña capa de lixiviado en el fondo del RS. Bajo estas condiciones la ecuación de Darcy se aplica de la siguiente forma:

$$Q(\text{M}^3/\text{año}) = -K(\text{M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{año}) - A(\text{m}^2) \cdot \frac{h_i(\text{m})}{L_i(\text{m})}$$

pero como $h_i = L_i$

$$Q(\text{M}^3/\text{año}) = -K(\text{M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{año}) - A(\text{m}^2)$$

Si se supone que el flujo se produce a través de 1.0 m', entonces

$$Q(\text{m}^3/\text{año}) = K(\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}) (\text{m}^2)$$

La tasa de descarga de lixiviado por unidad de área es igual al valor de K multiplicado por la unidad de superficie en metros cuadrados. Por ejemplo, si el estrato superior del material en la Figura 25 fuese arcilla arenosa, la tasa correspondiente de filtración sería $4,9 \cdot 10^{-4}$ m'/m' - d (Tabla 12). El valor calculado representa la cantidad máxima de filtración que podría esperarse, y se debería utilizar este valor con fines de diseño. En condiciones normales, la tasa actual sería menor que este valor porque la columna de suelo debajo del RS no estaría saturada. También, la mayor parte del lixiviado que llega hasta el fondo del RS se habría extraído con el sistema para la recolección del lixiviado.

En el segundo problema, la tasa del movimiento del agua desde el acuífero superior hasta el acuífero inferior se daría con la Ecuación (11.20). En este caso, el espesor de la capa confinadora se utiliza para determinar el gradiente hidráulico.

Equivalencia hidráulica. En algunos estados, se utiliza el concepto de equivalencia hidráulica para valorar diseños alternativos de recubrimientos. En la Figura 26 se ilustran tres configuraciones de recubrimientos equivalentes. Si se aplica la Ley de Darcy a la primera configuración, la tasa de flujo por unidad de área es igual a $2.67 K$. Aplicando la Ley de Darcy a las otras dos configuraciones da el mismo resultado. De este análisis se puede deducir que el nivel de agua mantenido dentro del RS es una importante consideración de diseño.

Tiempo de penetración. El tiempo de penetración, en años, que tardan los lixiviados en traspasar un recubrimiento de arcilla de un espesor dado puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{d^2x}{K(d+h)}$$

donde:

t = Tiempo de penetración, años.
 d = Espesor del recubrimiento de arcilla, m.
 x = Porosidad efectiva.
 K = Coeficiente de permeabilidad, m/año.
 h = Carga hidráulica, m.

Los valores típicos de porosidad efectiva para arcillas con un coeficiente de permeabilidad dentro del rango de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s variarán de 0,1 a 0,3, según el tipo de arcilla.

FIGURA 26

Dibujo de definición para valorar la equivalencia de recubrimientos de RS.
(Hay que resaltar que la descarga a través de cada configuración de recubrimiento es la misma.)

Destino de los constituyentes de los lixiviados en la migración subsuperficial

La inquietud principal en el movimiento de los lixiviados en el acuífero subsuperficial por debajo de los RS, con y sin recubrimientos, es el destino de los constituyentes encontrados en el lixiviado. Los mecanismos operativos para la reducción de los constituyentes encontrados en el lixiviado mientras migra a través del suelo subsuperficial incluyen: filtración mecánica, precipitación y coprecipitación, absorción (incluyendo intercambios iónicos), intercambio gaseoso, disolución y dispersión, y actividad microbiana [2, 29, 36]. El destino de los metales pesados y de los oligoorgánicos, los dos constituyentes de mayor interés, se argumenta en la siguiente exposición.

Metales pesados. En general, los metales pesados son removidos mediante reacciones de intercambio iónico que se producen mientras los lixiviados viajan a través del suelo, los oligoorgánicos se separan principalmente mediante absorción. La capacidad de un suelo para retener los metales pesados encontrados en los lixiviados está en función de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) que tiene el suelo. La

captación y la pérdida de iones positivamente cargados por un suelo se llama intercambio canónico o básico. Se define el CIC total de un suelo como el número de miliequivalentes (meq) de cationes que pueden absorber 100 gramos de suelo. El CIC de un suelo depende de la cantada materia coloide orgánica y minera presenté en a matriz del suelo. Los valores típicos de CIC con un pH de 7 son 100 a 200 meq/100 g para coloides orgánicos, de 40 a 80 meq/100 g para arcillas 2:1 (minerales montmorillonitas), y de 4 a 20 meq/100 g para arcillas 1:1 (minerales caolinitas). Los valores de CIC presentados están afectados por el pH de la disolución; caen hasta en un 10 por 100 de los valores dados para un pH igual a 4. Como ya se ha resaltado, la presencia de dióxido de carbono en el fondo del RS tenderá a bajar el pH de los lixiviados.

La capacidad de un recubrimiento de arcilla para absorber metales pesados puede estimarse de la forma siguiente. Supongamos que el CIC de un material de recubrimiento es 100 meq/100 g. Si la densidad del material arcilloso utilizado en el recubrimiento es 2.194 kg/m³ (gravedad específica igual a 2.2), entonces pueden ser absorbidos aproximadamente 106.000 meq de cationes por metro cúbico de material de recubrimiento. Utilizando un valor típico de 20 mg/meq para metales pesados, la cantidad de metal que puede absorberse por metro cúbico es igual a 1.700 g. Si la concentración de metales pesados en los lixiviados fuese de 100 mg/l, se podrían separar los metales pesados de aproximadamente 600 l de lixiviados. Si la permeabilidad de la arcilla es igual a $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s, entonces 30,46 l pasarían a través de 1 m³ cada año. Con esta tasa de filtración, se tardarían 212 años para saturar el volumen original de arcilla. Si la cantidad de lixiviado que se filtra a través del recubrimiento fuese limitada a un décimo de ese valor mediante el diseño correcto del sistema para la recolección de lixiviado, entonces el tiempo requerido para saturar el volumen de arcilla sería aproximadamente de 2.000 años. Incluso con todas las suposiciones simplificadoras que entraban en el análisis anterior, se puede concluir que con una cubrición de RS y un recubrimiento de arcilla diseñados correctamente, los

metales pesados no deben presentar un problema. El frente de saturación para un metal pesado frente al tiempo se puede representar como se muestra en la Figura 27.

FIGURA 11.34

Movimiento del frente de saturación de metales pesados en un recubrimiento de arcilla.

Oligoorgánicos. La absorción es el método más común por el que se separan los constituyentes orgánicos presentes en los lixiviados mientras estos últimos se mueven a través de un medio poroso. Si se desprecia la dispersión hidrodinámica, el balance de masas para un contaminante sometido a absorción en un acuífero de agua subterránea se obtiene por la siguiente fórmula modificada:

$$\frac{\partial S}{\partial T} \frac{p_b}{X} + \frac{\partial C}{\partial T} - V = \frac{\partial C}{\partial Z}$$

donde:

S = Masa del soluto absorbido por unidad de masa de suelo seco, g/g.

p_b = Densidad bruta del suelo, g/m³.

x = Porosidad.

C = Concentración del contaminante en fase líquida, g/m³.

V_z = Velocidad media del fluido en la dirección Z, m/s.

La masa del material absorbido por unidad de masa de suelo seco está relacionada con la concentración del contaminante en la fase líquida y con el coeficiente de distribución del suelo, tal como se describe en la siguiente ecuación:

$$S = K_{SD}C$$

Donde:

K_{SD} = Coeficiente de distribución del suelo, m³/g.

Hay que resaltar que la Ecuación (anterior) describe la absorción lineal. La absorción puede no ser lineal para algunos de los compuestos orgánicos encontrados en los RS. Calculando el diferencial de la Ecuación respecto al tiempo, y sustituyendo (KSD) $DCIDT$ por $Ds/2t$ en la Ecuación (11.23) se obtiene.

$$-V_z \frac{\partial C}{\partial z} = \left(1 + \frac{\rho_s}{\alpha} K_{sd}\right) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (11.25)$$

Cuando la partición del contaminante entre el suelo y el agua subterránea puede describirse adecuadamente mediante el coeficiente de distribución del suelo, KID , el retraso del frente contaminante relativo al líquido puede describirse con la siguiente relación:

$$R = \frac{V_z}{V_{zc}} = \left(1 + \frac{\rho_s}{\alpha} K_{sd}\right) \quad (11.26)$$

donde:

R = Factor de retraso, sin unidades.

V_z = Velocidad media del agua subterránea, m/s.

V_{zc} = Velocidad media del $C/C_0 = 0,5$ punto del perfil de concentración del contaminante retrasado, m/s.

Si se supone que α para la mayoría de los suelos varía de 0,2 a 0,4, y que los valores correspondientes de ρ_s son aproximadamente de 1.6 a $2.1 \cdot 10^6$ g/m³, entonces la Ecuación (1 1.26) puede escribirse de la forma siguiente:

$$R = \frac{V_z}{V_{zc}} = (1 + 4 \cdot 10^6 K_{sd}) \text{ a } (1 + 10 \cdot 10^6 K_{sd})$$

Si K_{SD} es igual a cero, el contaminante no es reactivo y no se produce el retraso (Figura 28). Si K_{SD} es mayor que aproximadamente 10^{-4} , el contaminante es esencialmente inmóvil. El valor de K_{SD} puede estimarse utilizando la siguiente expresión:

$$K_{SD} = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ foc} (K_{ow}) \quad (11.28)$$

donde:

foc Fracción de carbono orgánico en el suelo, g/g.

Kow Coeficiente de distribución octanol-agua.

El retraso de los constituyentes orgánicos encontrados en el lixiviado es importante porque el material retenido puede someterse a reacciones biológicas y químicas, en algunos casos, haciendo inocuo el material retenido.

FIGURA 28

Retraso típico de oligocompuestos orgánicos en movimiento subsuperficial.

Control de la lixiviación en RS

Mientras el lixiviado se filtra a través del estrato inferior, se separan muchos de los constituyentes químicos y biológicos originalmente contenidos en él, mediante la acción filtrante y absorbente del material que compone el estrato. Por lo general, la amplitud de esta acción depende de las características del Suelo, especialmente del contenido en arcilla. Por el riesgo potencial que implica el permitir que se filtre el lixiviado hasta el agua subterránea, la mejor práctica exige su eliminación o contención.

Actualmente se utilizan, por lo general, materiales aislantes de RS para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases de RS fuera de la zona del RS. Hasta la fecha (1992), el uso de arcilla como material de aislamiento ha sido el método más utilizado para reducir o eliminar la filtración del lixiviado fuera de los RS. La arcilla

es factible por su facilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado, y por su resistencia al flujo del lixiviado. Sin embargo, está ganando en popularidad el uso de aislantes formados por una combinación mixta de geomembrana y arcilla, especialmente por la resistencia proporcionada por las geomembranas al movimiento del lixiviado y de los gases del RS. En la Tabla 13 se resumen las características, ventajas y desventajas de las geomembranas (también conocidas como recubrimientos de membrana flexible, RMF) que han sido utilizadas en RS de RSM. En la Tabla 14 se dan las especificaciones para geomembranas.

Sistemas de recubrimientos para RSM. El objetivo en el diseño de aislamientos para RS es minimizar la filtración del lixiviado en los suelos subsuperficiales por debajo del RS y eliminar, así, la contaminación potencial de las aguas subterráneas. Se han desarrollado varios diseños de aislamientos para minimizar el movimiento del lixiviado en la subsuperficie por debajo del RS. En la Figura 11.36 se ilustran algunos de los múltiples tipos de diseños que se han utilizado. En los diseños de multilaminados ilustrados en la Figura 11.36, cada una de las capas tiene una función específica. Por ejemplo, en la Figura 11.36a la capa de arcilla y la geomembrana sirven como una barrera mixta para el movimiento del lixiviado y del gas del RS. La capa de arena o grava sirve como capa de recolección y drenaje del lixiviado generado dentro del RS. La capa geotextil se utiliza para minimizar la mezcla de las capas del suelo con las capas de arena o grava. La capa final del suelo se emplea para proteger las capas de drenaje y barrera. Una modificación del diseño de aislamiento, mostrado en la Figura 11.36a, implica la instalación de tuberías para la recolección de los lixiviados en la capa para la recolección del lixiviado. Los diseños de aislamientos mixtos, que emplean una capa de arcilla y una geomembrana, proporcionan más protección y son hidráulicamente más efectivos que cualquier tipo de impermeabilización utilizado aisladamente.

En la Figura 29, se coloca una malla de plástico, especialmente diseñada con tejido abierto (geomalla), y una tela de filtro geotextil

TABLA 13

Líneas directrices para instalaciones de control de lixiviado

Artículo	Comentarios
Recubrimientos sintéticos de membrana flexible(SMF)	<p>Los recubrimientos deben diseñarse y construirse para contener los fluidos, incluyendo a los residuos y lixiviados. Para los RS de RSM, no se requieren recubrimientos sintéticos. Sin embargo, si se selecciona esta alternativa, los recubrimientos sintéticos deben tener un espesor máximo de 40 mm. Estos recubrimientos deben instalarse para cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un RS.</p>
Selladores de fondo	<p>No existen normativas específicas que gobiernen la aplicación de los selladores de fondo en los RS de RSM. El diseño, la construcción y la instalación de los selladores de fondo están sujetos a la aprobación de las agencias locales</p>
Recubrimientos artificiales de arcilla	<p>Los recubrimientos de arcilla son opcionales para los RS de RSM. Si las condiciones del lugar lo requieren, los recubrimientos de arcilla para los RS de RSM deben tener un espesor mínimo de 0,3 m y deben instalarse con una compactación relativa de por lo menos el 90 por 100. Un recubrimiento de arcilla debe mostrar una permeabilidad máxima de $1 \cdot 10^{-6}$ CM/S. Los recubrimientos de arcilla, si se instalan, deben cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un RS.</p>
Barreras subsuperficiales	<p>Una barrera subsuperficial se usa conjuntamente con los materiales geológicos naturales para asegurar la satisfacción de las estandarizaciones de permeabilidad lateral.</p> <p>Quizás las barreras serán requeridas por las agencias regionales en los RS de RSM donde haya un potencial de movimiento lateral de los fluidos, incluyendo residuos y lixiviado, y se utiliza la permeabilidad de los materiales geológicos naturales para contener los residuos en vez de un recubrimiento.</p> <p>Las barreras deben tener un espesor mínimo de 2 ft para el material arcilloso o un mínimo de 40 mm para los materiales sintéticos. Se requiere que estas estructuras estén localizadas a un mínimo de 5 ft dentro de materiales geológicos naturales que satisfacen los requisitos de permeabilidad de $1 \cdot 10^{-6}$ a $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Si se utilizan muros interceptores, las excavaciones de los RS también deben localizarse en materiales geológicos naturales que exhiban permeabilidades no mayores que $1 \cdot 10^{-6}$ cm/s.</p> <p>Se requiere que las barreras tengan sistemas de recolección de fluidos</p>

pendiente arriba de la estructura. Los sistemas deben diseñarse, construirse, explotarse y mantenerse para prevenir la acumulación de una cabeza hidráulica contra la estructura. El sistema de recolección debe inspeccionarse regularmente y los fluidos acumulados deben separarse.

TABLA 14

Ensayos de rendimiento utilizados para medir las propiedades de las geomembranas sintéticas, y los valores típicos para estas propiedades'

Ensayo	Método de ensayo	Valores típicos
Categoría de resistencia		
Propiedades de tensión	ASTM D638, tipo IV; pesa 5 cm/min	
Resistencia a la tracción		16.548 KN/m ²
Resistencia a la tracción en rotura		27.580 KN/M ²
Alargamiento elástico		15 por 100
Alargamiento en rotura		700 por 100
Tenacidad		
Iniciación de resistencia a la rotura	ASTM D1004 molde C	20 kg
Resistencia a la perforación	FTMS 101B, método 2031	104 kg
Eragilidad a baja temperatura	ASTM D746 procedimiento B	-69°C
Durabilidad		
Porcentaje de negro de carbono	ASTM D1603	2 por 100
Dispersión de negro de carbono	ASTM D3015	A-1
Envejecimiento acelerado con calor	ASTM D 573, D1349	Cambio escaso de resistencia después de un mes a 110 °C
Resistencia química		
Resistencia a mezclas de residuos químicos	Método EPA 9090	Cambio en la resistencia a la tracción del 10 por 100 durante 120 días
Resistencia a reactivos químicos puros	ASTM D543	Cambio en la resistencia a la tracción del 10 por 100 durante 7 días
Resistencia a la rotura bajo tensión		
Resistencia a la rotura bajo	ASTM D1693,	1.500 h

FIGURA 29

Recubrimientos de RS: (a, b) tipos de barreras sencillas-mixtas y (c-f) tipos de barreras dobles-mixtas. Hay que destacar que en los sistemas con aislamiento doble, el mixto primario a menudo se identifica como primario o como sistema de recolección de lixiviados, mientras que el aislamiento mixto secundario se identifica como la capa de contención de lixiviado. Normalmente se colocan sensores de detección de lixiviados entre los aislamientos primarios y secundarios.

sobre una geomembrana que, a continuación, se coloca sobre una capa de arcilla compactada. Encima de geotextil se coloca una capa de suelo protectora. La geomalla y el geotextil funcionan conjuntamente como una capa que conduce el lixiviado hacia el sistema de recolección del lixiviado. La permeabilidad del sistema de aislamiento, que está conformado por una capa de drenaje y una capa de filtro, es equivalente a la de arena gruesa (ver Tabla 17). Por el potencial de atascamiento que presenta la tela geotextil, muchos diseñadores están a favor de uso de una capa de arena o grava como capa de drenaje.

En el sistema de recubrimiento mostrado en la Figura 29 se utilizan dos recubrimientos mixtos, comúnmente identificados como capas mixtas primaria y secundaria. El aislamiento mixto primario se utiliza para la recolección del lixiviado, mientras el aislamiento mixto secundario sirve como un sistema para detectar fugas y como un respaldo para el primario. Una modificación del sistema de recubrimiento mostrado en la Figura 29 implica la sustitución de la capa de drenaje con arena por un sistema de drenaje con geomalla, como se muestra en la Figura 29. El aislamiento mixto de dos capas mostrado en la Figura 29 es el mismo que el mostrado en la Figura 29, con la excepción de que la capa de arcilla debajo de la primera geomembrana es sustituida por un recubrimiento de arcilla geosintética (RAG). Como producto fabricado, el RAG se elabora con una arcilla bentonita de alta calidad y un material aglutinante apropiado

(ver Figura 29). La arcilla bentonita es esencialmente un mineral montmorillonito de sodio que tiene la capacidad de absorber hasta 10 veces su peso en agua. Mientras la arcilla absorbe el agua, se vuelve como masilla, siendo muy resistente al movimiento del agua. Se han observado permeabilidades tan bajas como 10^{-10} cm/s.: Disponibles en grandes láminas (3,6 a 4,2 por 30 m), los RAG se superponen en la construcción de un sistema de aislamiento. En las Figuras 29 y 29 se muestran dos sistemas adicionales de aislamientos con dos capas. En los sistemas mixtos mostrados en las Figs. 29, normalmente se colocan sensores para detectar fugas entre dos aislantes.

Sistemas de aislamientos para monorrellenos. Los sistemas de aislamientos para monorrellenos normalmente están formados por dos geomembranas, cada una con una capa de drenaje y un sistema de recolección de 'lixiviados (ver Figuras 29 y 29). Para detectar el lixiviado se coloca un sistema entre el primer y el segundo aislamiento, así como debajo del inferior. En muchas instalaciones se utiliza una capa de arcilla espesa (1 a 1.5 m) debajo de las dos geomembranas para una mayor protección.

Construcción de aislamientos de arcilla. En todos los diseños ilustrados en la Figura 29, se debe tener mucho cuidado con la construcción del aislamiento de arcilla. Quizás el mayor problema de la arcilla es su propensión a agrietarse debido a la desecación. Es muy importante no dejar que la arcilla se seque durante su colocación. Para asegurar un buen rendimiento, el recubrimiento de arcilla se debería instalar en capas de 10 a 15 cm, con una compactación adecuada antes de colocar las capas subsiguientes. Colocando la arcilla en capas finas se evita la posibilidad de fugas ocasionadas por la coincidencia de gruesos, lo que podría producirse si la capa de arcilla se coloca de una sola vez. Otro problema que puede plantearse cuando se utilizan arcillas de distintos tipos es la rotura debido a diferencias en el hinchamiento. Para evitar estas diferencias se debe utilizar un solo tipo de arcilla para la construcción del aislamiento.

Sistemas para la recolección de lixiviados

El diseño de un sistema para la recolección de lixiviados implica: 1) la selección del sistema que se va a utilizar, 2) el desarrollo de un plan gradual que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recolección del lixiviado y tuberías para canalizar el lixiviado, y 3) el trazado y diseño de instalaciones para canalizar, recoger y almacenar el lixiviado.

Selección del sistema de aislamiento. El sistema seleccionado dependerá en gran parte de la geología local y de los requisitos ambientales de la zona del RS. Por ejemplo, en localizaciones donde no hay agua subterránea, quizás sea suficiente un aislamiento sencillo con arcilla compactada. En lugares donde se debe controlar la migración del lixiviado y del gas, será necesario un aislamiento mixto de arcilla y geomembrana, con una capa apropiada de drenaje y de protección del suelo.

Diseño de instalaciones para la recolección de lixiviados. Se han utilizado varios diseños para separar el lixiviado dentro de los RS. A continuación se hace una exposición sobre los diseños de terraza inclinada y de fondo con tubos.

Terrazas inclinadas. Para evitar la acumulación del lixiviado en el fondo de un RS, la zona del fondo se gradúa en una serie de terrazas inclinadas. Como se muestra en la Figura 30, las terrazas están construidas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas drene hasta los canales de recolección del lixiviado. Se utiliza una tubería perforada colocada en cada canal (Figura 30) para transportar el lixiviado recogido hasta una localización central, a partir de la cual se separa para su tratamiento o para su reaplicación sobre la superficie del RS.

La pendiente transversal de las terrazas es normalmente del 1 al 5 por 100, y la pendiente de los canales de drenaje es del 0.5 al 1.0 por 100. La pendiente

FIGURA 30

Sistema con terrazas inclinadas para la recolección de lixiviados: (a) vista y (b) detalle del tubo para la recolección de lixiviados.

y la longitud máxima del canal de drenaje se seleccionan en base a la capacidad de las instalaciones de drenaje. La capacidad de la tasa de flujo de las instalaciones se estima utilizando la ecuación de Manning. El objetivo del diseño es no permitir que el lixiviado se estanque en el fondo del RS, creando así una importante carga hidráulica sobre el aislamiento del RS (menos de 0.3 m en el punto más alto). La profundidad de flujo en el tubo perforado de drenaje se incremento continuamente desde los tramos altos del canal de drenaje hasta los tramos bajos. En RS muy grandes se conectarán los canales de drenaje a un sistema más grande de recolección transversal.

Fondo con tuberías. Un plan alternativo para la recolección de lixiviados se muestra en la Figura 38. Como se puede observar, la zona del fondo se divide en una serie de tiras rectangulares con barreras de arcilla colocadas a distancias apropiadas (Figura 38). El espaciamiento de la barrera se corresponde con una celda del RS. Se procede a colocar la tubería, para la recolección del lixiviado, longitudinalmente encima de la geomembrana. Los tubos para la recolección del lixiviado son de 10 cm y tienen perforaciones cortadas con láser, similares a un colador, sobre la mitad de la circunferencia. Los cortes de láser están espaciados en 0.6 cm y el tamaño del corte es 0.00025 cm, que corresponde al tamaño más pequeño de la arena. Para proporcionar un drenaje efectivo, se inclina el fondo desde el 1.2 hasta el 1.8 por 100. Los tubos para la recolección del lixiviado, espaciados cada 6 m, se cubren con una capa de arena que mide 60 cm (Figura 31) antes de comenzar el vertido. El uso de un sistema con tubería múltiple para la recolección del lixiviado asegurará la rápida separación del lixiviado del fondo del RS. Además, el uso de una capa de arena de 60 cm sirve para filtrar los lixiviados antes de recogerlos para su tratamiento. La primera capa de 1 m de residuos sólidos, que se coloca directamente encima de la capa de arena, no se compacta.

Un rasgo único del diseño que se muestra en la Figura 11.40 es el método utilizado para separar las aguas pluviales de la porción no utilizada del RS. El método se detalla en la Figura 11.41. En la porción no utilizada del RS, se recogen las aguas pluviales en las líneas que al final se utilizarán

FIGURA 31

Sistema típico para la recolección de lixiviados utilizando una tubería múltiple: (a) vista panorámica y (b) detalle de tubos típicos para la recolección del lixiviado.

FIGURA 32

Gestión de aguas pluviales en un RS tipo área.

para la recolección del lixiviado. Cuando se va a poner en funcionamiento la siguiente celda del RS, se conecta la tubería para el lixiviado al sistema para la recolección del lixiviado, y se cubre el tubo que se extiende en la siguiente tira.

Instalaciones para separar, recoger y almacenar lixiviados. Se han utilizado dos métodos para la separación del lixiviado que se acumula dentro de un RS. En la Figura 33, se pasa el tubo para la recolección del lixiviado a través de un lateral del RS. Cuando se utiliza este método, debe tenerse mucho cuidado para asegurar que la estanqueidad donde el tubo penetra el RS sea total. Un método alternativo utilizado para la separación del lixiviado de los RS implica el uso de un tubo de recolección inclinado localizado dentro del RS (Figura 33). Se utilizan las instalaciones para la recolección del lixiviado cuando éste se va a reciclar o tratar en una localización central. En la Figura 34 se muestra una bóveda de acceso típica para la recolección del lixiviado. En algunas localizaciones, el lixiviado separado del RS se recoge en un depósito de retención, tal como se muestra en la Figura 34. La capacidad del depósito dependerá del tipo de instalaciones disponibles y de la tasa máxima de descarga permisible en la instalación de tratamiento. Normalmente los depósitos para la retención del lixiviado se diseñan para retener la producción de 1 a 3 días, durante el período de máxima producción de lixiviado. Se han utilizado depósitos con pared sencilla y doble, pero los depósitos con doble pared son preferibles frente a los de pared sencilla por la seguridad extra que proporcio-

FIGURA 11.42

Sistemas utilizados para separar el lixiviado de los RS: (a) tubo para la recolección del lixiviado llevado a través del lateral de un RS y (b) tubo inclinado para la recolección del lixiviado localizado dentro de un RS. El lixiviado se separa con una bomba.

-nan. Aunque se han utilizado depósitos de plástico y de metal, los de plástico son más resistentes a la corrosión.

Alternativas en la gestión de lixiviados

La gestión de lixiviados es clave para la eliminación del potencial que tiene un RS para contaminar acuíferos subterráneos. Se han utilizado varias alternativas para gestionar el lixiviado recogido de los RS, incluyendo: 1) reciclaje del lixiviado, 2) evaporación del lixiviado, 3) tratamiento seguido por evacuación, y 4) descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales. Estas alternativas se argumentan brevemente a continuación.

FIGURA 34

Ejemplos de instalaciones para la recogida de lixiviados: (a) bóveda para la recogida y transmisión de lixiviados y (b) depósito para la retención de lixiviados.

Reciclaje de lixiviados. Un método efectivo para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos (Figura 33) y recircularlos a través del RS. Durante las primeras etapas del funcionamiento del RS, el lixiviado contendrá cantidades importantes de TDS, DBO₅, DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado, se diluyen y atenúan los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del RS. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado se convertirán en CH₄ y CO₂. Por la subida del pH dentro del RS cuando se produce CH₄, los metales se precipitarán y serán retenidos dentro del RS. Un beneficio extra del reciclaje de los lixiviados es la reducción del gas de RS que contiene CH₄. Normalmente la tasa de producción de gas es mayor en sistemas para la recirculación del lixiviado. Para evitar la emisión incontrolado de gases

de RS cuando se recicla el lixiviado para su tratamiento, se debería equipar el RS con un sistema para la recuperación del gas. Finalmente será necesario recoger, tratar y evacuar el lixiviado residual. En RS grandes, quizás será necesario proporcionar instalaciones para el almacenamiento de lixiviados.

Evaporación de lixiviados. Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados (ver Figura 11.44). El lixiviado que no se evapora se riega por encima de las porciones completadas del RS. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre durante el invierno con una geomembrana, para excluir las aguas de lluvia. Se evacua el lixiviado acumulado mediante evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y regando el lixiviado sobre las superficies del RS en activo o ya lleno. Los gases olorosos que pueden acumularse debajo de la tapa superficial se extraen hacia un filtro de compost o suelo. Los lechos de suelo normalmente tienen una profundidad de 0,6 a 0,9 m, con tasas de carga orgánica de aproximadamente 1,6 a 0,4 kg/m de suelo. Durante el verano, cuando se destapa el estanque, puede ser necesaria una aireación superficial para controlar los olores. Si el estanque no es grande se puede dejar tapado durante todo el año. Otro ejemplo implica el tratamiento del lixiviado (por lo general biológicamente) con almacenamiento invernal y evacuación por riego sobre terrenos cercanos durante el verano. Si hay suficiente terreno disponible, se puede llevar a cabo el riego continuamente, incluso cuando llueve.

TABLA 15

Procesos y operaciones biológicos, químicos y físicos representativos, utilizados para el tratamiento de lixiviados

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
Procesos biológicos Lodos activados	Separación de orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos de desespumamiento, necesario clarificador separador.
Reactores de lotes	Separación de orgánicos	Similar a lodos activados, pero

secuenciados		no se precisa un clarificador separado, solamente aplicable con tasas de flujo relativamente lentas
Estanques aireados de estabilización	Separación de orgánicos	Requiere una gran superficie de terreno
Procesos de película fija (filtros percoladores, contactores biológicos rotatorios)	Separación de orgánicos	Frecuentemente utilizado con efluentes industriales similares a los lixiviados, pero no ensayado con lixiviados de RS
Lagunas anaerobias	Separación de orgánicos	Requisitos de energía y producción de lodos menores que en los sistemas aerobios, requiere calefacción, mayor potencial para la inestabilidad del proceso; más lento que los sistemas aerobios
Nitrificación/ desnitrificación	Separación de nitrógeno	La nitrificación/desnitrificación puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de orgánicos
Procesos químicos Neutralización	Control del pH	De aplicación limitada para la mayoría de los lixiviados
Precipitación	Separación de metales y algunos aniones	Produce un fango, que posiblemente requiera la evacuación como residuo peligroso
Oxidación	Separación de orgánicos; detoxificación de algunas especies inorgánicas	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos; el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmedo	Separación de orgánicos	Costoso; funciona bien con orgánicos refractarios
Operaciones físicas Sedimentación/ flotación	Separación de materia en suspensión	Sólo tiene una aplicación limitada; puede utilizarse conjuntamente con otros procesos de tratamiento
Filtración	Separación de materia en suspensión	Solamente útil como proceso de afino
Arrastre por aire	Separación de amoníaco u orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica

Separación por vapor	Separación de orgánicos volátiles	Altos costos energéticos; el vapor de condensado requiere un tratamiento adicional
Absorción	Separación de orgánicos	Tecnología probada; costos variables según lixiviado
Intercambio iónico	Separación de inorgánicos disueltos	Util solamente como un paso de acabado
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de orgánicos con alto peso molecular	Propenso al atascamiento, de aplicación limitada para los lixiviados
Osmosis inversa	Disoluciones diluidas de inorgánicos	Costoso; necesario un pretratamiento extensivo
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los lodos resultantes pueden ser peligrosos; puede ser costoso excepto en zonas áridas

Sistema integral para la gestión de lixiviados. En la Figura 35 se muestra un ejemplo de un sistema integral para la gestión de lixiviados. El líquido (lixiviado) que baja a través de los residuos sólidos es filtrado mientras atraviesa la capa de arena en el RS. El lixiviado recogido se transporta a una laguna de tratamiento, donde se añaden lodos de depuración de aguas residuales urbanas. Se airea el líquido en la laguna para reducir el contenido orgánico y para controlar los olores. Después el líquido de la laguna se aplica a RSU triturados que van a fermentarse para ser utilizados como material de cobertura intermedia en el RS. Antes de triturar los RSU se separan los metales y otros materiales reciclables. Aplicando el lixiviado a los RSU triturados se proporciona la humedad necesaria para el compostaje óptimo y se reduce el volumen del lixiviado mediante evaporación. El lixiviado en exceso se filtra mientras pasa a través de los residuos triturados y el sistema de drenaje inferior de filtros de arena. El lixiviado recogido se conduce hacia una serie de lagunas o estanques construidos. Las lagunas se utilizan para separar material orgánico, nutrientes, metales pesados y otros oligoorgánicos. El efluente de las lagunas construidas se pasa a través de un filtro lento de arena y después se utiliza para riego en el propio RS.

FIGURA 35

Sistema integral para el tratamiento de lixiviados empleando tierras húmedas construidas

Descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales. En aquellas zonas donde el RS está localizado cerca de un sistema para la recolección de aguas residuales o donde se puede utilizar una alcantarilla a presión para conectar el sistema para la recolección del lixiviado a un sistema para la recolección de aguas residuales, a menudo se descarga el lixiviado en el sistema para la recolección de aguas residuales. En muchos casos, quizás, será necesario un pretratamiento, utilizando uno de los métodos presentados en la Tabla 15, para reducir el contenido orgánico antes de proceder a la descarga del lixiviado en la alcantarilla. En lugares donde no hay alcantarillas disponibles, y no es factible la evacuación mediante evaporación y riego, puede ser necesario un tratamiento completo seguido de una descarga superficial.

8.0 GESTION DE AGUAS SUPERFICIALES

Igualmente importante en el control del movimiento del lixiviado es la gestión de todas las aguas superficiales, incluyendo la lluvia, el escurrimiento, los arroyos intermitentes y los manantiales artesianos. En este capítulo se presenta la gestión de aguas superficiales. Con el uso de una capa de cobertura correctamente diseñada, de una pendiente superficial adecuada (3 a 5 por 100) y de un drenaje adecuado para las aguas pluviales se puede controlar eficazmente la filtración superficial. Con controles correctos para el agua superficial, quizás no sea necesaria una barrera impermeable superficial. Los temas considerados en este capítulo incluyen: 1) sistemas para el control del agua superficial, 2) diseño de capas de cobertura intermedia, 3) diseño de capas de cobertura final, y 4) determinación de la filtración a través de la cobertura.

Sistemas para controlar las aguas superficiales

Eliminar o reducir la cantidad de agua superficial que entra en el RS es de una importancia fundamental para el diseño de un RS sanitario controlado, porque el agua superficial es la mayor contribución al volumen total del lixiviado. No se debe permitir que la escorrentía de las aguas de tormenta de los alrededores entre en el RS, y no se debe permitir el escurrimiento superficial (procedente de la lluvia) se acumule sobre la superficie del RS.

Instalaciones de drenaje para aguas superficiales. En los lugares donde la escorrentía de aguas pluviales procedente de los alrededores pueda entrar en el RS (por ejemplo, RS localizados en vaguadas), se debe instalar un sistema de drenaje correctamente diseñado (Figura 36). Se puede diseñar el sistema de drenaje para separar solamente el escurrimiento de los alrededores, o bien para separar la escorrentía de los alrededores y también de la superficie del RS. En RS donde se ha instalado un sistema de aislamiento completo en todo el fondo, el diseño del aislamiento debe tener en cuenta la desviación del agua pluvial que no cae sobre los residuos

cuando se vierten. En la Figura 37 se ilustra una desviación de agua pluvial fuera de la porción no utilizada del RS.

En lugares donde solamente hay que apartar el agua superficial de la superficie del RS, deberían diseñarse instalaciones de drenaje para limitar el recorrido del agua superficial. En muchos diseños se utilizan una serie de canales interceptores. El flujo de los canales se dirige hacia un canal principal más grande para apartarlo del lugar.

Estanques para el almacenamiento del agua pluvial. En muchos casos puede ser necesaria la construcción de estanques para contener los flujos desviados del agua pluvial, minimizando así las inundaciones río abajo. Normalmente, se deben recoger las aguas pluviales tanto en las porciones completadas del RS como en las zonas aún no rellenas. Para fijar su tamaño se siguen los procedimientos hidrológicos normales.

FIGURA 36

Ejemplos de instalaciones de drenaje utilizadas en RS: (a) canal trapezoidal recubierto, (b) canal en forma de «uve» recubierto, y (c) canal recubierto en forma de «uve» curvo. Hay que resaltar que se puede ampliar el perfil de canal trapezoidal para acomodar una amplia gama de flujos.

Capas de cobertura intermedia

Se utilizan las capas de cobertura intermedia para cubrir los residuos colocados diariamente con el fin de: eliminar la presencia de vectores sanitarios, mejorar la estética del RS y limitar la filtración superficial. La mayor cantidad de agua que entra en un RS y que finalmente se convierte en lixiviado, entra durante el período de relleno del RS. Parte del agua, en forma de lluvia y nieve, entra mientras se están colocando los residuos en el RS. El agua también entra en el RS primero filtrándose y después pasando a través del recubrimiento intermedia. De esta forma, los materiales y el método de puesta en obra de la cobertura intermedia pueden limitar la cantidad de agua superficial que entra en el RS.

Materiales utilizados para las capas de cobertura intermedia. En la Tabla 16 se presentan tasas generalizadas sobre la adaptabilidad de varios tipos de materiales que se han utilizado como recubrimiento intermedia. De los materiales listados, solamente el compost producido a partir de residuos de jardín y de RSM, el recubrimiento geosintético de arcilla y la arcilla son eficaces para limitar la entrada de aguas superficiales en el RS. Para conseguir la mayor eficiencia posible utilizando los materiales arriba citados, se debe inclinar la cobertura intermedia correctamente para aumentar el escurrimiento de las aguas superficiales.

TABLA 16

Valoraciones generalizadas sobre la adaptabilidad de varios materiales para su uso como recubrimiento intermedio en un RS'

Función	Valoraciones generalizadas ^b						
	Mulch de residuos de jardín	Compost residuos de jardín	Compost de RSM	Recubrimiento geosintético de arcilla	Suelo Nativo típico	Arena arcillosa lodosa	Arcilla
Proporciona un aspecto agradable y controla el vuelo de papeles	B-E	B-E	B	E	E	E	E ^c
Previene la excavación o tunelamiento de roedores	P	P	P	B-E	P	R-B	P
Previene la salida de moscas	R	R-B	R	E	B	P	E ^c
Minimiza la entrada de aguas superficiales en el RS	P	B-E	R-B	E	R-B ^d	P	E ^c
Retiene las aguas de la lluvia y la nieve	P	B-E	R-B	B	R-B ^d	P	E ^c
Minimiza el escape de gas de RS a través del cubrimiento	P	P	P	R-B	P	P	P-R ^c

^b E = excelente; B = bueno; R = regular, P = pobre

^c Excepto cuando se seca y aparecen grietas en la capa de cubrimiento.

^d Cuando se utiliza una capa de suelo espeso, la valoración es B-E-

En algunos RS, se coloca una capa muy espesa de suelo (0,9 a 1,8 m) sobre la celda llena. El agua de lluvia que se filtra por la capa de recubrimiento intermedia es retenida en virtud de su capacidad de campo. Cuando va a colocarse un segundo nivel sobre el primer nivel, se aparta el suelo y se almacena antes de comenzar el relleno. El uso de la técnica de almacenar temporalmente el material de cobertura adicional sobre una Celda ya llena puede limitar significativamente la cantidad de agua que entra en el RS. También se ha utilizado espuma sintética como material de recubrimiento intermedio. Por lo general la espuma funciona bien, excepto cuando llueve.

Capas de cobertura intermedia utilizando materiales residuales. Como se resaltó en capítulo 6 cuando está limitada la cantidad de suelo nativo para ser utilizado como material de recubrimiento intermedia, se han utilizado materiales alternativos para este propósito. Estos incluyen: compost y mulch producidos a partir de residuos de jardín; y compost producido a partir de. Una de las ventajas importantes de utilizar compost y mulch producidos a partir de RSM es que el volumen del RS que habría sido ocupado por el suelo utilizado para la recubrimiento intermedia, ahora, está disponible para la evacuación de materiales residuales. En lugares donde la cantidad del material de recubrimiento es limitada, el uso de RSM fermentado puede incrementar significativamente la capacidad del RS.

En la operación de compostaje, se trituran aproximadamente el 40 por 100 de los residuos domésticos y comerciales seleccionados después de separar manualmente los materiales reciclables, y los metales férricos mediante dos etapas de separación magnética. El material triturado se coloca en hileras para fermentarse. El lixiviado del RS se riega sobre los residuos triturados para incrementar el contenido en humedad, optimizando así el compostaje. El compost se usa como cobertura intermedia del 60 por 100 de los residuos restantes que se colocan directamente en el RS. Cuando se utilizan RSM fermentados como material de recubrimiento intermedia, no es necesario curar totalmente el compost antes de su uso. El compost curado colocado sobre los

RSM depositados en el RS también sirve como filtro de olores. Significativamente, se espera un incremento para los próximos años del uso de RSM fermentados para el recubrimiento intermedia, al mismo tiempo que la conservación de la capacidad del RS se convierte en una cuestión importante.

Otros materiales que se han utilizado como material de recubrimiento intermedia incluyen alfombras y moquetas usadas, residuos de construcción y demolición, y rechazos agrícolas. Se pueden almacenar alfombras y moquetas usadas cuando entran en el RS, y usarlas después cuando sea necesario. También se han utilizado alfombras y moquetas en el diseño de la cobertura final del RS. De todos modos, actualmente, la necesidad o no de una capa de recubrimiento intermedia está siendo objeto de un debate renovado.

Capas de recubrimiento final

Los propósitos principales de la recubrimiento final en un RS son: 1) minimizar la entrada del agua procedente de la lluvia y de la nieve después de completar el RS, 2) limitar la salida incontrolado de gases de RS, 3) suprimir la proliferación de vectores, 4) limitar el potencial de incendios, servir 5) proporcionar una superficie apta para la revegetación del lugar, y 6) como elemento central en la recuperación del lugar. Para afrontar estos propósitos el recubrimiento del RS 1) debe poder soportar extremos climáticos (por ejemplo, ciclos de calor/frío, humedad/sequedad, heladas/deshielos); 2) debe poder resistir la erosión acuática y eólica; 3) debe tener una estabilidad suficiente frente a hundimientos, roturas, fallos de pendiente, deslizamientos; 4) debe resistir los efectos del asentamiento diferencial en el RS, causado por la salida del gas y la compresión de los residuos y del suelo de cimentación; 5) debe resistir el deterioro debido a las operaciones de vertido, tales como sobrecargas ocasionadas por el almacenamiento y el movimiento de vehículos de recolección en las partes llenas del RS; 6) debe resistir las deformaciones producidas por terremotos; 7) debe resistir las alteraciones producidas en los materiales de recubrimiento por los constituyentes del gas de RS, y 8) debe resistir rupturas causadas por plantas, animales de madriguera,

lombrices e insectos. Es importante resaltar que bajo la actual legislación se deben satisfacer todos estos propósitos y atributos por un tiempo bastante prolongado. A continuación se argumentan los rasgos generales de una cobertura de RS, algunos diseños típicos de cobertura, y los requisitos de rendimiento a largo plazo para las cubiertas de RS.

Rasgos generales para el sellado de RS. Un sellado moderno de RS, como se muestra en la Figura 37, se conforma de una serie de capas, cada una de las cuales tiene una función especial. La capa subbase de suelo se utiliza para contornear la superficie del RS y servir como subbase para la capa barrera. En algunos diseños, se coloca una capa para la recolección del gas debajo de la capa de suelo con la finalidad de transportar el gas del RS hacia instalaciones para la gestión del gas. Se utiliza la capa barrera para restringir la entrada de líquidos en el RS y la salida de gases del RS a través del recubrimiento. Se utilizó la capa de drenaje para transportar las aguas de lluvia y nieve que se filtran a través del material de recubrimiento fuera de la capa barrera y para reducir la presión del agua sobre la capa barrera. Se utiliza la capa protectora para proteger las capas de drenaje y barrera. La capa superficial se usa para contornear la superficie del RS, y para servir como soporte de las plantas que se utilizarán en el diseño de clausura a largo plazo del RS.

Se debería resaltar que no todas las capas serán necesarias en cada localización. Por ejemplo, una capa para la recolección de gas no será necesaria donde exista un sistema activo para la recuperación del gas. A veces también se puede utilizar la capa subbase como capa para la recolección del gas. De las capas identificadas en la Figura 37, la capa barrera es la más importante por las razones anteriormente citadas. Aunque se ha utilizado la capa

Componente	Materiales típicos
Capa superficial	Cobertura de Suelo, disponible localmente o importada
Capa protectora	
Capa de drenaje	
	Arena, grava o gente para separación

Capa de barrera	Geomembrana
súbbase	Suelo nativo compactado

FIGURA 37

Componentes típicos que constituyen una cobertura de RS.

de arcilla como capa barrera en muchos RS, hay varios problemas inherentes a su uso. Por ejemplo, la arcilla es difícil de compactar sobre una cimentación blanda, la arcilla compactada puede desarrollar grietas debido a la desecación, la congelación puede dañar también la arcilla, el asentamiento diferencial causa grietas en la arcilla, y ésta una vez dañada es difícil de separar en una cobertura de RS, y finalmente, la capa de arcilla no restringe el movimiento del gas de RS de una forma significativa. En consecuencia, se recomienda el uso de una o más geomembranas antes que el uso de arcilla como capa barrera en sellado de RS. También se han utilizado recubrimientos geosintéticos de arcilla para la capa.

Diseños de cobertura. Algunos de los múltiples tipos de diseños de recubrimiento que se han propuesto y utilizado son ilustrados en la Figura 38. En la Figura 38, se utiliza la tela de filtro geotextil para limitar la mezcla del suelo con la capa de arena. Si el mantillo disponible en la zona del RS no es apto para el cultivo de plantas, se debería llevar un mantillo apto a la zona o enmendar el disponible para mejorar sus características con la finalidad del cultivo de plantas. El uso de un diseño de barrera mixta compuesto de una geomembrana y una capa de arcilla se ilustra en la Figura 38. En el diseño que se ilustra en la Figura 38, se sustituye la capa de arena o grava por la capa de drenaje geomalla en la Figura 38. En el diseño de cobertura ilustrado en la Figura 11.53d se utiliza una capa de suelo con un espesor de 1,8 a 3 m como capa de recubrimiento. Funcionalmente, la capa de suelo se inclina adecuadamente para maximizar el escurrir superficial. Se utiliza la capa de suelo para retener la lluvia que no corre por la superficie y entra en la cobertura. Se utiliza la membrana flexible para limitar la emisión de gases de RS. También se ha colocado Astro Turf™ sobre un

recubrimiento de membrana flexible. El uso de Astro Turf™ es ventajoso porque minimiza el mantenimiento.

Rendimiento y mantenimiento a largo plazo de coberturas de RS.

Independientemente del diseño final de la cobertura del RS, se debe considerar la siguiente cuestión: ¿cómo se mantendrá la integridad y el rendimiento del recubrimiento del RS mientras se asienta el RS, debido a la pérdida de peso por la producción del gas de RS y a la consolidación a largo plazo? Por ejemplo, ¿cómo se reparará un recubrimiento mixto para mantener un drenaje adecuado? Normalmente, si se produce la consolidación, se aparta el material de recubrimiento, se añade suelo o residuos fermentados para ajustar el grado, y se reemplazan diversas capas. Cuando se utiliza una cobertura espesa de suelo, se puede restaurar un drenaje superficial correcto mediante el repaso de la capa. Cuando hay vegetación sobre la cobertura de suelo, puede ser necesario un sistema de riego para mantener la vegetación durante el verano. En los RS donde se ha instalado Astro Turf™ (césped artificial), cuando éste empieza a romperse, se abre el recubrimiento, se repara la membrana flexible, y se añade una nueva capa de Astro Turf™.

FIGURA 38

Configuraciones típicas para la cobertura final de un RS.

Determinación de la tasa de filtración a través de las capas de cobertura intermedia y final

Si se supone 1) que el material de recubrimiento está saturado, 2) que se mantiene una capa fina de agua en la superficie, y 3) que no hay resistencia al flujo debajo de la capa de cobertura, entonces la cantidad teórica de agua que podría entrar en el RS por unidad de área en un periodo de 24 h. para varios materiales de recubrimiento se da en la Tabla 12 en la columna 3. Por supuesto, estos datos son valores puramente teóricos, pero se pueden utilizar para valorar la peor situación posible. En la práctica real, la cantidad de agua que entra en el RS dependerá de las condiciones hidrológicas locales,

del diseño de la cobertura, de su pendiente final, y también de si se ha plantado vegetación o no. Por lo general, los diseños de cobertura se construyen empleando una impermeabilización con membrana flexible para eliminar la filtración de aguas de lluvia o nieve en los residuos que están debajo de la cobertura del RS.

Normalmente se estima la filtración del agua de lluvia o de deshielo a través de la capa de suelo por encima de la capa de drenaje (Figura 39), o a través de una capa de cobertura compuesta solamente de suelo (Figura 39) utilizando uno de los muchos programas de simulación hidráulica que están disponibles en la actualidad. También se puede calcular la filtración a través de la cobertura del RS utilizando un balance hidrológico estándar. Con referencia a la Figura 39, se puede calcular el balance hidrológico para un recubrimiento de suelo con la siguiente expresión:

$$AS_{LC} = P - R - ET - PER_{SW}$$

donde:

AS_{LC} = Cambio en la cantidad de agua almacenada en una unidad de volumen de cobertura de RS, m.

P = Cantidad de precipitación atmosférica por unidad de área, m.

R = Cantidad de escorrentía por unidad de área, m.

ET = Cantidad de agua perdida mediante evapotranspiración por unidad de área, m.

PER_{SW} = Cantidad de agua que se filtra a través de la unidad de área de la cobertura del RS y que entra en los residuos sólidos, m.

La cantidad total de agua que se puede almacenar en un volumen unitario de suelo dependerá de la capacidad de campo (CC) y del porcentaje de marchitez permanente (PMP). La tensión húmeda del suelo en CC normalmente es entre 1/10 y 1/3 atm. El PMP se define como la cantidad de agua que queda en el suelo cuando las plantas no son capaces de extraer más. La tensión húmeda del suelo en PMP es aproximadamente de 15 atm. La diferencia entre la CC y el PMP representa la cantidad

de agua que puede almacenarse en un suelo. Los valores típicos de CC y de PMP para suelos representativos se dan en la Tabla 17. Si se utiliza una cobertura de RS laminada en capas, en el análisis se debe tener en cuenta la capacidad de campo de cada capa. En la Tabla 18 se dan los coeficientes típicos de escurrimiento para coberturas de RS agotados. Los datos sobre la precipitación atmosférica mensual y la evapotranspiración son específicos del lugar, pero los datos procedentes de la oficina local del tiempo normalmente son aceptables.

FIGURA 39

Dibujo de definición del balance de aguas de un RS: (a) para una cobertura de RS que contiene una capa de drenaje y un recubrimiento geomembrana Y (b) para un RS sin capa de drenaje (o recubrimiento geomembrana).

TABLA 17

Capacidad de campo (CC) y porcentaje de marchitez permanente (PMP) para varias clasificaciones de suelo.

Clasificación de suelo	Valor, porcentaje			
	Capacidad de campo		Punto de marchitez permanente	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Arena	6-12	6	2-4	4
Arena fina	8-16	8	3-6	5
Marga arenosa	10-18	14	4-8	6
Marga arenosa fina	14-22	18	6-10	8
Marga	18-26	22	8-12	10
Marga lodosa	19-28	24	9-14	10
Marga ligera de arcilla	20-30	26	10-15	11
Marga de arcilla	23-31	27	11-15	12
Arcilla lodosa	27-35	31	12-17	15
Marga pesada de arcilla	29-36	32	14-18	16
Arcilla	31-39	35	15-19	17

TABLA 18

Coeficientes típicos de escurrimientos para tormentas con una frecuencia de 5 a 10 años

Tipo de recubrimiento	Pendiente porcentaje	Coeficiente de escurrimiento			
		Con hierba		Sin hierba	
		Rango	Típico	Rango	Típico
Marga arenosa	2	0,05-0,10	0,06	0,06-0,14	0,10
	3-6	0,10-0,15	0,12	0,14-0,24	0,18
	7	0,15-0,20	0,17	0,20-0,30	0,24
Marga lodosa	2	0,12-0,17	0,14	0,25-0,35	0,30
	3-6	0,17-0,25	0,22	0,35-0,45	0,40
	7	0,25-0,36	0,30	0,45-0,55	0,50
Arcilla compacta	2	0,22-0,33	0,25	0,45-0,55	0,50
	3-6	0,30-0,40	0,35	0,55-0,65	0,60
	7	0,40-0,50	0,45	0,65-0,75	0,70

9 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y DE ASENTAMIENTO DE RS

Se deben tener en cuenta las características estructurales y el asentamiento de los RS en el diseño de instalaciones para la recolección del gas, durante las operaciones de relleno, y antes de llegar a una decisión sobre el uso final para el RS completado.

Características estructurales

Cuando inicialmente se colocan residuos sólidos en un RS se comportan de una forma similar a otros materiales de relleno. El ángulo nominal de reposo para el material residual colocado en un RS es aproximadamente de 1,5 a 1. Como los residuos sólidos tienen tendencia a deslizarse cuando la pendiente es demasiado inclinada, las pendientes utilizadas para las porciones ya llenas de un RS variarán de 2,5/1 a 4/1, siendo la más común 3/1. Como consecuencia de los problemas planteados con el deslizamiento ocasionado por el asentamiento, se han construido terrazas en muchos de los RS donde la altura total del RS excede de 15. Las terrazas ayudan a mantener la estabilidad de la pendiente y también se utilizan para la puesta en obra de conductos para el drenaje del agua superficial y para la localización de tuberías para la recuperación del gas de RS.

Por lo general, no se recomienda la construcción de instalaciones permanentes sobre los RS llenos por las características de asentamiento diferencial, por la distinta capacidad de aguante de los niveles superiores de] RS, y por los problemas potenciales que pueden resultar de la migración del gas, incluso cuando se usan instalaciones para la recolección del gas. Cuando se conoce el uso final del RS antes de empezar el relleno, es posible controlar la colocación de ciertos materiales durante el funcionamiento del RS. Por ejemplo, se pueden colocar materiales relativamente inertes, como residuos de construcción y demolición, en aquellos lugares donde se van a localizar edificios y/o otras instalaciones físicas en el futuro.

Asentamiento de RS

Mientras se descompone el material orgánico y se pierde peso en forma de componentes gaseosos y lixiviados de RS, se produce el asentamiento del RS. También se produce el asentamiento como resultado de la sobrecarga producida por la adición de niveles, y por la entrada y salida de agua del RS. El asentamiento produce roturas en la superficie y en la cobertura del RS, y roturas y desplazamientos en las instalaciones para la recuperación del gas. También interfiere en el uso final del RS después de la clausura.

Efecto de la descomposición de residuos. Una vez colocados en un RS, los componentes orgánicos de los residuos se descompondrán, ocasionando la pérdida de hasta el 30 o el 40 por 100 del total de la masa original. La pérdida de masa provoca una pérdida de volumen, que puede ser rellenada con nuevos residuos. Normalmente el volumen perdido se rellena cuando se coloca el segundo nivel encima del primero. Se perderá peso y volumen después de cerrar el RS.

Efecto de la presión por sobrecarga (altura). El peso específico del material colocado en el RS se incrementará con el peso del material colocado encima; por lo tanto, el peso específico de los residuos de un nivel dependerá de la profundidad del nivel. El peso específico máximo de los rechazos de residuos sólidos en un RS bajo presión por sobrecarga variará de 1.100 a 1.300 kg/m³. Se puede utilizar la siguiente relación para estimar el incremento en el peso específico de los residuos en función de la presión por sobrecarga:

$$SW_p = SW_i = \frac{P}{a + bp}$$

donde:

SW_p = Peso específico del material residual a una presión p , kg/m³

SW_i = Peso específico compactado inicial de residuos, kg/m³

p = Presión por sobrecarga, kg/m^3

a = Constante empírica (kg/M^2).

b = Constante empírica, M^3/kg .

En la Figura 40 muestran curvas típicas de peso específico frente a la presión aplicada para residuos sólidos compactados de varios pesos específicos iniciales. Para un peso específico inicial de $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ y un peso específico máximo de $1.200 \text{ kg}/\text{m}^3$, la Ecuación (anterior) se puede escribir de la forma siguiente:

$$DW_r = 600 \text{ kg}/\text{m}^3 + \frac{p, \text{ kg}/\text{m}^2}{0,0224 (\text{m}^2/\text{kg})(\text{kg}/\text{m}^2) + (0,0017 \text{ m}^3/\text{kg})(p, \text{ kg}/\text{m}^2)}$$

El incremento en el peso específico del material residual en el RS es importante 1) para determinar la cantidad real de residuos que se pueden colocar en un RS hasta un límite dado de pendiente y 2) para determinar el grado de asentamiento que se puede esperar en un RS después de su clausura.

Extensión del asentamiento. La extensión del asentamiento depende de la compactación inicial, de las características de los residuos, del grado de descomposición, de los efectos de la consolidación cuando el agua y el aire son expulsados fuera de los residuos compactados, y de la altura del RS lleno. En la Figura 41 se muestran datos representativos sobre el grado de asentamiento que se puede esperar en un RS en función de la compactación inicial. Se ha descubierto en varios estudios que aproximadamente el 90 por 100 del asentamiento final se produce durante los primeros cinco años. En climas secos la tasa de asentamiento normalmente es menor.

FIGURA 11.55

Peso específico de los residuos sólidos colocados en un RS en función del peso específico compactado inicial de los residuos y de la presión por sobrecarga.

FIGURA 11.56

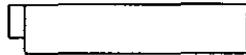
Asentamiento superficial de RS compactados.

10 SUPERVISION DE LA CALIDAD AMBIENTAL EN LOS RS

Se lleva a cabo la supervisión ambiental en los RS sanitarios Controlados para asegurar que ningún contaminante que pueda afectar a la salud pública y al ambiente circundante escape del RS. La supervisión necesaria se puede dividir en tres categorías generales: 1) supervisión de la zona aireada para gases y líquidos, 2) supervisión de las aguas subterráneas, y 3) supervisión de la calidad del aire. La supervisión ambiental implica el uso de ambos métodos, analítico y no analítico. Los métodos analíticos implican la recolección de una muestra para su análisis, normalmente en un laboratorio ajeno al RS. La instrumentación de un RS para la supervisión ambiental se ilustra en la Figura 42. Los métodos no analíticos son utilizados para detectar cambios físicos y químicos en el ambiente en función de una medición indirecta, tal como podría ser un cambio en una corriente eléctrica. En la Tabla 19 se listan los dispositivos representativos que se han utilizado para supervisar los RS.

Supervisión de la zona aireada

La zona aireada se define como aquella zona entre la superficie del suelo y el lugar donde se encuentra el agua subterránea permanente (Figura 43). Una característica importante de la zona aireada es que los espacios de los poros no están ocupados por agua, y que las pequeñas cantidades de agua que están presentes coexisten con el aire. La supervisión de la zona aireada en RS implica a líquidos y gases,



igura 42

Instrumentación de un RS para la recolección de datos para la supervisión ambiental. Hay que resaltar que toda la instrumentación que se muestra sera utilizada en un sol RS.

TABLA 19

Dispositivos representativos utilizados para controlar los gases y lixiviados de RSs

Tipo	Aplicación/descripción
Métodos de muestreo^a	
Calidad de aire Muestreador activo de aire Bolsa recogedora de aire Frasco evacuado Jeringuilla de gas	Recolección y análisis continuo de muestras de gas Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis
Agua subterránea Pozos de supervisión de profundidad sencilla y múltiple	Utilizados para recoger muestras de agua subterránea. Se utilizan los pozos múltiples de extracción para recoger muestras de diferentes profundidades.
Piezómetros	Utilizados para recoger muestras de agua subterránea
En RSs Piezómetros	Utilizados para recoger muestras de lixiviados. Los piezómetros pueden instalarse antes de iniciar el relleno del RS o después de completar el mismo.
Zona aireada Lisímetro de recolección	Utilizado para recoger muestras de líquidos debajo de los recubrimientos de RS
Sondas de gas en el suelo; de profundidad sencilla y múltiple	Utilizadas para supervisar los gases de RS y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en el suelo. Se puede analizar el gas in situ utilizando un cromatógrafo de gas portátil o ensayado en el laboratorio después de absorberlo en carbón vegetal.
Lisímetro de succión	Utilizado para obtener muestras líquidas de la zona aireada
Métodos no de muestreo^b	
Agua subterránea Celdas de conductividad	Utilizadas para supervisar cambios en la conductividad de las aguas subterráneas. Las celdas de conductividad a menudo están localizadas en o cerca de los pozos de supervisión.
En RSs Piezómetros Bloques de temperatura	Utilizados para medir la profundidad del lixiviado en los RS Utilizados para medir la temperatura
Sondas de temperatura	Utilizadas para medir la temperatura
Zona aireada Sondas eléctricas	Utilizadas para determinar la salinidad de la zona aireada. Se instala un equipo de cuatro sondas para poder medir la conductividad del suelo.

Bloques de resistencia eléctrica	Utilizados para medir cambios en el contenido de agua de la zona aireada- Se instalan en el suelo bloques de electrodos incrustados en material poroso. Las propiedades eléctricas de los bloques varían según los cambios en el contenido de agua de la zona aireada.
Sondas de atenuación de rayos gamma	Utilizadas para detectar cambios en el contenido de humedad de la zona aireada. Basado en la atenuación de la transmisión y dispersión de los rayos gamma. En el método de transmisión, se instalan dos pozos separados por una distancia conocida. Se utiliza un solo pozo en el método de dispersión. Normalmente limitado a pequeñas profundidades por las dificultades en la instalación de pozos paralelos.
Sensores de disipación de calor	Utilizados para supervisar el contenido de agua de la zona aireada mediante la medición de la tasa de disipación de calor desde el bloque hasta el suelo alrededor.
Medidor neutrónico de humedad	Utilizado para obtener un perfil del contenido de humedad del suelo debajo del RS. El medidor puede instalarse debajo del RS o moverse a través de una perforación al lado del RS.
Sensores de salinidad	Utilizados para supervisar la salinidad del suelo. Se instalan en el suelo electrodos unidos a un recipiente cerámico.
Tensiómetros	Utilizados para medir el potencial matriz del suelo. Los tensiómetros miden la presión negativa (presión capilar) que existe en el suelo no saturado.
Psicrómetros termocupla	Utilizados para detectar cambios en el contenido de humedad. Su operación se basa en el enfriamiento de una unión termocople por el efecto Peltier. Ampolleta húmeda y punto de condensación. El método de punto de condensación se utiliza más frecuentemente en la supervisión de RS.
Reflectometría de dominio de tiempo (TDR)	Basado en la diferencia de las propiedades dieléctricas del agua y del suelo. Se mide una anchura de banda de frecuencia ancha y de longitud de pulsaciones corta que son sensibles a las propiedades eléctricas de alta frecuencia del material.
Dispositivos de propagación de ondas	El uso de las propiedades de propagación de las ondas sísmicas y acústicas para la detección de escapes. En la técnica de ondas sísmicas, se utiliza la diferencia del tiempo de viaje de las ondas Rayleigh entre la fuente y los geófonos para detectar escapes. En la técnica de supervisión por emisiones acústicas (SEA), se utilizan las ondas de sonido generadas por el fluido de agua de un escape para detectar los escapes.

^a Métodos implicando la recolección de muestras para un análisis posterior en laboratorio.

^b Métodos implicando mediciones físicas y eléctricas.

FIGURA 43

Clasificación del agua subsuperficial. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

Supervisión de líquidos en la zona aireada. La supervisión de los líquidos en la zona aireada es necesaria para detectar escapes de lixiviados desde el fondo de] RS. En la zona aireada, la humedad mantenida en los intersticios de las partículas del suelo o dentro de la roca porosa siempre se mantiene a presiones por debajo de la presión atmosférica. Para eliminar la humedad es necesario desarrollar una presión negativa o un vacío para arrastrar la humedad fuera de las partículas del suelo. Como hay que aplicar una succión para arrastrar la humedad fuera de la zona aireada, no se pueden utilizar pozos convencionales u otras cavidades abiertas para obtener muestras en esta zona. Los dispositivos de muestreo utilizados para la extracción de muestras en la zona no saturada se llaman lisímetros de succión. Las tres clases de lisímetros más comúnmente utilizados son: 1) de taza cerámica, 2) de fibra hueca, y 3) de filtro de membrana.

El dispositivo que generalmente se utiliza para obtener muestras de humedad en la zona aireada es la taza cerámica (Figura 44), que consiste en una taza porosa o anillo hecho de material cerámico que está acoplado a una sección corta de tubería no porosa (por ejemplo, PVC). Cuando se coloca en el suelo, como tiene poros se convierte en una extensión del espacio poroso del suelo. La humedad del suelo es succionada a través del elemento poroso de cerámica mediante la aplicación de vacío. Cuando se ha recogido una

FIGURA 44

Lisímetro de succión de taza porosa para la recolección de muestras líquidas de la zona aireada. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión de Residuos.)

cantidad suficiente de agua en el muestreador, la muestra recolección se lleva a la superficie a través de un tubo estrecho mediante la aplicación de vacío o se empuja hacia arriba mediante presión de aire.

Supervisión del gas en la zona aireada. La supervisión de los gases en la zona aireada es necesaria para detectar el movimiento lateral de los gases del RS. En la Figura 45 se muestra un ejemplo típico de una sonda para la supervisión del gas en la zona aireada. En muchos sistemas de control se recogen las muestras del gas en múltiples profundidades dentro de la zona aireada.

FIGURA 45

Sonda para el control del gas en la zona aireada. (Cortesía de Waste anagement, Inc.)

Supervisión de aguas subterráneas

La supervisión de las aguas subterráneas es necesaria para detectar cambios en la calidad del agua que puedan producirse a causa del escape de los lixiviados y de los gases del RS. Se necesitan dos tipos de pozos -de pendientes positiva y negativa- para detectar cualquier contaminación del adufero subterráneo causado por el lixiviado del RS. En la Figura 46 se ilustra un ejemplo de un pozo utilizado para controlar las aguas subterráneas. Para obtener una muestra representativa, se debe eliminar el líquido dentro de la tubería de los sistemas permanentes para la recolección de muestras antes de recoger la muestra.

FIGURA 46

Pozo típico para el control de aguas subterráneas. (Cortesía de Waste anagement,

Control de la calidad del aire del RS

El control de la calidad del aire de los RS implica: 1) el control de la calidad del aire ambiental, en y alrededor del entorno del RS; 2) el control de los gases del RS extraídos

del RS, y 3) el control de los gases de salida procedentes de instalaciones para el procesamiento o tratamiento del gas.

Control de la calidad del aire ambiental. Se controla la calidad del aire ambiental en las zonas del RS para detectar el movimiento de contaminantes gaseosos en el contorno del RS. Se pueden dividir los dispositivos para el muestreo del gas en tres categorías: 1) pasivos, 2) de extracción, y 3) activos. El muestreo pasivo implica la recolección de una muestra del gas mediante el paso de una corriente de gas a través de un dispositivo de recolección en el que se separan los contaminantes contenidos en la corriente de gas para su análisis subsiguiente. El muestreo pasivo, comúnmente utilizado en el pasado, apenas se utiliza actualmente. Las muestras de extracción se recogen utilizando un frasco vacío, una jeringuilla de gas, o una bolsa para la recolección de aire elaborada con un material sintético (Figura 47). Un muestreo activo implica la recolección y el análisis de una corriente continua de gas.

Control del gas extraído del RS. Se controla el gas del RS para valorar la composición del gas, y para determinar la presencia de oligoconstituyentes que puedan ocasionar un riesgo ambiental o para la salud pública.

FIGURA 47

Dispositivo para el muestreo de muestras de extracción de aire en RS.

energía para determinar si cumplen los requisitos locales de control de contaminación aérea. Se ha utilizado el muestreo de extracción y el continuo para este propósito.

11.0 DISEÑO Y TRAZADO PRELIMINAR DE RS

Una vez que se han reducido el número de localizaciones potenciales de RS basándose en el análisis de la información preliminar disponible, normalmente será necesaria la preparación de un informe preliminar sobre la ingeniería del diseño en cada lugar para valorar los costos asociados con la preparación del lugar para el vertido, la colocación de los residuos sólidos y la clausura del lugar una vez finalizadas las operaciones de relleno. El informe preliminar sobre la ingeniería del diseño se diferencia de la evaluación completa requerida para la selección final del lugar en que ésta incluye consideraciones ambientales.

Entre los temas importantes que deben considerarse en un informe sobre la ingeniería del diseño se encuentran, aunque no necesariamente en ese orden, los siguientes: 1) trazado de la zona del RS, 2) tipos de residuos que hay que manipular, 3) necesidad de una estación de transferencia, 4) estimación de la capacidad del RS, 5) evaluación de la geología e hidrología del entorno, 6) selección de instalaciones para el control del lixiviado, 7) selección de instalaciones para controlar el gas del RS, 8) diseño de instalaciones para el drenaje superficial, 9) consideraciones de estética, 10) instalaciones de supervisión, 11) determinación de los requisitos de equipamiento, y 12) desarrollo de un plan de operaciones. En el siguiente capítulo se argumenta el desarrollo de un plan de operaciones para un RS. En el capítulo 13 se trata la clausura y el mantenimiento postclausura. En la Tabla 11.23 se presentan los factores importantes que hay que tener en cuenta en el diseño de RS. Durante el desarrollo del informe del diseño de ingeniería, se debe prestar una atención especial al uso final o usos finales que se van a dar al lugar completado. El terreno reservado para oficinas administrativas, edificios y apartamentos deberían llenarse solamente con escombros y debería sellarse eficazmente la entrada de gases.

Trazado de zonas para RS

En la planeación de una zona para RS, se debe determinar lo siguiente: 1) carreteras de acceso; 2) zonas para guardar el equipamiento; 3) básculas, si se usan; 4) espacio

para oficinas; 5) localización de la estación de transferencia, si se utiliza; 6) lugares para almacenar y/o evacuar residuos peligrosos; 7) zonas para el procesamiento de residuos (por ejemplo, compostaje); 8) definición del área del RS y de almacenamiento para el material de recubrimiento; 9) instalaciones de drenaje; 10) localización de las instalaciones para

TABLA 11.23

Factores importantes que hay que tener en cuenta en el diseño de RS

Factores	Observaciones
Acceso	Carreteras de acceso al RS pavimentadas para cualquier clima, carreteras temporales a las zonas de descarga.
Arca de terreno	El área debería ser suficientemente grande como para contener todos los residuos de una comunidad durante un mínimo de cinco años, pero preferiblemente 10 a 25 años; también deben incluirse zonas o franjas de separación
Método de vertido	El método de vertido variará según el terreno y la recubrimiento disponible; los métodos más comunes son: celda/zanja excavada, área, cañón.
Características del RS lleno	Las pendientes finales del RS, 3/1; altura de terraza, si se utiliza, 15-23 m; pendiente de recubrimiento final del RS, 3-6 por 100.
Drenaje superficial	Instalar conductos de drenaje para desviar el escurrimiento superficial; mantener la pendiente en un 3-6 por 100 en la recubrimiento terminada del RS para prevenir el estancamiento; desarrollar un plan para desviar las aguas torrenciales de las porciones recubiertas, pero no utilizadas, del RS.
Material de cobertura intermedia	Maximizar el uso de los materiales del suelo local; también pueden utilizarse otros materiales como compost producido a partir de residuos de jardín y RSM para maximizar la capacidad del RS; las relaciones típicas residuos/cubrimiento varían desde 5 a 1 hasta 10 a 1.
Cobertura final	Utilizar un diseño multilaminar (Figura 58); pendiente de la recubrimiento final del RS, 3-6 por 100.
Recubrimiento de RS	Capa de arcilla sencilla (0,6-1,3 m) o diseño multilaminar incorporando el uso de una geomembrana. Pendiente transversal para los sistemas de recolección de lixiviados tipo terraza, 1 a 5 por 100; distancia máxima de flujo sobre la terraza, 30 m; pendiente de los conductos de drenaje, 0,5 a 1,0 por 100. Pendiente para el sistema de recolección del lixiviado, tipo tubería, 1 a 2 por 100; tamaño de la tubería perforada, 10 cm; espaciamiento de la tubería, 6 m.
Diseño y construcción de celdas	Los residuos diarios deberían formar una celda; cubrirse al final del día con 15 cm de suelo u otro material apto; anchura típica de celda, 3-9 m; altura típica de nivel,

	incluyendo recubrimiento intermedia, 3-4,2 m; pendiente de los frentes de trabajo, 2:1 hasta 3:1.
Protección de aguas subterráneas	Desviar cualquier manantial subterráneo; si se precisa, instalar drenajes perimétricos, sistema de pozos u otras medidas de control.
Gestión del gas de RS	Desarrollar un plan de gestión del gas de RS incluyendo pozos de extracción, sistema de recolección con cabecera, instalaciones para la recolección de condensado, las instalaciones de extracción, y las instalaciones de quemado y/o instalaciones para la producción de energía. El vacío funcionando en la cabeza del pozo, 30 cm de agua
Recolección de lixiviado	Determinar las tasas de flujo máximas de lixiviados y elegir el tamaño de la tubería y/o zanjas de recolección de lixiviados; seleccionar el tamaño de las instalaciones para bombear el lixiviado; seleccionar materiales de la tubería de recolección para resistir las presiones estáticas correspondientes a la altura máxima del RS.
Tratamiento de lixiviados	Basándose en las cantidades estimadas de lixiviados y en las condiciones ambientales locales, seleccionar los procesos de tratamiento apropiados (Tabla 15),
Requisitos ambientales	Instalaciones de supervisión de gas y líquido de la zona aireada; instalaciones de su rvisión de aguas subterráneas pendiente arriba y abajo; localizar estaciones de supervisión del aire ambiental.
Requisitos equipamiento	de El número y el tipo de equipamiento variará según el tipo de RS y la capacidad del RS.
Prevención incendios	de Agua <i>in situ</i> ; si no es potable, debe señalarse claramente en las salidas, la separación correcta de las celdas previene la expansión del incendio a través de los niveles

la gestión del gas de RS; 11) localización de las instalaciones para el tratamiento del lixiviado, si es necesario; 12) localización de los pozos de supervisión; 13) plantaciones. En la Figura 48 se muestra un trazado típico para una zona de RS. Como el trazado de la zona es específico del lugar, la Figura 48 tiene solamente la intención de servir como guía. Sin embargo, las cuestiones identificadas en la Figura 11.63 pueden utilizarse como una lista de chequeo de las cuestiones que hay que afrontar en el trazado preliminar de un RS.

FIGURA 48

Trazado típico de un RS.

Tipos de residuo

El conocimiento de los tipos de residuos que hay que manipular es importante en el diseño y trazado de un RS, especialmente si están implicados residuos especiales. Normalmente es mejor desarrollar lugares separados o mono RS para la evacuación de residuos singulares y especiales, como puede ser el asbesto, porque en la mayoría de los casos será necesaria una preparación especial del lugar antes de poder verter los residuos. También son importantes los costos de evacuación asociados, y es un despilfarro utilizar esta capacidad del RS para residuos que no necesiten precauciones especiales. Si van a manipularse cantidades importantes de residuos de demolición, quizás se puedan usar en la estabilización del terraplén.

Necesidad de una estación de transferencia

Por la preocupación en los temas de seguridad y por las muchas restricciones que controlan el funcionamiento de RS, muchos operadores de RS han construido estaciones de transferencia en la zona del RS para la descarga de residuos, llevados al lugar por particulares y pequeños transportistas. Tener una instalación separada para la transferencia reduce significativamente el potencial de accidentes en el frente de trabajo del RS. También se utilizan las instalaciones de transferencia para la recuperación de materiales reciclables. Normalmente se vacían los materiales residuales en dos grandes trailers de transferencia que se llevan al lugar de evacuación, se vacían y se devuelven a la estación de transferencia. La necesidad de una estación de transferencia dependerá de las características físicas y del funcionamiento del RS, y también de si se dispone de un lugar separado donde el público pueda desechar residuos de una forma segura.

Estimación de la capacidad del RS

Previamente a este capítulo se presentó un método alternativo para determinar las necesidades de terreno del RS (Ejemplo 1). En este capítulo son considerados: 1) el método utilizado para estimar el volumen nominal del lugar, 2) el impacto de la compactabilidad de los componentes individuales de los residuos sólidos, 3) el impacto

del cubrimiento diaria, y 4) el impacto de la descomposición de los residuos y de la altura de sobrecarga.

Determinación del volumen nominal del RS. Se determina la capacidad volumétrica nominal de un lugar propuesto para un RS trazando primero varias configuraciones diferentes para el RS, teniendo en cuenta criterios apropiados de diseño (Figura 49). El siguiente paso es determinar el área superficial de cada nivel. Se determina el volumen nominal del RS multiplicando el área media entre dos contornos adyacentes por la altura del nivel, y sumando el volumen de los niveles sucesivos. Si va a excavarse el material de cubrimiento en la zona, entonces el volumen calculado corresponde al volumen de residuos sólidos que se puede colocar en la zona. Si hay que importar el material de cubrimiento, entonces hay que reducir la capacidad calculada por un factor para tener en cuenta el volumen ocupado por el material de cubrimiento. Por ejemplo, si se adopta una relación de cubrimiento/residuos de 1 a 5, entonces la capacidad obtenida debe multiplicarse por un factor de 0,833 (5/6).

FIGURA 49

Trazado de un RS típico con el propósito de estimar la capacidad volumétrica de una zona propuesta, teniendo en cuenta distancias de contorno (30 m), pendientes del RS lleno (3 a 1) y la altura de un nivel (3 m).

Se utiliza la capacidad volumétrica nominal del RS como una estimación preliminar de la capacidad del RS. La capacidad real total del RS para aceptar residuos basándose en el peso dependerá del peso específico inicial de los residuos cuando son colocados en el RS, de la compactación posterior de los residuos debida a la presión por sobrecarga, y de la pérdida de masa como resultado de la descomposición biológica. En la siguiente argumentación se debaten los impactos de estos factores sobre la capacidad del RS.

impacto de la compactabilidad de los componentes de los residuos sólidos. La densidad inicial de los residuos sólidos colocados en un RS varía según el método de explotación del RS, la compactabilidad de los componentes individuales de los residuos sólidos, y la distribución porcentual de los componentes. Si se esparcen los residuos colocados en el RS en capas finas y se compactan contra una superficie inclinada se puede conseguir un alto grado de compactación. Con una compactación mínima, el peso específico inicial será algo menor que el peso específico compactado en un vehículo de recolección. Por lo general, el peso específico inicial de los residuos sólidos colocados en un RS variará de 326 a 712 kg/m³, según el grado de compactación inicial que se ha dado a los residuos. La desviación de materiales residuales antes de su evacuación no solamente reducirá las necesidades de capacidad en los RS, sino que también afectará a la compactabilidad global de los materiales residuales restantes. En la Tabla 11.24 se presentan datos típicos de compactabilidad para los componentes encontrados en los RSM. Se dan los factores de reducción en volumen para RS compactados de una forma normal y para RS bien compactados.

TABLA 21

Factores típicos de compactación para varios componentes de residuos sólidos colocados en RS

Componente	Factores de compactación para componentes en RS ^a		
	Rango	Compactación normal	Bien compactado
Orgánicos			
Residuos de comida	0,2-0,5	0,35	0,33
Papel	0,1-0,4	0,2	0,15
Cartón	0,1-0,4	0,25	0,18
Plásticos	0,1-0,2	0,15	0,10
Textiles	0,1-0,4	0,18	0,15
Goma	0,2-0,4	0,3	0,3
Cuero	0,2-0,4	0,3	0,3
Podas de jardín	0,1-0,5	0,25	0,2
Madera	0,2-0,4	0,3	0,3
Inorgánicos			

Vidrio	0,3-0,9	0,6	0,4
Latas de hojalata	0,1-0,3	0,18	0,15
Metales no férreos	0,1-0,3	0,18	0,15
Metales férreos	0,2-0,6	0,35	0,3
Suciedad, cenizas, ladrillos, etc.	0,6-1,0	0,85	0,75

^a Factor de compactación = V_f / V_i , donde V_f = volumen final de los residuos sólidos después de la compactación y V_i = volumen inicial de los residuos sólidos antes de la compactación.

Ejemplo 11.5. Determinación de la densidad de los residuos sólidos compactados, sin y con detracción de residuos. Determinar el peso específico en un RS bien compactado para residuos sólidos Determinar también el impacto de un programa de recuperación de recursos sobre las necesidades de terreno de un RS en el cual se recupera el 50 por 100 del papel y el 80 por 100 del vidrio y de las latas de hojalata. Suponer que los residuos tienen las características presentadas en la Tabla 3.4.

Impacto del material de cobertura. El material de cobertura, normalmente tierra, se incorpora al RS en cada etapa de construcción. Una cubrimiento diario, de 15 a 30 cm de tierra, se aplica en los frentes de trabajo del RS diariamente al final de la operación, para controlar vectores sanitarios como ratas e insectos, y para no permitir el vuelo de materiales. La cobertura intermedia es una capa más espesa que el material de cobertura diario, que se aplica en las zonas del RS que no se van a trabajar durante algún tiempo. Las coberturas finales normalmente tienen de 1 a 2 metros de espesor e incluyen una capa de arcilla compactada junto con otras capas para aumentar el drenaje y soportar la vegetación. La cantidad del material de cobertura necesario para el funcionamiento del RS es un factor importante en la determinación de la capacidad del RS. Normalmente las necesidades de cobertura diaria e intermedia son expresadas como una relación residuos/suelo, definida como el volumen de residuos depositados por unidad de volumen de cobertura proporcionado. Normalmente, las relaciones residuos/suelo varían desde 4:1 y 10:1.

Se puede estimar la relación residuos/suelo considerando la geometría de una celda de RS. Las celdas son más o menos paralelepípedas, con material de cobertura en tres de los seis lados. El área superficial de estos frentes depende de la pendiente de los frentes de trabajo del RS, del volumen de la celda, de la altura del nivel y de la anchura de la terraza en la que se colocan los residuos. Las pendientes de los frentes de trabajo normalmente están entre 2:1 y 3: 1. Se puede calcular el volumen de la celda dividiendo la masa media de] material depositado cada día por la densidad media del nivel. Se debería seleccionar la altura del nivel y la anchura de la celda para proporcionar la menor relación residuos/suelo aceptable. El volumen de la cobertura diaria debería calcularse para diferentes alturas del nivel y diferentes anchuras de la terraza, y para tasas de colocación de residuos máximas y mínimas. En el Ejemplo siguiente se ilustra el cálculo de la relación residuos/suelo

Ejemplo Determinación de la relación residuos/suelo. Determinar la relación residuos/material de cubrimiento (base de volumen) en función del peso específico compactado inicial para un flujo de residuos sólidos de 70 t diarias que serán colocados en niveles de 3 m con una anchura de celda de 4,6 m. La pendiente del frente de trabajo es 3:1. Suponer que inicialmente se compactan los residuos hasta un peso específico de 356, 475 y 593 kg/m³. El espesor de la cubrimiento diaria es de 15 cm.

Impacto de la descomposición de residuos y de la altura de sobrecarga. La pérdida de masa por la descomposición biológica provoca una pérdida de volumen, disponible para ser rellenada con nuevos residuos. En la valoración preliminar de la capacidad de la zona, solamente se considera la compactación por sobrecarga. En las últimas etapas del diseño de RS, se debería considerar la pérdida por descomposición del material en el RS. Se puede estimar el peso específico del material vertido utilizando la Ecuación dada anteriormente.

Evaluación de la geología e hidrología local

Para evaluar las características geológicas e hidrológicas de un lugar que se está considerando para un RS, se precisa la obtención de testigos de perforación. Se deberían hacer suficientes perforaciones para establecer las formaciones geológicas por debajo del lugar propuesto desde la superficie hasta (e incluso) las porciones superiores del lecho de roca u otras capas confinantes (Figura 50). En el mismo momento debería determinarse la profundidad hasta el nivel de agua superficial para los niveles hidrológicos piezométricos en acuíferos de lecho de roca o confinados. Se procede a utilizar la información conseguida 1) para determinar la dirección general en que se mueve el agua subterránea por debajo de la zona, 2) para determinar si algún acuífero inconsolidado o lecho de roca está en contacto hidráulico directo en la zona del RS propuesto, y 3) para determinar el tipo de sistema de recubrimiento que será necesario.

Selección de las instalaciones para la gestión de los lixiviados

Las principales instalaciones para la gestión de los lixiviados que son necesarias en el diseño de un RS incluyen el aislamiento del RS y el sistema para la recolección de los lixiviados, además de las instalaciones para el tratamiento de los mismos.

Recubrimiento del RS e instalaciones para la recolección de lixiviados. El tipo de aislamiento utilizado dependerá de la geología e hidrogeología local. Por lo general, deberían localizarse las zonas para RS donde haya poca o ninguna posibilidad de contaminar suministros de agua potable. Para asegurar al público que el lixiviado no contaminará las aguas subterráneas, actualmente se requiere la utilización de algún tipo de aislamiento para todos los RS. En la Figura 29 se ilustran diseños de aislamientos comúnmente utilizados. En las Figuras 32, 33 y 34 se ilustran instalaciones típicas para la recolección de lixiviados. La tendencia actual se dirige hacia el uso de aislamientos mixtos que incluyen geomembrana y capa de arcilla. En zonas extremadamente áridas donde no exista ninguna posibilidad de contaminar aguas subterráneas, quizás sería posible desarrollar un RS sin aislamiento. No obstante, el uso de un sistema de aislamiento es un factor crítico en la localización de nuevos RS. Es más, el coste

relativo de un sistema de aislamiento no es alto si se consideran los beneficios potenciales ambientales. Para considerar el tamaño necesario de las instalaciones para la recolección y el tratamiento de lixiviados, se debe estimar la cantidad del lixiviado, utilizando los métodos descritos en el capítulo 7.0.

FIGURA 50

Registro de perforación de un pozo perforado en la zona propuesta para el RS.

Instalaciones para el tratamiento de lixiviados. Como se destacó en el capítulo 7.0, las alternativas más comunes que se han utilizado para gestionar los lixiviados recogidos en los RS incluyen: 1) reciclaje de los lixiviados, 2) evaporación de los lixiviados, 3) tratamiento seguido de evaporación, y 4) descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales. La opción escogida dependerá de las condiciones locales.

Selección de instalaciones para controlar el gas

Ya que la emisión incontrolado del gas de RS, especialmente del metano, contribuye al efecto invernadero, y como el gas del RS puede migrar lateralmente y potencialmente causar explosiones o dañar a la vegetación y los árboles, la mayoría de los nuevos RS están equipados con instalaciones para la recolección y el tratamiento del gas. Para determinar el tamaño necesario de las instalaciones para la recolección y el procesamiento del gas, primero se debe estimar la cantidad de gas en el RS utilizando los métodos descritos en el capítulo 6. Como la tasa de producción del gas varía según los procedimientos de explotación (por ejemplo, con o sin el reciclaje de lixiviados) deberían analizarse varias tasas. La decisión de utilizar pozos de recuperación horizontales o verticales depende del diseño y de la capacidad del RS. La decisión de quemar el gas o recuperar la energía del gas del RS se determina por la capacidad de la zona del RS y por la posibilidad de vender la energía producida a partir de la conversión del gas del RS en energía. En muchos RS pequeños localizados en zonas alejadas, normalmente no se utiliza equipamiento para la recolección del gas.

Selección de la configuración de la cobertura del RS

Como se ha argumentado anteriormente, una cobertura de RS normalmente está conformada por varias capas, cada una con una función específica (Figura 38). El uso de la geomembrana como capa barrera es favorable para la mayoría de los diseñadores de RS, con el fin de limitar la entrada de aguas superficiales y controlar la emisión de gases de RS. La configuración específica de la cobertura elegida dependerá de la localización del RS y de las condiciones climatológicas. Por ejemplo, para tener en cuenta la restauración, algunos diseñadores están a favor del uso de una capa de suelo profunda. Para asegurar la eliminación rápida de las aguas de lluvia en el RS lleno y para evitar la formación de charcos, el cubrimiento final debe tener una inclinación de aproximadamente un 3 a un 5 por 100.

Instalaciones para el drenaje de aguas superficiales

Un paso importante en el diseño de un RS es desarrollar un plan global de drenaje para la zona que presente localizaciones de desagües, alcantarillas, canales y drenajes subsuperficiales mientras se procede a la operación de relleno. Según la localización y la configuración del RS, y la capacidad de las cuencas naturales de drenaje, quizás sea necesario instalar un estanque para retener aguas pluviales.

Instalaciones para la supervisión ambiental

En los nuevos RS son obligatorias las instalaciones para la supervisión de 1) los gases y líquidos en la zona aireada, 2) la calidad de las aguas subterráneas río arriba y abajo de la zona del RS, y 3) la calidad del aire en los contornos del RS y de las instalaciones de procesamiento (por ejemplo, quemadores). El número específico de instalaciones de supervisión dependerá de la configuración y del tamaño del RS, y de las necesidades de las agencias locales para el control de la contaminación del aire y del agua.

Consideraciones de estética en el diseño

Las consideraciones de estética en el diseño están relacionadas con la minimización del impacto de la operación de vertido tanto sobre los residentes cercanos como sobre el público que pueda acercarse hasta el RS.

Protección en zonas de vertido. La protección, en las operaciones diarias de vertido, de las calles cercanas y de los residentes con bermas, plantaciones y otras medidas de paisajismo es uno de los ejemplos más importantes de una consideración estética del diseño. La protección de las zonas activas del RS debe incorporarse en el diseño y trazado preliminar del RS.

Control de pájaros. La presencia de pájaros en la zona del RS no solamente es irritante, sino que también puede causar graves problemas si el

FIGURA 11.67

Consideraciones de estética en el diseño de RS: (a) vista de un RS con paisaje en el que las operaciones de vertido no son visibles desde la carretera general de al lado, (b) sistema de cables elevados utilizados para controlar gaviotas en los RS, (c) pantalla de alambres utilizada para controlar el vuelo de plásticos y papeles, y (d) cobertura diaria utilizada para controlar vectores sanitarios en el RS.

RS está localizado cerca de un aeropuerto. Las técnicas que se han utilizado para controlar los pájaros en las zonas de RS incluyen el uso de productores de ruidos, el uso de grabaciones de sonidos producidos por aves de presa, y el uso de cables elevados. El uso de cables elevados para mantener los pájaros fuera de los pantanos y de los estanques de peces viene de principios de los años 30. Los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles fueron los pioneros en el uso de cables elevados para controlar gaviotas en RS a principios de los años 70. Como las gaviotas descienden formando círculos cuando aterrizan, parece que los cables interfieren en el mecanismo

de orientación de los pájaros. Normalmente los postes se espacian de 15 a 25 m con tramos de línea de 120 a 400 m. Si se cruzan los cables mejora la eficacia del sistema. Normalmente se utiliza hilo de pescar de monofilamento de 45 kg de resistencia, aunque también se ha utilizado cable de acero inoxidable.

Control del vuelo de materiales y polvo. Según la localización, el vuelo de papeles, plásticos y de otros residuos puede ser problemático en algunos RS. La solución más común es utilizar pantallas portátiles cerca del frente de trabajo del RS. Para evitar problemas con vectores sanitarios, hay que quitar diariamente el material que se ha acumulado en las pantallas. Se controla el polvo mediante el riego con agua de las carreteras de acceso e internas.

Control de plagas y vectores sanitarios. Los principales vectores sanitarios en el diseño y funcionamiento de los RS son los insectos, como mosquitos y moscas, y los roedores, tales como ratas y otros animales de madriguera. Se controlan las moscas y los mosquitos con cubrimiento diario y eliminando aguas estancadas. Estas últimas pueden ser problemáticas en zonas de almacenamiento de bienes de línea blanca y de neumáticos. El uso de instalaciones cubiertas para el almacenamiento de estos materiales eliminaría la mayoría de los problemas. Se controlan las ratas y otros animales de madriguera mediante el cubrimiento diario.

Necesidades de equipamiento

El tipo, tamaño y cantidad de equipamiento dependerá del tamaño del RS y del método de explotación. El equipamiento que se ha utilizado en RS incluye: tractores de orugas, palas de arrastre, apisonadoras, dragalinas y motoniveladoras (ver Figuras 51 y 52). De éstos, los tractores de orugas son los más utilizados. Los tractores correctamente equipados pueden utilizarse para llevar a cabo todas las operaciones necesarias dentro de un RS sanitario controlado, incluyendo: la nivelación, compactación, cubrimiento, realización de zanjas, e incluso el transporte de los materiales de cobertura. En la

Tabla 22 se resumen los datos generalizados sobre el rendimiento del equipamiento en un RS.

FIGURA 5

Maquinaria típica utilizada en RS para la colocación y cobertura de residuos.

TABLA 22

Características del rendimiento de la maquinaria para RS

Equipamiento	Residuos sólidos			Material de cubrimiento		
	Esparcimiento	Compactación	Excavación	Esparcimiento	Compactación	Transporte
Tractor de orugas	E ^c	B	E	E	B	NA
Compactador con ruedas	E	E	p	R-B	E	NA
Pala de arrastre	NA	NA	B	E	NA	E

^b Base de evaluación: suelo fácil de trabajar y distancia de transporte del material de cubrimiento mayor de 300 m,

^c Clave: E, excelente-, B, bueno; R, regular; P, pobre; NA, no aplicable.

El tamaño y la cantidad de máquinas dependerá principalmente del tamaño del RS. También las condiciones locales influirán sobre el tamaño de la maquinaria. En la Tabla 23 se presentan las necesidades de maquinaria, que se pueden utilizar como guía en la operación de RS.

FIGURA 52

Vistas de máquinas utilizadas en RS: (a) tractor de oruga con hoja de empuje, (b) tractor de oruga con hoja para basuras, (c) apisonadora con ruedas macizas de acero con hoja para basuras -el motor en esta unidad está enfriado por aire-, (d) pala de arrastre autocargadora, (e) cisterna con agua para el control de polvo, y (f) dragalina.

TABLA 11.26

Necesidades típicas de maquinaria para RS sanitarios controlados

Equipamiento					
Población aproximada	Residuos diarios t	Número	Tipo	Peso del equipamiento, kg	Accesorio ^a
0-20.000	0-50	1	Tractor orugas	4.500-13.500	Hoja de empuje Pala frontal (0,75-1,5 m ³)
20.000-50.000	50-150	1	Tractor orugas	13.500-27.000	Hoja para residuos Hoja de empuje Pala frontal 1,5-3 m ³ Empujador de cuchara
50.000-100.000	150-300	1-2	Tractor orugas	13.500 +	Placa para residuos Placa de empuje Pala frontal(1,5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Pala de arrastre o draga ^b		
		1	Camión cisterna		
> 100 000	300 ^c	1-2	Tractor orugas	21.000+	Placa de empuje Pala frontal (1,5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Compactador con ruedas de acero		
		1	Pala de arrastre o draga b		
		1	Camión cisterna		
		- ^a	Nivelador de carreteras		

^a Opcional, depende de necesidades individuales,

^b La elección entre una pala de arrastre o una draga dependerá de las condiciones locales.

^c Para cada incremento de 500 t hay que añadir una unidad más de cada pieza de equipamiento.

12.0 EXPLOTACION DE RS

El desarrollo de un horario de explotación laborable, un plan de relleno para los residuos sólidos, archivos de explotación e información de facturación del RS, un plan para la inspección de cargamentos de residuos peligrosos, y planes de seguridad contra accidentes y la seguridad en la zona son todos los elementos importantes dentro de un plan de explotación del RS.

Horarios para la explotación de RS

Los factores que deben considerarse en el desarrollo de horarios de explotación incluyen: 1) secuencias de llegada para vehículos de recolección, 2) distribución del tráfico en la zona, 3) secuencia temporal para seguir las operaciones de relleno, 4) efectos del viento y de otras condiciones climatológicas, y 5) acceso comercial y del público. Por ejemplo, por el tráfico congestionado de camiones por la mañana temprano, quizás sea necesario restringir el acceso al público a la zona hasta más entrada la mañana.

Plan de vertido de residuos sólidos

Una vez establecido el trazado general de la zona del RS será necesario seleccionar el método de colocación que va a utilizarse y trazar y diseñar las celdas individuales para residuos sólidos. El método específico de vertido dependerá de las características del lugar, tales como la cantidad de material de cobertura disponible, la topografía, y la hidrología y geología local. En el capítulo 4 se presentaron detalles sobre los diversos métodos de relleno. Para valorar los planes de desarrollo en el futuro, será necesario preparar un plan detallado del trazado de cada celda de residuos sólidos. La secuencia del vertido debería establecerse para que las operaciones de vertido no se paraliquen por el mal tiempo o por condiciones adversas en el invierno. En la Figura 53 se muestra un ejemplo típico de tal plan.

Archivos de explotación del RS

Para determinar las cantidades de residuos que son evacuadas se necesitarán una báscula en la entrada y una caseta. La caseta sería utilizada por el personal responsable del pesaje de los camiones que están entrando y saliendo. La sofisticación de las instalaciones de pesaje dependerá del número de vehículos que deben procesarse por hora y del tamaño del RS. (Por ejemplo, en algunos RS grandes, las instalaciones de pesaje están equipadas con detectores de radiación para descubrir la presencia de sustancias radiactivas en los residuos entrantes). Si se conoce el peso de los residuos entregados, entonces se puede determinar la cantidad *in situ* de residuos,

TABLA 11.27

Factores importantes que deben considerarse en la explotación de RS

Factores	Observaciones
Días y horas de explotación	La práctica normal es 5 a 6 días por semana y 8 a 10 h/d
Comunicaciones	Teléfono para emergencias
Instalaciones para empleados	Cuartos de descanso y agua potable
Mantenimiento de equipamiento	Debería proporcionarse una construcción cubierta para el mantenimiento en la zona de trabajo
Control de la basura caída	Utilizar vallas móviles en las zonas de descarga; los operarios deberían recoger las basuras caídas por lo menos una vez al mes o cuando sea necesario
Plan de explotación	Con o sin la coevacuación de lodos de plantas de tratamiento y la recuperación de gas
Archivos de explotación	Tonelaje, transacciones y facturación si se cobra una tarifa de evacuación
Rebusca o triaje (pepena)	No se puede ir buscando cosas en los residuos; si acaso debería producirse fuera de la zona de descarga
Básculas	Esenciales para mantener archivos si los camiones de recolección entregan residuos, capacidad hasta 48 t
Seguridad	Proporcionar portones con cerradura y vallas, iluminación de zonas sensibles
Esparcimiento y compactación	Esparcir y compactar los residuos en capas con un espesor menor de 0,6 m para lograr una compactación óptima
Zona de descarga	Mantenerla pequeña, generalmente de menos de 30 metros por lado, operar zonas de descarga separadas para automóviles y camiones comerciales

controlando así el rendimiento de la explotación. También se utilizarían los archivos de peso como una base para cobrar a las agencias y a los transportistas privados por sus producciones.

Inspección de carga para residuos peligrosos

Inspección de carga es el término utilizado para describir el proceso de descarga de los contenidos de un vehículo de recolección cerca del frente de trabajo o en alguna zona designada, esparciendo los residuos en una capa fina e inspeccionándolos visualmente para determinar si hay presentes residuos peligrosos. Se puede detectar la presencia de residuos radiactivos con un aparato manual para medir la radiación, o en la estación de pesaje, como anteriormente se ha descrito. Si se encuentran residuos peligrosos,

FIGURA 53

Ejemplos típicos de planes para el relleno de residuos sólidos: (a) plan de relleno para un RS de un solo nivel y (b) plan de relleno para un RS multinivel.

la compañía de recolección es la responsable de separarlos. En algunos RS, si se detecta a una compañía entrando por segunda vez con residuos peligrosos se le impone una multa importante. Si reincide por tercera vez, se le prohíbe descargar en el RS.

Salud y seguridad pública

Las cuestiones de salud y seguridad pública están relacionadas con la salud y seguridad laboral y pública.

Salud y seguridad de los trabajadores. La salud y la seguridad de los trabajadores en los RS es crucial en la explotación del RS. El gobierno federal, a través de las normativas OSHA, y los estados, a través de programas tipo OSHA, han establecido normativas para un programa global de salud y seguridad para los trabajadores en los RS. Como los requisitos para estos programas cambian continuamente, se deberían consultar las normativas más recientes para el desarrollo de programas de salud y seguridad laboral. Se debe prestar una atención especial a los tipos de ropa y de botas

protectoras, al equipamiento para la cabeza de filtro-aire, y a los guantes a prueba de pinchazos suministrados a los trabajadores.

Seguridad del público. Como se ha resaltado anteriormente, las inquietudes sobre seguridad y las múltiples restricciones que controlan la explotación de RS han obligado a los operadores de RS a reexaminar sus prácticas con respecto a la seguridad pública y de la zona. Como resultado, está ganando en popularidad el uso de una estación de transferencia en el entorno del RS para minimizar el contacto del público con las operaciones de explotación del RS.

Seguridad en la zona

El aumento del número de denuncias por accidentes en los entornos de los RS ha provocado una significativa mejora de su seguridad. La mayoría de los RS tienen un acceso restringido y están vallados y señalizados con señales de prohibido el paso y con otras advertencias. En algunas localizaciones se utilizan cámaras de televisión para supervisar el funcionamiento del RS y el acceso al lugar.

13.0 CLAUSURA DE RS y MANTENIMIENTO POSTCLAUSURA

Clausura del RS y mantenimiento postclausura son los términos utilizados para describir lo que va a pasar en un RS lleno en el futuro. Para asegurar el mantenimiento de RS clausurados durante 30 o 50 años en el futuro, muchos estados han aprobado una legislación que requiere que el operador del RS retenga suficiente dinero para mantener el entorno cerrado a perpetuidad.

Desarrollo de un Plan de clausura a largo plazo

Quizás el elemento más importante en el mantenimiento a largo plazo de un RS completado sea la disponibilidad de un plan de clausura en el que se discutan claramente los requisitos para la clausura. Un plan de clausura debe incluir un diseño para la cobertura y el paisajismo del lugar completado. La clausura también debe incluir planes a largo plazo para el control de la escorrentía, el control de la erosión, la recolección de los gases y lixiviados y su tratamiento, y la supervisión ambiental.

Diseño de la cobertura y del paisajismo. Se debe diseñar la cobertura para desviar el escurrimiento superficial y el agua del deshielo fuera de la zona del RS. Cada vez más el diseño del paisaje final se basa en las especies autóctonas de plantas y hierbas en detrimento de las no autóctonas. En muchas localizaciones áridas del Suroeste, se favorece un paisaje de tipo desértico.

Control de los gases del RS. El control de los gases del RS es una inquietud importante en el mantenimiento a largo plazo de los RS. Por las inquietudes acerca de la emisión incontrolado de los gases del RS, se instala un sistema para el control del gas antes de completar la mayoría de los RS modernos. Los RS antiguos ya completados, que no disponían de sistemas para la recolección del gas, se están equipando con sistemas de recolección. Se justifica el equipamiento de RS antiguos

con instalaciones para la recolección del gas, así como las acciones correctoras que pueden ser necesarias en zonas de RS abandonados.

Recolección y tratamiento de lixiviados. Como en el control del gas del RS, el control de las descargas de lixiviados es otra inquietud importante en el mantenimiento a largo plazo de RS. De nuevo, la mayoría de los RS modernos tienen algún tipo de sistema para controlar los lixiviados, como se ha argumentado anteriormente. Los RS más antiguos ya completos sin sistemas para la recolección de lixiviados se están equipando con dichos sistemas.

Sistemas de supervisión ambiental. Para llevar a cabo la supervisión ambiental a largo plazo después de haberse completado un RS, deben instalarse sistemas de supervisión. La supervisión requerida en RS agotados normalmente implica: 1) supervisión de la zona aireada, de gases y líquidos; 2) supervisión de aguas subterráneas; 3) supervisión de la calidad del aire. Anteriormente se han descrito las instalaciones necesarias.

Mantenimiento postclausura

El mantenimiento postclausura implica la inspección rutinaria de la zona del RS, el mantenimiento de la infraestructura y la supervisión ambiental. A continuación se tratan brevemente estos.

Inspecciones rutinarias. Debe establecerse un programa de inspecciones rutinarias para supervisar continuamente las condiciones del RS lleno.

Se deben establecer criterios para determinar cuándo se debe(n) tomar una(s) acción(es) correctiva(s). Por ejemplo, ¿cuánto asentamiento puede permitirse antes de llevar a cabo una restauración?

Mantenimiento de la infraestructura. El mantenimiento de la infraestructura normalmente implica el mantenimiento continuado de instalaciones para la desviación del agua superficial; de las pendientes superficiales del RS; de las condiciones de los aislamientos, cuando se usan; de la revegetación, y del equipo para la recolección del gas y de los lixiviados. La cantidad de restauración necesaria dependerá de la cantidad de asentamiento. A continuación, la velocidad de asentamiento dependerá de la velocidad de formación del gas y del grado de compactación inicial logrado en la colocación de los materiales residuales en el RS. La cantidad de equipamiento que debe haber en la zona dependerá de la extensión y capacidad del RS, y de la naturaleza de las instalaciones que hay que mantener.

Sistemas para la supervisión ambiental. Se lleva a cabo la supervisión ambiental a largo plazo en los RS completos para asegurar que no haya emisiones de contaminantes procedentes del RS que puedan afectar a la salud o al ambiente circundante. Ya se han enumerado los tipos de sistemas necesarios. El número de muestras recolecciones para su análisis y la frecuencia de su recolección normalmente dependerá de las normativas que tienen las agencias locales que controlan la contaminación del agua y del aire. EPA ha desarrollado un procedimiento directriz para el muestreo de aguas subterráneas que debería ser revisado (40 CFR 258).

14.0 CALCULOS DE PROCESOS DE RS

Se han presentado y descrito los rasgos generales de un RS controlado. El propósito de esta sección es ilustrar los cálculos básicos de los procesos implicados en el desarrollo de una zona de RS. Los cálculos del proceso se utilizan para identificar las cantidades requeridas para valorar la idoneidad de una zona (por ejemplo, capacidad volumétrica) y para fijar el tamaño de las instalaciones físicas (por ejemplo, tuberías para la recolección de lixiviados). Los cálculos principales acerca del proceso y del diseño que se considerarán en la siguiente presentación incluyen:

7. Determinación de la capacidad y de la vida útil de un RS.
8. Generación del gas de RS.
9. Análisis de un sistema para la recuperación del gas.
10. Determinación de la cantidad de vapor de agua recogido en un sistema para la recuperación del gas de RS.
11. Producción de lixiviados en un RS.
12. Estimación de las tasas de filtración de agua a través de un cubrimiento de RS.
13. Compactación del RS durante la explotación y compactación/consolidación a largo plazo.
14. Selección de un sistema para la recolección de lixiviados y configuración de la cubrimiento del RS

Se han agrupado estos cálculos de diseño para no romper la argumentación en el texto y para proporcionar una presentación más coherente de los cálculos implicados en el diseño de un RS. Cuando ha sido posible, los cálculos presentados en los siguientes ejemplos se han organizado para solucionarlo utilizando una hoja de cálculo. Además, los formatos en hojas de cálculo se han utilizado para la presentación de los datos.

Ejemplo 7. Determinación de la capacidad y vida útil de un RS. Determinar la capacidad y vida útil estimada del RS de South Valley mostrado en la figura adjunta. Las suposiciones utilizadas para la determinación de la capacidad y vida útil del RS se presentan a continuación, con datos sobre la población y las cantidades estimadas de residuos diarios que se van a verter.

Figura

Altura de cada nivel en el RS, incluyendo el material de cubrimiento 3 m
 Pendiente de la cara frontal del RS = 3:1 (ver Tabla 20)
 Peso específico de los residuos sólidos compactados en el RS = 534 kg/m³
 Elevación máxima del RS = 122 m

Año	Poblacion proyectada fin de año (x1.000)	Cantidades de residuos kg/hab día
1995	38	2.2
1996	40	2.0
1997	42	1.9
1998	44	1.8
1999	46	1.7
2000	48	1.6
2001	50	1.6
2002	51	1.5
2003	52	1.5
2004	53	1.5
2005	54	1.4
2006	55	1.4
2007	56	1.4
2008	57	1.4
2009	58	1.4
2010	59	1.4

Ejemplo 8. Generación de gas de RS. Determinar la distribución de la producción de gas para un RS con una vida util de 5 años basándose en los siguientes datos y suposiciones:

1. Vida de RS = 5 años.

2. La composición de los residuos es tal como se describe en la Tabla anexa para RSM domésticos y comerciales, de los que el 79,5 por 100 son orgánicos y el 20,5 por 100 inertes.
3. La fracción orgánica (79,5 por 100) está compuesta por un 7 por 100 de plástico (considerado como inertes) un 60,1 por 100 de material rápidamente biodegradable y un 12,4 por 100 de material lentamente. Los valores correspondientes para el material rápidamente y lentamente biodegradable basándose en el peso seco son 44,8 y 7,3 por 100, respectivamente.
4. De los residuos orgánicos rápidamente biodegradables, el 75 por 100 está disponible para la degradación (es decir, que algunos de los materiales residuales orgánicos que están en bolsas de plástico no serán degradados, parte del material estará demasiado seco como para soportar actividad biológica).
5. De los residuos orgánicos lentamente biodegradables, el 50 por 100 está disponible para la degradación (por las mismas razones citadas anteriormente).
6. La cantidad total de gas de RS producido por la fracción biodegradable de los materiales rápidamente y lentamente biodegradables colocados cada año es de 0,87 y 0,99 m³/kg de sólidos secos, respectivamente.
7. El período de tiempo para la descomposición total del material orgánico rápidamente descomponible es 5 años.
8. El período de tiempo para la descomposición total del material orgánico lentamente descomponible es 15 años.

Suponer que la tasa de descomposición del material rápidamente y lentamente descomponible está basada en un modelo triangular de producción de gas donde la tasa más alta de producción de gas se produce el primer y el quinto año, respectivamente, después del comienzo de la producción de gas. Se supone que la producción de gas comienza al final del primer año de explotación.

Ejemplo 9. Análisis de un sistema de recuperación de gas de RS. Determinar la pérdida de carga en el sistema de recuperación de gas de RS que se muestra en la

figura adjunta. También, determinar la capacidad necesaria del extractor. El análisis estará basado en los siguientes datos y suposiciones:

FIGURA

1. Diámetro de los pozos horizontales de extracción de gas = 15 cm
2. Diámetro del cabezal de tubos utilizado para recoger el gas de los pozos horizontales de recuperación de gas de RS = por determinar
3. Rugosidad absoluta para la tubería de plástico utilizada en el cabezal de tubos para recoger el gas, $e = 0,0015$ cm
4. Previsión para pérdidas menores en el cabezal entre pozos de extracción = $0,25$ cm H_2O
5. Previsión para pérdidas menores en el cabezal entre el último pozo de extracción y el ventilador = $1,27$ cm H_2O
6. Flujo de gas estimado por pozo horizontal de extracción de gas = $5,66$ M³/min ($160^{\circ}C$, 101 kN/M²)
 7. Composición de gas (por Volumen) = CH₄, 50 por 100; CO₂, 50 por 100
 8. Temperatura de gas de RS en el cabezal de los pozos = $540^{\circ}C$
 9. Pérdida de temperatura en el cabezal de tubos entre los pozos de extracción = $- 5^{\circ}C$
10. Temperatura de gas de RS en la estación del extractor = $32^{\circ}C$
11. El gas de RS está saturado en vapor de agua en el cabezal del pozo.
12. El vacío que hay que mantener en el cabezal de pozo del pozo horizontal de extracción de gas más lejano (punto E) = $0,25$ m H_2O
13. El vacío en el ventilador = a determinarse, m H_2O

Ejemplo IO. Determinación de la cantidad de vapor de agua recogido en un sistema de recuperación de gas de RS. Determinar la cantidad de vapor de agua condensado que hay que separar diariamente de un sistema de recuperación de gas de RS basándose en los siguientes datos y suposiciones:

1. Flujo total de gas = $70.750 \text{ m}^3/\text{d}$ (16°C , 10.297 kg/m^3)
2. Temperatura del gas de RS cuando sale del RS = 54°C
3. Temperatura del gas de RS en la estación del ventilador = 32°C
4. Vacío en el cabezal del pozo = $0,25 \text{ m H}_2\text{O}$
5. Vacío en el ventilador = $1,9 \text{ m H}_2\text{O}$
6. El gas de RS está saturado en vapor de agua en el cabezal del pozo

Ejemplo 11. Producción de lixiviados de RS. Dada la siguiente información, calcular la cantidad anual de lixiviados producidos en un RS que se va a explotar durante cinco años. Los cálculos deberían continuar hasta que el RS alcance un equilibrio; es decir, la cantidad de agua que entra al RS se igualará a la cantidad de agua que se lixivía fuera. Trazar una curva de la producción anual de lixiviados para el RS. Para simplificar los cálculos, determinar la cantidad de lixiviados producidos para un área superficial de 1 m^2 , después convertir la solución para tener en cuenta la cantidad total de residuos colocados en el RS.

1. Cantidades de residuos

- a) Residuos colocados por día = 1.000 t
- b) Número de días de explotación = 300
- c) Residuos colocados por año = $3 \cdot 10^8 \text{ kg}$

2. Características de los residuos

- a) Peso específico compactado de los residuos = 590 kg/m^3
- b) Contenido en humedad inicial de los residuos = 20 por 100 en masa
- c) La distribución de los materiales orgánicos rápidamente y lentamente descomponibles en el flujo de residuos.
- d) Suponer que no se van a verter lodos con los residuos.

3. Características del RS

a) Generales

- i. Altura de nivel = 3 m
- ii. Relación residuos/cubrimiento = 511 en volumen
- iii. Número de niveles = 5 (correspondiendo uno a cada año)

b) Material de cubrimiento

- i. Peso específico del suelo = 1.770 kg/m³ (incluyendo humedad)
- ii. Se supone que el contenido en humedad del suelo es su capacidad de campo

c) Producción de gas

- i. Producción de gas: Utilizar los siguientes datos de producción de gas para estimar la cantidad total de gas producido por kg de residuos totales colocados en cada nivel.

Producción de gas, m ³ /kg			
Final del año	Rápidamente descomponible	Lentamente descomponible	Total ^a
1	0,000	0,000	0,000
2	0,059	0,000	0,059
3	0,103	0,001	0,104
4	0,073	0,002	0,076
5	0,044	0,003	0,047
6	0,015	0,004	0,019
7	0,000	0,005	0,005
8	0,000	0,004	0,004
9	0,000	0,004	0,004
10	0,000	0,003	0,003
11	0,000	0,002	0,002
12	0,000	0,002	0,002
13	0,000	0,001	0,001
14	0,000	0,001	0,001
15	0,000	0,001	0,001
16	0,000	0,001	0,001
17	0,000	0,000	0,000
Total	0,294	0,034	0,329

- ii. El agua consumida en la formación de gas de RS = 0,160 kg/m³ del gas producido
 - iii. El agua presente como vapor de agua en el gas de RS = 0,016 kg/m³ del gas producido
 - iv. Peso específico de gas de RS = 1,339 kg/m³
- d) Capacidad de campo

La capacidad de campo en función del peso de sobrecarga se expresa como

$$FC = 0,6 - 0,55 \left(\frac{W}{4.536 + W} \right)$$

FC = la fracción de agua en los residuos basándose en su peso seco

W = el peso de sobrecarga calculado a una altura media de los residuos en el nivel en cuestión, kg

4. Cantidades de lluvia

- a) La lluvia que entra en el cubrimiento diaria durante los primeros cinco años de explotación = 10 cm/año
- b) La lluvia que entra en el cubrimiento final después de cinco años = 2,5 cm/año

Ejemplo 11.12. Estimación de las tasas de infiltración de agua a través de la cubrimiento de un RS. Determinar la cantidad de agua que entraría en un RS si se utiliza una capa de marga arcillosa con un espesor de 0,9 m para el cubrimiento final. Suponer lo siguiente: 1) Son aplicables los siguientes datos de lluvia y de evapotranspiración. 2) El coeficiente medio de escorrentía mensual es igual al 20 por 100. 3) El material de cubrimiento es una marga arcillosa con las características físicas dadas en la Tabla 11.20. 4) El contenido en humedad del material de cubrimiento es el 50 por 100 de su capacidad de campo.

Mes	Precipitación mm	Evapotranspiración mm
Enero	114,3	17,8
Febrero	88,9	38,0
Marzo	76,2	78,7
Abril	60,9	99,1
Mayo	40,6	132,1
Junio	12,7	165,1
Julio	2,5	177,8
Agosto	Trazas	165,1
Septiembre	5,1	111,8
Octubre	15,2	99,1
Noviembre	66,1	38,1
Diciembre	99,1	20,3
Total anual	581,6	1,143,0

Ejemplo 13. Compactación de RS durante la explotación y compactación/consolidación a largo plazo. Dada la siguiente información, calcular la capacidad adicional disponible en el RS del Ejemplo 11 después de cinco años como consecuencia de la compactación y la producción de gas. Estimar, también, la altura real del RS al final del quinto año y el asentamiento a largo plazo del RS después de su clausura. Los cálculos deberían seguir hasta que el RS llegue a su equilibrio.

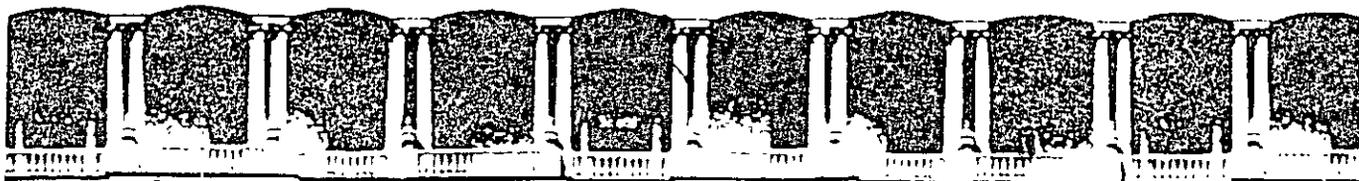
Utilizar los mismos datos que aquellos dados en el Ejemplo 11. Suponer que el peso específico compactado inicial de los residuos es de 590 kg/m³ y que puede utilizarse la siguiente relación para estimar el peso específico de los residuos compactados en función de la presión de sobrecarga. Suponer que no hay compactación en el material de cubrimiento.

$$SW_p = 590 \text{ kg/m}^3 \frac{P, \text{ kg/m}^2}{15.76 \text{ (m}^3\text{/kg)} + (0.0016 \text{ m}^3\text{/kg)} (p, \text{ kg/m}^2)}$$

Donde:

SW_p = peso específico compactado de los residuos a una presión p , kg/m³

Ejemplo 11.14. Selección de un sistema para la recolección de lixiviados y para la configuración de cubrimiento de un RS. Seleccionar los criterios de diseño apropiados para un sistema de recolección de lixiviados y de diseño de cubrimiento para un RS de RSU. Suponer que el municipio ha solicitado la utilización de un recubrimiento y diseño de cubrimiento compuesto. El recubrimiento será de arcilla y de una geomembrana con una capa de drenaje, y la cubrimiento incorporará la utilización de una capa de drenaje y una geomembrana. Comprobar, también, si se pueden transportar suficientes lixiviados a través de la capa de drenaje hasta el canal recolectar de lixiviados para acomodar los lixiviados producidos en el RS en el Ejemplo 9.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS URBANOS
DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS
SANITARIOS**

Del 06 al 17 de Noviembre del 2000

A N E X O S

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez
Delegación Iztacalco
Noviembre/2000

7.0 COMPOSICION, FORMACION, MOVIMIENTO Y CONTROL DEL LIXIVIADO EN RS.

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. En la mayoría de los RS el lixiviado está formado por el líquido que entra en el RS desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos, si hay. En este capítulo se hace una exposición sobre la composición, formación, movimiento y control del lixiviado.

Composición del lixiviado

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la Tabla 10 se presentan datos representativos sobre las características de los lixiviados en RS nuevos y antiguos. Como el rango de los valores de concentración observados para varios constituyentes presentados en la Tabla 10 es bastante grande, especialmente en RS nuevos, se debe tener mucho cuidado en la utilización de los diversos valores que se presentan. En la Tabla 11 se resumen los parámetros físicos, químicos y biológicos a supervisar.

TABLA 10

Datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de RS nuevos y maduros

Constituyente	Valor, mg/l ^p		
	RS nuevo (menos de 2 años)		RS maduro (mayor de 10 años)
	Rango ^c	Típico ^d	
DOB, (demanda de oxígeno bioquímico de 5 días)	2,000-30,000	10,000	100-200
COT (carbono orgánico total)	1,500-20,000	6,000	80-160
DOC (demanda de oxígeno químico)	3,000-60,000	18,000	100-500
Total de sólidos en suspensión	200-2,000	500	100-400

Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Total fósforo	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO ₃	300-10,000	3,500	200-500
Calcio	200-3,000	1,000	100-400
Magnesio	50-1,500	250	50-200
Potasio	200-1,000	300	50-400
Sodio	200-2,500	500	100-200
Cloro	200-3,000	500	100-400
Sulfatos	50-1,000	300	20-50
Total hierro	50-1,200	60	20-200

^b Excepto el pH, que no tiene unidades.

^c Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura del tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^d Los valores típicos para los RS nuevos variarán según el estado metabólico del RS.

TABLA 11
Parámetros de muestreo de los lixiviados^a.

Físicos	Constituyentes orgánicos	Constituyentes inorgánicos	Biológicos
Aspecto	Químicos orgánicos	Sólidos en suspensión (SS), sólidos totales disueltos (STD)	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos volátiles en suspensión (SVS), sólidos volátiles disueltos (SVD).	Bacterias coliformes (total, fecal, fecal es treptococo).
Potencial de reducción oxidación	Demanda química de oxígeno (DQO)	Cloruros	Recuento sobre placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico total (COT)	Sulfatos	
Color	Ácidos volátiles	Fosfatos	
Turbiedad	Taninos, ligninas	Alcalinidad y acidez	
Temperatura	N-Orgánico	N-Nitrato	
Olor	Solubles en éter(aceite y grasa) Sustancias activas al azul de metileno(SAAM)	N-Nitrito N-Amoníaco	

Grupos funcionales orgánicos según sean requeridos	Sodio
Hidrocarburos clorados	Potasio
	Calcio
	Magnesio
	Dureza
	Metales pesados (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag)
	Arsenio
	Cianuro
	Flúor
	Selenio

Variaciones en la composición de los lixiviados. Hay que resaltar que la composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del RS y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del rango de 6.5 a 7.5, y los valores de concentración de DBO₅, COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO₂ en el gas de RS que está en contacto con el lixiviado. En el ejemplo 2, a continuación, se ilustra el efecto del CO₂ en el gas de RS.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación

DBO₅/DQO. Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0.5 o más. Las relaciones en el rango de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los RS antiguos, la relación DBO₅/DQO está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de RS antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

Ejemplo 2. Estimar el pH de los lixiviados en contacto con el gas de RS.

Suponer que la composición del gas de RS que está en contacto con el lixiviado es del 50 por 100 de dióxido de carbono y del 50 por 100 de metano, que el gas de RS está saturado con vapor de agua a una temperatura de 50°C y que la presión dentro del RS es la atmosférica. La alcalinidad del lixiviado es de 500 mg/l, como el CaCO₃.

Como resultado de la diversidad en las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del lixiviado es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar un lixiviado con las características presentadas por un RS nuevo sería bastante diferente de una diseñada para tratar el lixiviado procedente de un RS antiguo. El problema de interpretación de los resultados analíticos es todavía más complicado, por el hecho de que el lixiviado que está generándose en un momento dado es una mezcla del lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades.

Oligocompuestos. La presencia de oligocompuestos (algunos de los cuales pueden plantear riesgos para la salud) en el lixiviado dependerá de la concentración de estos compuestos en la fase gas dentro del RS. Las concentraciones esperadas pueden estimarse utilizando la ley de Henry y las constantes de la ley de Henry. Al mismo tiempo que las comunidades y los operadores de RS implantan programas que limitan la evacuación de residuos sólidos mezclados procedentes de los RSM, la calidad del lixiviado procedente de los nuevos RS está mejorando respecto a la presencia de oligoconstituyentes.

Balance de aguas y generación del lixiviado en los RS

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del RS. El balance hidrológico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el RS y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el RS.

Descripción de los componentes del balance de aguas para una celda de RS.

Los componentes que conforman el balance de aguas para una celda de RS se identifican en la Figura 24. Las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cubrimiento y la humedad de los lodos, si se permite la evacuación de lodos. Las principales salidas son: el agua que abandona el RS formando parte del gas de RS (es decir, el agua utilizada para la formación del gas), el vapor de agua saturado en el gas de RS y el lixiviado. Cada uno de estos componentes se considera a continuación.

Agua filtrada superiormente. En la capa superior del RS, el agua que entra desde arriba procede de la precipitación atmosférica que se ha filtrado a través del material de cobertura. En las capas por debajo de la capa superior, el agua que entra desde arriba procede del agua que se ha filtrado a través de los residuos sólidos situados sobre la capa en cuestión. Uno de los

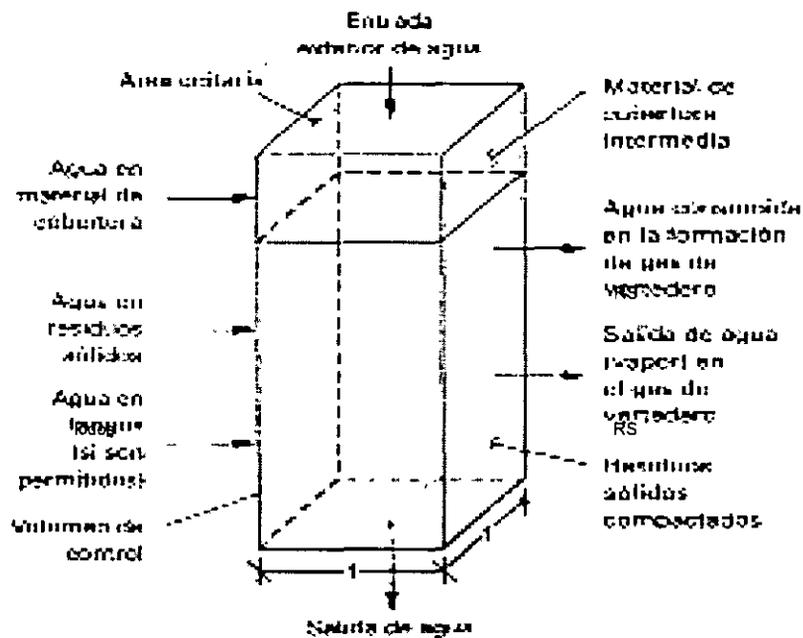


FIGURA 24

Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación del lixiviado en un RS.

aspectos más críticos en la preparación de un balance hidrológico para un RS es determinar la cantidad de lluvia que realmente se filtra a través de la capa de cobertura del RS. Cuando no se utiliza una geomembrana, se puede determinar la cantidad de lluvia que se filtra a través del cubrimiento del RS. En el capítulo 8 se presenta un método simplificado para estimar la cantidad de filtración que se puede esperar.

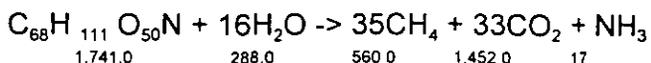
Agua aportada por los residuos sólidos. El agua que entra al RS con los materiales residuales es tanto el agua intrínseca de los residuos como la humedad que se ha absorbido de la atmósfera o de la lluvia (cuando los contenedores de almacenamiento no están correctamente cerrados). En climas secos, se puede perder algo de la humedad intrínseca contenida en los residuos por las condiciones de almacenamiento. El contenido en humedad de los RSM domésticos y comerciales es aproximadamente del 20 por 100. Sin embargo, por la variabilidad

del contenido en humedad durante las estaciones húmedas y secas, puede ser necesario llevar a cabo una serie de ensayos durante los períodos húmedos y secos.

Agua aportada por el material de cubrimiento. La cantidad de agua que entra con el material de cubrimiento dependerá del tipo y del origen del material de cubrimiento y de la estación del año. La cantidad máxima de humedad que el material de cubrimiento puede contener se define como capacidad de campo (CC) del material, o sea, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad. Los valores para suelos varían del 6 al 12 por 100 para arena, y del 23 al 31 por 100 para marga arcillosa. En el capítulo 8 se argumenta más extensamente la CC de los suelos en conexión con el almacenamiento de agua en las coberturas de los RS.

Agua perdida inferiormente. El agua que sale desde el fondo de la *primera* celda del RS se llama *lixiviado*. Como se ha resaltado anteriormente, el agua que sale del fondo de la segunda y de las subsiguientes celdas procede del agua que entra desde la celda superior a la celda en cuestión. En los RS donde se utilizan sistemas intermedios para la recolección del lixiviado, el agua que sale desde el fondo de la celda colocada directamente por encima del sistema para la recolección del lixiviado intermedio también se llama lixiviado.

Agua consumida en la formación del gas de RS. Se consume agua durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los RSM. La cantidad de agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la fórmula para el material de descomposición rápida. La masa de agua absorbida por kilogramo de residuos orgánicos secos consumidos puede estimarse de la forma siguiente:



La masa de agua consumida por kilogramo de residuos sólidos volátiles rápidamente biodegradables (SVRB) secos y destruidos es:

$$\text{Agua consumida} = \frac{288.0}{1,741.0} = 0.165 \text{ kg H}_2\text{O/kg SVRB destruidos}$$

Utilizando un valor de 223.61 kg/m³ SVRB destruidos para la producción del gas, el valor correspondiente para la cantidad de agua consumida por metro cúbico de gas producido es

$$\text{Agua consumida} = \frac{(0.165 \text{ kg H}_2\text{O/kg SVRB destruidos})}{(223.61 \text{ kg/M}^3 \text{ SVRB destruidos})} = 7.3789 \text{ kg H}_2\text{O/m}^3$$

Agua perdida como vapor de agua. El gas de RS normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad del vapor de agua que se escapa del RS se determina suponiendo que el gas del RS está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases perfectos de la forma siguiente:

$$p_v V = nRT \quad (11.16)$$

donde:

p_v = Presión de vapor del H₂O a una temperatura T, en atm.

V = Volumen, l.

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases = 0.082 atm · l/°K.

T = Temperatura, °K.

El valor numérico para la masa de vapor de agua contenida por litro de gas de RS a 32°C se obtiene de la forma siguiente:

$$p_v = 4.82 \text{ KN/M}^2$$

n = Número de moles.

R = Constante universal de los gases = 0.082 atm · l/mol·K.

T = 305 °K.

$$n = \frac{(p.) (Vg)}{RT} = \frac{(4.82)(1,0)}{(0.082)(305)} = 0.0019 \text{ mol}$$

0.0019 mol · 18 kg/kg - mol = 0.0352 kg H₂O/m³ gas de RS

Otras pérdidas y ganancias en agua. Habrá alguna pérdida de humedad por evaporación durante el vertido de los residuos. Las cantidades no son grandes y a menudo se desprecian. La decisión de incluir estas variables en el balance hidrológico dependerá de las condiciones locales.

Capacidad de campo del RS. El agua que entra en el RS, que no se consume y que no sale como vapor de agua, puede mantenerse en el RS o puede aparecer como lixiviado. El material residual y el material de cobertura, ambos, son capaces de retener agua. La cantidad de agua que se puede retener, en contra de la gravedad, se denomina capacidad de campo. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de humedad dentro del RS por encima de la CC del RS. La CC, que varía con el peso de sobrecarga, puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$CC = 0.6 - 0.55 \left(\frac{W}{10,000 + W} \right)$$

donde:

CC = Capacidad de campo (o sea, la fracción de agua en los residuos basándose en el peso seco de los mismos)

W= Peso de sobrecarga calculado en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión.

Preparación del balance de aguas del RS. Los términos que componen el balance de aguas pueden colocarse en forma de ecuación de la forma siguiente-

$$AS_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GW} - W_E + W_{F(L)}$$

donde:

AS_{RS} = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el RS kg/m^3 .

W_{RS} = Agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes, kg/m^3 .

W_{FT} = Agua (humedad) en los lodos de plantas de tratamiento entrantes, kg/m^3 .

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura, kg/M^3 .

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (para la capa superior del RS el agua desde arriba procede de la lluvia o del agua de nieve), kg/m^3 .

W_{GV} = Agua perdida en la formación del gas de RS, kg/m^3 .

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas de RS, kg/m^3 .

W_E = Agua perdida debido a la evaporación superficial, kg/M^3 .

$W_{F(L)}$ = Agua que sale interiormente (en la celda localizada directamente por encima de un sistema para la recolección del lixiviado, el agua del fondo se corresponde con el lixiviado), kg/m^3 .

Se prepara el balance hidrológico del RS añadiendo la masa del agua entrante por unidad de área de una capa concreta del RS, para un incremento de tiempo dado, al contenido en humedad de esa capa al final del incremento del tiempo anterior, y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el período de tiempo actual. El resultado se conoce como agua disponible en el incremento de tiempo actual para una capa particular del RS. Para determinar si se formará lixiviado, se compara la capacidad de campo del RS con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se formará lixiviado.

Por lo general, la cantidad de lixiviado está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el RS. De hecho, si se construye correctamente un RS, se puede eliminar la producción de cantidades medibles de lixiviado. Cuando se añaden lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales a los residuos sólidos para incrementar la cantidad de metano producida, deben proporcionarse instalaciones para el control del lixiviado. En algunos casos pueden necesitarse instalaciones para el tratamiento del lixiviado.

Movimiento del lixiviado en RS sin aislamiento

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los RS. Desde allí su movimiento en RS sin aislamiento es hacia abajo a través del estrato inferior, aunque también puede producirse algún movimiento lateral, según las características del material circundante. Por la importancia que tiene la filtración vertical en la contaminación de aguas subterráneas, se trata más este tema en la exposición siguiente.

Ley de Darcy. La velocidad de filtración de los lixiviados del fondo del RS puede estimarse utilizando la ley de Darcy, que puede expresarse de la forma siguiente:

$$Q = KA \frac{dh}{dL}$$

donde:

Q = Descarga del lixiviado por unidad de tiempo, m³/año.

K = Coeficiente de permeabilidad m³/M² año.

A = Área en perfil a través de la cual corre el lixiviado, m².

dh/dl = Gradiente hidráulico. m/m.

h = Pérdida de carga, m.

l = Longitud del camino del flujo, m.

El signo negativo en la ley de Darcy viene del hecho de que la pérdida de carga, dh , siempre es negativa. El coeficiente de permeabilidad también se conoce como conductividad hidráulica, permeabilidad efectiva o coeficiente de filtración. En unidades USA, el coeficiente de permeabilidad se expresa en galones/día/pie cuadrado, o pies/día. La conversión entre estos factores se hace resaltando que $7.48 \text{ gal/ft}^2 \text{-año} = 1 \text{ ft/año}$. En la Tabla 12 se dan valores típicos del coeficiente de permeabilidad para varios suelos.

TABLA 12

Coefficientes típicos de permeabilidad para varios suelos'

Material	Coeficiente de permeabilidad, K	
	m/d	l/m ² d
Arena gruesa uniforme	406	405,779
Arena mediana uniforme	100	101,343
Arena y grava bien graduadas y limpias	100	101,343
Arena fina uniforme	4	4,074
Arena de lodo y grava bien graduadas	0.4	392
Arena de lodo	0.1	89.54
Lodo uniforme	0.04	48.84
Arcilla arenosa	0.004	4.8
Arcilla de lodo	10^{-4}	$8.9 \cdot 10^{-2}$
Arcilla (tamaños de arcilla del 30 al 50 %)	10^{-5}	$8.9 \cdot 10^{-3}$
Arcilla coloidal	10^{-6}	$8.9 \cdot 10^{-4}$

Estimación de la filtración vertical del lixiviado. Antes de aplicar la ley de Darcy para estimar las tasas de filtración de un RS, es útil revisar las condiciones físicas del problema refiriéndose a la Figura 25. En ésta, se ha colocado una celda de RS dentro de un acuífero superficial formado por un material de una permeabilidad moderada, que yace sobre un acuífero

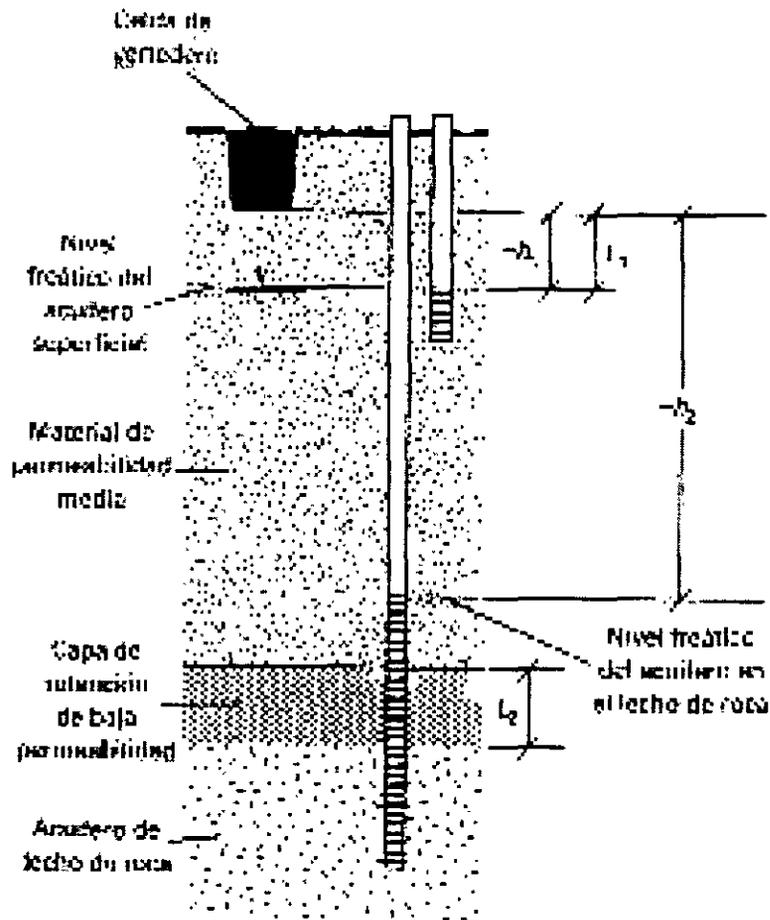


FIGURA 25

Esquema de definición de la filtración a partir de los RS y de acuíferos superficiales hasta subsuperficiales.

de lecho de roca. En esta situación es posible tener dos niveles piezométricos de agua si se colocan los pozos dentro de acuíferos superficiales y del lecho de roca. Con respecto al movimiento del lixiviado, hay dos problemas de interés. El primero es la velocidad con que el lixiviado se filtra desde el fondo del RS hasta el agua subterránea en el acuífero superficial. El segundo es la velocidad con que las aguas subterráneas procedentes del acuífero superficial entran en el acuífero sobre lecho de roca. Estos dos problemas son tratados en el análisis siguiente, pero la

cuestión de cómo se produce la mezcla del lixiviado con las aguas subterráneas dentro del acuífero superficial va más allá del alcance de este trabajo.

En el primer problema, la tasa de flujo de lixiviación del RS al agua subterránea superior se calcula suponiendo que el material que se encuentra entre el fondo del RS y la cima del nivel freático está saturada, y que existe una pequeña capa de lixiviado en el fondo del RS. Bajo estas condiciones la ecuación de Darcy se aplica de la siguiente forma:

$$Q(\text{M}^3/\text{año}) = -K(\text{M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{año}) \cdot A(\text{m}^2) \frac{-h_i(\text{m})}{L_i(\text{m})}$$

pero como $h_i = L_i$,

$$Q(\text{M}^3/\text{año}) = -K(\text{M}^3/\text{M}^2 \cdot \text{año}) \cdot A(\text{m}^2)$$

Si se supone que el flujo se produce a través de 1.0 m^2 , entonces

$$Q(\text{m}^3/\text{año}) = K(\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}) (\text{m}^2)$$

La tasa de descarga del lixiviado por unidad de área es igual al valor de K multiplicado por la unidad de superficie en metros cuadrados. Por ejemplo, si el estrato superior del material en la Figura 25 fuese arcilla arenosa, la tasa correspondiente de filtración sería $4.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ (Tabla 12). El valor calculado representa la cantidad máxima de filtración que podría esperarse, y se debería utilizar este valor con fines de diseño. En condiciones normales, la tasa actual sería menor que este valor porque la columna de suelo debajo del RS no estaría saturada. También, la mayor parte del lixiviado que llega hasta el fondo del RS se habría extraído con el sistema para la recolección del lixiviado.

En el segundo problema, la tasa del movimiento del agua desde el acuífero superior hasta el acuífero inferior se daría con la Ecuación (penúltima). En este caso, el espesor de la capa confinadora se utiliza para determinar el gradiente hidráulico.

Equivalencia hidráulica. En algunos estados, se utiliza el concepto de equivalencia hidráulica para valorar diseños alternativos de recubrimientos. En la Figura 26 se ilustran tres configuraciones de recubrimientos equivalentes. Si se aplica la Ley de Darcy a la primera configuración, la tasa de flujo por unidad de área es igual a $2.67 K$. Aplicando la Ley de Darcy a las otras dos configuraciones da el mismo resultado. De este análisis se puede deducir que el nivel de agua mantenido dentro del RS es una importante consideración de diseño.

Tiempo de penetración. El tiempo de penetración, en años, que tardan los lixiviados en traspasar un recubrimiento de arcilla de un espesor dado puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{d^2 x}{K(d + h)}$$

donde:

t = Tiempo de penetración, años.

d = Espesor del recubrimiento de arcilla, m

x = Porosidad efectiva.

K = Coeficiente de permeabilidad, m/año.

h = Carga hidráulica, m.

Los valores típicos de porosidad efectiva para arcillas con un coeficiente de permeabilidad dentro del rango de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s variarán de 0.1 a 0.3, según el tipo de arcilla.

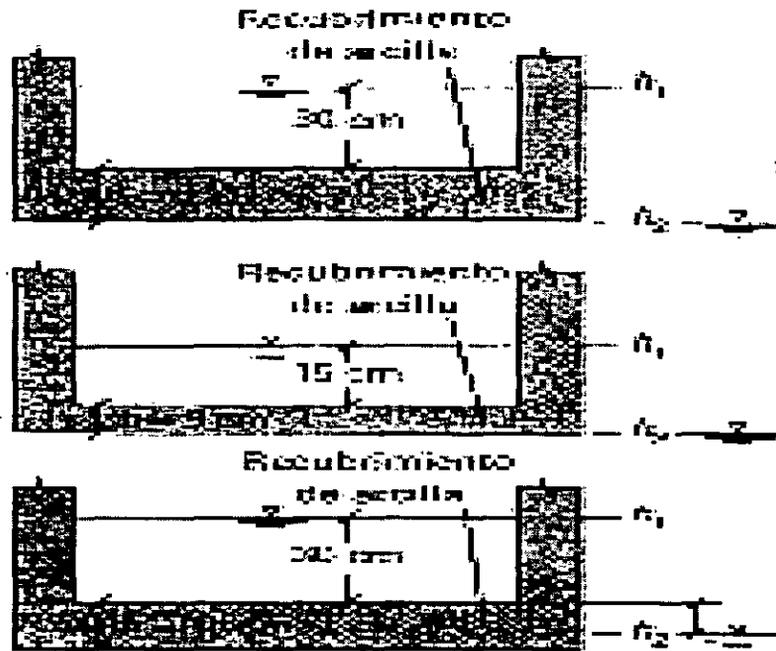


FIGURA 26

Dibujo de definición para valorar la equivalencia de recubrimientos de RS.
 (Hay que resaltar que la descarga a través de cada configuración de recubrimiento es la misma.)

Destino de los constituyentes de los lixiviados en la migración subsuperficial

La inquietud principal en el movimiento de los lixiviados en el acuífero subsuperficial por debajo de los RS, con y sin recubrimientos, es el destino de los constituyentes encontrados en el lixiviado. Los mecanismos operativos para la reducción de los constituyentes encontrados en el lixiviado mientras migra a través del suelo subsuperficial incluyen: filtración mecánica, precipitación y coprecipitación, absorción (incluyendo intercambios iónicos), intercambio gaseoso, disolución y dispersión, y actividad microbiana. El destino de los metales pesados y de los oligoorgánicos, los dos constituyentes de mayor interés, se argumenta en la siguiente exposición.

Metales pesados. En general, los metales pesados son removidos mediante reacciones de intercambio iónico que se producen mientras los lixiviados viajan a través del suelo, los oligoorgánicos se separan principalmente mediante absorción. La capacidad de un suelo para retener los metales pesados encontrados en los lixiviados está en función de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) que tiene el suelo. La captación y la pérdida de iones positivamente cargados por un suelo se llama intercambio catiónico o básico. Se define el CIC total de un suelo como el número de miliequivalentes (meq) de cationes que pueden absorber 100 gramos de suelo. La CIC de un suelo depende de la cantidad de materia coloidal orgánica y mineral presente en la matriz del suelo. Los valores típicos de CIC con un pH de 7 son 100 a 200 meq/100 g para coloides orgánicos, de 40 a 80 meq/100 g para arcillas 2:1 (minerales montmorillonitas), y de 4 a 20 meq/100 g para arcillas 1:1 (minerales caolinitas). Los valores de CIC presentados están afectados por el pH de la disolución; caen hasta en un 10 por 100 de los valores dados para un pH igual a 4. Como ya se ha resaltado, la presencia de dióxido de carbono en el fondo del RS tenderá a bajar el pH de los lixiviados.

La capacidad de un recubrimiento de arcilla para absorber metales pesados puede estimarse de la forma siguiente. Supongamos que el CIC de un material de recubrimiento es 100 meq/100 g. Si la densidad del material arcilloso utilizado en el recubrimiento es 2.194 kg/m³ (gravedad específica igual a 2.2), entonces pueden ser absorbidos aproximadamente 106,000 meq de cationes por metro cúbico de material de recubrimiento. Utilizando un valor típico de 20 mg/meq para metales pesados, la cantidad de metal que puede absorberse por metro cúbico es igual a 1,700 g. Si la concentración de metales pesados en los lixiviados fuese de 100 mg/l, se podrían separar los metales pesados de aproximadamente 600 de lixiviados. Si la permeabilidad de la arcilla es igual a $1.1 \cdot 10^{-7}$ cm/s, entonces 30.46 pasarían a través de 1 m² cada año. Con esta tasa de filtración, se tardarían 212 años para saturar el volumen original de arcilla. Si la cantidad de lixiviado que se filtra a través del recubrimiento fuese limitada a un décimo de ese valor mediante el diseño correcto del sistema para la recolección de lixiviado, entonces el tiempo requerido

para saturar el volumen de arcilla sería aproximadamente de 2,000 años. Incluso con todas las suposiciones simplificadoras que entraban en el análisis anterior, se puede concluir que con un cubrimiento de RS y un recubrimiento de arcilla diseñados correctamente, los metales pesados no deben presentar un problema. El frente de saturación para un metal pesado frente al tiempo se puede representar como se muestra en la Figura 27.

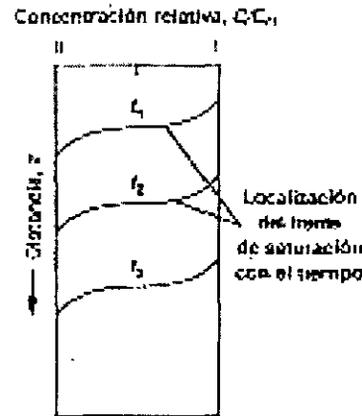


FIGURA 27

Movimiento del frente de saturación de metales pesados en un recubrimiento de arcilla.

Oligoorgánicos. La absorción es el método más común por el que se separan los constituyentes orgánicos presentes en los lixiviados mientras estos últimos se mueven a través de un medio poroso. Si se desprecia la dispersión hidrodinámica, el balance de masas para un contaminante sometido a absorción en un acuífero de agua subterránea se obtiene por la siguiente fórmula modificada:

$$\frac{\partial S}{\partial T} \frac{\rho_b}{X} + \frac{\partial C}{\partial T} = v \frac{\partial C}{\partial z}$$

donde:

S = Masa del soluto absorbido por unidad de masa de suelo seco, g/g.

ρ_b = Densidad bruta del suelo, g/m³.

x = Porosidad.

C = Concentración del contaminante en fase líquida, g/m^3 .

V_z = Velocidad media del fluido en la dirección Z, m/s.

La masa del material absorbido por unidad de masa de suelo seco está relacionada con la concentración del contaminante en la fase líquida y con el coeficiente de distribución del suelo, tal como se describe en la siguiente ecuación:

$$S = K_{SD}C$$

Donde:

K_{SD} = Coeficiente de distribución del suelo, m^3/g .

Hay que resaltar que la Ecuación (anterior) describe la absorción lineal. La absorción puede no ser lineal para algunos de los compuestos orgánicos encontrados en los RS. Calculando el diferencial de la Ecuación respecto al tiempo, y sustituyendo $(K_{SD}) \partial C/\partial t$ por $\partial S/\partial t$ en la Ecuación (penúltima) se obtiene.

$$V_z \frac{\partial C}{\partial t} = \left(1 + \frac{\rho_s}{\alpha} K_{SD}\right) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (11.25)$$

Cuando la partición del contaminante entre el suelo y el agua subterránea puede describirse adecuadamente mediante el coeficiente de distribución del suelo, K_{SD} , el retraso del frente contaminante relativo al líquido puede describirse con la siguiente relación:

$$R = \frac{V_z}{V_w} = \left(1 + \frac{\rho_s}{\alpha} K_{SD}\right) \quad (11.26)$$

donde:

R = Factor de retraso, sin unidades.

V_z = Velocidad media del agua subterránea, m/s.

V_{zc} = Velocidad media del $C/C_o = 0.5$ punto del perfil de concentración del contaminante retrasado, m/s.

Si se supone que x para la mayoría de los suelos varía de 0.2 a 0.4, y que los valores correspondientes de p_b son aproximadamente de 1.6 a $2.1 \cdot 10^6$ g/m³, entonces la Ecuación (1 1.26) puede escribirse de la forma siguiente:

$$R = \frac{V_z}{V_{zc}} = (1 + 4 \cdot 10^6 K_{vd}) + (1 + 10 \cdot 10^6 K_{SD})$$

Si K_{SD} es igual a cero, el contaminante no es reactivo y no se produce el retraso (Figura 28). Si K_{SD} es mayor que aproximadamente 10^{-4} , el contaminante es esencialmente inmóvil. El valor de K_{SD} puede estimarse utilizando la siguiente expresión:

$$K_{SD} = 6.3 \cdot 10^{-7} foc (K_{ow}) \quad (11.28)$$

donde:

foc Fracción de carbono orgánico en el suelo, g/g.

Kow Coeficiente de distribución octanol-agua.

El retraso de los constituyentes orgánicos encontrados en el lixiviado es importante porque el material retenido puede someterse a reacciones biológicas y químicas, en algunos casos, haciendo inocuo el material retenido.

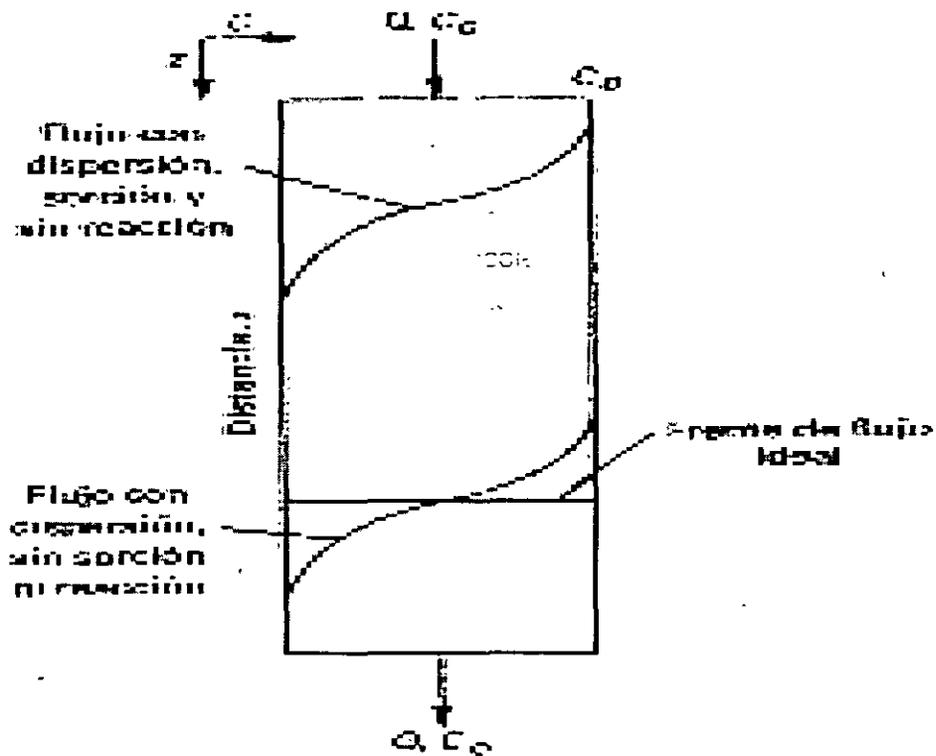


FIGURA 28

Retraso típico de oligocompuestos orgánicos en movimiento subsuperficial.

Control de la lixiviación en RS

Mientras el lixiviado se filtra a través del estrato inferior, se separan muchos de los constituyentes químicos y biológicos originalmente contenidos en él, mediante la acción filtrante y absorbente del material que compone el estrato. Por lo general, la amplitud de esta acción depende de las características del suelo, especialmente del contenido en arcilla. Por el riesgo potencial que implica el permitir que se filtre el lixiviado hasta el agua subterránea, la mejor práctica exige su eliminación o contención.

Actualmente se utilizan, por lo general, materiales aislantes de RS para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases de RS fuera de la zona del RS.

Hasta la fecha, el uso de arcilla como material de aislamiento ha sido el método más utilizado para reducir o eliminar la filtración del lixiviado fuera de los RS. La arcilla es factible por su facilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado, y por su resistencia al flujo del lixiviado. Sin embargo, está ganando en popularidad el uso de aislantes formados por una combinación mixta de geomembrana y arcilla, especialmente por la resistencia proporcionada por las geomembranas al movimiento del lixiviado y de los gases del RS. En la Tabla 13 se resumen las características, ventajas y desventajas de las geomembranas (también conocidas como recubrimientos de membrana flexible, RMF) que han sido utilizadas en RS de RSM. En la Tabla 14 se dan las especificaciones para geomembranas.

Sistemas de recubrimientos para RSM. El objetivo en el diseño de aislamientos para RS es minimizar la filtración del lixiviado en los suelos subsuperficiales por debajo del RS y eliminar, así, la contaminación potencial de las aguas subterráneas. Se han desarrollado varios diseños de aislamientos para minimizar el movimiento del lixiviado en la subsuperficie por debajo del RS. En la Figura 29 se ilustran algunos de los múltiples tipos de diseños que se han utilizado. En los diseños de multilaminados ilustrados en la Figura 29, cada una de las capas tiene una función específica. Por ejemplo, en la Figura 29a la capa de arcilla y la geomembrana sirven como una barrera mixta para el movimiento del lixiviado y del gas del RS. La capa de arena o grava sirve como capa de recolección y drenaje del lixiviado generado dentro del RS. La capa geotextil se utiliza para minimizar la mezcla de las capas del suelo con las capas de arena o grava. La capa final del suelo se emplea para proteger las capas de drenaje y barrera. Una modificación del diseño de aislamiento, mostrado en la Figura 29a, implica la instalación de tuberías para la recolección de los lixiviados en la capa para la recolección del lixiviado. Los diseños de aislamientos mixtos, que emplean una capa de arcilla y una geomembrana, proporcionan más protección y son hidráulicamente más efectivos que cualquier tipo de impermeabilización utilizado aisladamente.

En la Figura 29, se coloca una malla de plástico, especialmente diseñada con tejido abierto (geomalla), y una tela de filtro geotextil sobre

TABLA 13

Líneas directrices para instalaciones de control del lixiviado

Artículo	Comentarios
Recubrimientos sintéticos de membrana flexible(SMF)	Los recubrimientos deben diseñarse y construirse para contener los fluidos, incluyendo a los residuos y lixiviados. Para los RS de RSM, no se requieren recubrimientos sintéticos. Sin embargo, si se selecciona esta alternativa, los recubrimientos sintéticos deben tener un espesor máximo de 40 mm. Estos recubrimientos deben instalarse para cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un RS.
Selladores de fondo	No existen normativas específicas que gobiernen la aplicación de los selladores de fondo en los RS de RSM. El diseño, la construcción y la instalación de los selladores de fondo están sujetos a la aprobación de las agencias locales.
Recubrimientos artificiales de arcilla	Los recubrimientos de arcilla son opcionales para los RS de RSM. Si las condiciones del lugar lo requieren, los recubrimientos de arcilla para los RS de RSM deben tener un espesor mínimo de 0.3 m y deben instalarse con una compactación relativa de por lo menos el 90 por 100. Un recubrimiento de arcilla debe mostrar una permeabilidad máxima de $1 \cdot 10^{-6}$ CM/S. Los recubrimientos de arcilla, si se instalan, deben cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un RS.
Barreras subsuperficiales	<p>Una barrera subsuperficial se usa conjuntamente con los materiales geológicos naturales para asegurar la satisfacción de las estandarizaciones de permeabilidad lateral.</p> <p>Quizás las barreras serán requeridas por las agencias regionales en los RS de RSM donde haya un potencial de movimiento lateral de los fluidos, incluyendo residuos y lixiviado, y se utiliza la permeabilidad de los materiales geológicos naturales para contener los residuos en vez de un recubrimiento.</p> <p>Las barreras deben tener un espesor mínimo de 2 ft para el material arcilloso o un mínimo de 40 mm para los materiales sintéticos. Se requiere que estas estructuras estén localizadas a un mínimo de 5 ft dentro de materiales geológicos naturales que satisfacen los requisitos de permeabilidad de $1 \cdot 10^{-6}$ a $1 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Si se utilizan muros interceptores, las excavaciones de los RS también deben localizarse en materiales geológicos naturales que exhiban permeabilidades no mayores que $1 \cdot 10^{-6}$ cm/s.</p> <p>Se requiere que las barreras tengan sistemas de recolección de fluidos pendiente arriba de la estructura. Los sistemas deben diseñarse, construirse, explotarse y mantenerse para prevenir la acumulación de una cabeza hidráulica contra la estructura. El sistema de recolección debe inspeccionarse</p>

regularmente y los fluidos acumulados deben separarse.

TABLA 14

Ensayos de rendimiento utilizados para medir las propiedades de las geomembranas sintéticas, y los valores típicos para estas propiedades'

Ensayo	Método de ensayo	Valores típicos
Categoría de resistencia		
Propiedades de tensión	ASTM D638, tipo IV; pesa 5 cm/min	
Resistencia a la tracción		16,548 KN/m ²
Resistencia a la tracción en rotura		27,580 KN/M ²
Alargamiento elástico		15 por 100
Alargamiento en rotura		700 por 100
Tenacidad		
Iniciación de resistencia a la rotura	ASTM D1004 molde C	20 kg
Resistencia a la perforación	FTMS 10IB, método 2031	104 kg
Fragilidad a baja temperatura	ASTM D746 procedimiento B	-69°C
Durabilidad		
Porcentaje de negro de carbono	ASTM D1603	2 por 100
Dispersión de negro de carbono	ASTM D3015	A-1
Envejecimiento acelerado con calor	ASTM D 573, D1349	Cambio escaso de resistencia después de un mes a 110 °C
Resistencia química		
Resistencia a mezclas de residuos químicos	Método EPA 9090	Cambio en la resistencia a la tracción del 10 por 100 durante 120 días
Resistencia a reactivos químicos puros	ASTM D543	Cambio en la resistencia a la tracción del 10 por 100 durante 7 días
Resistencia a la rotura bajo tensión		
Resistencia a la rotura bajo tensión ambiental	ASTM D1693, condición C	1.500 h

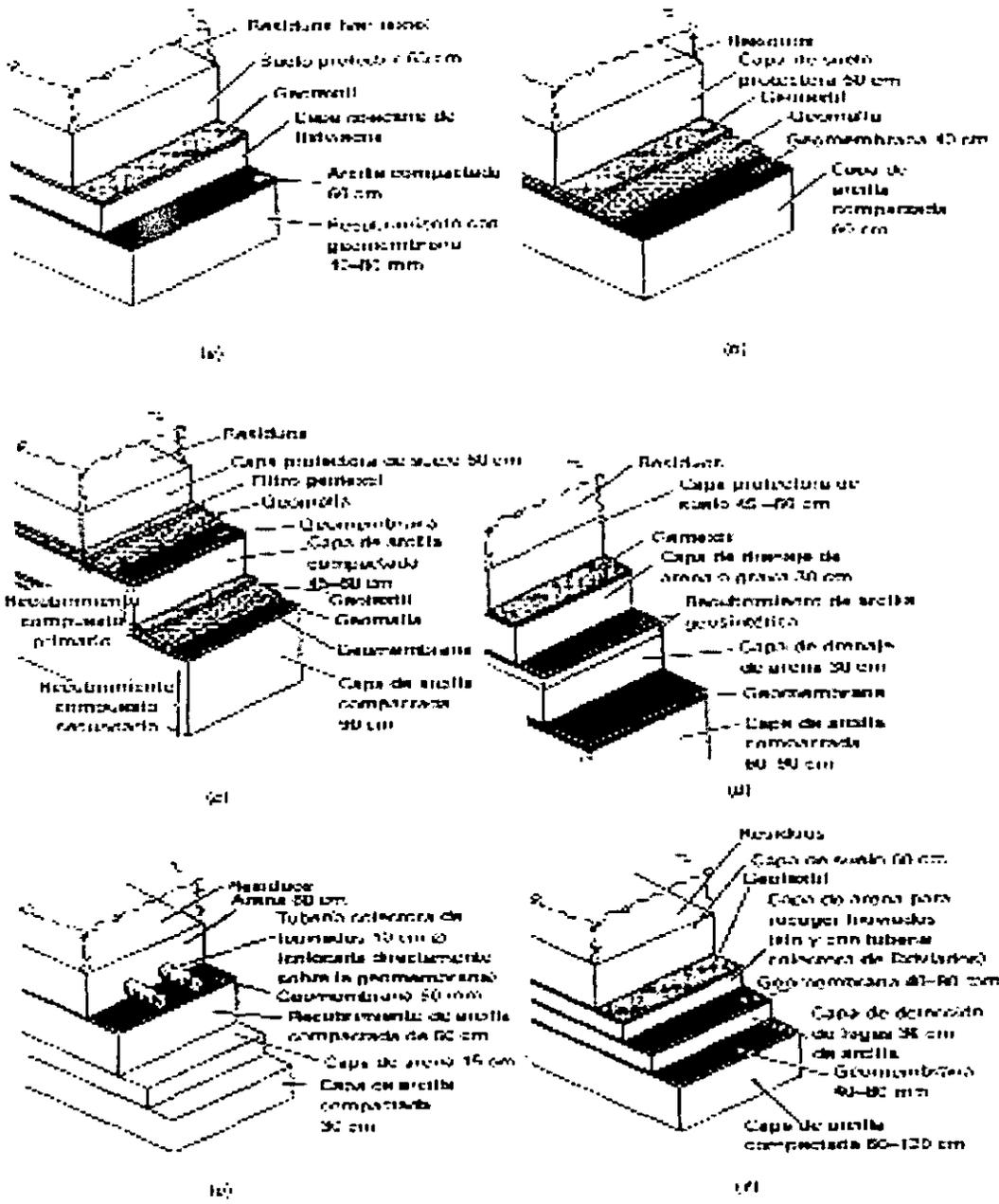


FIGURA 29

Recubrimientos de RS: (a, b) tipos de barreras sencillas-mixtas y (c-f) tipos de barreras dobles-mixtas. Hay que destacar que en los sistemas con aislamiento doble, el mixto primario a menudo se identifica como primario o como sistema de recolección de lixiviados, mientras que el aislamiento mixto secundario se identifica

como la capa de contención del lixiviado. Normalmente se colocan sensores de detección de lixiviados entre los aislamientos primarios y secundarios.

sobre una geomembrana que, a continuación, se coloca sobre una capa de arcilla compactada. Encima del geotextil se coloca una capa de suelo protectora. La geomalla y el geotextil funcionan conjuntamente como una capa que conduce el lixiviado hacia el sistema de recolección del lixiviado. La permeabilidad del sistema de aislamiento, que está conformado por una capa de drenaje y una capa de filtro, es equivalente a la de arena gruesa (ver Tabla 12). Por el potencial de atascamiento que presenta la tela geotextil, muchos diseñadores están a favor del uso de una capa de arena o grava como capa de drenaje.

En el sistema de recubrimiento mostrado en la Figura 29^c se utilizan dos recubrimientos mixtos, comúnmente identificados como capas mixtas primaria y secundaria. El aislamiento mixto primario se utiliza para la recolección del lixiviado, mientras el aislamiento mixto secundario sirve como un sistema para detectar fugas y como un respaldo para el primario. Una modificación del sistema de recubrimiento mostrado en la Figura 29^d implica la sustitución de la capa de drenaje con arena por un sistema de drenaje con geomalla, como se muestra en la Figura 29^e. El aislamiento mixto de dos capas mostrado en la Figura 29 es el mismo que el mostrado en la Figura 29^c, con la excepción de que la capa de arcilla debajo de la primera geomembrana es sustituida por un recubrimiento de arcilla geosintética (RAG). Como producto fabricado, el RAG se elabora con una arcilla bentonita de alta calidad y un material aglutinante apropiado. La arcilla bentonita es esencialmente un mineral montmorillonito de sodio que tiene la capacidad de absorber hasta 10 veces su peso en agua. Mientras la arcilla absorbe el agua, se vuelve como masilla, siendo muy resistente al movimiento del agua. Se han observado permeabilidades tan bajas como 10^{-10} cm/s. Disponibles en grandes láminas (3,6 a 4,2 por 30 m), los RAG se superponen en la construcción de un sistema de aislamiento. En las Figuras 29^e y 29^f se muestran dos sistemas adicionales de aislamientos con dos capas. En los sistemas mixtos mostrados en

las Figs. 29^{e-f}, normalmente se colocan sensores para detectar fugas entre dos aislantes.

Sistemas de aislamientos para monorrellenos. Los sistemas de aislamientos para monorrellenos normalmente están formados por dos geomembranas, cada una con una capa de drenaje y un sistema de recolección de 'lixiviados (ver Figuras 29^e y 29^f). Para detectar el lixiviado se coloca un sistema entre el primer y el segundo aislamiento, así como debajo del inferior. En muchas instalaciones se utiliza una capa de arcilla espesa (1 a 1.5 m) debajo de las dos geomembranas para una mayor protección.

Construcción de aislamientos de arcilla. En todos los diseños ilustrados en la Figura 29, se debe tener mucho cuidado con la construcción del aislamiento de arcilla. Quizás el mayor problema de la arcilla es su propensión a agrietarse debido a la desecación. Es muy importante no dejar que la arcilla se seque durante su colocación. Para asegurar un buen rendimiento, el recubrimiento de arcilla se debería instalar en capas de 10 a 15 cm, con una compactación adecuada antes de colocar las capas subsiguientes. Colocando la arcilla en capas finas se evita la posibilidad de fugas ocasionadas por la coincidencia de gruesos, lo que podría producirse si la capa de arcilla se coloca de una sola vez. Otro problema que puede plantearse cuando se utilizan arcillas de distintos tipos es la rotura debido a diferencias en el hinchamiento. Para evitar estas diferencias se debe utilizar un solo tipo de arcilla para la construcción del aislamiento.

Sistemas para la recolección de lixiviados

El diseño de un sistema para la recolección de lixiviados implica: 1) la selección del sistema que se va a utilizar, 2) el desarrollo de un plan gradual que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recolección del lixiviado y tuberías para canalizar el lixiviado, y 3) el trazado y diseño de instalaciones para canalizar, recoger y almacenar el lixiviado.

Chimeneas horizontales para la extracción del gas. Una alternativa al uso de chimeneas verticales es el uso de chimeneas horizontales. Esta utilización fue explorada y desarrollada por los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles (Figuras 16 y 17). En las Figuras 16 y 17 se ilustra también el uso de chimeneas perimétricas verticales conjuntamente con chimeneas horizontales para la extracción del gas. Las chimeneas horizontales se instalan después de completar dos o más niveles. Se excava en los residuos sólidos una zanja horizontal para la extracción del gas, con una retroexcavadora. Después se rellena la mitad de la zanja con grava y se instala una tubería perforada con juntas abiertas (Figura 18). Se procede a rellenar la zanja con grava y se cubre con residuos sólidos. Con el uso de una zanja llena de grava y de una tubería perforada con juntas abiertas, la zanja sigue funcionando incluso con el asentamiento diferencial que se produce en el RS con el paso del tiempo. Las zanjas horizontales se instalan en intervalos verticales de aproximadamente 25 m y en intervalos horizontales de 65 m.

Gestión del condensado en sistemas para la recuperación del gas. El condensado se forma cuando se enfría el gas del RS mientras se transporta en el colector camino del compresor. Los colectores de gas normalmente se instalan con una pendiente mínima del 3 por 100, para compensar el asentamiento diferencial. Como los colectores son construidos en secciones que se inclinan hacia arriba y hacia abajo a través de toda la extensión del RS, se instalan.

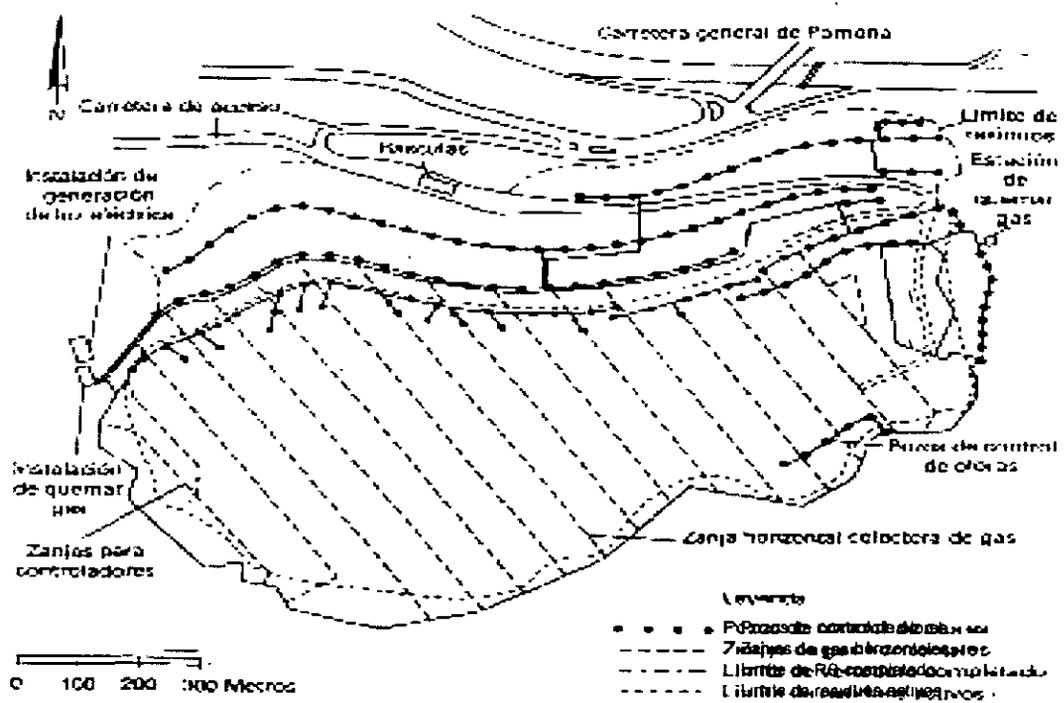


FIGURA 16

Plano de las instalaciones para la recolección del gas en el RS de Puente Hills.
 (Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

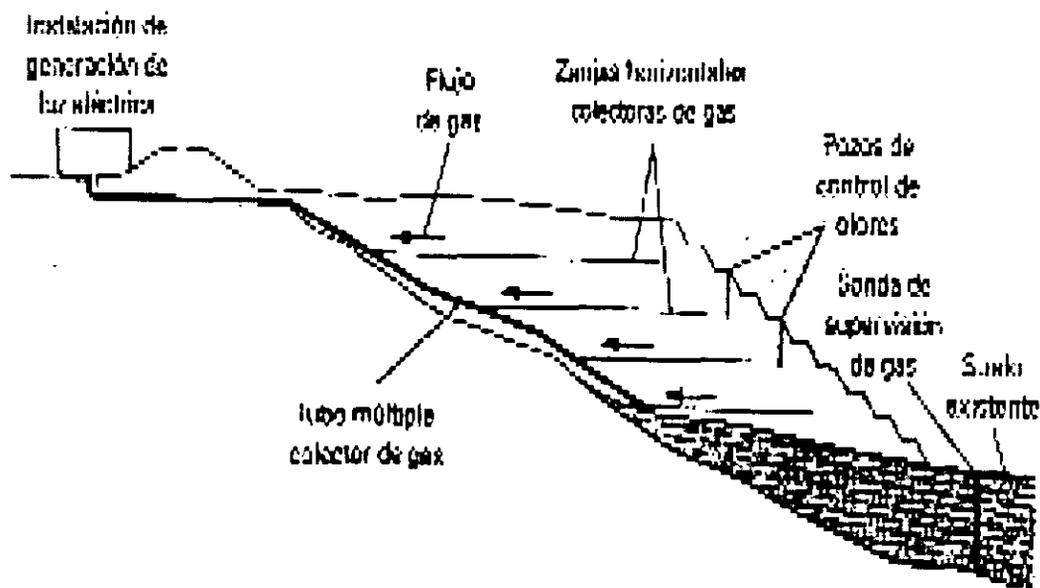


FIGURA 17

Perfil del RS de Puente Hills mostrando las zanjas horizontales recolectoras de gas. (Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

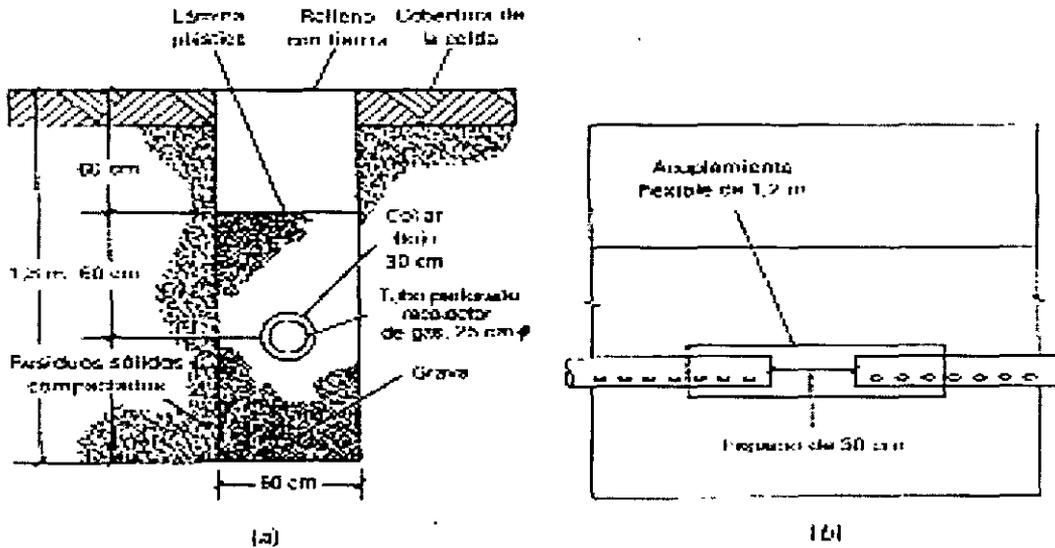


FIGURA 18

Detalles de una zanja horizontal para la extracción del gas: (a) perfil de zanja y (b) vista lateral. (Cortesía de los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles.)

se instalan trampas para el condensado en los puntos bajos de la línea. En la Figura 19 se muestra una trampa típica para el condensado, en la que éste se devuelve al RS. En los estados donde no se permite devolver el condensado al RS, las trampas para el condensado se conectan a depósitos de almacenamiento (Figura 19). El condensado se bombea periódicamente fuera del depósito y se transporta a una instalación autorizada de evacuación, o bien se trata *in situ* antes de evacuarlo o desecharlo a la alcantarilla local.

Gestión del gas de RS

Normalmente, los gases de RS que se han recuperado de un RS activo o se queman o se utilizan para la recuperación de energía en forma de electricidad, o ambos. Recientemente, se ha sugerido la separación del dióxido de carbono del

metano en el gas del RS, como una alternativa a la producción de calor y electricidad.

Incineración de los gases de RS. Un método común para tratar los gases del RS es la destrucción térmica, es decir, se queman el metano y cualquier otro oligogás (incluyendo COV) en presencia de oxígeno (contenido en el aire), produciéndose dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno y otros gases relacionados. La destrucción térmica de los gases del RS normalmente se lleva a cabo en una instalación de combustión especialmente diseñada (Figuras 20 y 21). Por las inque-

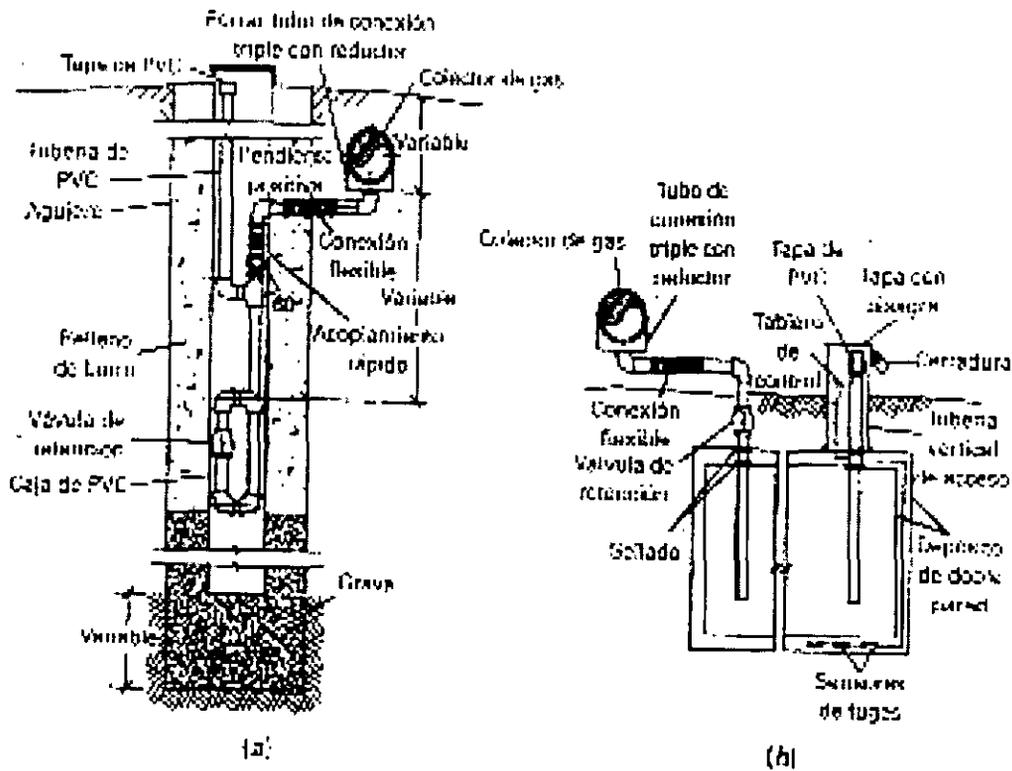


FIGURA 19

Trampas para el condensado: (a) el líquido se devuelve al RS (cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos Sólidos) y (b) el líquido se almacena en depósitos de almacenamiento.

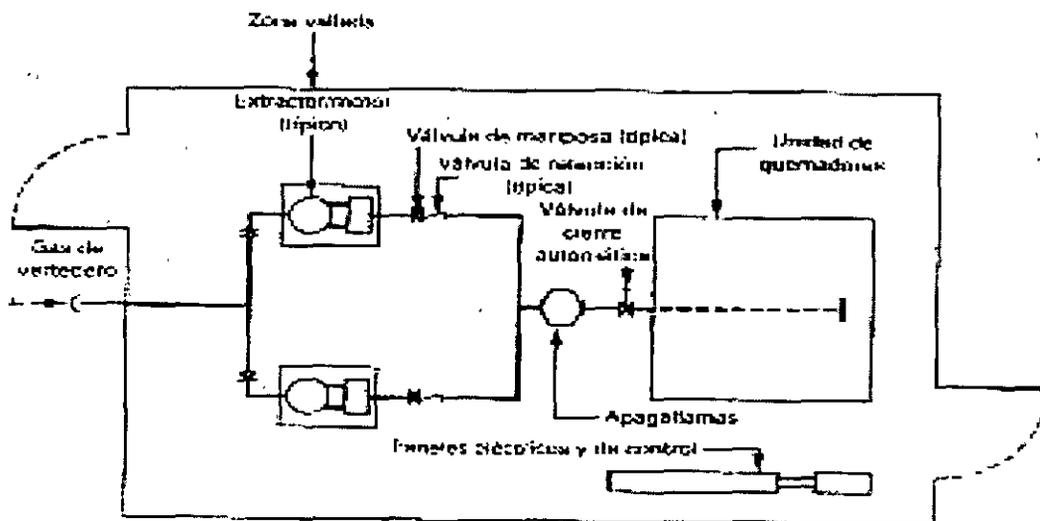


FIGURA 20

Esquema de una estación compresor/quemador, para la incineración del gas del RS. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.)



FIGURA 21

Vista de un conjunto de antorchas de gas utilizadas para quemar el gas de RS.

-tudes existentes acerca de la contaminación del aire, las instalaciones modernas se diseñan para cumplir rigurosas especificaciones de operación, que aseguren la destrucción total de COV y de otros compuestos similares que puedan estar

presentes en el gas del RS. Por ejemplo, un requisito típico podría ser una temperatura de incineración mínima de 815°C y un tiempo de residencia de 0.3 a 0.5 s, así como diversos controles y una instrumentación adecuada en la estación de combustión. En la Tabla 9 se resumen las especificaciones para una instalación moderna de combustión.

TABLA 9

Elementos de diseño importantes para los quemadores de gas de RS cerrados a nivel de suelos

Artículo	Observaciones
Indicador y registrador de temperatura	Utilizado para medir y registrar la temperatura del gas en la chimenea del quemador. Cuando el quemador está funcionando, debe mantenerse una temperatura de 815°C o más en la chimenea según el indicador de temperatura, 0.3 s después de pasar a través del quemador.
Sistema de re arranque del piloto automático.	Para asegurar un funcionamiento continuo.
Alarma de mal funcionamiento con sistema automático de aislamiento.	Se utilizan la alarma y el sistema de aislamiento para aislar al quemador del suministro de gas, cortar el ventilador y notificar a alguien responsable sobre la interrupción.
Rejillas de aire de combustión automáticamente controladas	Utilizadas para controlar la cantidad de aire de combustión y la temperatura de la llama.
Escotillas de muestreo en la fuente, con un acceso seguro	Utilizadas para supervisar el proceso de combustión y para el muestreo de las emisiones atmosféricas.
Ventanillas de inspección	Debe haber suficientes ventanillas de inspección para permitir un reconocimiento visual de la localización del sensor de temperatura dentro de la llama.
Pantalla de calor de la llama	Debería proporcionarse una pantalla de calor alrededor del punto más alto del aro de refuerzo para su utilización durante el muestreo.

Sistemas para recuperación de energía a partir del gas de RS. Normalmente, el gas de RS se convierte en electricidad (Figuras 22 y 23). En instalaciones pequeñas

(hasta 5 MW), es común utilizar motores de combustión interna para dos combustibles (Figuras 22a y 23a) o turbinas de gas (ver Figura 23). Cuando se utilizan motores tipo émbolo, se debe procesar el gas de RS para separar toda la humedad posible, de forma que se minimicen los daños a las cabezas de los cilindros. Si el gas contiene H_2S , la temperatura de combustión debe controlarse cuida-

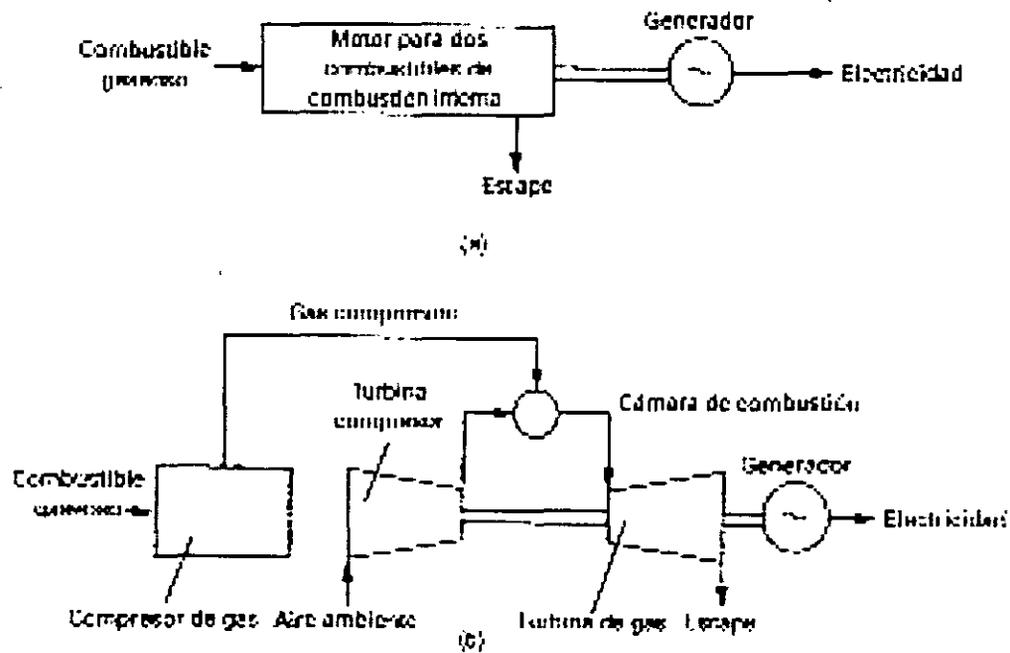


FIGURA 22

Diagramas de flujo esquemáticos para la recuperación de energía a partir de combustible gaseoso: (a) utilizando motor de combustión interna, y (b) utilizando turbina de gas.



(a)



(b)

FIGURA 23

Vistas de instalaciones para la conversión del gas: (a) utilizando motores de combustión interna para dos combustibles y (b) utilizando calderas y una turbina de vapor

dosamente para evitar problemas de corrosión. Alternativamente, se puede hacer pasar el gas de RS a través de una depuradora que contiene limaduras de hierro, o a través de depuradoras patentadas, para separar el H_2S antes de quemar el gas.

Las temperaturas de combustión también serán de gran importancia cuando el gas del RS contenga COV procedentes de los residuos colocados en RS, antes de que se prohibiera la evacuación de residuos peligrosos en los RS municipales. El ciclo típico de los motores para dos combustibles que funcionan con gas de RS varía de 3,000 a 10,000 horas, antes de tener que reacondicionar los motores. En la Figura 23a el gas del RS de bajo poder calorífico se comprime a altas presiones, para aprovecharlo mejor en la turbina de gas. El ciclo de servicio normal para turbinas que queman gases de RS es aproximadamente de 10.000 horas.

Purificación y recuperación del gas. Si hay una utilización potencial para el CO_2 contenido en el gas del RS, se pueden separar el CH_4 y el CO_2 en el gas del RS. La separación de CO_2 y de CH_4 puede realizarse mediante absorción física, absorción química, y mediante separación por membrana. En las absorciones física y química, un componente se absorbe preferencialmente utilizando un disolvente adecuado. La separación mediante membrana implica el uso de una membrana semipermeable que dejan pasar CO_2 , H_2S y H_2O , mientras se retiene el CH_4 . Hay membranas en láminas planas o en fibras huecas. Para incrementar la eficiencia de la separación, las láminas se retuercen en forma de espiral sobre un medio de soporte, mientras las fibras huecas están agrupados juntas en haces.

Zanja perimétrica barrera. Las zanjas barrera (Figura 11b) normalmente se llenan con materiales relativamente impermeables, como bentonita o pastas de arcilla. En este caso, la zanja se convierte en una barrera física para el movimiento lateral subsuperficial. El gas de RS se separa de la cara interna de la barrera con chimeneas para la extracción del gas o con zanjas llenas de grava. Sin embargo, las zanjas pueden sufrir rotura por desecación, y por lo tanto se utilizan más frecuentemente en proyectos para interceptar aguas subterráneas. La eficacia a largo plazo de las zanjas de barrera para controlar la migración de los gases de RS es dudosa.

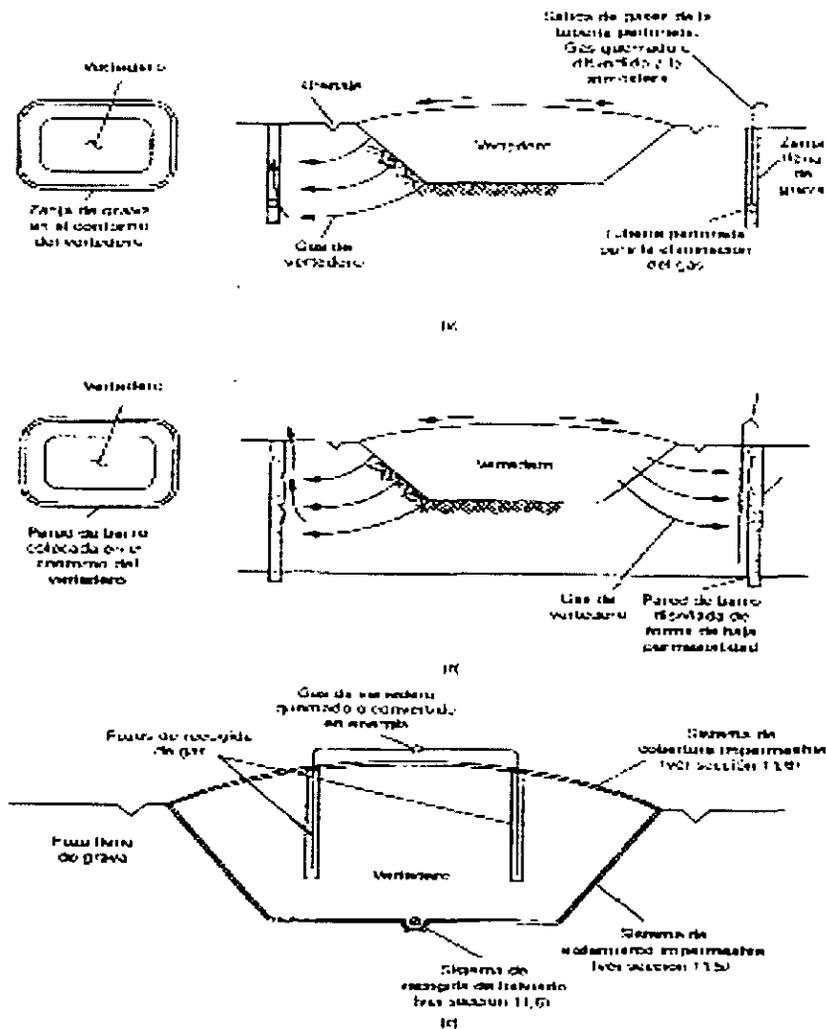


FIGURA 11

Instalaciones pasivas utilizadas para controlar el gas del RS: (a) zanja interceptora rellena con grava y con tubería perforada; (b) zanja barrera perimétrica, y (c) uso de recubrimiento impermeable en el RS. Hay que destacar que las zanjas interceptoras perimétricas se utilizan para controlar la migración del gas del RS en RS sin recubrimientos.

Barreras impermeables dentro de los RS. En los RS modernos, el movimiento de los gases del RS a través de las formaciones adyacentes del suelo se controla, antes de comenzar las operaciones de relleno, con la construcción de barreras de materiales que son más impermeables que el suelo (Figura 11c). Algunos de los materiales usados para esta finalidad se identifican en la Tabla 8. Para controlar el lixiviado, lo más común es el uso de arcillas compactadas y geomembranas de varias clases, sencillas o en configuraciones multilaminares. Como los principales gases y los oligogases se difundirán a través de los recubrimientos de arcilla, actualmente muchas agencias exigen el uso de geomembranas para limitar el movimiento de los gases del RS.

TABLA 8

Materiales de sellado de RS para el control del movimiento de gas y lixiviado

Sellador		
Clasificación	Tipos representativos	Comentarios
Suelo compactado		Debería contener algo de arcilla y lodo fino
Arcilla compactada	Bentonitas, ilitas, caolinitas	El material de sellado más frecuentemente utilizado para los RS; el espesor de la capa varía de 0.15 a 1.2 m; la capa debe ser continua, no permitiendo que se seque o agriete
Químicas inorgánicas	Carbonato de sodio, silicato o pirofosfato	Su uso depende de las características del suelo local.

Químicas sintéticas	Polímeros, goma látex	Experimental; su utilización en campo no está bien establecida
Recubrimientos de membrana sintética	Policloruro de vinilo, goma butilo, polietileno, recubrimientos reforzados de nylon	Frecuentemente utilizado para el control del lixiviado; utilización incrementada para controlar el gas de RS
Asfalto	Asfalto modificado, asfalto impregnado de goma, tejido de polietileno recubierto de asfalto, hormigón asfáltico	La capa debe ser lo suficientemente espesa como para mantener la continuidad bajo diferentes condiciones de consolidación
Otros	Hormigón gunita, cemento de suelo, cemento plástico de suelo	No utilizado frecuentemente para controlar el movimiento de gas y lixiviados por grietas de contracción después de la construcción.

Uso de barreras absorbentes para oligogases dentro del RS. En base a los resultados de los programas de muestreo llevados a cabo por la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos, es patente que los oligogases están presentes en los RS en concentraciones muy variables. Gradientes de alta concentración ocasionan un componente de flujo de oligogases de gran difusión, incluso cuando hay muy poco transporte por convección de la mezcla del gas principal en forma de flujo. La utilización de material absorbente, tal como compost, puede retrasar la salida de oligogases. De esta forma, los mecanismos de transformación bióticos y/o abióticos pueden contar con más tiempo para degradar los oligocompuestos absorbidos.

**Control activo del gas de RS
con instalaciones perimétricas**

Se puede controlar el movimiento lateral del gas de RS mediante el uso de chimeneas y zanjas perimétricas para la extracción del gas, creando un vacío parcial que origina un gradiente de presión hacia la chimenea de extracción. El gas extraído se quema para controlar las emisiones de metano y COV, o se utiliza para producir energía. El uso de chimeneas con inyección de aire también se explica en la siguiente exposición.

Chimeneas perimétricas para la extracción del gas y para el control de olores.

Normalmente las chimeneas perimétricas se utilizan (Figura 12a) en RS con profundidades de residuos sólidos de por lo menos 8 m, cuando la distancia entre el RS y la urbanización más cercana es relativamente pequeña. Se trata de una serie de chimeneas verticales instaladas o bien dentro del RS a lo largo de su borde o bien en la zona localizada entre el borde del RS y el vallado del lugar. Cada chimenea se conecta a un tubo recolector común que después está conectado a un compresor eléctrico centrífugo, que produce vacío (presión negativa) en el colector y en las chimeneas individuales. Cuando se aplica el vacío, se crea una *zona o radio de influencia* que se extiende a la masa de residuos sólidos alrededor de cada chimenea y dentro de la cual el gas generado es aspirado hacia la chimenea. Normalmente se ventila o se quema el gas extraído del RS, de una forma controlada, en la estación del compresor. También se puede utilizar el gas extraído como fuente de energía si la cantidad que se puede recoger y la calidad son suficientes.

El diseño de la chimenea de extracción consiste en una tubería de 10 a 16 cm (a menudo de PVC o PE) colocada en una perforación de 45 a 90 cm (ver Figura 13). Del tercio a la mitad inferior, la funda se perfora y se coloca sobre un relleno de grava. El resto de la funda no se perfora y se coloca en un relleno de tierra (preferentemente) o de residuos sólidos. Se espacian las chimeneas para que sus zonas de influencia se traslapen. A diferencia de los pozos para agua, la zona de influencia para las chimeneas verticales es esencialmente una esfera extendida en todas las direcciones a partir de la chimenea de extracción (ver Figura 12). Por esta

razón, se debe tener mucho cuidado para evitar una *sobrecarga* en el sistema. Tasas de extracción excesivas pueden

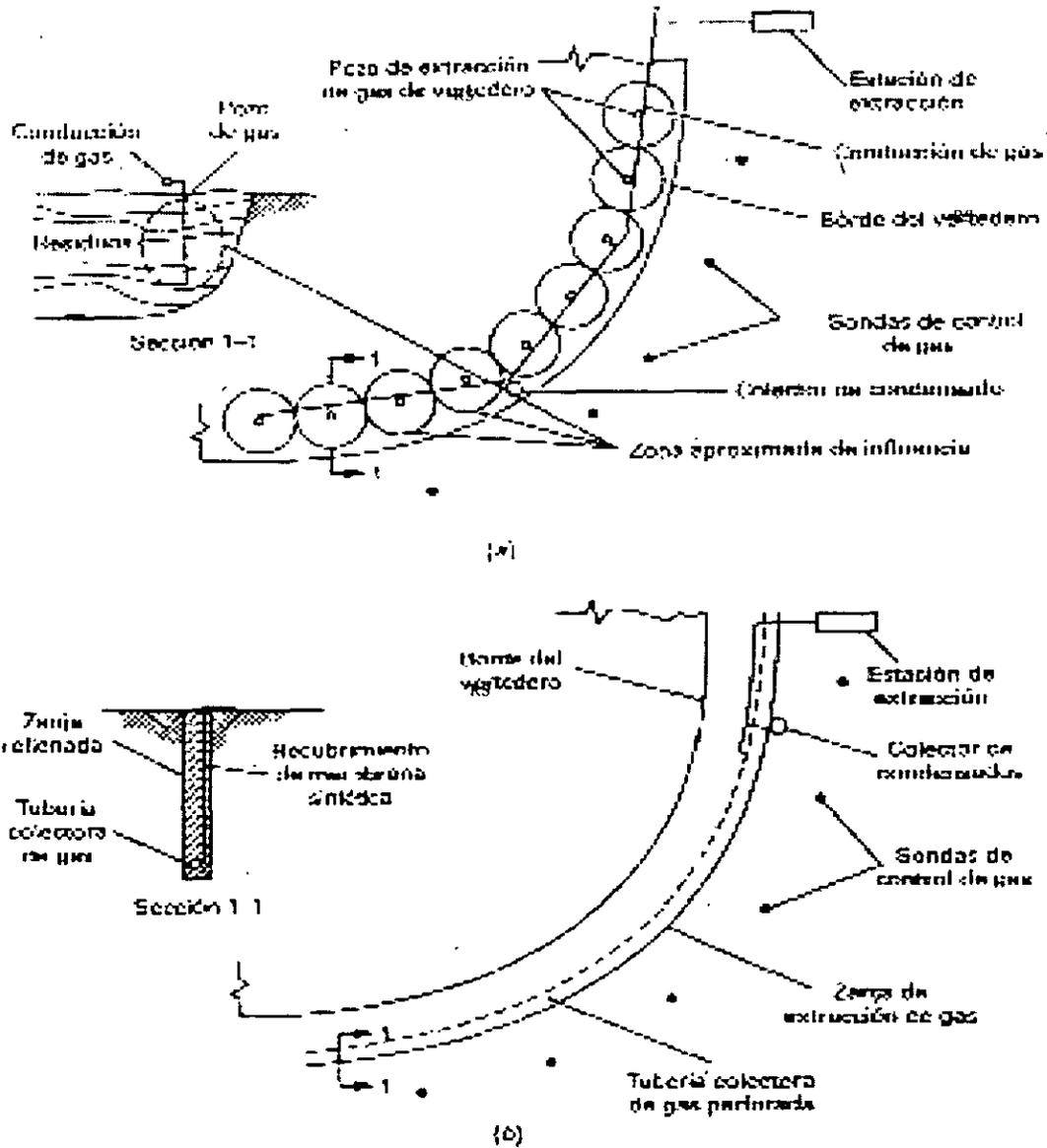


FIGURA 12

Instalaciones activas utilizadas para el control subsuperficial de la migración del gas de RS: (a) chimeneas perimétricas para la extracción del gas del RS y (b) zanja perimétrica para la extracción del gas del RS.

causar que el aire procedente del suelo circundante se infiltre en la masa de residuos. Para prevenir la entrada de aire, la tasa de flujo de gas para cada chimenea debe controlarse cuidadosamente. Para esta finalidad se equipan las chimeneas con tomas para el muestreo del gas y válvulas para controlar el flujo. Según la profundidad del RS y otras consideraciones locales, el espacio entre las chimeneas perimétricas variará de 8 a 16 m, aunque se han utilizado distancias mayores.

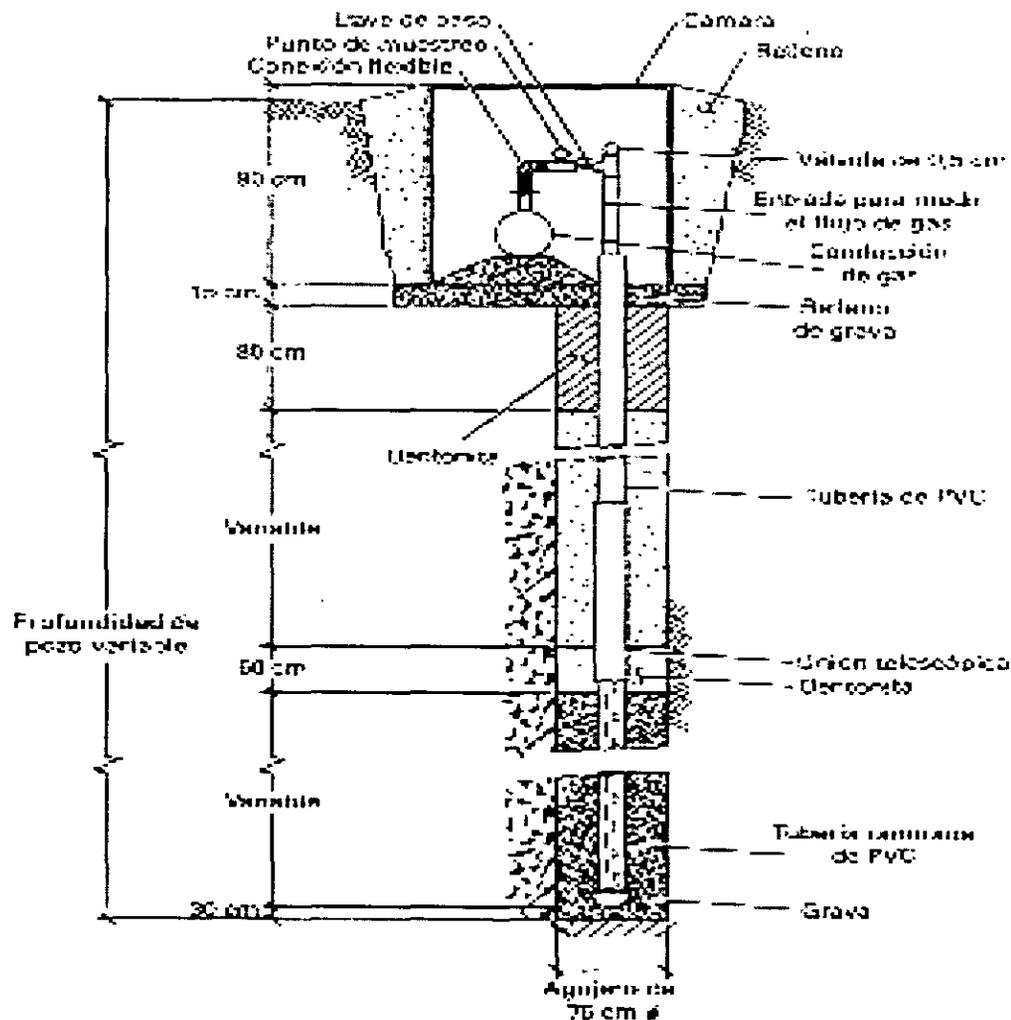


FIGURA 13

Detalle representativo de una chimenea para la extracción de gas de RS.
(Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

En RS grandes, también se utilizan chimeneas perimétricas verticales para la extracción del gas localizado en el interior del RS conjuntamente con chimeneas horizontales y verticales más grandes. Las chimeneas perimétricas verticales se utilizan para controlar la migración fuera del lugar de los gases del RS en los bordes y superficies del RS. Cuando se utilizan chimeneas perimétricas para controlar las emisiones olorosas a través de las superficies del RS, se mantienen las superficies del RS con un ligero vacío.

Zanjas perimétricas para la extracción del gas. Las zanjas perimétricas de extracción (ver Figura 12) normalmente se instalan en el suelo original adyacente del perímetro del RS. Se utilizan normalmente en RS poco profundos, con profundidades de 8 m o menos. Las zanjas están llenas de grava y contienen tuberías de plástico perforadas que se conectan lateralmente a un colector y compresor centrífugo de extracción. Las zanjas de extracción pueden extenderse verticalmente desde la superficie del RS hasta la profundidad total de los residuos o hasta el agua subterránea, y pueden sellarse adicionalmente en la superficie con un recubrimiento de membrana. El compresor crea una zona de presión negativa en cada zanja que se extiende hacia los residuos sólidos. El gas de RS migrando en esta zona es aspirado por la tubería perforada y el recolector, y subsiguientemente emitido o quemado en la estación del compresor. Se pueden hacer ajustes en el flujo mediante válvulas de control en cada zanja.

Chimeneas perimétricas con inyección de aire (sistema de cortina de aire). Las chimeneas perimétricas con inyección de aire son una serie de chimeneas verticales instaladas en el suelo original entre los límites del RS y las instalaciones que hay que proteger contra la intrusión del gas del RS. Normalmente se instalan las chimeneas con inyección de aire cerca de RS con profundidades de residuos sólidos de 7 m o más, en zonas de suelo inalterado entre el RS y las propiedades potencialmente afectadas.

Control activo del gas de RS con chimeneas verticales y horizontales para la extracción del gas

Se han utilizado chimeneas verticales y horizontales para la extracción del gas de RS. En algunas instalaciones se han utilizado los dos tipos de chimenea. La gestión del condensado que se forma cuando se extrae el gas del RS también es un elemento importante en el diseño de sistemas para la recuperación del gas.

Chimeneas verticales, para la extracción del gas. En la Figura 14 se ilustra un sistema típico para la recuperación de gas que utiliza chimeneas verticales para la extracción. Se separan las chimeneas para que sus zonas de influencia se complementen (Figura 15). En los RS clausurados, sin instalaciones para la recuperación de gas, la zona de influencia de las chimeneas se determina, a veces, llevando a cabo pruebas de aspiración sobre el terreno. Normalmente se instala una chimenea de extracción conjuntamente con sondas de gas a distancias regulares de la chimenea, y se mide el vacío dentro del RS mientras se aplica el vacío a la chimenea de extracción. Se pueden realizar pruebas de extracción de gas a largo y corto plazo. Como el volumen del gas producido disminuye con el tiempo, algunos diseñadores prefieren utilizar un espaciamiento uniforme de las chimeneas y controlar la zona de influencia de las chimeneas ajustando el vacío en la cabecera de cada chimenea. Puesto que la zona de influencia de una chimenea vertical es esencialmente una esfera, su extensión dependerá también de la profundidad del RS y del diseño de cubrimiento del RS. En RS

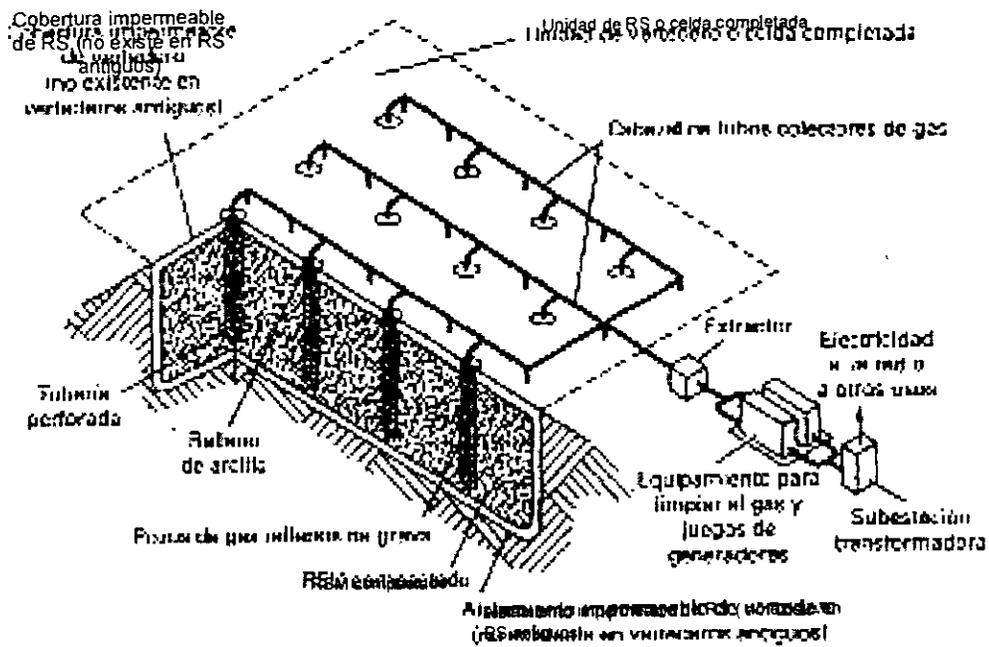


FIGURA 14

Sistema para la recuperación del gas del RS utilizando chimeneas verticales.

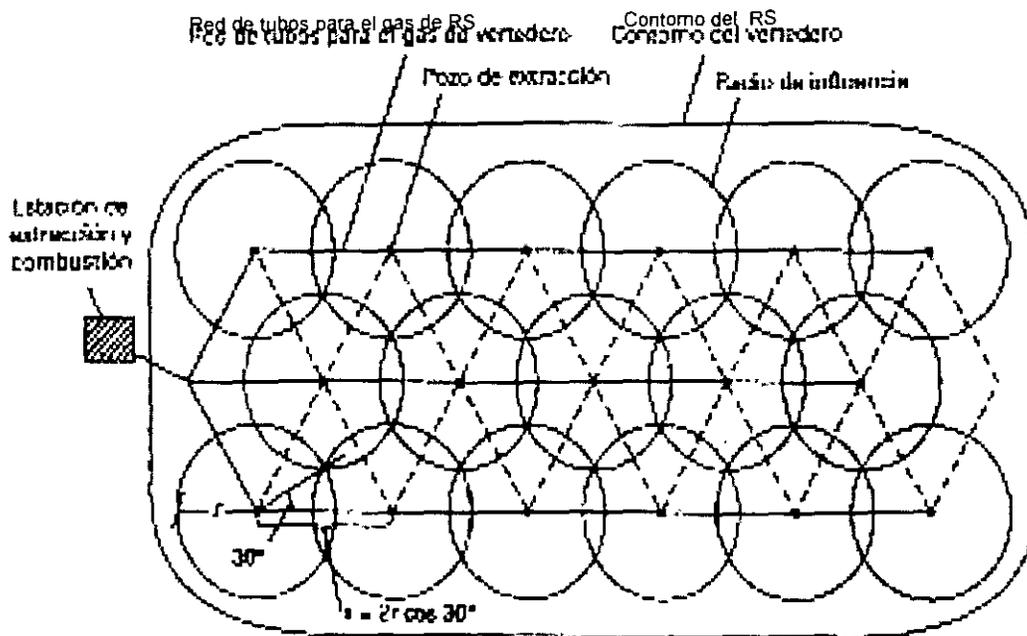


FIGURA 15

Distribución en forma de triángulo equilátero de chimeneas verticales para la extracción del gas. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

profundos con una cobertura mixta, que contiene una geomembrana, es común para las chimeneas un espaciamiento de 50 a 65 m. En RS con coberturas de arcilla y/o suelo, quizás se necesite, dentro del sistema para la recuperación del gas, un espaciamiento menor (por ejemplo, 30 m) para evitar la salida de gases a la atmósfera.

Las chimeneas verticales normalmente se instalan después de llenarse el RS o ciertas zonas del mismo. En RS más antiguos se instalan las chimeneas verticales para recuperar energía y para controlar el movimiento de los gases a propiedades de terrenos adyacentes. El diseño de una chimenea de extracción consiste en una funda de tubería de 10 a 16 cm (a menudo de PVC o PE) puesta en una perforación de 45 a 90 cm (Figura 13). Del tercio a la mitad inferior de la funda se perfora y se coloca sobre un relleno de grava. El resto de la funda no se perfora y se coloca sobre un relleno de tierra, y se sella con arcilla. Normalmente las chimeneas para la recuperación del gas del RS se diseñan para penetrar hasta el 80 por 100 de la profundidad de los residuos, ya que su zona de influencia se extenderá hasta el fondo del RS. Sin embargo, para calmar el miedo del público acerca de los escapes de los gases del RS, actualmente algunos diseñadores colocan las chimeneas para la recuperación del gas de forma que lleguen hasta el fondo del RS. El vacío disponible en el colector en la cabecera de la chimenea normalmente es de 25 cm³ de agua.

6.0 COMPOSICION Y CARACTERISTICAS, GENERACION, MOVIMIENTO Y CONTROL DE LOS GASES DE RS

Se puede conceptuar un RS de residuos sólidos como un reactor bioquímico, con residuos y agua como entradas principales, y con *gases de RS y lixiviado* como principales salidas. El material almacenado en el RS incluye: material orgánico parcialmente biodegradado y otros materiales inorgánicos de los residuos originalmente colocados en el RS. Se emplean los sistemas de control de los gases del RS para prevenir el movimiento indeseable hacia la atmósfera de los gases del RS, o el movimiento lateral o vertical a través del suelo circundante. Se puede utilizar el gas recuperado del RS para producir energía, o se puede quemar, bajo condiciones controladas, para disminuir la emisión de constituyentes dañinos a la atmósfera.

Composición y características del gas de RS

El gas de RS está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (gases principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (oligogases). Los gases principales proceden de la descomposición de la fracción orgánica de los RSM. Algunos de los oligogases, aunque presentes en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y podrían presentar riesgos para la salud pública.

Constituyentes principales del gas de RS. Los gases que se encuentran en los RS incluyen amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). En la Tabla 2 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un RS de RSM. En la Tabla .3 se presentan datos sobre el peso molecular y la densidad. El metano y el dióxido de carbono son los

principales gases procedentes de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los RSM.

TABLA .2

Constituyentes típicos encontrados en el gas de RS de RSM,

Componente	Porcentaje (base volumen seco) ^b
Metano	45-60
45-60 Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0,1-1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, cte	0-1,0
Amoniaco	0,1-1,0
Hidrógeno	0-2,0
Monóxido de carbono	0-2,0
Constituyentes en cantidades traza	0,01-0,6
Características	Valor
Temperatura	37-60°C
Densidad específica	1,02-1,06
Contenido en burnedad	Suturado
Poder calorifico superior Kcal/m ³	890-1.223

^b La distribución porcentual exacta viariará según la antigüedad del RS.

TABLA .3

Peso molecular, densidad y peso específico de los gases encontrados en un RS controlado en condiciones estándar (OC, 1 atm)

Gas	Fórmula	Peso molecular	Densidad g/l	Peso, específico kg/m ³
Aire		28.97	1.2928	1.293

Amoniaco	NH ₃	17.03.	0.7708	0.771
Dióxido de carbono	CO ₂	44.00	1.9768	1.977
Monóxido de carbono	CO	28.00	1.2501	.1250
Hidrógeno	H ₂	2.016	0.0898	0.089
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	34.08	1.5392	1.538
Metano	CH ₄	16.03	0.7167	0.717
Nitrógeno	N ₂	28.02	1.2507	1.251
Oxígeno	O ₂	32.00	1.4289	1.428

Nota: Para un comportamiento de gas ideal, la densidad es igual a $\frac{mp}{IRT}$, donde m es el peso molecular del gas, p es la presión, R es la constante de gas *universal*. y T es la temperatura utilizando una serie de unidades consistente.

orgánicos en los RSM. Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones de entre el 5 y el 15 por 100, es explosivo. Como en el RS sólo están presentes cantidades limitadas de oxígeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de que el RS vaya a explotar. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo si el gas del RS migra fuera del lugar y se mezcla con el aire. La concentración de los gases que pueden escaparse en el lixiviado dependerá de su concentración en la fase gas cuando se pone en contacto con el lixiviado, ésta se estima utilizando la ley de Henry, Como el dióxido de carbono afectará al pH del lixiviado, se requieren datos sobre el equilibrio carbónico, que pueden utilizarse para estimar el pH del lixiviado.

Constituyentes del gas de RS en cantidades traza. La Junta para la Gestión integral de Residuos de California ha llevado a cabo un programa extensivo para realizar ensayos sobre los gases del RS, como parte de un estudio para su caracterización. En la Tabla 4 se presentan datos resumidos sobre.

TABLA 4

Concentraciones típicas de compuestos en cantidades traza encontrados en el
gas de RS en 66 RS de RSM en California

Compuesto	Concentración, ppbV ^b		
	Mediana	Media	Máxima
Acetona	0	6.038	240.000
Benceno	932	2.057	39.000
Clorobenceno	0	82	1.640
Cloroformo	0	245	12.000
1,1-dicloroetano	0	2.801	36.000
Diclorometano	1.150	25.694	620.000
1,1-diclorodietileno	0	130	4.000
Clorodietileno	0	2.835	20.000
Tras-1,2 dicloroetano	0	36	850
2,3-dicloropropano	0	0	0
1,2-dicloropropano	0	0	0
Bromuro de etileno	0	0	0
Dicloroetileno	0	59	2.100
Oxido de etileno	0	0	0
Etilenceno	0	7.334	87.500
Metil-etil-cetona	0	3.092	130.000
1,1,2-tricloroetano	0	0	0
1,1,1-tricloroetano	0	615	14.500
Tricloroetano	0	2.079	32.000
Tolueno	8.125	34.907	280.000
1,1,2,2-tetracloroetano	0	246	16.000
Tetracloroetileno	260	5.244	180.000
Cloruro de vinilo	1.150	3.508	32.000
Estirenos	0	1.517	87.000
Acetato de vinilo	0	5.663	240.000
Xileno	0	2.651	38.000

ppbV = partes por billón (mil millones) por volumen.

datos resumidos sobre las concentraciones de los oligocompuestos encontrados en las muestras de los gases de RS procedentes de 66 RS. Los datos que se presentan en la Tabla 4 son representativos de los oligocompuestos encontrados en la mayoría de los RS. La presencia de estos gases en el lixiviado que se separa del RS dependerá de sus concentraciones en el gas del RS cuando se pone en contacto con el lixiviado. Se pueden estimar las concentraciones de estos constituyentes en el lixiviado utilizando la ley de Henry. Hay que resaltar que la

frecuencia de concentraciones significativas de COV en el gas del RS está asociada a RS antiguos, que aceptaban residuos industriales y comerciales que contenían COV. En los RS más modernos, donde está prohibida la evacuación de residuos peligrosos, las concentraciones de COV en el gas del RS han sido extremadamente bajas.

Generación del gas de RS

En la siguiente exposición se tratan estos temas: la generación de los principales gases del RS, la variación en la tasa de generación frente al tiempo, y los orígenes de los oligogases en los RS.

Generación de los principales gases del RS. Como se ilustra en la Figura 7, se considera que la generación de los principales gases del RS se produce en cinco o menos fases secuenciales. A continuación se describe cada una de estas fases.

Fase 1: Ajuste inicial. La fase 1 es la de ajuste inicial, en la que los componentes orgánicos biodegradables de los RSM sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un RS y poco después. En la fase 1, se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del RS. La fuente principal de organismos, ambos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cubrimiento diario y final. Otras fuentes de organismos son los lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales evacuados en muchos RS de RSM, y el lixiviado reciclado.

Fase II: Fase de transición. En la fase II, identificada como fase de transición, desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el RS se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica.

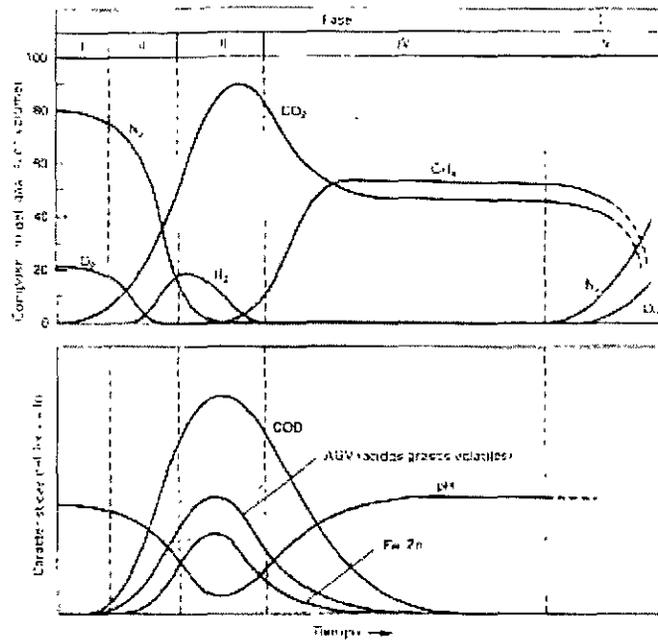


FIGURA 7

Fases generales en la generación de gases de RS (I = ajuste inicial, II = fase de transición, III - fase ácida, IV = fermentación del metano y V - fase de maduración).

de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación /reducción que tiene el residuo. Las condiciones de reducción suficientes para producir la reducción del nitrato y del sulfato se dan aproximadamente entre - 50 a - 100 milivoltios. El metano se produce cuando los valores del potencial de oxidación/reducción están dentro del rango de - 150 a - 300 milivoltios. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción. los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los RSM en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III. En la fase II, el pH del lixiviado, si es que éste se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del RS (ver Figura 7).

Fase III: Fase ácida. En la fase III, fase ácida, se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH_3COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fulvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal gas generado durante la fase III. También se producirán cantidades más pequeñas de gas de hidrógeno (H_2). Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metano- génicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas. A menudo se identifican estos microorganismos en la literatura de ingeniería como acidogénicos o formadores de ácido.

El pH del lixiviado, si se forma, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del RS. La demanda de bioquímica de oxígeno (DOB_5), la demanda química de oxígeno (DOQ) y la conductividad del lixiviado se incrementará significativamente durante la fase III debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado. También se solubilizarán durante la fase III algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, debido a los bajos valores del pH en el lixiviado. Muchos nutrientes esenciales también se separan con el lixiviado en la fase III. Si no se recicla el lixiviado, se perderán del sistema nutrientes esenciales. Es importante resaltar que si no se forma lixiviado, quedarán dentro del RS productos de conversión producidos durante la fase 111 como constituyentes absorbidos en el agua contenida por los residuos, como se define en la capacidad de campo (capítulo 7).

Fase IV: Fase de fermentación del metano. En la fase IV, la fase de fermentación del metano, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH_4 y CO_2 , llegan a ser más predominantes. En algunos casos, estos organismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. Colectivamente, se identifican en la literatura como metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

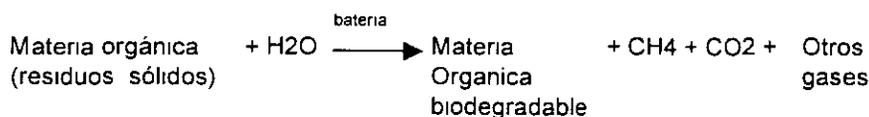
Como los ácidos y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH_4 y CO_2 en la fase IV, el pH dentro del RS subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DOB_5 y DOQ y el valor de conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

Fase V: Fase de maduración. La fase V, *fase de maduración*, se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH_4 y CO_2 durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación del gas de RS disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el RS son de una degradación lenta. Los principales gases de RS que han evolucionado en la fase V son CH_4 y CO_2 . Según las medidas de sellado del RS, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del RS. Durante

la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmico y fúlvico, que son difíciles de degradar biológicamente.

Duración de fases. La duración de las fases individuales de producción del gas de RS variará según la distribución de los componentes orgánicos en el RS, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial. Por ejemplo, si se compactan juntos varios cargamentos de matorrales la relación carbono/nitrógeno y el balance de nutrientes puede que no sea favorable para la producción del gas de RS. De forma similar, se retardará la generación del gas de RS si no hay suficiente humedad disponible. Incrementando la densidad del material colocado en el RS, descenderá la posibilidad de que la humedad llegue a todas las partes de los residuos y, por lo tanto, reducirá la velocidad de bioconversión y la producción de gas. En la Tabla 5 se presentan datos típicos sobre la distribución porcentual en función del tiempo de los principales gases encontrados en un RS recientemente agotado.

Volumen del gas producido. La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



Hay que resaltar que la reacción requiere la presencia de agua. Se han encontrado RS que carecen de un contenido de humedad suficiente en un estado «momificado», con papel de periódico de hace décadas en condiciones legibles. Entonces, aunque la cantidad total del gas que se produce a partir de residuos sólidos se derive directamente de una reacción estequiométrica, las

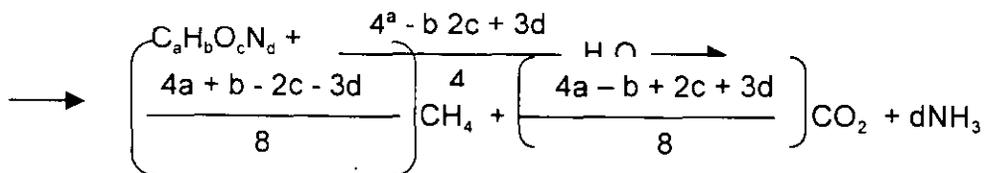
TABLA 5

Distribución porcentual de los gases de RS observados durante los primeros 48 meses después de la clausura de una celda de RS'

Intervalo temporal desde el llenado de la celda, meses	Medio, porcentaje por volumen		
	Nitrógeno, N ₂	Dióxido de carbono, CO ₂	Metano, CH ₄
0-3	5	88	5
3-6	3,8	76	21
6-12	0,4	65	29
12-18	1,1	52	40
18-24	0,4	53	47
24-30	0,2	52	48
30-36	1,3	46	51
36-42	0,9	50	47
42-48	0,4	51	48

condiciones hidrológicas locales afectan significativamente a la velocidad y al período de tiempo en el que tiene lugar la producción del gas.

El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias formas. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales encontrados en los RSM (con la excepción de plásticos) se representan de una forma generalizada con la fórmula C_aH_bO_cN_d, entonces se puede estimar el volumen total del gas utilizando la Ecuación (2), suponiendo la conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en CO₂ y CH₄.



En general, se pueden dividir los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos en dos clasificaciones: 1) aquellos materiales que se descomponen rápidamente (tres meses a cinco años) y 2) aquellos materiales que se

descomponen lentamente (hasta 50 años o más). En la Tabla 6 se identifican los componentes de la fracción orgánica de los RSM de descomposición lenta y rápida.

TABLA 6

Constituyentes orgánicos rápidamente y lentamente biodegradables en los RSM

Componente de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	si	
Periódicos	si	
Papel de oficina	si	
Cartón	si	
Plásticos ^a		si
Textiles		si
Goma		si
Cuero		si
Residuos de jardín	si ^b	si ^c
Madera		si
Orgánicos misceláneos		si

^a Los plásticos generalmente son considerados no biodegradables.

^b Hojas Y recortes de césped. Normalmente 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como rápidamente biodegradables,

^c Porciones leñosas de los residuos de jardín

La fracción biodegradable de los residuos orgánicos depende en gran medida del contenido de lignina de los residuos. En la Tabla 7 se presenta la biodegradabilidad de varios constituyentes orgánicos basándose en su contenido de lignina. Como se puede observar, el papel de periódico es solamente un 22 por 100 degradable.

TABLA 7

Biodegradabilidad de los constituyentes orgánicos en los RSM

Componente de residuos orgánicos	Contenido de lignina, porcentaje SV	Fracción biodegradable^a, porcentaje SV
---	--	--

Residuos de comida	0.4	0.82
Papel de periódicos	21.9	0.22
Papel de oficina	0.4	0.82
Cartón	12.9	0.47
Residuos de jardín	4.1	0.72

^a Fracción biodegradable = 0,83 (0,028). LC, donde LC = porcentaje SV (sólidos volátiles).

Variación de la producción de gas en relación al tiempo. En condiciones normales, la velocidad de descomposición, medida por la producción de gas, llega a su cima dentro de los primeros dos años y después baja lentamente, continuando en muchos casos durante períodos de hasta 25 años o más. Si no se añade humedad a los residuos en un RS bien compactado, no es infrecuente encontrar, materiales en su forma original años después de enterrarlos.

La variación en la tasa de producción del gas a partir de la descomposición anaerobia de los materiales orgánicos de los RSM rápidamente biodegradables (cinco años o menos -algunos residuos altamente biodegradables se descomponen después de algunos días-) y lentamente biodegradables (5 a 50 años) puede moderarse. Las tasas anuales de descomposición para materiales rápidamente y lentamente descomponibles se basan en un modelo triangular de producción del gas en el que la tasa punta de producción del gas se produce en uno y cinco años, respectivamente, después de comenzar la producción de gas. Se supone que la producción de gas se inicia a finales del primer año de la puesta en funcionamiento del RS.

Corno se ha resaltado anteriormente, en muchos RS la humedad disponible es insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos biodegradables de los RSM. El contenido en humedad óptimo para la conversión de la materia orgánica biodegradable de los RSM es del orden del 50 al 60 por 100. También en muchos RS la humedad presente no se distribuye uniformemente.

Cuando el contenido en humedad del RS es limitado, la curva representando la producción de gas es más plana y se extiende por un período de tiempo más largo. En la Figura 8 se presenta un ejemplo del efecto que tiene un contenido de humedad reducido sobre la producción del gas de RS. La producción del gas de RS durante períodos de tiempo amplios es de gran importancia respecto a la estrategia de gestión que se va a adoptar para el mantenimiento postclausura.

Fuentes de oligogases. Los oligoconstituyentes en los gases de RS tienen dos orígenes. Pueden llegar al RS con los residuos entrantes o pueden producirse mediante reacciones bióticas y abióticas que tienen lugar dentro del RS. De los oligocompuestos encontrados en los gases del RS, muchos están mezclados con los residuos entrantes en forma líquida, pero tienden a volatilizarse. La tendencia a la volatilización es directamente proporcional a la presión de vapor del líquido, e inversamente proporcional al área de una esfera del líquido volátil dentro del RS.

FIGURA 8

Efecto de un contenido de humedad reducido sobre la producción de gases de RS.

En la Tabla 8 se ilustran los diversos tiempos de volatilización que se pueden esperar para algunos líquidos volátiles seleccionados encontrados en los RS. En RS más recientes, donde se ha prohibido la evacuación de residuos peligrosos, se han reducido significativamente las concentraciones de COV en el gas de RS.

TABLA 8

Tiempos estimados para la volatilización completa de líquidos
volátiles seleccionados encontrados en los RS,

Compuesto	Tiempo de evaporación, d ^b
Cloroetano	0.0
Diclorometano	1.2
Triclorometano	4.4
Benceno	6.4
Tetraclorometano	9.6
Tricloroetano	13.6
Tolueno	23.4
Tetracloroetano	62.6
Clorobenceno	76.0
1,2-Dibromoetano	128.2
o-Diclorobenceno	497.6

^b En base a una esfera de 10 mm de líquido volátil a 25°C, en un RS con una porosidad de 0.5.

Pueden darse diferentes caminos bioquímicos complejos para la producción o consumo de cualesquiera de los constituyentes en cantidades traza. Por ejemplo, el cloruro de vinilo es un subproducto de la degradación de di y tricloroetano. Por la naturaleza orgánica de estos gases, pueden ser absorbidos por los constituyentes de los residuos en el RS. Actualmente, se puede decir muy poco que sea definitivo acerca de las tasas de transformación bioquímica de los oligocompuestos. Las vidas medias varían de una fracción de año hasta más de mil años para algunos compuestos.

Movimientos del gas de RS

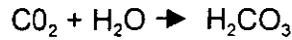
En condiciones normales, los gases producidos en el suelo se emiten a la atmósfera mediante difusión molecular. En el caso de un RS activo, la presión interna normalmente es mayor que la presión atmosférica, y el gas de RS saldrá mediante

difusión y flujo convectivo (conducido por presión). Otros factores que influyen en el movimiento de los gases del RS incluyen la absorción de los gases en componentes líquidos o sólidos y la generación o consumo de un componente gaseoso a través de reacciones químicas o de la actividad biótica.

Movimiento de los principales gases de RS. Aunque la mayor parte del metano escape a la atmósfera, ambos, metano y dióxido de carbono, se han encontrado en concentraciones de hasta el 40 por 100 en distancias laterales de hasta 150 m de los bordes de RS sin recubrimiento. En RS sin ventilación, la extensión de este movimiento lateral varía según las características del material de cubrimiento y del suelo circundante. Si se escapa el metano de una forma incontrolada, puede acumularse (porque su peso específico es menor que el del aire) debajo de edificios o en otros lugares cerrados, próximos o dentro de un RS controlado. Con una extracción correcta, el metano no debe suponer un problema (excepto por el hecho de que es un gas que influye en el efecto invernadero). Por otro lado, el dióxido de carbono es problemático por su densidad. Como se muestra en la Tabla 3, el dióxido de carbono tiene aproximadamente 1,5 veces la densidad del aire y 2,8 veces la densidad del metano; por lo tanto, tiende a moverse hacia el fondo del RS. Como resultado, las concentraciones de dióxido de carbono en las porciones más bajas del RS pueden ser altas durante años.

Migración ascendente del gas de RS El metano y el dióxido de carbono pueden emitirse a través de la cobertura del RS mediante la convección y la difusión

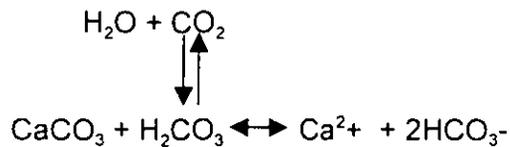
Migración descendente del gas de RS. Finalmente, el dióxido de carbono, por su densidad, puede acumularse en el fondo del RS. Si se utiliza un recubrimiento de suelo, el dióxido de carbono puede moverse desde allí hacia abajo, principalmente mediante la difusión a través del recubrimiento hasta que llega al agua subterránea (hay que resaltar que se puede limitar el movimiento de CO₂, utilizando un recubrimiento geomembrana). El dióxido de carbono es fácilmente soluble en agua y puede reaccionar con ella para formar ácido carbónico, o



Esta reacción baja el pH, que más tarde puede incrementar la dureza y el contenido mineral del agua subterránea mediante disolución. Por ejemplo, si el carbonato cálcico está presente en la estructura del suelo, el ácido carbónico reaccionará con él para formar bicarbonato cálcico soluble, según la siguiente reacción:



Reacciones similares se producen con carbonatos de magnesio. Para una concentración dada de dióxido de carbono, la reacción mostrada en la Ecuación del ácido carbónico procederá hasta que llegue al equilibrio, como se muestra en la Ecuación.



Entonces, cualquier proceso que incremente el dióxido de carbono libre causará la disolución de más carbonato cálcico. El incremento de la dureza resultante es el efecto principal de la presencia de dióxido de carbono en el agua subterránea. La solubilidad en agua de los principales gases encontrados en los RS puede calcularse utilizando la Ley de Henry. El efecto del dióxido de carbono sobre el pH del lixiviado puede estimarse utilizando la primera constante de disociación para el ácido carbónico.

Control pasivo de los gases del RS

Se controla el movimiento de los gases del RS para reducir las emisiones atmosféricas, para minimizar la salida de emisiones olorosas, para minimizar la migración subsuperficial del gas, y para permitir la recuperación de energía a partir del metano. Los sistemas de control se pueden clasificar como pasivos y activos. En los sistemas pasivos de control del gas se utiliza energía en forma de vacío inducido para controlar el flujo del gas- Se puede lograr el control pasivo para ambos gases, principales y oligogases, mientras se están produciendo los gases principales a altas velocidades, proporcionando caminos de más alta permeabilidad para guiar el flujo del gas en la dirección deseada. Por ejemplo, una zanja de grava puede servir para conducir el gas hasta un sistema de ventilación con quemador. Cuando la producción de los principales gases es limitada los controles pasivos no son muy eficaces, porque la difusión molecular será el mecanismo de transporte predominante. Sin embargo, en esta etapa de la vida del RS quizás no sea tan importante controlar la emisión residual del metano presente en el gas del RS. El control de las emisiones de COV puede necesitar del uso de ambas instalaciones, pasivas y activas.

Ventilación para rebajar la presión/quemadores en la cobertura del RS. Uno de los métodos pasivos más comunes para controlar los gases del RS se basa en el hecho de que se puede reducir la migración lateral de los gases del RS rebajando la presión del gas dentro del interior del RS. Para este propósito, se instalan chimeneas a través de la cobertura final, extendiéndose hacia abajo en la masa de residuos sólidos (Figura 9). Si el metano en el gas que está escapando es de una concentración suficiente, se pueden conectar varias chimeneas y equiparlas con un quemador de gas (Figura 10a). Cuando se utilizan quemadores del gas residual, la chimenea debe penetrar en las celdas de residuos. La altura del quemador de residuos puede variar de 3 a 6 m por encima. Se puede encender el quemador manualmente o con una llama piloto continua. Para conseguir el máximo beneficio de la instalación de un quemador de gas de residuos se debería utilizar la llama piloto (Figura 10b). Hay que resaltar, sin embargo, que las chimeneas pasivas con

quemadores quizás no lograrán una destrucción eficaz de los olores y de los COV, no alcanzando las exigencias para el control de la calidad del aire de muchas agencias urbanas, y, por lo tanto, no se considera su utilización como una buena práctica. Más adelante, en esta sección, se tratan los quemadores de gas.

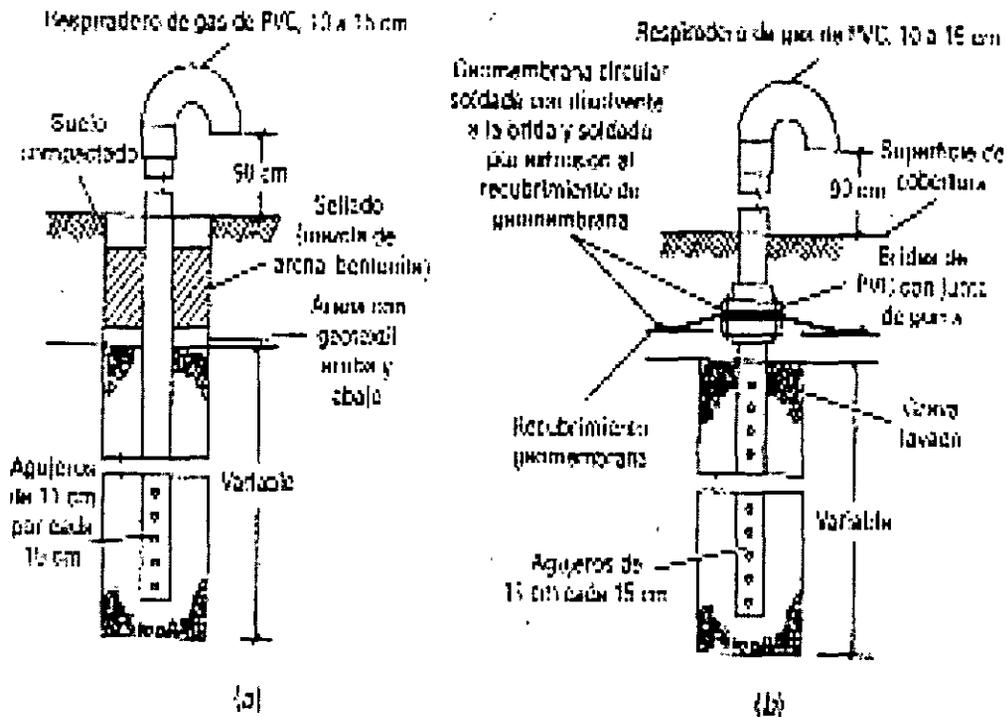


FIGURA 9

Chimeneas de gas utilizadas en la superficie de un RS para el control pasivo del gas de RS: (a) chimenea de gas para un RS que no contiene un recubrimiento con geomembrana, y (b) chimenea de gas para un RS que contiene un recubrimiento de membrana sintética.

Zanjas perimetrales de intercepción. Para interceptar el movimiento lateral de los gases del RS puede utilizarse un sistema de zanjas perimétricas, que consiste en zanjas interceptoras llenas de grava que contienen tuberías

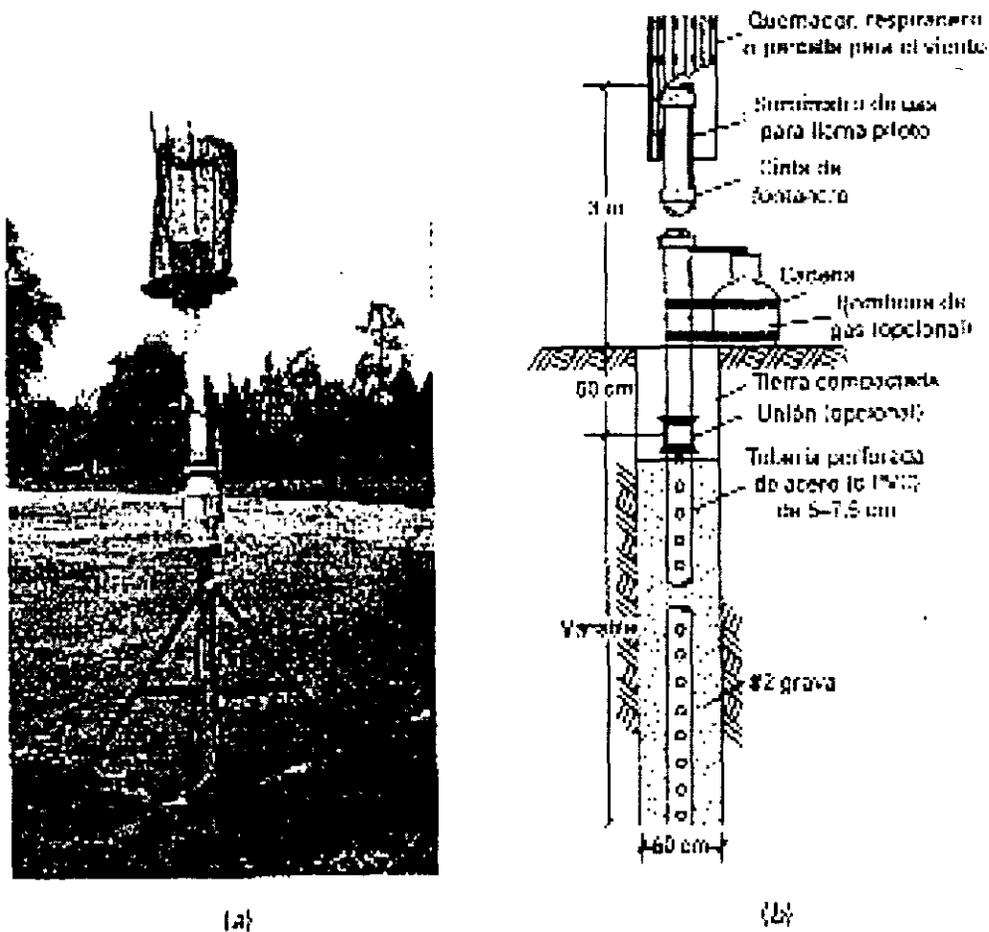


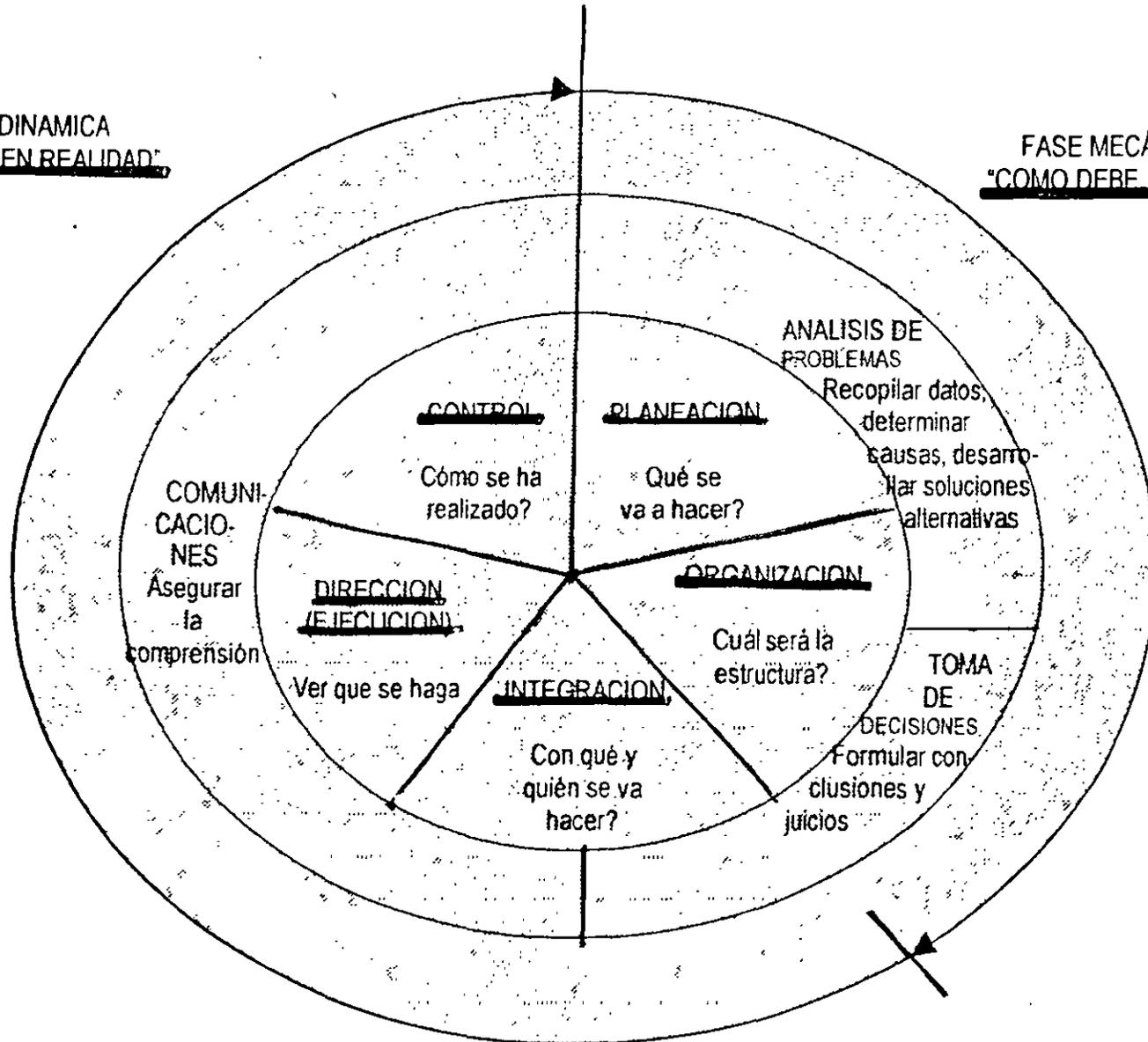
FIGURA 10

Quemador típico tipo candelabro para gas de residuos, utilizado para quemar el gas del RS procedente de un pozo de ventilación o de varios pozos de ventilación interconectados: (a) sin llama piloto y (b) con llama piloto.

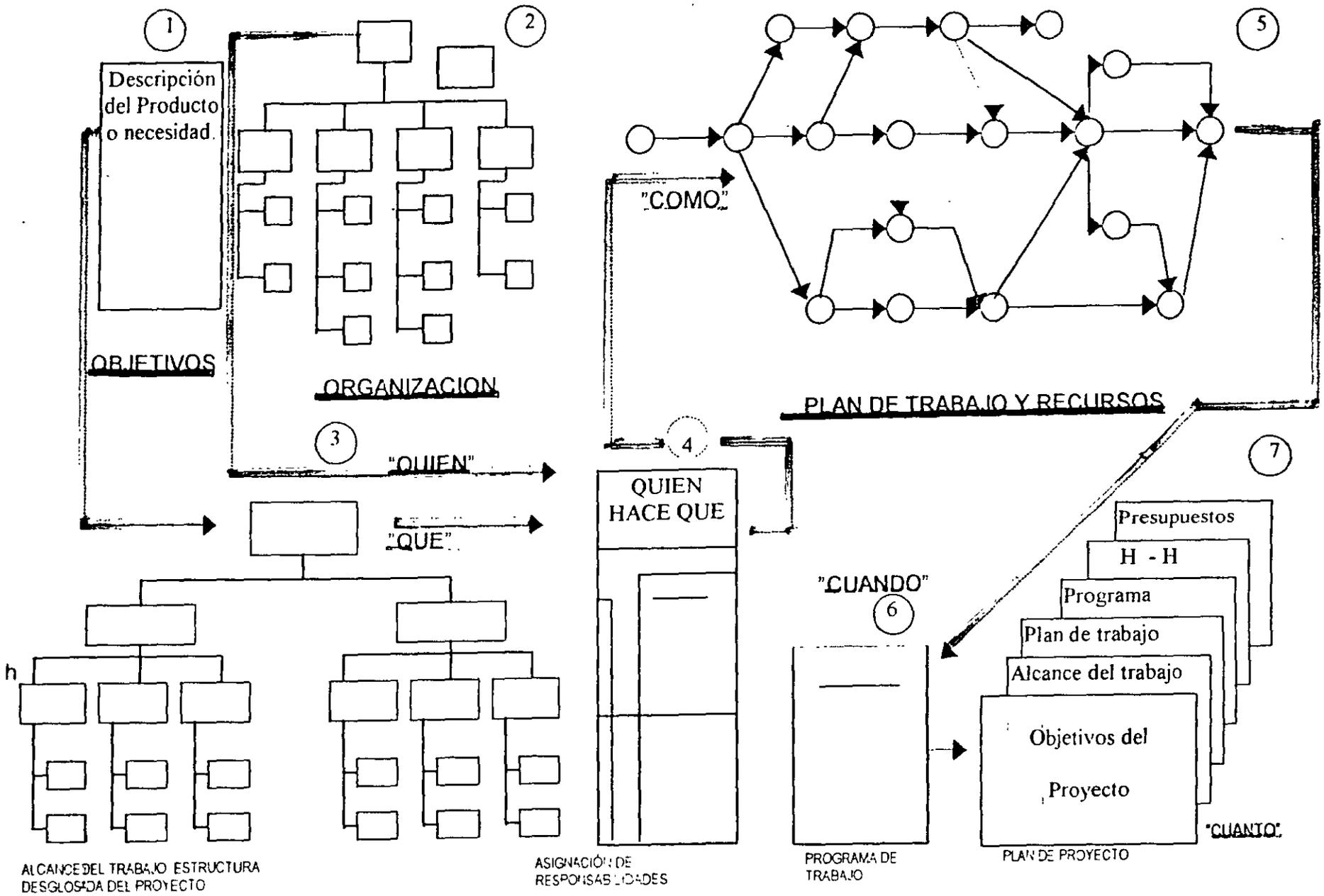
horizontales de plástico perforado (normalmente policloruro de vinilo, PVC, o polietileno, PE) (Figura 11a). La tubería perforada está conectada a chimeneas verticales a través de las cuales el gas del RS que se acumula en el relleno del fondo de la zanja puede dirigirse hacia la atmósfera. Para facilitar la recolección del gas en la zanja frecuentemente se instala un recubrimiento de membrana en su pared hacia la parte exterior del RS.

FASE DINAMICA
"COMO ES EN REALIDAD"

FASE MECÁNICA
"COMO DEBE DE SER"



EL PROCESO ADMINISTRATIVO



F16,2 PROCESO DE PLANEACIÓN



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS URBANOS
DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS
SANITARIOS**

Del 06 al 17 de Noviembre del 2000

A N E X O S

**Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez
Delegación Iztacalco
Noviembre/ 2000**

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RELLENOS SANITARIOS

1. Planeación del relleno sanitario (RS)
2. Marco legal (NOM-083)
3. El relleno como método de evacuación de residuos sólidos
4. Clasificación de rellenos, tipos y métodos
5. Consideraciones en la localización de rellenos
6. Composición y características, generación, movimiento y control de gas de relleno
7. Composición, formación, movimiento y control de lixiviado en rellenos
8. Gestión de aguas superficiales
9. Características estructurales y de asentamiento de rellenos
10. Supervisión de la calidad ambiental en los rellenos
11. Diseño y trazado de rellenos
12. Operación de rellenos
13. Clausura y mantenimiento de postclausura de rellenos
14. Cálculos de procesos de rellenos

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE RELLENOS SANITARIOS

1.- PLANEACION

como en todas las actividades importantes, el diseño y construcción de rellenos sanitarios, requiere previamente de un proceso de planeación muy bien estructurado a efecto de apoyar eficientemente el éxito del proyecto.

La planeación forma parte de proceso de gestión o administrativo, definiéndose a la administración como un método por medio del cual un grupo de personas en cooperación persigue la satisfacción de objetivos institucionales, mediante cierto mecanismo de operación.

Las funciones del proceso de administración en su sentido ejecutivo, en el presente son esencialmente las mismas que presentó Henri Fayol por primera vez en el año de 1916, y que son las siguientes:

- planeación
- organización
- integración
- dirección
- control

En la Fig. 1, se muestra un esquema del proceso administrativo y a continuación, se hará una breve discusión de la función de planeación; en términos generales las actividades que se requieren desarrollar en la función de planeación, son las siguientes:

Identificación de:

- a) Oportunidades
- b) Necesidades
- c) Problemas
- Elaboración de pronósticos para determinar hacia donde llevará el curso actual.

Figura I. El Proceso administrativo

- Fijar objetivos para precisar los resultados finales deseados, que pueden ser en términos de:
 - a) Resultados, terminaciones
 - b) Productividad
 - c) Estándares de comportamiento
 - d) Proyectos de desarrollo
 - e) Desarrollo organizacional
- Buscar las acciones mas adecuadas para alcanzar los objetivos.
- Seleccionar la acción más eficaz, teniendo en cuenta los recursos disponibles hoy y los previsibles en el futuro
- Desarrollar estrategias, para decidir como y cuando alcanzar las metas fijadas
- Elaboración de programas, estableciendo prioridades, secuencias y sincronización de los pasos a seguir
- Requerimientos, justificación y asignación de recursos para presupuestar, en:
 - a) Facilidades
 - b) Equipo
 - c) Materiales
 - d) Personal

e) Programas de tiempo

- Establecer procedimientos para normalizar métodos, como por ejemplo. -

a) Estándares

b) Programas del plan de acción táctico

c) Requerimientos de control, con necesidades de información

d) Lista de tareas

e) Programas de trabajo

f) Criterios y procedimientos para revisión de los planes

g) Interrelaciones con otras funciones

- Formulación de políticas, es decir, tomar decisiones sobre asuntos importantes y recurrentes.

La Matriz de responsabilidades y relaciones funcionales. - Es una herramienta muy valiosa que se define al inicio del proyecto y que se emplea en la elaboración de manual de proyecto y procedimientos de proyecto así como el plan de mismo; en la Tabla 1 se muestra un ejemplo de esta anotándose en los renglones las partes del proyecto, en las columnas las áreas funcionales y en el cruce de los ejes se anota la actividad que le corresponde, clasificada en la siguiente forma:

Responsabilidad primaria y

aprobación final = 1

Información = 2

Aprobación = 3

Trabajo en detalle = 4

El grado de interrelación y responsabilidad se define en el manual de gestión y en los procedimientos.

Finalmente, aún cuando la programación es parte de la planeación, debido a la gran importancia que tiene, requiere un capítulo especial para su estudio y análisis. Las interrelaciones de la programación con las demás partes de la planeación, se pueden observar en la Fig. 2 de proceso de planeación.

TABLA I. MATRIZ DE RELACIONES FUNCIONALES

FIGURA

La planeación de los rellenos sanitarios se lleva a cabo aplicando los principios de ingeniería de acuerdo a las necesidades, capacidades y objetivos de la comunidad; para comprender la naturaleza de la planeación en este caso, es importante tener en cuenta:

- El marco en el que normalmente se llevan a cabo las actividades de planeación.
- El efecto del tiempo de planeación.
- Los niveles jurisdiccionales en los que se realiza los estudios de planeación.
- Las definiciones de programas y planes

En muchas ocasiones, el proyectista y el responsable de la toma de decisiones no tienen la oportunidad de estudiar la totalidad del sistema de gestión de RSM y de desarrollar un conocimiento total sobre la comunidad bajo todas las condiciones por restricciones de tiempo y limitantes económica resultantes de necesidades sociales y políticas que conducen a decisiones basadas en poca o ninguna información; bajo esta circunstancia se recomienda que la planeación se realice de acuerdo a los siguientes pasos.

Paso 1.- Definición y especificación del problema

Paso 2.- Inventario y acumulación de datos

Paso 3.- Evaluación y desarrollo de alternativas; análisis económico, valoración del impacto

Paso 4.- Selección de plan y programa.- Obtención del apoyo de la comunidad, demostrar compatibilidad con los objetivos comunitarios.

Paso 5.- Desarrollo de programaciones de implantación.- Organización, gestión fiscal, normatividad, revisión y actualización del plan.

La identificación y evaluación de datos para la localización del sitio se lleva a cabo por un equipo multidisciplinario de especialistas en diseño y operaciones, ingenieros ambientales, geólogos, hidrólogos, geotécnicos y especialista en valoración ambientales.

La localización de rellenos provocara fuertes reacciones negativas en la comunidad por que las instalaciones residuos, sólidos, en el pasado no ha sido buenas vecinas, aunque e la actualidad los problemas ocasionados se han controlado hasta niveles aceptables.- Los criterios para evaluación de sitio incluyen las siguientes categorías.

- Marco político
- Regulaciones
- Ambientales
 - ⇒ Aguas superficiales
 - ⇒ Aguas subterráneas
 - ⇒ Hábitat natural
 - ⇒ Utilización del terreno
 - ⇒ Calidad del aire
 - ⇒ Sociales/culturales
 - ⇒ Estéticos
- Tecnológicos
- Económicos

Estas instalaciones de residuos sólidos municipales requieren permisos que para su obtención se recomienda incluir en la estrategia.

- Identificación de los permisos y de las instancias expedidoras
- Implicación de la instancias expedidora
- Respuesta cabal a las condiciones fijadas durante el proceso de solicitud de permiso.

2.0 MARCO LEGAL

Todas las personas, industrias y prestadores de servicios en su actividad cotidiana generan residuos o desechos, conocidos comúnmente como basura.- Estos desechos o residuos son la causa principal de contaminación del suelo, son focos de reproducción de fauna nociva, causa de olores desagradables, contaminación de agua y fuentes de riego, tanto para el ser humano como para el ecosistema en general.- de acuerdo en la legislación , residuo es:

“Cualquier material generado en el proceso de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo genero”.

También la legislación define los residuos sólidos municipales (RSM) como:

“Los que se generan en casas habitación, parques, jardines, vía pública, oficinas, sitios de reunión, mercados, comercios, bienes muebles, demoliciones, construcciones, instituciones, establecimientos de servicios, y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieren técnicos especiales para su control excepto las peligrosas o potencialmente peligrosas de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación”.

El artículo 137 de la LGEEPA establece que las autoridades de los municipios o del distrito federal serán las que autorizan, conforme a sus leyes locales en la materia y a las NOM que resultan aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final de los RSM.

Todos los desechos como son frutas, verduras, carnes, plantas, excreta, etc., se descomponen naturalmente. Esta propiedad puede aprovecharse tanto en forma doméstica como municipal para reducir los volúmenes de basura y al mismo tiempo convertir esos desechos en abono orgánico (composteo) que ayuda a mejorar la fertilidad de los suelos.

En los basureros a cielo abierto, la materia orgánica al descomponerse, desprende líquidos contaminantes conocidos como lixiviados, que se filtran a través del suelo hacia los mantos acuíferos contaminando el agua.

En ningún caso se puede autorizar la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en territorio nacional. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación, sólo pueden otorgarse cuando existe previo consentimiento de ésta.

Los gobiernos de los estados y los municipios son los responsables de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales-, Esto no incluye los residuos peligrosos, La SEMARNAP está promoviendo acuerdos con los estados y municipios para la identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos y sus inventarios.

RELLENOS SANITARIOS

Para controlar algunos de los efectos dañinos de los residuos sólidos municipales la ley establece que se deben depositar en **rellenos** sanitarios. Éstos son obras de ingeniería planeada y ejecutada, previendo los efectos adversos al ambiente, para la disposición final de los residuos sólidos municipales.

De 1984 a la fecha se han venido publicando una serie de normas que describen los métodos para medir y caracterizar una serie de sustancias presentes en los residuos sólidos municipales. El propósito de estas normas es dar una disposición adecuada a los residuos para evitar contaminación al suelo. Las sustancias y factores que describe la ley para su análisis son- materia orgánica, nitrógeno, pH, poder calorífico, humedad, relación carbono nitrógeno, hidrógeno, oxígeno en materia orgánica, azufre y fósforo.

En las normas se establecen las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios y la construcción de obras complementarias para la disposición final de los residuos sólidos municipales.

Estos deben estar a una profundidad mayor de 10 m arriba del nivel de los mantos freáticos o aguas subterráneas, a más de un kilómetro de zonas de recarga de acuíferos, cuerpos y corrientes de agua, y a más de 100 m de fallas geológicas.

El terreno debe tener una pendiente no mayor de 30 %, reunir ciertas características de impermeabilidad y vida útil de mas de 7 años.

Se deben ubicar a una distancia mayor de 500 m de áreas urbanas, 70 m. de carreteras, 3 km de áreas protegidas y aeropuertos y 150 m. de áreas de almacenamiento de hidrocarburos.

En el anexo 1 se incluye la NOM-083-ECOL-1996 que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a las disposición final de los RSM.

3.0 EL RELLENO SANITARIO (RS) COMO METODO DE EVACUACION DE RESIDUOS DE SÓLIDOS

Históricamente, los RS han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en Estados Unidos y en todo el mundo. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, de reciclaje y de las tecnologías de transformación, la evacuación en RS de los rechazos procedentes de los residuos sólidos sigue siendo un componente importante dentro de una estrategia para la gestión integral de residuos sólidos. La gestión de RS implica la planeación, diseño, explotación, clausura y control postclausura de RS. Los propósitos de este capítulo son:

- Introducir a los temas de procesos de RS.
- Repasar las principales reacciones que se producen en los RS.
- Identificar las inquietudes ambientales asociadas a los RS, y
- Repasar brevemente algunas de las normativas que regulan la evacuación de residuos sólidos en RS

Más adelante en otros capítulos se examinan de una forma más amplia muchos de los temas introducidos en este capítulo.

Método

El propósito de la exposición siguiente es introducir en el tema de vertido de residuos sólidos mediante

- 1) la definición de algunos términos que son comúnmente utilizados cuando se trata el vertido de residuos sólidos,

- 2) el repaso de operaciones y procesos,
- 3) la descripción de la vida de un RS, y
- 4) el repaso de algunas de las reacciones que se producen en los RS.

Definición de términos. RS son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. En el pasado, el término «RS sanitario controlados se utilizaba para denominar un RS en el que se cubrían los residuos puestos en el RS al finalizar cada día de operación. Actualmente, *relleno sanitario controlado* se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSM, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública. Los RS para la evacuación de residuos peligrosos son conocidos como *de seguridad*. Un RS sanitario controlado a veces se identifica como una *unidad para la gestión de residuos sólidos*. *Vertido* es el proceso mediante el cual se depositan los residuos sólidos en un RS. El vertido incluye la supervisión de flujo de residuos entrante, la colocación y compactación de los residuos, y la implantación de instalaciones para el control y la supervisión ambiental.

El término *celda* se utiliza para describir el volumen de material depositado en un RS durante un período de explotación, normalmente un día. Una celda incluye: los residuos sólidos depositados y la materia de cubrimiento. *diaria* normalmente consiste en 15 o hasta 30 cm de suelo natural o materiales alternativos, como compost, que se aplican a los frentes de trabajo del RS al final de cada período de operación. Los objetivos de la cubrimiento diario son: controlar el vuelo de materiales residuales; prevenir la entrada o salida del RS de vectores sanitarios, tales como ratas, moscas y otros, y controlar durante la operación la entrada de agua en el RS.

El nivel es una capa completa de celdas sobre una zona activa del RS (figura 3). Normalmente, los RS se conforman en una serie de niveles. La *berma* (o *terrazza*) se utiliza frecuentemente cuando la altura del RS excede de 125 cm a 2 m. Las bermas se

utilizan para mantener la estabilidad de la pendiente de RS, para la localización de canales para el drenaje de agua superficial, y para la localización de tuberías destinadas a la recuperación del gas de RS. El nivel final incluye la capa de cubrimiento. *Capa final de cubrimiento* se aplica a toda la superficie del RS después de concluir todas las operaciones de vertido. El cubrimiento final normalmente consiste en múltiples capas de tierra y/o materiales como geomembranas diseñadas para facilitar el drenaje superficial, interceptar aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial

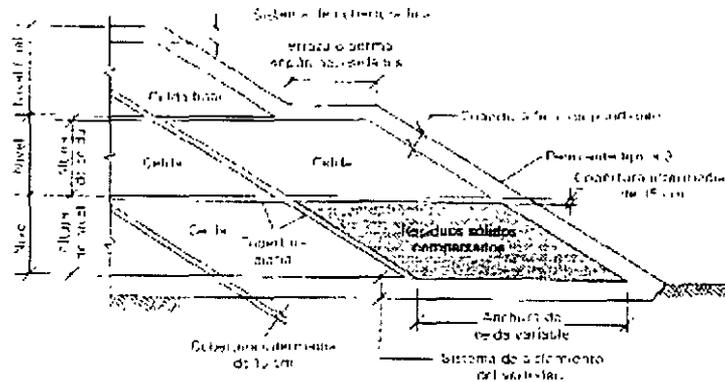


FIGURA 3

Vista en sección de un relleno sanitario controlado.

El líquido que se acumula en el fondo de un RS se conoce como *lixiviado*. En RS profundos, frecuentemente se recoge el lixiviado en puntos intermedios. En general el lixiviado es el resultado de la precipitación, del escurrimiento no controlado y del agua de irrigación que entra en el RS. El lixiviado también puede incluir aguas inicialmente contenidas en los residuos, así como aquellas procedentes de aguas subterráneas que se infiltren. El lixiviado contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados en el RS y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del RS.

Gas de RS es la mezcla de los gases que se encuentran dentro de un RS. La mayor parte del gas de RS está formado por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), productos principales de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica

biodegradable de los RSM en el RS. Otros componentes del RS son nitrógeno y oxígeno atmosféricos, amoníaco y compuestos orgánicos en cantidades traza.

Recubrimientos de RS son materiales (naturales y fabricados) que se utilizan para recubrir el fondo y las superficies laterales del RS. Los recubrimientos suelen estar formados por capas de arcilla compactadas y/o geotexturas diseñados para prevenir la migración del lixiviado y del gas de RS. Las *instalaciones para el control del RS* incluyen recubrimiento, sistemas para la recolección y extracción del lixiviado, sistemas de extracción y recolección del gas de RS, y capas diarias y finales de cubrimiento.

La supervisión ambiental implica actividades, asociadas con la recolección y el análisis de muestras de agua y de aire, que se utilizan para supervisar el movimiento de los gases y del lixiviado del RS en la zona de vertido. *Clausura de RS* es el término utilizado para describir los pasos que se deben seguir para cerrar y asegurar la zona del RS una vez completada la operación de relleno. *Mantenimiento postclausura* se refiere a las actividades asociadas con la supervisión y mantenimiento a largo plazo del RS completado (normalmente 30 a 50 años).

Exposición general de la planeación, diseño y explotación de RS. En la Figura 4 se identifican los elementos principales que se deben considerar en la planeación, diseño y explotación de RS, que incluyen:

- 1) Trazado y diseño de RS;
- 2) explotación y gestión de RS
- 3) Reacciones que se producen en los RS;
- 4) Gestión de gases de RS;
- 5) gestión del lixiviado;
- 6) supervisión ambiental,
- 7) clausura del RS y mantenimiento postclausura.

Se considera cada uno de los elementos más ampliamente en este capítulo.

Vida de un RS moderno. La siguiente descripción de la vida de un RS moderno es genérica. Los detalles específicos de explotación variarán según el tipo de material que se vierte y según la configuración del RS. En capítulo 4 se presentan los tipos y configuraciones de RS, donde se resaltan algunas desviaciones significativas del esquema genérico de explotación. En la Figura 5 se ilustra el desarrollo de un RS moderno.

Preparación de la zona de vertido. El primer paso en el proceso implica la preparación de la zona para la construcción del RS. Se debe modificar el drenaje existente para canalizar el escurrimiento fuera de la zona elegida para el RS. La recanalización del drenaje natural es particularmente importante para los RS tipo barranco, donde puede drenarse a través de la zona una importante cuenca. Además, el drenaje natural debe mortificarse para canalizar el agua fuera de la zona inicial de relleno. Otras tareas de preparación incluyen la construcción de carreteras de acceso y de instalaciones de pesaje, además de la instalación de vallas.

El siguiente paso en el desarrollo de un RS es la excavación y preparación del fondo del RS y de las superficies laterales. Los RS modernos normalmente se construyen en secciones. El trabajo por secciones permite, en cualquier momento, la exposición a la precipitación de solamente una pequeña parte de la superficie no protegida del RS. Además las excavaciones se llevan a cabo gradualmente, no preparando todo el fondo del RS en una sola vez. Se puede almacenar el material excavado sobre el suelo no excavado cerca de la zona activa, minimizándose así el problema de la precipitación que pueda acumularse en la excavación. Cuando se recubre de una sola vez todo el fondo del RS, se debe hacer provisión para separar el escurrimiento de aguas de tormenta fuera de la porción del RS que está siendo utilizada.

Para minimizar costos, es deseable conseguir en el mismo lugar los materiales de cubrimiento de la zona del RS. La zona de trabajo inicial del RS se excava hasta la profundidad diseñada, y se almacena el material excavado para su utilización posterior. La zona aireada (zona entre la superficie del suelo y las aguas subterráneas permanentes) y el equipamiento para supervisar las aguas subterráneas se instala antes de colocar el recubrimiento

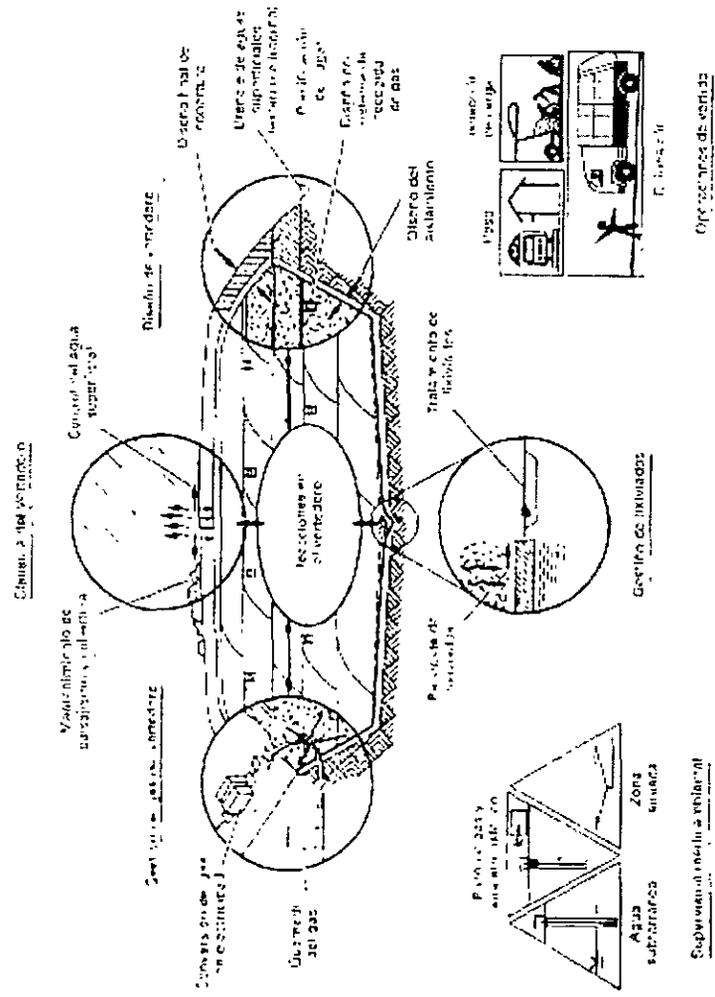


FIGURA 4

Esquema de operaciones y procesos en RS.

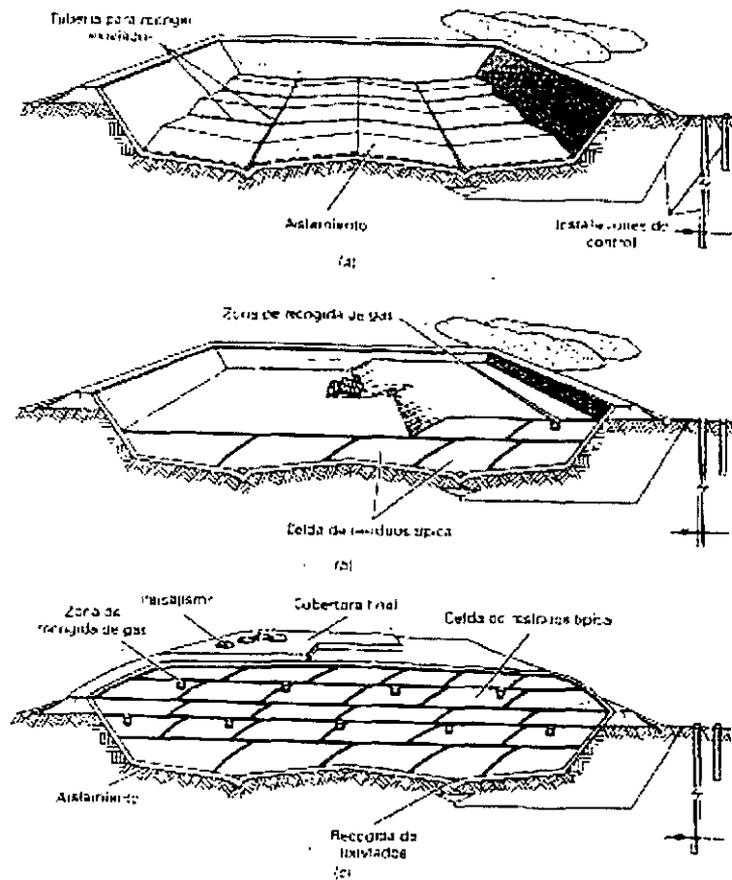


FIGURA 5

Desarrollo y clausura de un RS de residuos sólidos: (a) excavación e implantación de recubrimiento del RS, (b) vertido de residuos sólidos en el RS y (c), sección del RS clausurado.

del RS. El fondo del RS se prepara para proporcionar drenaje para el lixiviado y se instala un recubrimiento de baja permeabilidad. Las instalaciones para la recolección y extracción del lixiviado se localizan dentro o encima del recubrimiento. Normalmente, el recubrimiento se extiende por las paredes excavadas en los laterales de RS.

Pueden instalarse zanjas horizontales para la recuperación del gas en el fondo del RS, particularmente si se piensa que van a ser problemáticas las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los residuos recientemente colocados. Para

minimizar el escape de COV, se aplica un vacío y el aire se aspira a través de las áreas ya utilizadas del RS. El gas que se separa tiene que quemarse en condiciones controladas para destruir los COV. Antes de empezar el relleno, se construye una berma de suelo en el lado a favor del viento dentro de la zona planificada de relleno. La berma sirve como cortavientos para controlar el vuelo de materiales y también sirve para compactar contra ella los residuos. Para los RS excavados, la pared de excavación normalmente sirve como cara inicial de compactación.

Colocación de residuos. Una vez preparada la zona de vertido, el siguiente paso en el proceso implica la colocación de los residuos. Como se muestra en la Figura 5b, los residuos se colocan en celdas empezando a lo largo de la cara de compactación, y siguiendo hacia afuera y hacia arriba a partir de dicha cara. Los residuos depositados en cada período de operación, normalmente un día, forman una celda individual. Los residuos depositados por los vehículos de recolección y transferencia se esparcen en capas de 45-60 cm y se compactan. Las alturas normales de las celdas varían de 240 a 360 cm. La longitud del frente de trabajo varía con las condiciones de la zona y la magnitud de la operación. El frente de trabajo es la zona del RS donde se descargan, colocan y compactan los residuos sólidos durante un período dado de operación. La anchura de la celda varía de 3 a 9 m, de nuevo según el diseño y la capacidad del RS. Se cubren todas las superficies externas de la celda con una delgada capa de tierra (15-30 cm) o con otro material apto, al final de cada período de operación.

Después de colocar uno o más niveles, pueden excavarse zanjas horizontales para la recuperación de gas en las áreas ya completadas (Figura 4). Las zanjas excavadas se rellenan con grava, y se instalan en ellas tubos de plástico perforados. Se extrae el gas de RS a través de los tubos durante el período de tiempo que se esté produciendo el gas. Se colocan niveles sucesivos, uno encima de otro, hasta llegar al nivel final previsto en el proyecto. Según la profundidad del RS, se pueden colocar instalaciones adicionales para la recolección del lixiviado en distintos niveles. Se aplica una capa de cubrimiento a cada sección completa del RS. El cubrimiento final se diseña para

minimizar la filtración de la precipitación atmosférica y para conducir el drenaje fuera de la sección activa del RS. Por otra parte, se hace una restauración del escurrimiento para controlar la erosión. En este momento se pueden instalar chimeneas verticales para la extracción del gas, y éste puede quemarse en una antorcha o en instalaciones para recuperación de energía, según lo que se considere apropiado.

Se construyen, progresivamente y hacia afuera de las secciones ya completadas, secciones adicionales repitiendo los pasos de construcción anteriormente descritos. A medida que se descompongan los materiales orgánicos depositados en el RS se asentarán las secciones llenas. Las actividades de gestión de RS deben incluir el relleno y la recuperación de las superficies asentadas de los RS para mantener el drenaje y el grado final deseado. También deben extenderse y mantenerse los sistemas para el control del gas y del lixiviado. Cuando han finalizado todas las actividades asociadas con el relleno, se arregla la superficie y se mejora con la instalación de un cubrimiento final. Se restaura el lugar apropiadamente y se prepara para otros usos.

Gestión postclausura. La supervisión y mantenimiento del RS lleno debe continuar, según la ley, durante algún tiempo después de la clausura (30 a 50 años). Es de especial importancia que se mantenga y se arregle la superficie del RS para aumentar el drenaje, que se mantengan y operen los sistemas para el control del lixiviado y del gas, y que se supervise el sistema para la detección de posibles contaminaciones.

Reacciones que se producen en RS. Los residuos sólidos colocados en un relleno sanitario controlado sufren simultáneamente algunos cambios biológicos, químicos y físicos que están interrelacionados y que se presentan en esta sección. En capítulos subsiguientes son consideradas con más amplio detalle algunas reacciones.

Reacciones biológicas. Las reacciones biológicas más importantes que se producen en los RS son aquellas que afectan a la materia orgánica de los RSM, que evoluciona produciendo gas de RS y, eventualmente, líquidos. El proceso de descomposición biológica normalmente sucede aerobiamente durante un corto periodo de tiempo,

inmediatamente después de la evacuación de los residuos, hasta que se agota el oxígeno inicialmente presente. Durante la descomposición aerobia el gas principal producido es CO_2 . Una vez consumido el oxígeno, la descomposición pasa a ser anaerobia y la materia orgánica se convierte en CO_2 , CH_4 , y cantidades traza de amoníaco y sulfuro de hidrógeno. También se producen un gran número de reacciones bioquímicas. Por el número de interrelaciones, es difícil determinar las condiciones que existen en cualquier RS o porción de RS para un momento dado.

Reacciones químicas. Las reacciones químicas más importantes que se producen dentro de un RS incluyen:

- la disolución y arrastre en suspensión de los materiales de los residuos y de productos de conversión biológica en los líquidos que se filtran a través de los residuos;
- la evaporación de compuestos químicos y de agua en el gas de RS,
- la absorción de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en el material vertido,
- la deshalogelización y descomposición de compuestos orgánicos, y
- reacciones de oxidación-reducción que afectan a metales y a la solubilidad de las sales metálicas.

La disolución en el lixiviado de productos de conversión biológica y de otros compuestos, particularmente compuestos orgánicos, es de especial importancia por que estos materiales pueden salir del RS con el lixiviado. Estos compuestos orgánicos, a continuación, pueden entrar en la atmósfera, bien a través del suelo (cuando el lixiviado ha salido de un RS sin revestimiento) o bien a través de instalaciones descubiertas para el tratamiento del lixiviado. Otras reacciones químicas importantes incluyen aquellas que se producen entre ciertos compuestos orgánicos y los revestimientos de arcilla, que pueden alterar la estructura y la permeabilidad del material de revestimiento. Las

interrelaciones de las reacciones químicas que se producen dentro del RS no se conocen bien.

Reacciones físicas. Entre los cambios físicos más importantes que se producen en los RS están: la difusión lateral de los gases en el RS y la emisión de gases de RS al ambiente circundante, el movimiento del lixiviado dentro y hacia abajo del RS, a través del suelo, y el asentamiento causado por la consolidación y descomposición del material vertido. El movimiento y las emisiones de gas de RS necesitan una especial e importante consideración en la gestión de RS. Mientras se está produciendo gas dentro de un RS, la presión interna puede crecer, causando roturas en el cubrimiento del RS y, por lo tanto, escapes. El agua que entra en el RS a través del cubrimiento roto puede aumentar la velocidad de producción del gas, causando todavía más roturas. El gas de RS que consiga escapar podría llevar al ambiente circundante oligocompuestos cancerígenos y teratogénicos. Como el gas de RS suele tener un alto contenido de metano, existe el peligro de combustión y/o explosión. Otra inquietud importante es la migración del lixiviado. Como el lixiviado migra hacia abajo, puede llevar compuestos y materiales hasta nuevos puntos donde puedan reaccionar con facilidad. El lixiviado se introduce en los poros de aire del RS, interfiriendo así en la migración del gas de RS.

Problemas ambientales en el relleno de residuos sólidos

Estos problemas están relacionados con:

- el escape incontrolados de los gases del RS, que pueden migrar fuera del lugar y causar olores y otras condiciones potencialmente peligrosas;
- el impacto de la descarga de los gases del RS sobre el efecto invernadero en la atmósfera;

- la salida incontrolada del lixiviado, que puede migrar hacia aguas subterráneas o superficiales,
- la reproducción de vectores sanitarios en RS incorrectamente gestionados, y
- los impactos sobre la salud y el ambiente relacionados con el escape de gases en cantidades traza que surgen a partir de materiales peligrosos, que fueron colocados en el pasado dentro del RS.

La finalidad del diseño y del funcionamiento de un RS moderno es eliminar o minimizar los impactos asociados a estos problemas.

Normativas para RS

Cuando se planea la ubicación de un nuevo RS, deben tenerse en cuenta las múltiples normativas que están en vigor para mejorar el rendimiento de los RS controlados.

4.0 CLASIFICACION DE RS, TIPOS Y METODOS

El propósito de este capítulo es presentar al lector

- un sistema comúnmente utilizado para la clasificación de RS
- los distintos tipos de RS que se utilizan actualmente, y
- Los distintos métodos de vertido utilizados

Clasificación de RS

Aunque se han propuesto a lo largo de los años algunos sistemas para la clasificación de RS, el sistema de clasificación adoptado en el estado de California en 1984 quizás sea el más ampliamente aceptado. En el sistema de California, presentado a continuación, se utilizan tres clasificaciones:

Clasificación	Tipo de residuo
I	Residuos peligroso
II	Residuos singulares
III	Residuos sólidos municipales (RSM)

Los residuos designados son residuos no peligrosos que pueden emitir constituyentes en concentraciones que sobrepasan las normativas en vigor sobre calidad de agua, o son aquellos residuos que han sido clasificados como singulares por el Departamento de Estado de Servicios de Salud (DOHS). Hay que resaltar que este sistema de clasificación está enfocado principalmente hacia la protección de aguas superficiales y subterráneas, en vez de hacia la migración del gas de RS o hacia la calidad del aire.

Tipos de RS

Los principales tipos de RS pueden clasificarse como:

- convencionales para RSM no seleccionados,
- RS para residuos triturados, y 3
- monoRS para residuos singulares o especiales.

También se tratarán otros tipos de RS y operaciones de RS, incluyendo el reciclaje del lixiviado.

RS para RSM no seleccionados. La mayoría de los RS en Estados Unidos se diseñan para RSM no seleccionados. En muchos de estos RS de clase 111, también se aceptan cantidades limitadas de residuos industriales no peligrosos y de lodos de plantas para el tratamiento de aguas residuales. En muchos estados se aceptan lodos de plantas para el tratamiento de aguas residuales si están deshidratados hasta un contenido en sólidos del 51 por 100 o más. Por ejemplo, en California, la evacuación de lodos en RS para RSM está restringida a una relación de cinco partes de residuos sólidos por una parte de lodos en peso. Muchos municipios han adoptado limitaciones aún más restrictivas sobre la cantidad de lodos que se pueden aceptar.

En muchos casos, se utiliza el suelo natural como material de cubrimiento final e intermedio. Sin embargo, en lugares como Florida y New Jersey, donde la cantidad de suelo natural disponible para ser utilizado como cubrimiento intermedio es limitado, se emplean materiales alternativos, como compost producido a partir de RSM y residuos de jardín, espuma, alfombras y moquetas viejas, dragados y residuos de demolición. Para conseguir una mayor capacidad, en algunos lugares se están reutilizando RS clausurados o abandonados excavando el material descompuesto para recuperar los metales, y utilizando los restos descompuestos como cubrimiento diario de los nuevos residuos. En algunos casos, los residuos descompuestos son excavados y almacenados, instalándose un revestimiento antes de reactivar el RS.

RS para residuos sólidos triturados. Un método alternativo de vertido, que está probándose en varios lugares de Estados Unidos, es aquel que implica la trituración de los residuos sólidos antes de colocarlos en el RS. Los residuos triturados pueden colocarse en una densidad de hasta el 35 por 100 mayor que los residuos no triturados, y sin cubrimiento diario, en las normativas de algunos estados. El vuelo de papeles, los olores, las moscas y las ratas no han causado problemas significativos. Como se pueden compactar los residuos triturados formando una superficie más apretada y uniforme, puede ser suficiente una pequeña cantidad de suelo u otro material de cubrimiento para controlar la infiltración de agua durante la operación de relleno.

Las desventajas de este método son: la necesidad de una planta de trituración y la necesidad de operar una sección de vertido convencional para residuos no fácilmente triturables. El método con residuos triturados tiene un uso potencial en zonas donde la capacidad de los RS es pequeña (por la mayor compactación que se puede conseguir), cuando no hay material de cubrimiento fácilmente disponible, y cuando la precipitación atmosférica es muy baja o altamente estacional. También se pueden utilizar materiales triturados para producir compost, que después puede utilizarse como material de cubrimiento intermedio.

RS para constituyentes individuales de residuos. Los RS que se utilizan para constituyentes individuales de residuos son conocidos como *monoRS*. Las cenizas de incineración, el asbesto y otros residuos similares, a menudo identificados como residuos especiales, se colocan normalmente en *monoRS* para aislarlos de los materiales colocados en los RS para RSM. Como las cenizas de incineración contienen pequeñas cantidades de material orgánico no quemado, la producción de olores procedentes de la reducción de sulfatos ha sido un problema en los *monoRS* utilizados para cenizas de incineración. Por ello se recomienda la instalación de sistemas para la recuperación del gas, de forma que se puedan controlar los problemas de olor.

Otros tipos de RS. Además de los métodos convencionales descritos, se están desarrollando otros métodos de vertido especializados, diseñados para mejorar los distintos objetivos de gestión de RS. Los métodos de explotación alternativos que están utilizándose actualmente incluyen:

- RS diseñados para maximizar la producción de gas dentro del RS, y
- RS funcionando como unidades para el tratamiento integral de residuos sólidos.

También, se discute la práctica de vertido en zonas húmedas, que actualmente está prohibida.

RS diseñados para maximizar la producción de gas. Si se va a maximizar la cantidad de gas producido y recuperado de la descomposición anaerobia de residuos sólidos, harán falta diseños de RS especializados. Por ejemplo, el uso de celdas profundas individualmente recubiertas, en las que se depositen los residuos sin capas intermedias de material de cubrimiento y se recicle el lixiviado para intensificar el proceso de descomposición biológica, es una opción viable. Una posible desventaja de un RS así es que finalmente es imprescindible evacuar el lixiviado en exceso.

RS como unidades de tratamiento integral. En este método de explotación, los constituyentes orgánicos se separarían y se colocarían en un RS apartado, donde se intensificarían las tasas de biodegradación incrementando el contenido en humedad de los residuos, bien mediante el reciclaje del lixiviado o bien mediante la siembra con lodos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales o con estiércol animal. El material degradado se recuperaría y se utilizaría como material de cubrimiento en las nuevas zonas de relleno, y la celda excavada se rellenaría con nuevos residuos.

RS en zonas húmedas. En el pasado, el vertido en zonas húmedas, tales como ciénagas, pantanos y marismas, se consideraba aceptable si se proporcionaba un

drenaje adecuado y si no se desarrollaban condiciones insalubres. Bajo las 'normativas federales actuales, se prohíbe tal destrucción de zonas húmedas, aunque la expansión de un RS existente puede permitirse bajo condiciones especiales. Ya que existen algunos RS en estas zonas, se presenta una breve descripción de los métodos normalmente utilizados en estos rellenos.

La práctica normal para rellenar zonas húmedas era dividir la zona en celdas o lagunas y controlar las operaciones de relleno para que fuese rellenada una célula o laguna cada año. A menudo se colocaban los residuos sólidos directamente en el agua. Una alternativa consistía en añadir material de relleno limpio hasta el nivel del agua o un poco más, antes de comenzar el relleno con residuos. Para contener las olas de barro y para incrementar la estabilidad estructural, se construyeron diques con piedras sueltas, árboles, ramas de árboles, madera, residuos de demolición, o materiales similares además de material de relleno limpio, para dividir las celdas o lagunas. En algunos casos, para prevenir el movimiento del lixiviado y de los gases de las celdas o lagunas completadas, se ha utilizado arcilla y pilotaje entrelazado de placa de acero o madera.

Métodos de vertido

Los principales métodos utilizados para el vertido de RSM son: 1) celda/zanja excavada, 2) zona y 3) vaguada/depresión. Los rasgos principales de estos tipos de RS, ilustrados en la Figura 6, se describen a continuación. Los detalles sobre el diseño de los RS se presentan más adelante dentro de este capítulo.

Método celda/zanja excavada. El método de vertido celda/zanja excavada (ver Figura 6a) es idóneo para zonas donde se dispone de una profundidad adecuada de material de cubrimiento y donde el nivel freático no se encuentra cerca de la superficie. Normalmente, se colocan los residuos sólidos en celdas o zanjas excavadas en el suelo. La tierra excavada se utiliza como material para el cubrimiento diario o final. Usualmente, las celdas o zanjas excavadas se revisten con membrana sintética o con arcilla de baja permeabilidad, o con una combinación de los dos, para limitar el

movimiento de los gases del RS y de la lixiviación. Las celdas excavadas son normalmente cuadradas, de hasta 300 m de largo y ancho, con pendientes laterales de 1,5:1 a 2:1. Las zanjas varían desde 60 a 300 m de largo, de 1 a 3 m de profundidad, y de 4,5 a 15 m de ancho.

En algunos estados, se permiten RS construidos por debajo de nivel freático, si se toman medidas especiales para prevenir la entrada de aguas subterráneas en el RS, y para contener o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases de las celdas llenas. Normalmente se deseca el lugar, se excava, y después se reviste según las normativas locales. Las instalaciones de desecado funcionan hasta que el lugar está relleno, para evitar la creación de presiones que puedan causar que el revestimiento se levante y se rompa. En el capítulo 7 se trata más extensamente el uso de revestimientos de arcilla y de membranas.

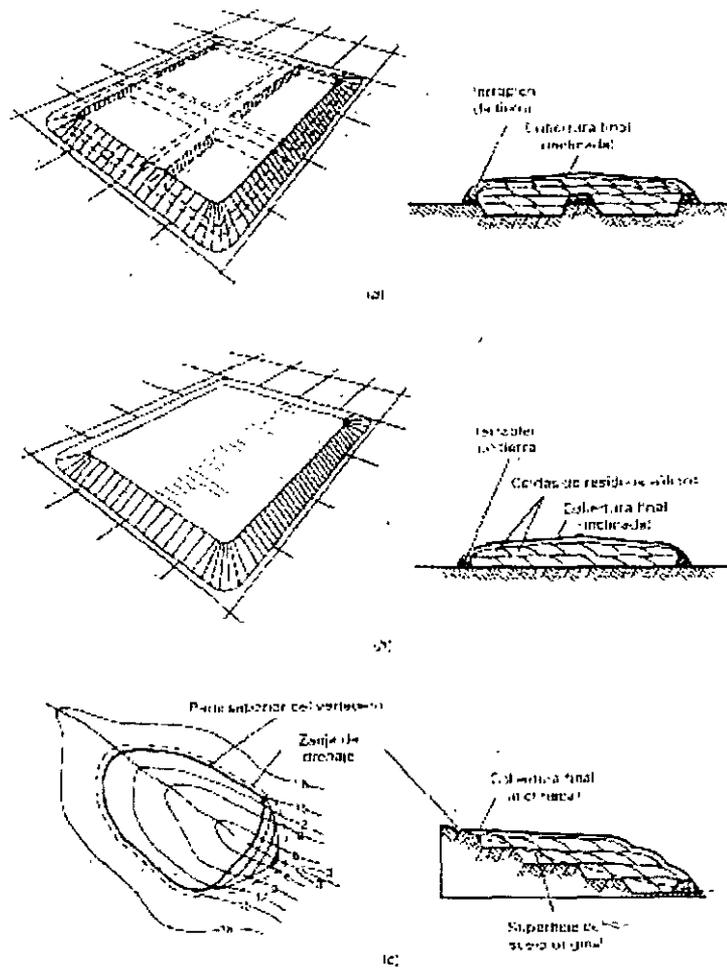


FIGURA 6

Metodos de vertido comúnmente utilizados: (a) celda/zanja excavada, (b) zona, y (c) vaguada/depresión

Método en zona. El método en zona se utiliza cuando el terreno es inapropiado para la excavación de celdas o zanjas donde colocar los residuos sólidos (ver Figuras 6b). Las condiciones de alto nivel freático, que se producen en muchos lugares de Florida y también en otras partes, precisan del uso de RS de tipo zona. La preparación de lugar implica la instalación de un revestimiento y de un sistema para el control del lixiviado. El material de cubrimiento tiene que llevarse en camión desde terrenos adyacentes o desde zonas de fosas de relleno suplementario. Como anteriormente se ha resaltado,

en los lugares con una disponibilidad limitada de material para ser utilizado como cubrimiento se ha empleado con éxito compost producido a partir de residuos de jardín y RSM como material para el cubrimiento intermedio. Otras técnicas que se han utilizado incluyen el uso de materiales portátiles de cubrimiento temporal, tales como tierra y geomembranas. La tierra y las geomembranas colocadas temporalmente sobre una celda completa se pueden quitar antes de comenzar el siguiente nivel.

Método vaguada/depresión. Se han utilizado vaguadas, barrancos y fosas de relleno suplementario, y canteras como zonas de vertido (Figura 6c). Las técnicas para colocar y compactar residuos en RS de vaguada/depresión varían según la geometría del lugar, las características del material de cubrimiento disponible, la hidrología y geología del lugar, los tipos de instalaciones para el control del gas y del lixiviado que van a utilizarse, y el acceso al lugar.

El control del drenaje superficial a menudo es un factor crítico en el desarrollo de las zonas de vaguada/depresión. Normalmente, se comienza el relleno de cada nivel por la cabeza de la vaguada (ver Figura 6c) y se termina por la boca, para prevenir la acumulación de agua en la parte de atrás del RS. Se rellenan los lugares vaguada/depresión en múltiples niveles. El método de explotación es esencialmente el mismo que para el método en zona anteriormente descrito. Si el suelo de la vaguada es razonablemente plano el vertido inicial puede realizarse utilizando el método celda/zanja excavada argumentado previamente.

Una de las claves para la utilización con éxito del método vaguada/depresión es la disponibilidad del material adecuado para cubrir cada nivel mientras se completa y para proporcionar un cubrimiento final sobre la totalidad del RS cuando se ha alcanzado la altura final. El material de cubrimiento se excava de las paredes o del suelo de la vaguada antes de instalar el sistema de revestimiento. Quizás las fosas de relleno suplementario y las canteras abandonadas no contengan suficiente tierra para cubrimiento inmediato; en ese caso, quizás será necesario importar el material de

cubrimiento. Para las capas intermedias de cubrimiento se puede utilizar compost producido de residuos de jardín y RSM

S

5.0 CONSIDERACIONES EN LA LOCALIZACIÓN DE RS

Una de las tareas más difíciles afrontadas por la mayoría de las comunidades en la implantación de un programa de gestión integral de residuos sólidos es la localización de los RS. En esta sección se presentan los factores que hay que tener en cuenta en la localización de un nuevo RS.

Los factores que tienen que considerarse en la evaluación de potenciales ubicaciones para la evacuación de residuos sólidos a largo plazo incluyen: 1) distancia de transporte, 2) restricciones en la localización, 3) cantidad de terreno disponible, 4) acceso al lugar, 5) condiciones y topografía del lugar, 6) condiciones climatológicas, 7) hidrología del agua superficial, 8) condiciones geológicas e hidrológicas, 9) condiciones ambientales locales y 10) usos potenciales para el lugar tras la clausura. La selección final de un lugar de evacuación normalmente se basa en los resultados de un estudio detallado del lugar, de estudios de ingeniería de diseño y de costos, y en una valoración del impacto ambiental. Es interesante el hecho de que los costos de entrada para el desarrollo de nuevos RS en California actualmente varían de 10 millones de dólares hasta 20 millones de dólares, antes de realizar el primer vertido de residuos en el RS.

Distancia de transporte

La distancia de transporte es una de las variables importantes en la selección de un lugar de evacuación. Está claro que la distancia de transporte puede afectar significativamente al diseño y a la operación global de un sistema para la gestión de residuos. Aunque son deseables distancias mínimas de transporte, también se deben tener en cuenta otros factores. Como la localización de RS normalmente se determina por necesidades ambientales y políticas, el transporte a larga distancia, actualmente está llegando a ser muy común.

Restricciones en la localización

Restricciones en la localización hace referencia a los lugares donde se pueden situar los RS. Actualmente hay restricciones en vigor con respecto a la localización de RS cerca de aeropuertos, terrenos aluviales, zonas húmedas, zonas con fallas conocidas, zonas de impacto sísmico y zonas inestables. Todas las restricciones actuales tienen que estudiarse cuidadosamente durante el proceso preliminar de localización para evitar gastos de tiempo y dinero, evaluando un lugar que no cumplirá los requisitos regulatorios.

Disponibilidad de terreno

En la selección de lugares potenciales de evacuación en la tierra es importante asegurar que hay suficiente terreno disponible. Aunque no hay normas estrictas, es deseable tener suficiente terreno, incluyendo una zona adecuada de vallado, para el funcionamiento durante por lo menos siete años en un lugar determinado. Para períodos de tiempo más cortos, la operación de evacuación llega a ser considerablemente más cara, especialmente respecto a la preparación del lugar, aprovisionamiento de instalaciones auxiliares tales como báscula, e instalaciones de almacenamiento, y operaciones de cubrimiento final. En la valoración inicial de los lugares potenciales de evacuación, es importante calcular la desviación de residuos que va a producirse en el futuro, y determinar el impacto que tendrá tal desviación sobre la cantidad y la condición de los materiales que se van a evacuar. Para satisfacer los propósitos de planeación preliminar, la cantidad de terreno necesario se puede estimar como se ilustra en el Ejemplo 1.

Ejemplo 1 Estimación del área requerida para un RS. Estimar el área necesaria para un RS que sirve una comunidad con una población de 31.000 habitantes. Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

1. Generación de residuos sólidos = 2,9 kg/hab.día
2. Peso específico de residuos compactados en el RS = 474.64 kg/m³
3. Profundidad media de residuos compactados = 6 m.

Acceso al lugar

Como el número de RS en operación sigue reduciéndose, los nuevos RS que se están utilizando están incrementando su tamaño. Ya que los terrenos del tamaño deseado a menudo no están cerca de carreteras existentes adecuadas, la construcción de carreteras de acceso y el uso de equipamiento para el transporte a larga distancia se ha convertido en una realidad, y una parte importante en la localización de RS. Las vías de ferrocarril a menudo pasan cerca de lugares distantes que se pueden utilizar como RS; por lo tanto, hay un renovado interés por el uso del ferrocarril para transportar los residuos a estas zonas distantes.

Condiciones del suelo y topografía

Al ser necesario cubrir los residuos colocados en el RS cada día y proporcionar un cubrimiento final después de completar la operación de vertido, se deben obtener datos sobre las cantidades y las características de los suelos de la zona. Si se va a utilizar como material de cubrimiento el suelo del lugar propuesto para el RS, deben obtenerse datos sobre sus características geológicas e hidrológicas. Si el material de cubrimiento va a proceder de una fosa suplementaria de relleno, habrá que hacer sondeos para caracterizar el material. Se debe tener en cuenta la topografía local porque afectará al tipo de operación de vertido utilizada, a las necesidades de equipamiento y al trabajo necesario para hacer que el lugar sea utilizable. Si el material de cubrimiento adecuado

es limitado y se está haciendo un esfuerzo para alargar la vida útil del RS, puede que sea necesario considerar el uso de compost o de otros materiales para la cubrimiento intermedio.

Condiciones climatológicas

También deben tenerse en cuenta las condiciones del clima local en la evaluación de lugares potenciales. En muchas localizaciones, las condiciones durante el invierno afectarán al acceso al lugar. Un tiempo húmedo hará necesario el uso de lugares de vertido separados. Cuando la congelación es severa debe disponerse de material de cubrimiento almacenado, por ser impracticable la excavación. La fuerza y las formas de viento también deben considerarse cuidadosamente. Para evitar el vuelo de materiales residuales, hay que construir cortavientos. La forma exacta de los cortavientos dependerá de las condiciones locales.

Hidrología de aguas superficiales

La hidrología local de las aguas superficiales de la zona es importante para determinar las características de drenaje natural y el escurrimiento existentes que hay que tener en cuenta. Deben identificarse también otras condiciones de inundación (por ejemplo, los límites de inundación en 100 años). Como hay que desarrollar medidas para desviar el escurrimiento superficial fuera del lugar del RS, los planificadores deben tener mucho cuidado en el momento de definir los canales de flujo existentes y el área y las características de la cuenca.

Condiciones geológicas e hidrogeológicas

Estos quizás sean los factores más importantes para establecer la idoneidad ambiental de un lugar para instalar un RS. Se necesitan datos sobre estos factores para valorar la contaminación potencial del lugar propuesto y para establecer lo que hay que hacer en el lugar, para asegurar que el movimiento del lixiviado o de los gases procedentes del RS no dañarán la calidad de las aguas subterráneas locales o contaminarán otros acuíferos superficiales o lechos de roca. En la valoración preliminar de lugares alternativos, se pueden usar los mapas e información geológica local o estatal. También se pueden usar archivos de perforación de pozos cercanos para la valoración preliminar.

Condiciones ambientales locales

Aunque ha sido posible construir y explotar RS próximos a zonas residenciales e industriales, hay que operarlos con muchas precauciones, considerando si van a ser ambientalmente aceptables respecto al tráfico, ruidos, olores, polvo, residuos volantes, impacto visual, control de vectores sanitarios, peligros para la salud, y valores de la propiedad. Para minimizar el impacto de las operaciones de vertido, actualmente se sitúan los RS en lugares distantes, donde se pueden establecer y mantener zonas adecuadas de vallado alrededor del RS.

Uso final de RS llenos

Una de las ventajas de un RS es que, una vez completado, queda disponible para otros usos una superficie de terreno bastante grande. Como la utilización final de este terreno influye en el diseño y el funcionamiento del RS, se debe resolver esta cuestión antes de comenzar con el trazado y el diseño del RS. Las posibilidades para el uso final de RS completados son cada vez más limitadas por las normativas estatales y federales que tratan sobre la clausura y el mantenimiento postclausura de RS. Si el RS municipal se

va a utilizar para funciones municipales, se debería iniciar un programa de plantación por etapas que continúe mientras se completan las distintas porciones del RS

8.0 GESTION DE AGUAS SUPERFICIALES

Igualmente importante en el control del movimiento del lixiviado es la gestión de todas las aguas superficiales, incluyendo la lluvia, el escurrimiento, los arroyos intermitentes y los manantiales artesianos. En este capítulo se presenta la gestión de aguas superficiales. Con el uso de una capa de cobertura correctamente diseñada, de una pendiente superficial adecuada (3 a 5 por 100) y de un drenaje adecuado para las aguas pluviales se puede controlar eficazmente la filtración superficial. Con controles correctos para el agua superficial, quizás no sea necesaria una barrera impermeable superficial. Los temas considerados en este capítulo incluyen: 1) sistemas para el control del agua superficial, 2) diseño de capas de cobertura intermedia, 3) diseño de capas de cobertura final, y 4) determinación de la filtración a través de la cobertura.

Sistemas para controlar las aguas superficiales

Eliminar o reducir la cantidad de agua superficial que entra en el RS es de una importancia fundamental para el diseño de un RS sanitario controlado, porque el agua superficial es la mayor contribución al volumen total del lixiviado. No se debe permitir que el escurrimiento de las aguas de tormenta de los alrededores entre en el RS, y no se debe permitir el escurrimiento superficial (procedente de la lluvia) se acumule sobre la superficie del RS.

Instalaciones de drenaje para aguas superficiales. En los lugares donde el escurrimiento de aguas pluviales procedente de los alrededores pueda entrar en el RS (por ejemplo, RS localizados en vaguadas), se debe instalar un sistema de drenaje correctamente diseñado (Figura 36). Se puede diseñar el sistema de drenaje para separar solamente el escurrimiento de los alrededores, o bien para separar el escurrimiento de los alrededores y también de la superficie del RS. En RS donde se ha instalado un sistema de aislamiento completo en todo el fondo, el diseño del aislamiento debe tener en cuenta la desviación del agua pluvial que no

cae sobre los residuos cuando se vierten. En la Figura 37 se ilustra una desviación de agua pluvial fuera de la porción no utilizada del RS.

En lugares donde solamente hay que apartar el agua superficial de la superficie del RS, deberían diseñarse instalaciones de drenaje para limitar el recorrido del agua superficial. En muchos diseños se utilizan una serie de canales interceptores. El flujo de los canales se dirige hacia un canal principal más grande para apartarlo del lugar.

Estanques para el almacenamiento del agua pluvial. En muchos casos puede ser necesaria la construcción de estanques para contener los flujos desviados del agua pluvial, minimizando así las inundaciones río abajo. Normalmente, se deben recoger las aguas pluviales tanto en las porciones completadas del RS como en las zonas aún no rellenas. Para fijar su tamaño se siguen los procedimientos hidrológicos normales.

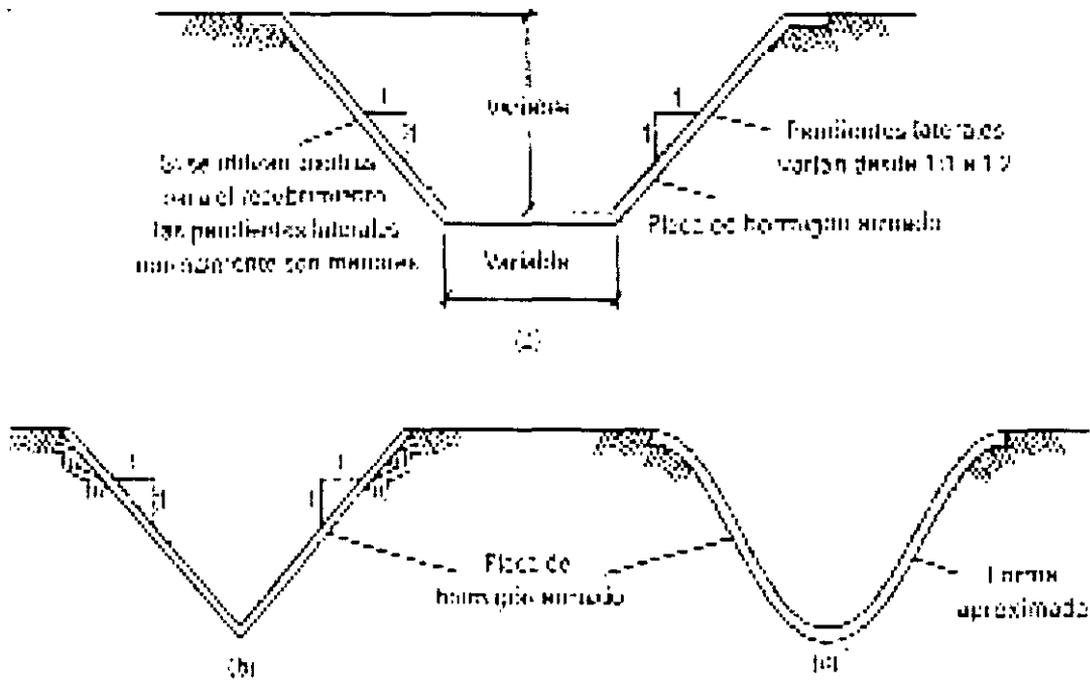


FIGURA 36

Ejemplos de instalaciones de drenaje utilizadas en RS: (a) canal trapezoidal recubierto, (b) canal en forma de «uve» recubierto, y (c) canal recubierto en forma

de «uve» curvo. Hay que resaltar que se puede ampliar el perfil del canal trapezoidal para acomodar una amplia gama de flujos.

Capas de cobertura intermedia

Se utilizan las capas de cobertura intermedia para cubrir los residuos colocados diariamente con el fin de: eliminar la presencia de vectores sanitarios, mejorar la estética del RS y limitar la filtración superficial. La mayor cantidad de agua que entra en un RS y que finalmente se convierte en lixiviado, entra durante el período de relleno del RS. Parte del agua, en forma de lluvia y nieve, entra mientras se están colocando los residuos en el RS. El agua también entra en el RS primero filtrándose y después pasando a través del recubrimiento intermedio. De esta forma, los materiales y el método de puesta en obra de la cobertura intermedia pueden limitar la cantidad de agua superficial que entra en el RS.

Materiales utilizados para las capas de cobertura intermedia. En la Tabla 16 se presentan tasas generalizadas sobre la adaptabilidad de varios tipos de materiales que se han utilizado como recubrimiento intermedio. De los materiales listados, solamente el compost producido a partir de residuos de jardín y de RSM, el recubrimiento geosintético de arcilla y la arcilla son eficaces para limitar la entrada de aguas superficiales en el RS. Para conseguir la mayor eficiencia posible utilizando los materiales arriba citados, se debe inclinar la cobertura intermedia correctamente para aumentar el escurrimiento de las aguas superficiales.

TABLA 16

Valoraciones generalizadas sobre la adaptabilidad de varios materiales para su uso como recubrimiento intermedio en un RS'

Función	Valoraciones generalizadas ^b						
	Mulch de residuos de jardín	Compost residuos de jardín	Compost de RSM	Recubrimiento geosintético de arcilla	Suelo Nativo típico	Arena arcillosa lodosa	Arcilla
Proporciona un aspecto agradable y	B-E	B-E	B	E	E	E	E ^c

controla el vuelo de papeles							
Previene la excavación o tunelamiento de roedores	P	P	P	B-E	P	R-B	P
Previene la salida de moscas	R	R-B	R	E	B	P	E ^c
Minimiza la entrada de aguas superficiales en el RS	P	B-E	R-B	E	R-B ^d	P	E ^c
Retiene las aguas de la lluvia y la nieve	P	B-E	R-B	B	R-B ^d	P	E ^c
Minimiza el escape de gas de RS a través del cubrimiento	P	P	P	R-B	P	P	P-R ^c

^b E = excelente; B = bueno; R = regular, P = pobre

^c Excepto cuando se seca y aparecen grietas en la capa de cubrimiento.

^d Cuando se utiliza una capa de suelo espeso, la valoración es B-E-

En algunos RS, se coloca una capa muy espesa de suelo (0.9 a 1.8 m) sobre la celda llena. El agua de lluvia que se filtra por la capa de recubrimiento intermedio es retenida en virtud de su capacidad de campo. Cuando va a colocarse un segundo nivel sobre el primer nivel, se aparta el suelo y se almacena antes de comenzar el relleno. El uso de la técnica de almacenar temporalmente el material de cobertura adicional sobre una Celda ya llena puede limitar significativamente la cantidad de agua que entra en el RS. También se ha utilizado espuma sintética como material de recubrimiento intermedio. Por lo general la espuma funciona bien, excepto cuando llueve.

Capas de cobertura intermedia utilizando materiales residuales. Como se resaltó en capítulo 6 cuando está limitada la cantidad de suelo nativo para ser utilizado como material de recubrimiento intermedio, se han utilizado materiales alternativos para este propósito. Estos incluyen: compost y mulch producidos a partir de residuos de jardín, y compost producido a partir de RSM. Una de las ventajas importantes de utilizar compost y mulch producidos a partir de RSM es que el volumen del RS que habría sido ocupado por el suelo utilizado para la

recubrimiento intermedio, ahora, está disponible para la evacuación de materiales residuales. En lugares donde la cantidad del material de recubrimiento es limitada, el uso de RSM fermentado puede incrementar significativamente la capacidad del RS.

En la operación de compostaje, se trituran aproximadamente el 40 por 100 de los residuos domésticos y comerciales seleccionados después de separar manualmente los materiales reciclables, y los metales férricos mediante dos etapas de separación magnética. El material triturado se coloca en hileras para fermentarse. El lixiviado del RS se riega sobre los residuos triturados para incrementar el contenido en humedad, optimizando así el compostaje. El compost se usa como cobertura intermedia del 60 por 100 de los residuos restantes que se colocan directamente en el RS. Cuando se utilizan RSM fermentados como material de recubrimiento intermedio, no es necesario curar totalmente el compost antes de su uso. El compost curado colocado sobre los RSM depositados en el RS también sirve como filtro de olores. Significativamente, se espera un incremento para los próximos años del uso de RSM fermentados para el recubrimiento intermedio, al mismo tiempo que la conservación de la capacidad del RS se convierte en una cuestión importante.

Otros materiales que se han utilizado como material de recubrimiento intermedio incluyen alfombras y moquetas usadas, residuos de construcción y demolición, y rechazos agrícolas. Se pueden almacenar alfombras y moquetas usadas cuando entran en el RS, y usarlas después cuando sea necesario. También se han utilizado alfombras y moquetas en el diseño de la cobertura final del RS. De todos modos, actualmente, la necesidad o no de una capa de recubrimiento intermedia está siendo objeto de un debate renovado.

Capas de recubrimiento final

Los propósitos principales del recubrimiento final en un RS son: 1) minimizar la entrada del agua procedente de la lluvia y de la nieve después de completar el RS, 2) limitar la salida incontrolada de gases de RS, 3) suprimir la proliferación de

vectores, 4) limitar el potencial de incendios, 5) proporcionar una superficie apta para la revegetación del lugar, y 6) servir como elemento central en la recuperación del lugar. Para afrontar estos propósitos el recubrimiento del RS 1) debe poder soportar extremos climáticos (por ejemplo, ciclos de calor/frío, humedad/sequedad, heladas/deshielos); 2) debe poder resistir la erosión acuática y eólica; 3) debe tener una estabilidad suficiente frente a hundimientos, roturas, fallos de pendiente, deslizamientos; 4) debe resistir los efectos del asentamiento diferencial en el RS, causado por la salida del gas y la compresión de los residuos y del suelo de cimentación; 5) debe resistir el deterioro debido a las operaciones de vertido, tales como sobrecargas ocasionadas por el almacenamiento y el movimiento de vehículos de recolección en las partes llenas del RS; 6) debe resistir las deformaciones producidas por terremotos; 7) debe resistir las alteraciones producidas en los materiales de recubrimiento por los constituyentes del gas de RS, y 8) debe resistir rupturas causadas por plantas, animales de madriguera, lombrices e insectos. Es importante resaltar que bajo la actual legislación se deben satisfacer todos estos propósitos y atributos por un tiempo bastante prolongado. A continuación se argumentan los rasgos generales de una cobertura de RS, algunos diseños típicos de cobertura, y los requisitos de rendimiento a largo plazo para las cubiertas de RS.

Rasgos generales para el sellado de RS. Un sellado moderno de RS, como se muestra en la Figura 37, se conforma de una serie de capas, cada una de las cuales tiene una función especial. La capa subbase de suelo se utiliza para contornear la superficie del RS y servir como subbase para la capa barrera. En algunos diseños, se coloca una capa para la recolección del gas debajo de la capa de suelo con la finalidad de transportar el gas del RS hacia instalaciones para la gestión del gas. Se utiliza la capa barrera para restringir la entrada de líquidos en el RS y la salida de gases del RS a través del recubrimiento. Se utiliza la capa de drenaje para transportar las aguas de lluvia y nieve que se filtran a través del material de recubrimiento fuera de la capa barrera y para reducir la presión del agua sobre la capa barrera. Se utiliza la capa protectora para proteger las capas de drenaje y barrera. La capa superficial se usa para contornear la superficie del RS, y para

servir como soporte de las plantas que se utilizarán en el diseño de clausura a largo plazo del RS.

Se debería resaltar que no todas las capas serán necesarias en cada localización. Por ejemplo, una capa para la recolección de gas no será necesaria donde exista un sistema activo para la recuperación del gas. A veces también se puede utilizar la capa subbase como capa para la recolección del gas. De las capas identificadas en la Figura 37, la capa barrera es la más importante por las razones anteriormente citadas. Aunque se ha utilizado la capa

Componente	Materiales típicos
Capa superficial	Cobertura de Suelo, disponible localmente o importada
Capa protectora	
Capa de drenaje	Arena, grava o greda para separación
Capa de barrera	Geomembrana
súbbase	Suelo nativo compactado

FIGURA 37

Componentes típicos que constituyen una cobertura de RS.

de arcilla como capa barrera en muchos RS, hay varios problemas inherentes a su uso. Por ejemplo, la arcilla es difícil de compactar sobre una cimentación blanda, la arcilla compactada puede desarrollar grietas debido a la desecación, la congelación puede dañar también la arcilla, el asentamiento diferencial causa grietas en la arcilla, y ésta una vez dañada es difícil de separar en una cobertura de RS, y finalmente, la capa de arcilla no restringe el movimiento del gas de RS de una forma significativa. En consecuencia, se recomienda el uso de una o más geomembranas antes que el uso de arcilla como capa barrera en sellado de RS. También se han utilizado recubrimientos geosintéticos de arcilla para la capa.

Diseños de cobertura. Algunos de los múltiples tipos de diseños de recubrimiento que se han propuesto y utilizado son ilustrados en la Figura 38. En la Figura 38, se

utiliza la tela de filtro geotextil para limitar la mezcla del suelo con la capa de arena. Si el mantillo disponible en la zona del RS no es apto para el cultivo de plantas, se debería llevar un mantillo apto a la zona o enmendar el disponible para mejorar sus características con la finalidad del cultivo de plantas. El uso de un diseño de barrera mixta compuesto de una geomembrana y una capa de arcilla se ilustra en la Figura 38^b. En el diseño que se ilustra en la Figura 38^c, se sustituye la capa de arena o grava por la capa de drenaje geomalla en la Figura 38^b. En el diseño de cobertura ilustrado en la Figura 38^d se utiliza una capa de suelo con un espesor de 1,8 a 3 m como capa de recubrimiento. Funcionalmente, la capa de suelo se inclina adecuadamente para maximizar el escurrimiento superficial. Se utiliza la capa de suelo para retener la lluvia que no corre por la superficie y entra en la cobertura. Se utiliza la membrana flexible para limitar la emisión de gases de RS. También se ha colocado Astro Turf™ sobre un recubrimiento de membrana flexible. El uso de Astro Turf™ es ventajoso porque minimiza el mantenimiento.

Rendimiento y mantenimiento a largo plazo de coberturas de RS.

Independientemente del diseño final de la cobertura del RS, se debe considerar la siguiente cuestión: ¿cómo se mantendrá la integridad y el rendimiento del recubrimiento del RS mientras se asienta el RS, debido a la pérdida de peso por la producción del gas de RS y a la consolidación a largo plazo? Por ejemplo, ¿cómo se reparará un recubrimiento mixto para mantener un drenaje adecuado? Normalmente, si se produce la consolidación, se aparta el material de recubrimiento, se añade suelo o residuos fermentados para ajustar el grado, y se reemplazan diversas capas. Cuando se utiliza una cobertura espesa de suelo, se puede restaurar un drenaje superficial correcto mediante el repaso de la capa. Cuando hay vegetación sobre la cobertura de suelo, puede ser necesario un sistema de riego para mantener la vegetación durante el verano. En los RS donde se ha instalado Astro Turf™ (césped artificial), cuando éste empieza a romperse, se abre el recubrimiento, se repara la membrana flexible, y se añade una nueva capa de Astro Turf™.

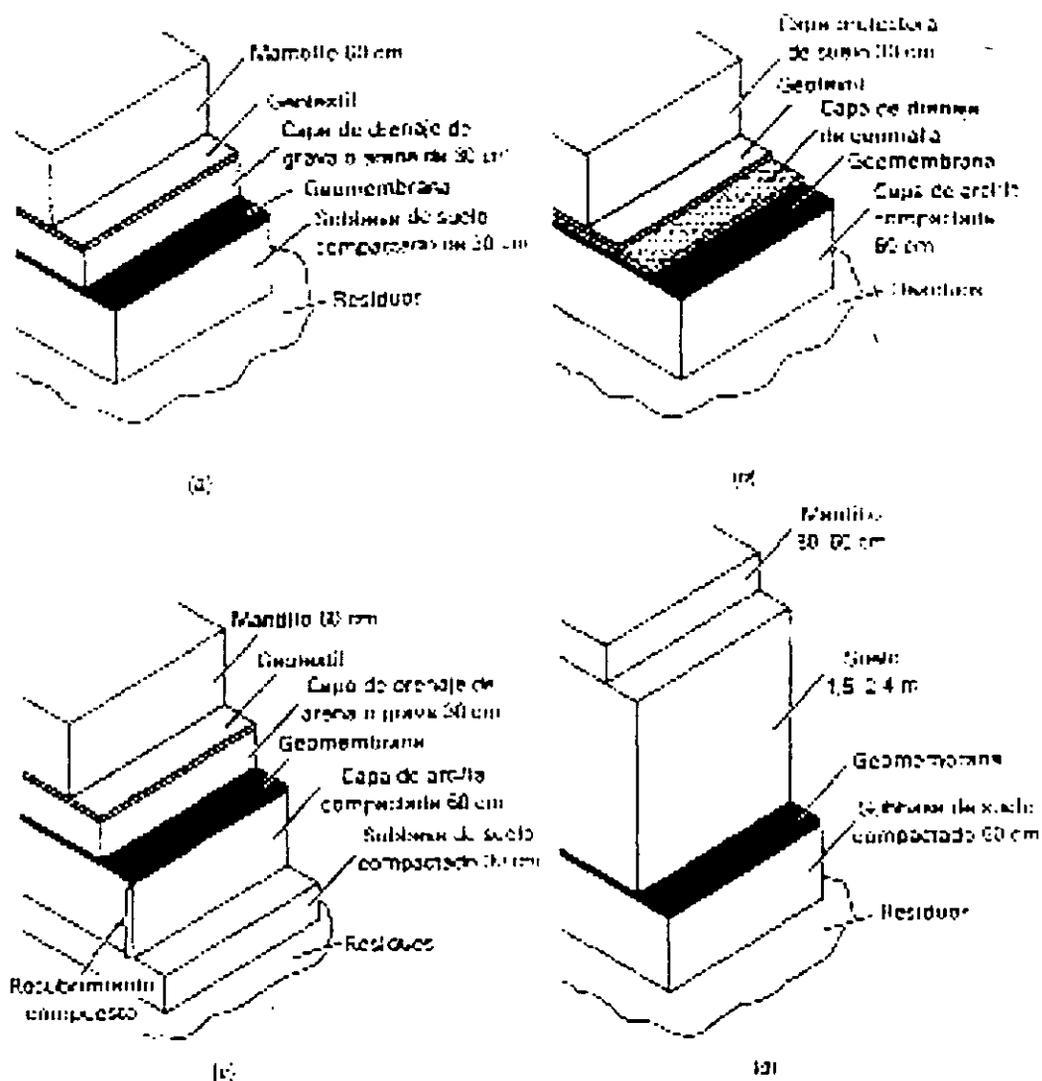


FIGURA 38

Configuraciones típicas para la cobertura final de un RS.

Determinación de la tasa de filtración a través de las capas de cobertura intermedia y final

Si se supone 1) que el material de recubrimiento está saturado, 2) que se mantiene una capa fina de agua en la superficie, y 3) que no hay resistencia al flujo debajo de la capa de cobertura, entonces la cantidad teórica de agua que podría entrar en el RS por unidad de área en un periodo de 24 h. para varios materiales de

recubrimiento se da en la Tabla 12 en la columna 3. Por supuesto, estos datos son valores puramente teóricos, pero se pueden utilizar para valorar la peor situación posible. En la práctica real, la cantidad de agua que entra en el RS dependerá de las condiciones hidrológicas locales, del diseño de la cobertura, de su pendiente final, y también de si se ha plantado vegetación o no. Por lo general, los diseños de cobertura se construyen empleando una impermeabilización con membrana flexible para eliminar la filtración de aguas de lluvia o nieve en los residuos que están debajo de la cobertura del RS.

Normalmente se estima la filtración del agua de lluvia o de deshielo a través de la capa de suelo por encima de la capa de drenaje (Figura 39), o a través de una capa de cobertura compuesta solamente de suelo (Figura 39) utilizando uno de los muchos programas de simulación hidráulica que están disponibles en la actualidad. También se puede calcular la filtración a través de la cobertura del RS utilizando un balance hidrológico estándar. Con referencia a la Figura 39, se puede calcular el balance hidrológico para un recubrimiento de suelo con la siguiente expresión:

$$AS_{LC} = P - R - ET - PER_{SW}$$

donde:

AS_{LC} = Cambio en la cantidad de agua almacenada en una unidad de volumen de cobertura de RS, m.

P = Cantidad de precipitación atmosférica por unidad de área, m.

R = Cantidad de escurrimiento por unidad de área, m.

ET = Cantidad de agua perdida mediante evapotranspiración por unidad de área, m.

PER_{SW} = Cantidad de agua que se filtra a través de la unidad de área de la cobertura del RS y que entra en los residuos sólidos, m.

La cantidad total de agua que se puede almacenar en un volumen unitario de suelo dependerá de la capacidad de campo (CC) y del porcentaje de marchitez permanente (PMP). La tensión húmeda del suelo en CC normalmente es entre 1/10

y 1/3 atm. El PMP se define como la cantidad de agua que queda en el suelo cuando las plantas no son capaces de extraer más. La tensión húmeda del suelo en PMP es aproximadamente de 15 atm. La diferencia entre la CC y el PMP representa la cantidad de agua que puede almacenarse en un suelo. Los valores típicos de CC y de PMP para suelos representativos se dan en la Tabla 17. Si se utiliza una cobertura de RS laminada en capas, en el análisis se debe tener en cuenta la capacidad de campo de cada capa. En la Tabla 18 se dan los coeficientes típicos de escurrimiento para coberturas de RS agotados. Los datos sobre la precipitación atmosférica mensual y la evapotranspiración son específicos del lugar, pero los datos procedentes de la oficina local del tiempo normalmente son aceptables.

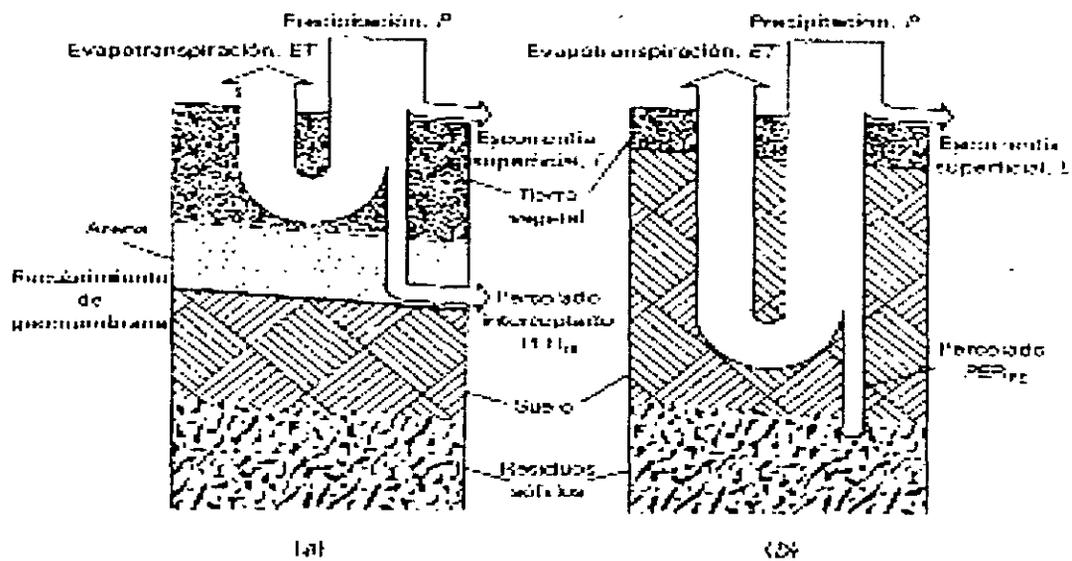


FIGURA 39

Dibujo de definición del balance de aguas de un RS: (a) para una cobertura de RS que contiene una capa de drenaje y un recubrimiento geomembrana y (b) para un RS sin capa de drenaje (o recubrimiento geomembrana).

TABLA 17

Capacidad de campo (CC) y porcentaje de marchitez permanente (PMP) para varias clasificaciones de suelo.

Clasificación de suelo	Valor, porcentaje			
	Capacidad de campo		Punto de marchitez permanente	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Arena	6-12	6	2-4	4
Arena fina	8-16	8	3-6	5
Marga arenosa	10-18	14	4-8	6
Marga arenosa fina	14-22	18	6-10	8
Marga	18-26	22	8-12	10
Marga lodosa	19-28	24	9-14	10
Marga ligera de arcilla	20-30	26	10-15	11
Marga de arcilla	23-31	27	11-15	12
Arcilla lodosa	27-35	31	12-17	15
Marga pesada de arcilla	29-36	32	14-18	16
Arcilla	31-39	35	15-19	17

TABLA 18

Coefficientes típicos de escurrimientos para tormentas con una frecuencia de 5 a 10 años

Tipo de recubrimiento	Pendiente porcentaje	Coeficiente de escurrimiento			
		Con hierba		Sin hierba	
		Rango	Típico	Rango	Típico
Marga arenosa	2	0.05-0.10	0.06	0.06-0.14	0.10
	3-6	0.10-0.15	0.12	0.14-0.24	0.18
	7	0.15-0.20	0.17	0.20-0.30	0.24
Marga lodosa	2	0.12-0.17	0.14	0.25-0.35	0.30
	3-6	0.17-0.25	0.22	0.35-0.45	0.40
	7	0.25-0.36	0.30	0.45-0.55	0.50
Arcilla compacta	2	0.22-0.33	0.25	0.45-0.55	0.50
	3-6	0.30-0.40	0.35	0.55-0.65	0.60
	7	0.40-0.50	0.45	0.65-0.75	0.70

9 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y DE ASENTAMIENTO DE RS

Se deben tener en cuenta las características estructurales y el asentamiento de los RS en el diseño de instalaciones para la recolección del gas, durante las operaciones de relleno, y antes de llegar a una decisión sobre el uso final para el RS completado.

Características estructurales

Cuando inicialmente se colocan residuos sólidos en un RS se comportan de una forma similar a otros materiales de relleno. El ángulo nominal de reposo para el material residual colocado en un RS es aproximadamente de 1.5 a 1. Como los residuos sólidos tienen tendencia a deslizarse cuando la pendiente es demasiado inclinada, las pendientes utilizadas para las porciones ya llenas de un RS variarán de 2.5/1 a 4/1, siendo la más común 3/1. Como consecuencia de los problemas planteados con el deslizamiento ocasionado por el asentamiento, se han construido terrazas en muchos de los RS donde la altura total del RS excede de 15. Las terrazas ayudan a mantener la estabilidad de la pendiente y también se utilizan para la puesta en obra de conductos para el drenaje del agua superficial y para la localización de tuberías para la recuperación del gas de RS.

Por lo general, no se recomienda la construcción de instalaciones permanentes sobre los RS llenos por las características de asentamiento diferencial, por la distinta capacidad de aguante de los niveles superiores del RS, y por los problemas potenciales que pueden resultar de la migración del gas, incluso cuando se usan instalaciones para la recolección del gas. Cuando se conoce el uso final del RS antes de empezar el relleno, es posible controlar la colocación de ciertos materiales durante el funcionamiento del RS. Por ejemplo, se pueden colocar materiales relativamente inertes, como residuos de construcción y demolición, en aquellos lugares donde se van a localizar edificios y/o otras instalaciones físicas en el futuro.

Asentamiento de RS

Mientras se descompone el material orgánico y se pierde peso en forma de componentes gaseosos y lixiviados de RS, se produce el asentamiento del RS. También se produce el asentamiento como resultado de la sobrecarga producida por la adición de niveles, y por la entrada y salida de agua del RS. El asentamiento produce roturas en la superficie y en la cobertura del RS, y roturas y desplazamientos en las instalaciones para la recuperación del gas. También interfiere en el uso final del RS después de la clausura.

Efecto de la descomposición de residuos. Una vez colocados en un RS, los componentes orgánicos de los residuos se descompondrán, ocasionando la pérdida de hasta el 30 o el 40 por 100 del total de la masa original. La pérdida de masa provoca una pérdida de volumen, que puede ser rellenada con nuevos residuos. Normalmente el volumen perdido se rellena cuando se coloca el segundo nivel encima del primero. Se perderá peso y volumen después de cerrar el RS.

Efecto de la presión por sobrecarga (altura). El peso específico del material colocado en el RS se incrementará con el peso del material colocado encima; por lo tanto, el peso específico de los residuos de un nivel dependerá de la profundidad del nivel. El peso específico máximo de los rechazos de residuos sólidos en un RS bajo presión por sobrecarga variará de 1,100 a 1,300 kg/m³. Se puede utilizar la siguiente relación para estimar el incremento en el peso específico de los residuos en función de la presión por sobrecarga:

$$SW_p = SW_i = \frac{p}{u + bp}$$

donde:

SW_p = Peso específico del material residual a una presión p , kg/m³

SW_i = Peso específico compactado inicial de residuos, kg/m³

p = Presión por sobrecarga, kg/m³

$a =$ Constante empírica (kg/M^2).

$b =$ Constante empírica, M^3/kg .

En la Figura 40 muestran curvas típicas de peso específico frente a la presión aplicada para residuos sólidos compactados de varios pesos específicos iniciales. Para un peso específico inicial de $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ y un peso específico máximo de $1,200 \text{ kg}/\text{m}^3$, la Ecuación (anterior) se puede escribir de la forma siguiente:

$$DW_p = 600 \text{ kg}/\text{m}^3 + \frac{0,0024 \text{ m}^3/\text{kg}(\text{kg}/\text{m}^3)}{0,0024 \text{ m}^3/\text{kg}(\text{kg}/\text{m}^3) + (0,0017 \text{ m}^3/\text{kg})(p \text{ kg}/\text{m}^2)}$$

El incremento en el peso específico del material residual en el RS es importante 1) para determinar la cantidad real de residuos que se pueden colocar en un RS hasta un límite dado de pendiente y 2) para determinar el grado de asentamiento que se puede esperar en un RS después de su clausura.

Extensión del asentamiento. La extensión del asentamiento depende de la compactación inicial, de las características de los residuos, del grado de descomposición, de los efectos de la consolidación cuando el agua y el aire son expulsados fuera de los residuos compactados, y de la altura del RS lleno. En la Figura 41 se muestran datos representativos sobre el grado de asentamiento que se puede esperar en un RS en función de la compactación inicial. Se ha descubierto en varios estudios que aproximadamente el 90 por 100 del asentamiento final se produce durante los primeros cinco años. En climas secos la tasa de asentamiento normalmente es menor.

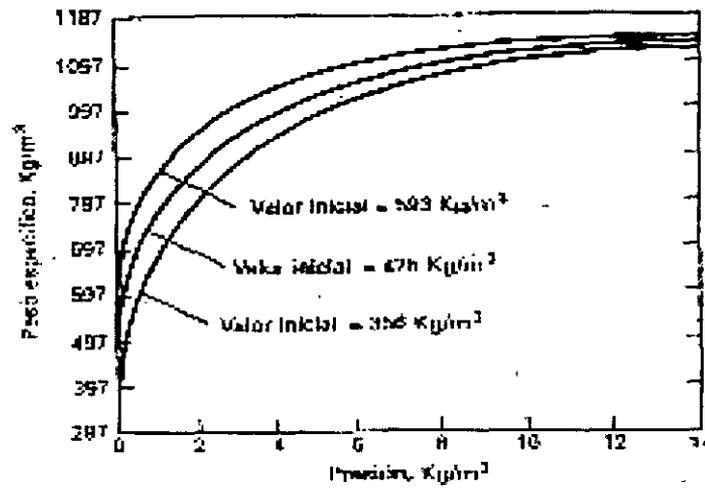


FIGURA 40

Peso específico de los residuos sólidos colocados en un RS en función del peso específico compactado inicial de los residuos y de la presión por sobrecarga.

EVALUACION DE RESIDUOS SOLIDOS Y RECIV

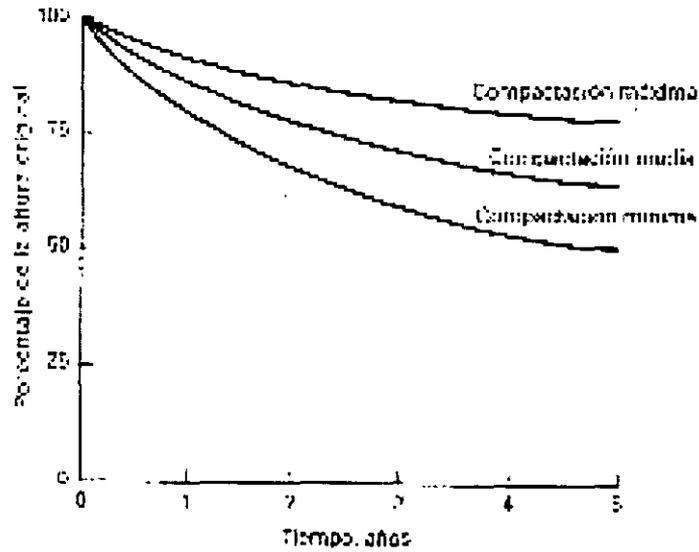


FIGURA 41

Asentamiento superficial de RS compactados.

10 SUPERVISION DE LA CALIDAD AMBIENTAL EN LOS RS

Se lleva a cabo la supervisión ambiental en los RS sanitarios Controlados para asegurar que ningún contaminante que pueda afectar a la salud pública y al ambiente circundante escape del RS. La supervisión necesaria se puede dividir en tres categorías generales: 1) supervisión de la zona aireada para gases y líquidos, 2) supervisión de las aguas subterráneas, y 3) supervisión de la calidad del aire. La supervisión ambiental implica el uso de ambos métodos, analítico y no analítico. Los métodos analíticos implican la recolección de una muestra para su análisis, normalmente en un laboratorio ajeno al RS. La instrumentación de un RS para la supervisión ambiental se ilustra en la Figura 42. Los métodos no analíticos son utilizados para detectar cambios físicos y químicos en el ambiente en función de una medición indirecta, tal como podría ser un cambio en una corriente eléctrica. En la Tabla 19 se listan los dispositivos representativos que se han utilizado para supervisar los RS.

Supervisión de la zona aireada

La zona aireada se define como aquella zona entre la superficie del suelo y el lugar donde se encuentra el agua subterránea permanente (Figura 43). Una característica importante de la zona aireada es que los espacios de los poros no están ocupados por agua, y que las pequeñas cantidades de agua que están presentes coexisten con el aire. La supervisión de la zona aireada en RS implica a líquidos y gases,

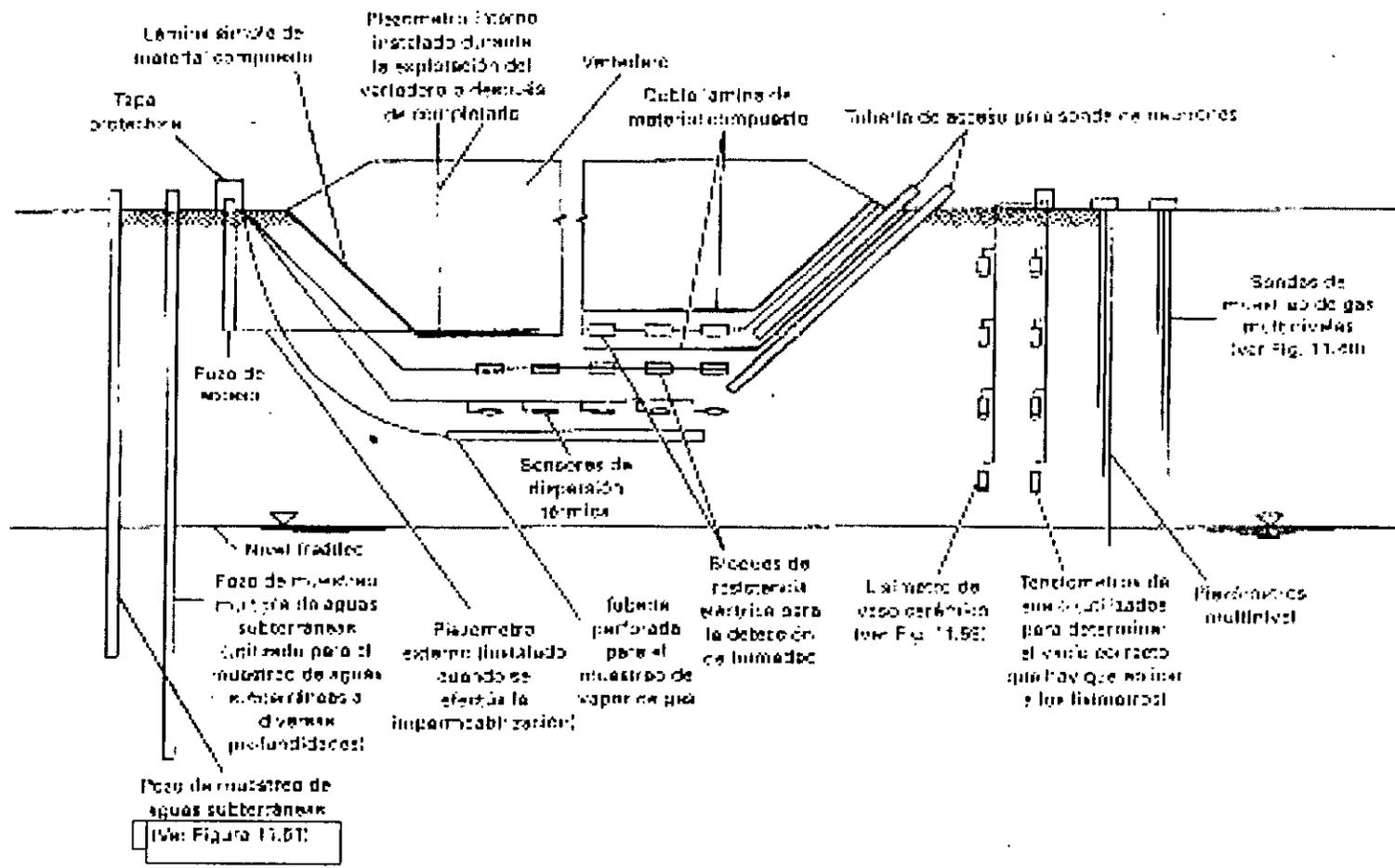


Figura 42

Instrumentación de un RS para la recolección de datos para la supervisión ambiental. Hay que resaltar que toda la instrumentación que se muestra será utilizada en un solo RS.

TABLA 19

Dispositivos representativos utilizados para controlar los gases y lixiviados de RSs

Tipo	Aplicación/descripción
Métodos de muestreo^a	
Calidad de aire	
Muestreador activo de aire	Recolección y análisis continuo de muestras de gas
Bolsa recogedora de aire	Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis
Frasco evacuado	Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis
Jeringuilla de gas	Recolección de muestras fortuitas de aire para su análisis
Agua subterránea	
Pozos de supervisión de profundidad sencilla y múltiple	Utilizados para recoger muestras de agua subterránea. Se utilizan los pozos múltiples de extracción para recoger muestras de diferentes profundidades
Piezómetros	Utilizados para recoger muestras de agua subterránea
En RSs	
Piezómetros	Utilizados para recoger muestras de lixiviados. Los piezómetros pueden instalarse antes de iniciar el relleno del RS o después de completar el mismo.
Zona aireada	
Lisímetro de recolección.	Utilizado para recoger muestras de líquidos debajo de los recubrimientos de RS.
Sondas de gas en el suelo; de profundidad sencilla y múltiple	Utilizadas para supervisar los gases de RS y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en el suelo. Se puede analizar el gas in situ utilizando un cromatógrafo de gas portátil o ensayado en el laboratorio después de absorberlo en carbón vegetal.
Lisímetro de succión	Utilizado para obtener muestras líquidas de la zona aireada
Métodos no de muestreo^b	
Agua subterránea	
Celdas de conductividad	Utilizadas para supervisar cambios en la conductividad de las aguas subterráneas. Las celdas de conductividad a menudo están localizadas en o cerca de los pozos de supervisión.
En RSs	
Piezómetros	Utilizados para medir la profundidad del lixiviado en los RS
Bloques de temperatura	Utilizados para medir la temperatura
Sondas de temperatura	Utilizadas para medir la temperatura
Zona aireada	
Sondas eléctricas	Utilizadas para determinar la salinidad de la zona aireada. Se instala un equipo de cuatro sondas para poder medir la conductividad del suelo
Bloques de resistencia eléctrica	Utilizados para medir cambios en el contenido de agua de la zona aireada. Se instalan en el suelo bloques de electrodos incrustados

	en material poroso. Las propiedades eléctricas de los bloques varían según los cambios en el contenido de agua de la zona aireada.
Sondas de atenuación de rayos gamma	Utilizadas para detectar cambios en el contenido de humedad de la zona aireada. Basado en la atenuación de la transmisión y dispersión de los rayos gamma. En el método de transmisión, se instalan dos pozos separados por una distancia conocida. Se utiliza un solo pozo en el método de dispersión. Normalmente limitado a pequeñas profundidades por las dificultades en la instalación de pozos paralelos.
Sensores de disipación de calor	Utilizados para supervisar el contenido de agua de la zona aireada mediante la medición de la tasa de disipación de calor desde el bloque hasta el suelo alrededor.
Medidor neutrónico de humedad	Utilizado para obtener un perfil del contenido de humedad del suelo debajo del RS. El medidor puede instalarse debajo del RS o moverse a través de una perforación al lado del RS.
Sensores de salinidad	Utilizados para supervisar la salinidad del suelo. Se instalan en el suelo electrodos unidos a un recipiente cerámico.
Tensiómetros	Utilizados para medir el potencial matriz del suelo. Los tensiómetros miden la presión negativa (presión capilar) que existe en el suelo no saturado.
Psicrómetros termocupla	Utilizados para detectar cambios en el contenido de humedad. Su operación se basa en el enfriamiento de una unión termocople por el efecto Peltier. Ampolleta húmeda y punto de condensación. El método de punto de condensación se utiliza más frecuentemente en la supervisión de RS.
Reflectometría de dominio de tiempo (TDR)	Basado en la diferencia de las propiedades dieléctricas del agua y del suelo. Se mide una anchura de banda de frecuencia ancha y de longitud de pulsaciones corta que son sensibles a las propiedades eléctricas de alta frecuencia del material.
Dispositivos de propagación de ondas	El uso de las propiedades de propagación de las ondas sísmicas y acústicas para la detección de escapes. En la técnica de ondas sísmicas, se utiliza la diferencia del tiempo de viaje de las ondas Rayleigh entre la fuente y los geófonos para detectar escapes. En la técnica de supervisión por emisiones acústicas (SEA), se utilizan las ondas de sonido generadas por el fluido de agua de un escape para detectar los escapes.

^a Métodos implicando la recolección de muestras para un análisis posterior en laboratorio.

^b Métodos implicando mediciones físicas y eléctricas.

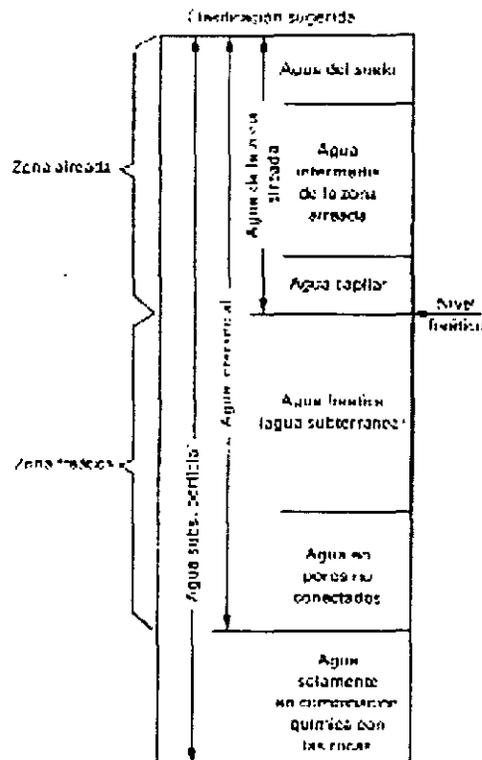


FIGURA 43

Clasificación del agua subsuperficial. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión Integral de Residuos.)

Supervisión de líquidos en la zona aireada. La supervisión de los líquidos en la zona aireada es necesaria para detectar escapes de lixiviados desde el fondo del RS. En la zona aireada, la humedad mantenida en los intersticios de las partículas del suelo o dentro de la roca porosa siempre se mantiene a presiones por debajo de la presión atmosférica. Para eliminar la humedad es necesario desarrollar una presión negativa o un vacío para arrastrar la humedad fuera de las partículas del suelo. Como hay que aplicar una succión para arrastrar la humedad fuera de la zona aireada, no se pueden utilizar pozos convencionales u otras cavidades abiertas para obtener muestras en esta zona. Los dispositivos de muestreo utilizados para la extracción de muestras en la zona no saturada se llaman lisímetros de succión. Las tres clases de lisímetros más comúnmente utilizados son: 1) de taza cerámica, 2) de fibra hueca, y 3) de filtro de membrana.

El dispositivo que generalmente se utiliza para obtener muestras de humedad en la zona aireada es la taza cerámica (Figura 44), que consiste en una taza porosa o anillo hecho de material cerámico que está acoplado a una sección corta de tubería no porosa (por ejemplo, PVC). Cuando se coloca en el suelo, como tiene poros se convierte en una extensión del espacio poroso del suelo. La humedad del suelo es succionada a través del elemento poroso de cerámica mediante la aplicación de vacío. Cuando se ha recogido una

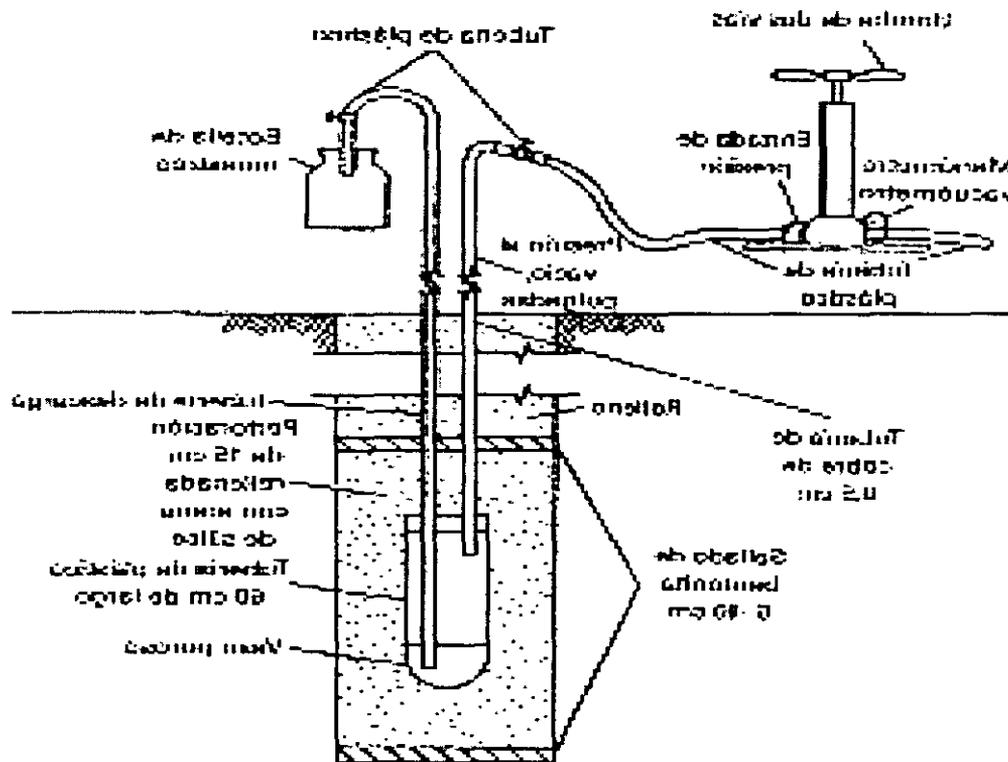


FIGURA 44

Lisímetro de succión de taza porosa para la recolección de muestras líquidas de la zona aireada. (Cortesía de la Junta de California para la Gestión de Residuos.)

cantidad suficiente de agua en el muestreador, la muestra recolección se lleva a la superficie a través de un tubo estrecho mediante la aplicación de vacío o se empuja hacia arriba mediante presión de aire.

Evaluación de la geología e hidrología local

Para evaluar las características geológicas e hidrológicas de un lugar que se está considerando para un RS, se precisa la obtención de testigos de perforación. Se deberían hacer suficientes perforaciones para establecer las formaciones geológicas por debajo del lugar propuesto desde la superficie hasta (e incluso) las porciones superiores del lecho de roca u otras capas confinantes (Figura 50). En el mismo momento debería determinarse la profundidad hasta el nivel de agua superficial para los niveles hidrológicos piezométricos en acuíferos de lecho de roca o confinados. Se procede a utilizar la información conseguida 1) para determinar la dirección general en que se mueve el agua subterránea por debajo de la zona, 2) para determinar si algún acuífero inconsolidado o lecho de roca está en contacto hidráulico directo en la zona del RS propuesto, y 3) para determinar el tipo de sistema de recubrimiento que será necesario.

Selección de las instalaciones para la gestión de los lixiviados

Las principales instalaciones para la gestión de los lixiviados que son necesarias en el diseño de un RS incluyen el aislamiento del RS y el sistema para la recolección de los lixiviados, además de las instalaciones para el tratamiento de los mismos.

Recubrimiento del RS e instalaciones para la recolección de lixiviados. El tipo de aislamiento utilizado dependerá de la geología e hidrogeología local. Por lo general, deberían localizarse las zonas para RS donde haya poca o ninguna posibilidad de contaminar suministros de agua potable. Para asegurar al público que el lixiviado no contaminará las aguas subterráneas, actualmente se requiere la utilización de algún tipo de aislamiento para todos los RS. En la Figura 29 se ilustran diseños de aislamientos comúnmente utilizados. En las Figuras 32, 33 y 34 se ilustran instalaciones típicas para la recolección de lixiviados. La tendencia actual se dirige hacia el uso de aislamientos mixtos que incluyen geomembrana y capa de arcilla. En zonas extremadamente áridas donde no exista ninguna posibilidad de contaminar aguas subterráneas, quizás sería posible desarrollar un

RS sin aislamiento. No obstante, el uso de un sistema de aislamiento es un factor crítico en la localización de nuevos RS. Es más, el costo relativo de un sistema de aislamiento no es alto si se consideran los beneficios potenciales ambientales. Para considerar el tamaño necesario de las instalaciones para la recolección y el tratamiento de lixiviados, se debe estimar la cantidad del lixiviado, utilizando los métodos descritos en el capítulo 7.0.

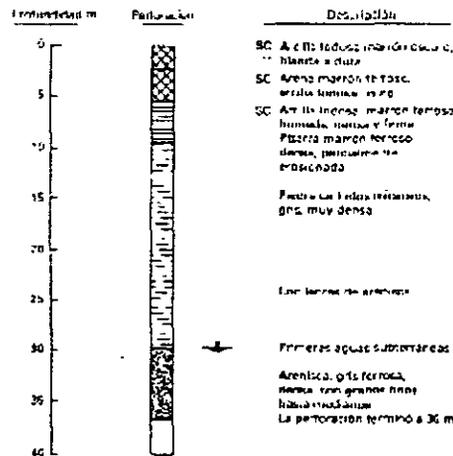


FIGURA 50

Registro de perforación de un pozo perforado en la zona propuesta para el RS.

Instalaciones para el tratamiento de lixiviados. Como se destacó en el capítulo 7.0, las alternativas más comunes que se han utilizado para gestionar los lixiviados recogidos en los RS incluyen: 1) reciclaje de los lixiviados, 2) evaporación de los lixiviados, 3) tratamiento seguido de evaporación, y 4) descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales. La opción escogida dependerá de las condiciones locales.

Selección de instalaciones para controlar el gas

Ya que la emisión incontrolado del gas de RS, especialmente del metano, contribuye al efecto invernadero, y como el gas del RS puede migrar lateralmente y potencialmente causar explosiones o dañar a la vegetación y los árboles, la mayoría de los nuevos RS están equipados con instalaciones para la recolección y el

tratamiento del gas. Para determinar el tamaño necesario de las instalaciones para la recolección y el procesamiento del gas, primero se debe estimar la cantidad de gas en el RS utilizando los métodos descritos en el capítulo 6. Como la tasa de producción del gas varía según los procedimientos de explotación (por ejemplo, con o sin el reciclaje de lixiviados) deberían analizarse varias tasas. La decisión de utilizar pozos de recuperación horizontales o verticales depende del diseño y de la capacidad del RS. La decisión de quemar el gas o recuperar la energía del gas del RS se determina por la capacidad de la zona del RS y por la posibilidad de vender la energía producida a partir de la conversión del gas del RS en energía. En muchos RS pequeños localizados en zonas alejadas, normalmente no se utiliza equipamiento para la recolección del gas.

Selección de la configuración de la cobertura del RS

Como se ha argumentado anteriormente, una cobertura de RS normalmente está conformada por varias capas, cada una con una función específica (Figura 38). El uso de la geomembrana como capa barrera es favorable para la mayoría de los diseñadores de RS, con el fin de limitar la entrada de aguas superficiales y controlar la emisión de gases de RS. La configuración específica de la cobertura elegida dependerá de la localización del RS y de las condiciones climatológicas. Por ejemplo, para tener en cuenta la restauración, algunos diseñadores están a favor del uso de una capa de suelo profunda. Para asegurar la eliminación rápida de las aguas de lluvia en el RS lleno y para evitar la formación de charcos, el cubrimiento final debe tener una inclinación de aproximadamente un 3 a un 5 por 100.

Instalaciones para el drenaje de aguas superficiales

Un paso importante en el diseño de un RS es desarrollar un plan global de drenaje para la zona que presente localizaciones de desagües, alcantarillas, canales y drenajes subsuperficiales mientras se procede a la operación de relleno. Según la localización y la configuración del RS, y la capacidad de las cuencas naturales de drenaje, quizás sea necesario instalar un estanque para retener aguas pluviales.

Instalaciones para la supervisión ambiental

En los nuevos RS son obligatorias las instalaciones para la supervisión de 1) los gases y líquidos en la zona aireada, 2) la calidad de las aguas subterráneas río arriba y abajo de la zona del RS, y 3) la calidad del aire en los contornos del RS y de las instalaciones de procesamiento (por ejemplo, quemadores). El número específico de instalaciones de supervisión dependerá de la configuración y del tamaño del RS, y de las necesidades de las agencias locales para el control de la contaminación del aire y del agua.

Consideraciones de estética en el diseño

Las consideraciones de estética en el diseño están relacionadas con la minimización del impacto de la operación de vertido tanto sobre los residentes cercanos como sobre el público que pueda acercarse hasta el RS.

Protección en zonas de vertido. La protección, en las operaciones diarias de vertido, de las calles cercanas y de los residentes con bermas, plantaciones y otras medidas de paisajismo es uno de los ejemplos más importantes de una consideración estética del diseño. La protección de las zonas activas del RS debe incorporarse en el diseño y trazado preliminar del RS.

Control de pájaros. La presencia de pájaros en la zona del RS no solamente es irritante, sino que también puede causar graves problemas si el

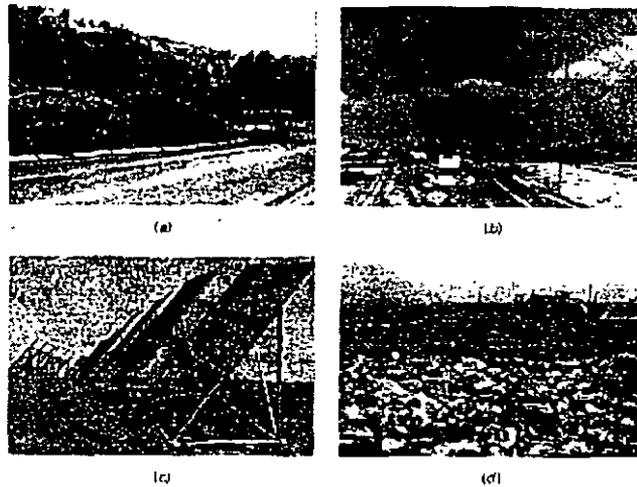


FIGURA 50-a

Consideraciones de estética en el diseño de RS: (a) vista de un RS con paisaje en el que las operaciones de vertido no son visibles desde la carretera general de al lado, (b) sistema de cables elevados utilizados para controlar gaviotas en los RS, (c) pantalla de alambres utilizada para controlar el vuelo de plásticos y papeles, y (d) cobertura diaria utilizada para controlar vectores sanitarios en el RS.

RS está localizado cerca de un aeropuerto. Las técnicas que se han utilizado para controlar los pájaros en las zonas de RS incluyen el uso de productores de ruidos, el uso de grabaciones de sonidos producidos por aves de presa, y el uso de cables elevados. El uso de cables elevados para mantener los pájaros fuera de los pantanos y de los estanques de peces viene de principios de los años 30. Los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles fueron los pioneros en el uso de cables elevados para controlar gaviotas en RS a principios de los años 70. Como las gaviotas descienden formando círculos cuando aterrizan, parece que los cables interfieren en el mecanismo de orientación de los pájaros. Normalmente los postes se espacian de 15 a 25 m con tramos de línea de 120 a 400 m. Si se cruzan los cables mejora la eficacia del sistema. Normalmente se utiliza hilo de pescar de monofilamento de 45 kg de resistencia, aunque también se ha utilizado cable de acero inoxidable.

Control del vuelo de materiales y polvo. Según la localización, el vuelo de papeles, plásticos y de otros residuos puede ser problemático en algunos RS. La solución más común es utilizar pantallas portátiles cerca del frente de trabajo del RS. Para evitar problemas con vectores sanitarios, hay que quitar diariamente el material que se ha acumulado en las pantallas. Se controla el polvo mediante el riego con agua de las carreteras de acceso e internas.

Control de plagas y vectores sanitarios. Los principales vectores sanitarios en el diseño y funcionamiento de los RS son los insectos, como mosquitos y moscas, y los roedores, tales como ratas y otros animales de madriguera. Se controlan las moscas y los mosquitos con cubrimiento diario y eliminando aguas estancadas. Estas últimas pueden ser problemáticas en zonas de almacenamiento de bienes de línea blanca y de neumáticos. El uso de instalaciones cubiertas para el almacenamiento de estos materiales eliminaría la mayoría de los problemas. Se controlan las ratas y otros animales de madriguera mediante el cubrimiento diario.

Necesidades de equipamiento

El tipo, tamaño y cantidad de equipamiento dependerá del tamaño del RS y del método de explotación. El equipamiento que se ha utilizado en RS incluye: tractores de orugas, palas de arrastre, apisonadoras, dragalinas y motoniveladoras (ver Figuras 51 y 52). De éstos, los tractores de orugas son los más utilizados. Los tractores correctamente equipados pueden utilizarse para llevar a cabo todas las operaciones necesarias dentro de un RS sanitario controlado, incluyendo: la nivelación, compactación, cubrimiento, realización de zanjas, e incluso el transporte de los materiales de cobertura. En la Tabla 22 se resumen los datos generalizados sobre el rendimiento del equipamiento en un RS.

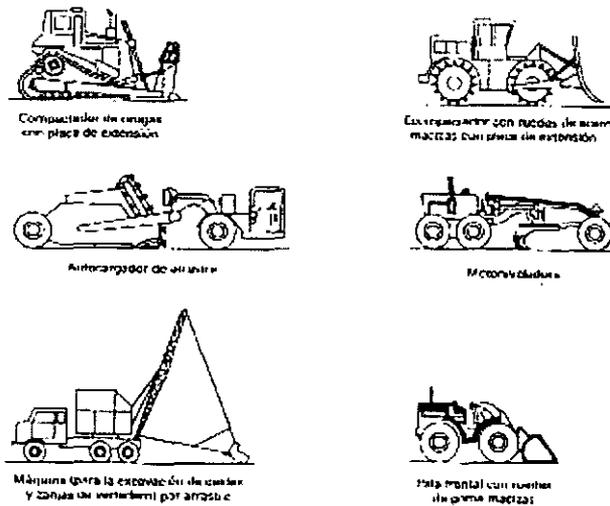


FIGURA 51

Maquinaria típica utilizada en RS para la colocación y cobertura de residuos.

TABLA 22

Características del rendimiento de la maquinaria para RS

Equipamiento	Residuos sólidos		Material de cubrimiento			
	Esparcimiento	Compacción	Excavación	Esparcimiento	Compactación	Transporte
Tractor de orugas	E ^c	B	E	E	B	NA
Compactador con ruedas	E	E	p	R-B	E	NA
Pala de arrastre	NA	NA	B	E	NA	E

^b Base de evaluación: suelo fácil de trabajar y distancia de transporte del material de cubrimiento mayor de 300 m.

^c Clave: E, excelente-, B, bueno; R, regular; P, pobre; NA, no aplicable.

El tamaño y la cantidad de máquinas dependerá principalmente del tamaño del RS. También las condiciones locales influirán sobre el tamaño de la maquinaria. En la Tabla 23 se presentan las necesidades de maquinaria, que se pueden utilizar como guía en la operación de RS.

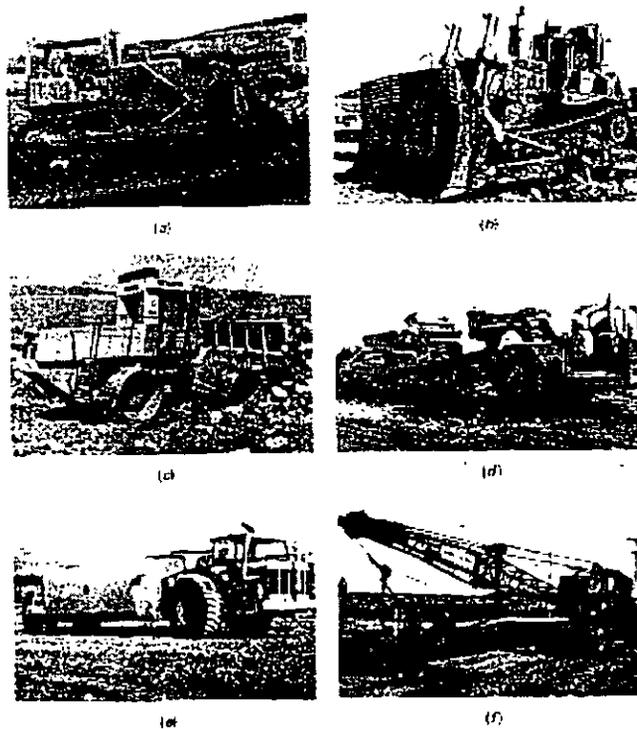


FIGURA 52

Vistas de máquinas utilizadas en RS: (a) tractor de oruga con hoja de empuje, (b) tractor de oruga con hoja para basuras, (c) apisonadora con ruedas macizas de acero con hoja para basuras -el motor en esta unidad está enfriado por aire-, (d) pala de arrastre autocargadora, (e) cisterna con agua para el control del polvo, y (f) dragalina.

TABLA 23

Necesidades típicas de maquinaria para RS sanitarios controlados

Población aproximada	Residuos diarios t	Equipamiento		Peso del equipamiento, kg	Accesorio ^a
		Número	Tipo		
0-20,000	0-50	1	Tractor orugas	4,500-13,500	Hoja de empuje Pala frontal (0.75-1.5 m ³)
20,000-50,000	50-150	1	Tractor orugas	13,500-27,000	Hoja para residuos Hoja de empuje Pala frontal 1.5-3 m ³) Empujador de

50,000-100,000	150-300	1-2	Tractor orugas	13,500 +	cuchara Placa para residuos Placa de empuje Pala frontal(1.5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Pala de arrastre o draga ^b		
		1	Camión cisterna		
> 100,000	300 ^c	1-2	Tractor orugas	21,000+	Placa de empuje Pala frontal (1.5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Compactador con ruedas de acero		
		1	Pala de arrastre o draga b		
		1	Camión cisterna		
		- ^a	Nivelador de carreteras		

^a Opcional, depende de necesidades individuales,

^b La elección entre una pala de arrastre o una draga dependerá de las condiciones locales.

^c Para cada incremento de 500 t hay que añadir una unidad más de cada pieza de equipamiento.

Evaluación de la geología e hidrología local

Para evaluar las características geológicas e hidrológicas de un lugar que se está considerando para un RS, se precisa la obtención de testigos de perforación. Se deberían hacer suficientes perforaciones para establecer las formaciones geológicas por debajo del lugar propuesto desde la superficie hasta (e incluso) las porciones superiores del lecho de roca u otras capas confinantes (Figura 50). En el mismo momento debería determinarse la profundidad hasta el nivel de agua superficial para los niveles hidrológicos piezométricos en acuíferos de lecho de roca o confinados. Se procede a utilizar la información conseguida 1) para determinar la dirección general en que se mueve el agua subterránea por debajo de la zona, 2) para determinar si algún acuífero inconsolidado o lecho de roca está en contacto hidráulico directo en la zona del RS propuesto, y 3) para determinar el tipo de sistema de recubrimiento que será necesario.

Selección de las instalaciones para la gestión de los lixiviados

Las principales instalaciones para la gestión de los lixiviados que son necesarias en el diseño de un RS incluyen el aislamiento del RS y el sistema para la recolección de los lixiviados, además de las instalaciones para el tratamiento de los mismos.

Recubrimiento del RS e instalaciones para la recolección de lixiviados. El tipo de aislamiento utilizado dependerá de la geología e hidrogeología local. Por lo general, deberían localizarse las zonas para RS donde haya poca o ninguna posibilidad de contaminar suministros de agua potable. Para asegurar al público que el lixiviado no contaminará las aguas subterráneas, actualmente se requiere la utilización de algún tipo de aislamiento para todos los RS. En la Figura 29 se ilustran diseños de aislamientos comúnmente utilizados. En las Figuras 32, 33 y 34 se ilustran instalaciones típicas para la recolección de lixiviados. La tendencia actual se dirige hacia el uso de aislamientos mixtos que incluyen geomembrana y capa de arcilla. En zonas extremadamente áridas donde no exista ninguna posibilidad de contaminar aguas subterráneas, quizás sería posible desarrollar un

tratamiento del gas. Para determinar el tamaño necesario de las instalaciones para la recolección y el procesamiento del gas, primero se debe estimar la cantidad de gas en el RS utilizando los métodos descritos en el capítulo 6. Como la tasa de producción del gas varía según los procedimientos de explotación (por ejemplo, con o sin el reciclaje de lixiviados) deberían analizarse varias tasas. La decisión de utilizar pozos de recuperación horizontales o verticales depende del diseño y de la capacidad del RS. La decisión de quemar el gas o recuperar la energía del gas del RS se determina por la capacidad de la zona del RS y por la posibilidad de vender la energía producida a partir de la conversión del gas del RS en energía. En muchos RS pequeños localizados en zonas alejadas, normalmente no se utiliza equipamiento para la recolección del gas.

Selección de la configuración de la cobertura del RS

Como se ha argumentado anteriormente, una cobertura de RS normalmente está conformada por varias capas, cada una con una función específica (Figura 38). El uso de la geomembrana como capa barrera es favorable para la mayoría de los diseñadores de RS, con el fin de limitar la entrada de aguas superficiales y controlar la emisión de gases de RS. La configuración específica de la cobertura elegida dependerá de la localización del RS y de las condiciones climatológicas. Por ejemplo, para tener en cuenta la restauración, algunos diseñadores están a favor del uso de una capa de suelo profunda. Para asegurar la eliminación rápida de las aguas de lluvia en el RS lleno y para evitar la formación de charcos, el cubrimiento final debe tener una inclinación de aproximadamente un 3 a un 5 por 100.

Instalaciones para el drenaje de aguas superficiales

Un paso importante en el diseño de un RS es desarrollar un plan global de drenaje para la zona que presente localizaciones de desagües, alcantarillas, canales y drenajes subsuperficiales mientras se procede a la operación de relleno. Según la localización y la configuración del RS, y la capacidad de las cuencas naturales de drenaje, quizás sea necesario instalar un estanque para retener aguas pluviales.

Instalaciones para la supervisión ambiental

En los nuevos RS son obligatorias las instalaciones para la supervisión de 1) los gases y líquidos en la zona aireada, 2) la calidad de las aguas subterráneas río arriba y abajo de la zona del RS, y 3) la calidad del aire en los contornos del RS y de las instalaciones de procesamiento (por ejemplo, quemadores). El número específico de instalaciones de supervisión dependerá de la configuración y del tamaño del RS, y de las necesidades de las agencias locales para el control de la contaminación del aire y del agua.

Consideraciones de estética en el diseño

Las consideraciones de estética en el diseño están relacionadas con la minimización del impacto de la operación de vertido tanto sobre los residentes cercanos como sobre el público que pueda acercarse hasta el RS.

Protección en zonas de vertido. La protección, en las operaciones diarias de vertido, de las calles cercanas y de los residentes con bermas, plantaciones y otras medidas de paisajismo es uno de los ejemplos más importantes de una consideración estética del diseño. La protección de las zonas activas del RS debe incorporarse en el diseño y trazado preliminar del RS.

Control de pájaros. La presencia de pájaros en la zona del RS no solamente es irritante, sino que también puede causar graves problemas si el

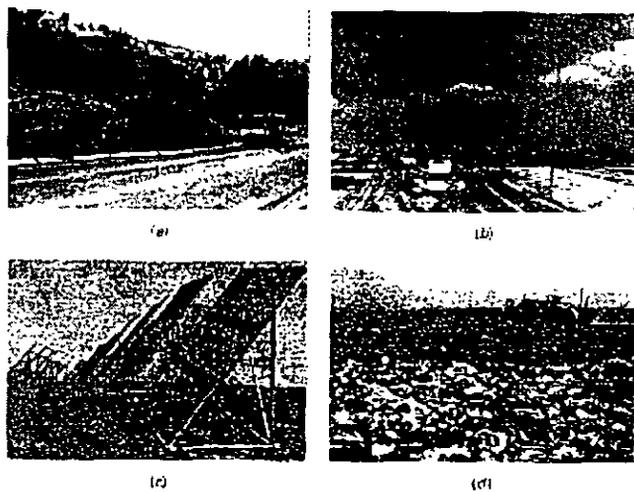


FIGURA 50-a

Consideraciones de estética en el diseño de RS: (a) vista de un RS con paisaje en el que las operaciones de vertido no son visibles desde la carretera general de al lado, (b) sistema de cables elevados utilizados para controlar gaviotas en los RS, (c) pantalla de alambres utilizada para controlar el vuelo de plásticos y papeles, y (d) cobertura diaria utilizada para controlar vectores sanitarios en el RS.

RS está localizado cerca de un aeropuerto. Las técnicas que se han utilizado para controlar los pájaros en las zonas de RS incluyen el uso de productores de ruidos, el uso de grabaciones de sonidos producidos por aves de presa, y el uso de cables elevados. El uso de cables elevados para mantener los pájaros fuera de los pantanos y de los estanques de peces viene de principios de los años 30. Los Distritos Sanitarios del Condado de Los Angeles fueron los pioneros en el uso de cables elevados para controlar gaviotas en RS a principios de los años 70. Como las gaviotas descienden formando círculos cuando aterrizan, parece que los cables interfieren en el mecanismo de orientación de los pájaros. Normalmente los postes se espacian de 15 a 25 m con tramos de línea de 120 a 400 m. Si se cruzan los cables mejora la eficacia del sistema. Normalmente se utiliza hilo de pescar de monofilamento de 45 kg de resistencia, aunque también se ha utilizado cable de acero inoxidable.

Control del vuelo de materiales y polvo. Según la localización, el vuelo de papeles, plásticos y de otros residuos puede ser problemático en algunos RS. La solución más común es utilizar pantallas portátiles cerca del frente de trabajo del RS. Para evitar problemas con vectores sanitarios, hay que quitar diariamente el material que se ha acumulado en las pantallas. Se controla el polvo mediante el riego con agua de las carreteras de acceso e internas.

Control de plagas y vectores sanitarios. Los principales vectores sanitarios en el diseño y funcionamiento de los RS son los insectos, como mosquitos y moscas, y los roedores, tales como ratas y otros animales de madriguera. Se controlan las moscas y los mosquitos con cubrimiento diario y eliminando aguas estancadas. Estas últimas pueden ser problemáticas en zonas de almacenamiento de bienes de línea blanca y de neumáticos. El uso de instalaciones cubiertas para el almacenamiento de estos materiales eliminaría la mayoría de los problemas. Se controlan las ratas y otros animales de madriguera mediante el cubrimiento diario.

Necesidades de equipamiento

El tipo, tamaño y cantidad de equipamiento dependerá del tamaño del RS y del método de explotación. El equipamiento que se ha utilizado en RS incluye: tractores de orugas, palas de arrastre, apisonadoras, dragalinas y motoniveladoras (ver Figuras 51 y 52). De éstos, los tractores de orugas son los más utilizados. Los tractores correctamente equipados pueden utilizarse para llevar a cabo todas las operaciones necesarias dentro de un RS sanitario controlado, incluyendo: la nivelación, compactación, cubrimiento, realización de zanjas, e incluso el transporte de los materiales de cobertura. En la Tabla 22 se resumen los datos generalizados sobre el rendimiento del equipamiento en un RS.

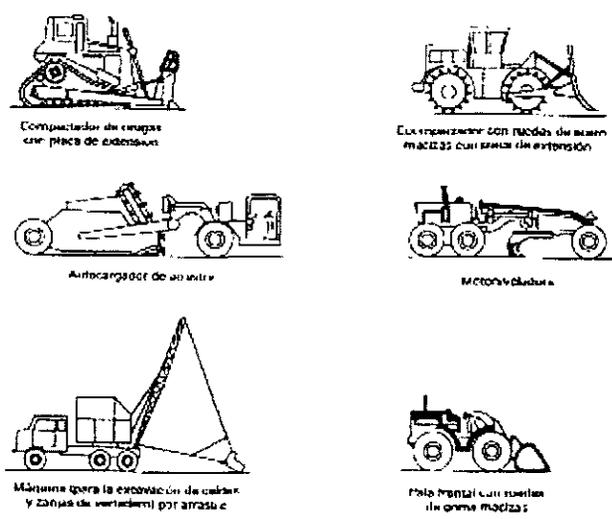


FIGURA 51

Maquinaria típica utilizada en RS para la colocación y cobertura de residuos.

TABLA 22

Características del rendimiento de la maquinaria para RS

Equipamiento	Residuos sólidos		Material de cubrimiento			
	Esparcimiento	Compactación	Excavación	Esparcimiento	Compactación	Transporte
Tractor de orugas	E ^c	B	E	E	B	NA
Compactador con ruedas	E	E	p	R-B	E	NA
Pala de arrastre	NA	NA	B	E	NA	E

^b Base de evaluación: suelo fácil de trabajar y distancia de transporte del material de cubrimiento mayor de 300 m,

^c Clave: E, excelente-, B, bueno, R, regular, P, pobre; NA, no aplicable.

El tamaño y la cantidad de máquinas dependerá principalmente del tamaño del RS. También las condiciones locales influirán sobre el tamaño de la maquinaria. En la Tabla 23 se presentan las necesidades de maquinaria, que se pueden utilizar como guía en la operación de RS.

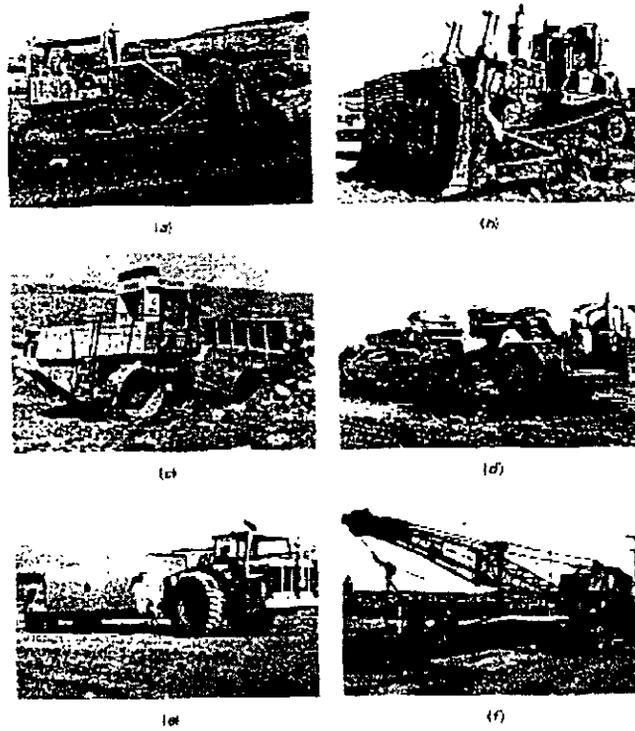


FIGURA 52

Vistas de máquinas utilizadas en RS: (a) tractor de oruga con hoja de empuje, (b) tractor de oruga con hoja para basuras, (c) apisonadora con ruedas macizas de acero con hoja para basuras -el motor en esta unidad está enfriado por aire-, (d) pala de arrastre autocargadora, (e) cisterna con agua para el control del polvo, y (f) dragalina.

TABLA 23

Necesidades típicas de maquinaria para RS sanitarios controlados

Población aproximada	Residuos diarios t	Equipamiento			
		Número	Tipo	Peso del equipamiento, kg	Accesorio ^a
0-20,000	0-50	1	Tractor orugas	4,500-13,500	Hoja de empuje Pala frontal (0.75-1.5 m ³)
20,000-50,000	50-150	1	Tractor orugas	13,500-27,000	Hoja para residuos Hoja de empuje Pala frontal 1.5-3 m ³) Empujador de

50,000-100,000	150-300	1-2	Tractor orugas	13,500 +	cuchara Placa para residuos Placa de empuje Pala frontal(1.5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Pala de arrastre o draga ^b		
		1	Camión cisterna		
> 100,000	300 ^c	1-2	Tractor orugas	21,000+	Placa de empuje Pala frontal (1.5-4 m ³) Empujador de cuchara Placa para residuos
		1	Compactador con ruedas de acero		
		1	Pala de arrastre o draga b		
		1	Camión cisterna		
		- ^a	Nivelador de carreteras		

^a Opcional, depende de necesidades individuales,

^b La elección entre una pala de arrastre o una draga dependerá de las condiciones locales.

^c Para cada incremento de 500 t hay que añadir una unidad más de cada pieza de equipamiento

12.0 EXPLOTACION DE RS

El desarrollo de un horario de explotación laborable, un plan de relleno para los residuos sólidos, archivos de explotación e información de facturación del RS, un plan para la inspección de cargamentos de residuos peligrosos, y planes de seguridad contra accidentes y la seguridad en la zona son todos los elementos importantes dentro de un plan de explotación del RS.

Horarios para la explotación de RS

Los factores que deben considerarse en el desarrollo de horarios de explotación incluyen: 1) secuencias de llegada para vehículos de recolección, 2) distribución del tráfico en la zona, 3) secuencia temporal para seguir las operaciones de relleno, 4) efectos del viento y de otras condiciones climatológicas, y 5) acceso comercial y del público. Por ejemplo, por el tráfico congestionado de camiones por la mañana temprano, quizás sea necesario restringir el acceso al público a la zona hasta más entrada la mañana.

Plan de vertido de residuos sólidos

- Una vez establecido el trazado general de la zona del RS será necesario seleccionar el método de colocación que va a utilizarse y trazar y diseñar las celdas individuales para residuos sólidos. El método específico de vertido dependerá de las características del lugar, tales como la cantidad de material de cobertura disponible, la topografía, y la hidrología y geología local. En el capítulo 4 se presentaron detalles sobre los diversos métodos de relleno. Para valorar los planes de desarrollo en el futuro, será necesario preparar un plan detallado del trazado de cada celda de residuos sólidos. La secuencia del vertido debería establecerse para que las operaciones de vertido no se paralicen por el mal tiempo o por condiciones adversas en el invierno. En la Figura 53 se muestra un ejemplo típico de tal plan.

Archivos de explotación del RS

Para determinar las cantidades de residuos que son evacuadas se necesitarán una báscula en la entrada y una caseta. La caseta sería utilizada por el personal responsable del pesaje de los camiones que están entrando y saliendo. La sofisticación de las instalaciones de pesaje dependerá del número de vehículos que deben procesarse por hora y del tamaño del RS. (Por ejemplo, en algunos RS grandes, las instalaciones de pesaje están equipadas con detectores de radiación para descubrir la presencia de sustancias radiactivas en los residuos entrantes). Si se conoce el peso de los residuos entregados, entonces se puede determinar la cantidad *in situ* de residuos,

TABLA 24

Factores importantes que deben considerarse en la explotación de RS

Factores	Observaciones
Días y horas de explotación	La práctica normal es 5 a 6 días por semana y 8 a 10 h/d
Comunicaciones	Teléfono para emergencias
Instalaciones para empleados	Cuartos de descanso y agua potable
Mantenimiento de equipamiento	Debería proporcionarse una construcción cubierta para el mantenimiento en la zona de trabajo
Control de la basura caída	Utilizar vallas móviles en las zonas de descarga; los operarios deberían recoger las basuras caídas por lo menos una vez al mes o cuando sea necesario
Plan de explotación	Con o sin la coevacuación de lodos de plantas de tratamiento y la recuperación de gas
Archivos de explotación	Tonelaje, transacciones y facturación si se cobra una tarifa de evacuación
Rebusca o triaje (pepena)	No se puede ir buscando cosas en los residuos, si acaso debería producirse fuera de la zona de descarga
Básculas	Esenciales para mantener archivos si los camiones de recolección entregan residuos; capacidad hasta 48 t
Seguridad	Proporcionar portones con cerradura y vallas, iluminación de zonas sensibles
Esparcimiento y compactación	Esparcir y compactar los residuos en capas con un espesor menor de 0.6 m para lograr una compactación óptima
Zona de descarga	Mantenerla pequeña, generalmente de menos de 30 metros por lado, operar zonas de descarga separadas para automóviles y camiones comerciales

controlando así el rendimiento de la explotación. También se utilizarían los archivos de peso como una base para cobrar a las agencias y a los transportistas privados por sus producciones.

Inspección de carga para residuos peligrosos

Inspección de carga es el término utilizado para describir el proceso de descarga de los contenidos de un vehículo de recolección cerca del frente de trabajo o en alguna zona designada, esparciendo los residuos en una capa fina e inspeccionándolos visualmente para determinar si hay presentes residuos peligrosos. Se puede detectar la presencia de residuos radiactivos con un aparato manual para medir la radiación, o en la estación de pesaje, como anteriormente se ha descrito. Si se encuentran residuos peligrosos,

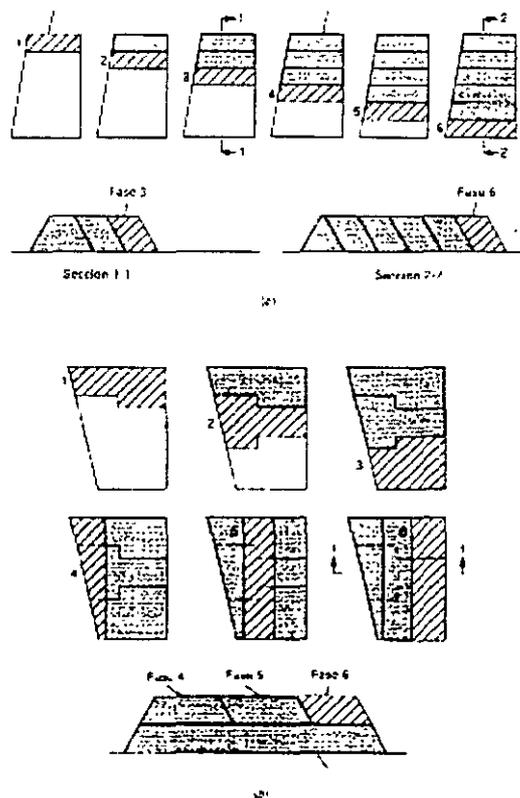


FIGURA 53

Ejemplos típicos de planes para el relleno de residuos sólidos: (a) plan de relleno para un RS de un solo nivel y (b) plan de relleno para un RS multinivel.

la compañía de recolección es la responsable de separarlos. En algunos RS, si se detecta a una compañía entrando por segunda vez con residuos peligrosos se le

impone una multa importante. Si reincide por tercera vez, se le prohíbe descargar en el RS.

Salud y seguridad pública

Las cuestiones de salud y seguridad pública están relacionadas con la salud y seguridad laboral y pública.

Salud y seguridad de los trabajadores. La salud y la seguridad de los trabajadores en los RS es crucial en la explotación del RS. El gobierno federal, a través de las normativas OSHA, y los estados, a través de programas tipo OSHA, han establecido normativas para un programa global de salud y seguridad para los trabajadores en los RS. Como los requisitos para estos programas cambian continuamente, se deberían consultar las normativas más recientes para el desarrollo de programas de salud y seguridad laboral. Se debe prestar una atención especial a los tipos de ropa y de botas protectoras, al equipamiento para la cabeza de filtro-aire, y a los guantes a prueba de pinchazos suministrados a los trabajadores.

Seguridad del público. Como se ha resaltado anteriormente, las inquietudes sobre seguridad y las múltiples restricciones que controlan la explotación de RS han obligado a los operadores de RS a reexaminar sus prácticas con respecto a la seguridad pública y de la zona. Como resultado, está ganando en popularidad el uso de una estación de transferencia en el entorno del RS para minimizar el contacto del público con las operaciones de explotación del RS.

Seguridad en la zona

El aumento del número de denuncias por accidentes en los entornos de los RS ha provocado una significativa mejora de su seguridad. La mayoría de los RS tienen un acceso restringido y están vallados y señalizados con señales de prohibido el

paso y con otras advertencias. En algunas localizaciones se utilizan cámaras de televisión para supervisar el funcionamiento del RS y el acceso al lugar.

13.0 CLAUSURA DE RS y MANTENIMIENTO POSTCLAUSURA

Clausura del RS y mantenimiento postclausura son los términos utilizados para describir lo que va a pasar en un RS lleno en el futuro. Para asegurar el mantenimiento de RS clausurados durante 30 o 50 años en el futuro, muchos estados han aprobado una legislación que requiere que el operador del RS retenga suficiente dinero para mantener el entorno cerrado a perpetuidad.

Desarrollo de un Plan de clausura a largo plazo

Quizás el elemento más importante en el mantenimiento a largo plazo de un RS completado sea la disponibilidad de un plan de clausura en el que se discutan claramente los requisitos para la clausura. Un plan de clausura debe incluir un diseño para la cobertura y el paisajismo del lugar completado. La clausura también debe incluir planes a largo plazo para el control del escurrimiento, el control de la erosión, la recolección de los gases y lixiviados y su tratamiento, y la supervisión ambiental.

Diseño de la cobertura y del paisajismo. Se debe diseñar la cobertura para desviar el escurrimiento superficial y el agua del deshielo fuera de la zona del RS. Cada vez más el diseño del paisaje final se basa en las especies autóctonas de plantas y hierbas en detrimento de las no autóctonas. En muchas localizaciones áridas, se favorece un paisaje de tipo desértico.

Control de los gases del RS. El control de los gases del RS es una inquietud importante en el mantenimiento a largo plazo de los RS. Por las inquietudes acerca de la emisión incontrolada de los gases del RS, se instala un sistema para el control del gas antes de completar la mayoría de los RS modernos. Los RS antiguos ya completados, que no disponían de sistemas para la recolección del gas, se están equipando con sistemas de recolección. Se justifica el equipamiento de RS antiguos con instalaciones para la recolección del gas, así como las acciones correctoras que pueden ser necesarias en zonas de RS abandonados.

Recolección y tratamiento de lixiviados. Como en el control del gas del RS, el control de las descargas de lixiviados es otra inquietud importante en el mantenimiento a largo plazo de RS. De nuevo, la mayoría de los RS modernos tienen algún tipo de sistema para controlar los lixiviados, como se ha argumentado anteriormente. Los RS más antiguos ya completos sin sistemas para la recolección de lixiviados se están equipando con dichos sistemas.

Sistemas de supervisión ambiental. Para llevar a cabo la supervisión ambiental a largo plazo después de haberse completado un RS, deben instalarse sistemas de supervisión. La supervisión requerida en RS agotados normalmente implica: 1) supervisión de la zona aireada, de gases y líquidos; 2) supervisión de aguas subterráneas; 3) supervisión de la calidad del aire. Anteriormente se han descrito las instalaciones necesarias.

Mantenimiento postclausura

El mantenimiento postclausura implica la inspección rutinaria de la zona del RS, el mantenimiento de la infraestructura y la supervisión ambiental. A continuación se tratan brevemente estos temas

Inspecciones rutinarias. Debe establecerse un programa de inspecciones rutinarias para supervisar continuamente las condiciones del RS lleno.

Se deben establecer criterios para determinar cuándo se debe(n) tomar una(s) acción(es) correctiva(s). Por ejemplo, ¿cuánto asentamiento puede permitirse antes de llevar a cabo una restauración?

Mantenimiento de la infraestructura. El mantenimiento de la infraestructura normalmente implica el mantenimiento continuado de instalaciones para la desviación del agua superficial; de las pendientes superficiales del RS; de las condiciones de los aislamientos, cuando se usan, de la revegetación, y del equipo

para la recolección del gas y de los lixiviados. La cantidad de restauración necesaria dependerá de la cantidad de asentamiento. A continuación, la velocidad de asentamiento dependerá de la velocidad de formación del gas y del grado de compactación inicial logrado en la colocación de los materiales residuales en el RS. La cantidad de equipamiento que debe haber en la zona dependerá de la extensión y capacidad del RS, y de la naturaleza de las instalaciones que hay que mantener.

Sistemas para la supervisión ambiental. Se lleva a cabo la supervisión ambiental a largo plazo en los RS completos para asegurar que no haya emisiones de contaminantes procedentes del RS que puedan afectar a la salud o al ambiente circundante. Ya se han enumerado los tipos de sistemas necesarios. El número de muestras recolecciones para su análisis y la frecuencia de su recolección normalmente dependerá de las normativas que tienen las agencias locales que controlan la contaminación del agua y del aire. EPA ha desarrollado un procedimiento directriz para el muestreo de aguas subterráneas que debería ser revisado (40 CFR 258).

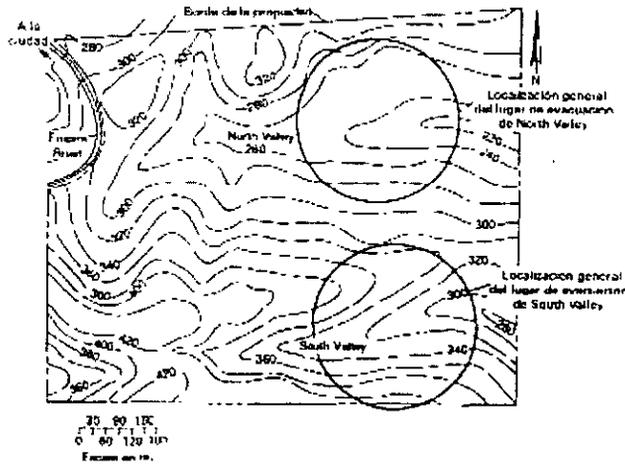
14.0 CALCULOS DE PROCESOS DE RS

Se han presentado y descrito los rasgos generales de un RS controlado. El propósito de esta parte es ilustrar los cálculos básicos de los procesos implicados en el desarrollo de una zona de RS. Los cálculos del proceso se utilizan para identificar las cantidades requeridas para valorar la idoneidad de una zona (por ejemplo, capacidad volumétrica) y para fijar el tamaño de las instalaciones físicas (por ejemplo, tuberías para la recolección de lixiviados). Los cálculos principales acerca del proceso y del diseño que se considerarán en la siguiente presentación incluyen:

7. Determinación de la capacidad y de la vida útil de un RS.
8. Generación del gas de RS.
9. Análisis de un sistema para la recuperación del gas.
10. Determinación de la cantidad de vapor de agua recogido en un sistema para la recuperación del gas de RS.
11. Producción de lixiviados en un RS.
12. Estimación de las tasas de filtración de agua a través de una cobertura de RS.
13. Compactación del RS durante la explotación y compactación/consolidación a largo plazo.
14. Selección de un sistema para la recolección de lixiviados y configuración del cubrimiento del RS

Se han agrupado estos cálculos de diseño para no romper la argumentación en el texto y para proporcionar una presentación más coherente de los cálculos implicados en el diseño de un RS. Cuando ha sido posible, los cálculos presentados en los siguientes ejemplos se han organizado para solucionarlos utilizando una hoja de cálculo. Además, los formatos en hojas de cálculo se han utilizado para la presentación de los datos.

Ejemplo 7. Determinación de la capacidad y vida útil de un RS. Determinar la capacidad y vida útil estimada del RS de South Valley mostrado en la figura adjunta. Las suposiciones utilizadas para la determinación de la capacidad y vida útil del RS se presentan a continuación, con datos sobre la población y las cantidades estimadas de residuos diarios que se van a verter.



Figura

Altura de cada nivel en el RS, incluyendo el material de cubrimiento 3 m

Pendiente de la cara frontal del RS = 3:1 (ver Tabla 20)

Peso específico de los residuos sólidos compactados en el RS = 534 kg/m³

Elevación máxima del RS = 122 m

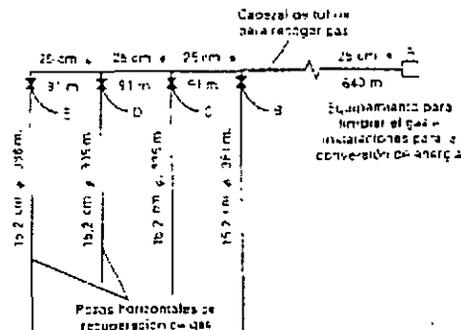
Año	Poblacion proyectada fin de año (x1.000)	Cantidades de residuos kg/hab día
1995	38	2.2
1996	40	2.0
1997	42	1.9
1998	44	1.8
1999	46	1.7
2000	48	1.6
2001	50	1.6
2002	51	1.5
2003	52	1.5
2004	53	1.5
2005	54	1.4
2006	55	1.4
2007	56	1.4
2008	57	1.4
2009	58	1.4

Ejemplo 8. Generación de gas de RS. Determinar la distribución de la producción de gas para un RS con una vida útil de 5 años basándose en los siguientes datos y suposiciones:

1. Vida de RS = 5 años.
2. La composición de los residuos es tal como se describe en la Tabla anexa para RSM domésticos y comerciales, de los que el 79.5 por 100 son orgánicos y el 20.5 por 100 inertes.
3. La fracción orgánica (79.5 por 100) está compuesta por un 7 por 100 de plástico (considerado como inertes) un 60,1 por 100 de material rápidamente biodegradable y un 12.4 por 100 de material lentamente biodegradable. Los valores correspondientes para el material rápidamente y lentamente biodegradable basándose en el peso seco son 44.8 y 7.3 por 100, respectivamente.
4. De los residuos orgánicos rápidamente biodegradables, el 75 por 100 está disponible para la degradación (es decir, que algunos de los materiales residuales orgánicos que están en bolsas de plástico no serán degradados, parte del material estará demasiado seco como para soportar actividad biológica).
5. De los residuos orgánicos lentamente biodegradables, el 50 por 100 está disponible para la degradación (por las mismas razones citadas anteriormente).
6. La cantidad total de gas de RS producido por la fracción biodegradable de los materiales rápidamente y lentamente biodegradables colocados cada año es de 0.87 y 0.99 m³/kg de sólidos secos, respectivamente.
7. El período de tiempo para la descomposición total del material orgánico rápidamente descomponible es 5 años.
8. El período de tiempo para la descomposición total del material orgánico lentamente descomponible es 15 años.

Suponer que la tasa de descomposición del material rápidamente y lentamente descomponible está basada en un modelo triangular de producción de gas donde la tasa más alta de producción de gas se produce el primer y el quinto año, respectivamente, después del comienzo de la producción de gas. Se supone que la producción de gas comienza al final del primer año de explotación.

Ejemplo 9. Análisis de un sistema de recuperación de gas de RS. Determinar la pérdida de carga en el sistema de recuperación de gas de RS que se muestra en la figura adjunta. También, determinar la capacidad necesaria del extractor. El análisis estará basado en los siguientes datos y suposiciones:



FIGURA

1. Diámetro de los pozos horizontales de extracción de gas = 15 cm.
2. Diámetro del cabezal de tubos utilizado para recoger el gas de los pozos horizontales de recuperación de gas de RS = por determinar
3. Rugosidad absoluta para la tubería de plástico utilizada en el cabezal de tubos para recoger el gas, $e = 0.0015$ cm
4. Previsión para pérdidas menores en el cabezal entre pozos de extracción = $0,25$ cm H_2O
5. Previsión para pérdidas menores en el cabezal entre el último pozo de extracción y el ventilador = 1.27 cm H_2O
6. Flujo de gas estimado por pozo horizontal de extracción de gas = 5.66 M³/min ($16^{\circ}C$, 101 kN/M²)
7. Composición de gas (por Volumen) = CH₄, 50 por 100; CO₂, 50 por 100

8. Temperatura del gas de RS en el cabezal de los pozos = 54°C
9. Pérdida de temperatura en el cabezal de tubos entre los pozos de extracción = - 5 °C
10. Temperatura del gas de RS en la estación del extractor = 32° C
11. El gas de RS está saturado en vapor de agua en el cabezal del pozo.
12. El vacío que hay que mantener en el cabezal de pozo del pozo horizontal de extracción de gas más lejano (punto E) = 0.25 m H₂O
13. El vacío en el ventilador = a determinarse, m H₂O

Ejemplo IO. Determinación de la cantidad de vapor de agua recogido en un sistema de recuperación de gas de RS. Determinar la cantidad de vapor de agua condensado que hay que separar diariamente de un sistema de recuperación de gas de RS basándose en los siguientes datos y suposiciones:

1. Flujo total de gas = 70,750 m³/d (16°C, 10,297 kg/m²)
2. Temperatura del gas de RS cuando sale del RS = 54°C
3. Temperatura del gas de RS en la estación del ventilador = 32°C
4. Vacío en el cabezal del pozo = 0.25 m H₂O
5. Vacío en el ventilador = 1.9 m H₂O
6. El gas de RS está saturado en vapor de agua en el cabezal del pozo

Ejemplo 11. Producción de lixiviados de RS. Dada la siguiente información, calcular la cantidad anual de lixiviados producidos en un RS que se va a explotar durante cinco años. Los cálculos deberían continuar hasta que el RS alcance un equilibrio; es decir, la cantidad de agua que entra al RS se igualará a la cantidad de agua que se lixivia fuera. Trazar una curva de la producción anual de lixiviados para el RS. Para simplificar los cálculos, determinar la cantidad de lixiviados producidos para un área superficial de 1 m², después convertir la solución para tener en cuenta la cantidad total de residuos colocados en el RS.

1. Cantidades de residuos

- a) Residuos colocados por día = 1,000 t
- b) Número de días de explotación = 300
- c) Residuos colocados por año = $3 \cdot 10^8$ kg

2. Características de los residuos

- a) Peso específico compactado de los residuos = 590 kg/m^3
- b) Contenido en humedad inicial de los residuos = 20 por 100 en masa
- c) La distribución de los materiales orgánicos rápidamente y lentamente descomponibles en el flujo de residuos.
- d) Suponer que no se van a verter lodos con los residuos.

3. Características del RS

a) Generales

- i. Altura de nivel = 3 m
- ii. Relación residuos/cubrimiento = 5/1 en volumen
- iii. Número de niveles = 5 (correspondiendo uno a cada año)

b) Material de cubrimiento

i. Peso específico del suelo = $1,770 \text{ kg/m}^3$ (incluyendo humedad)

ii. Se supone que el contenido en humedad del suelo es su capacidad de campo

c) Producción de gas

i. Producción de gas: Utilizar los siguientes datos de producción de gas para estimar la cantidad total de gas producido por kg de residuos totales colocados en cada nivel.

Producción de gas, m ³ /kg			
Final del año	Rápidamente descomponible	Lentamente descomponible	Total ^a
1	0.000	0.000	0.000
2	0.059	0.000	0.059
3	0.103	0.001	0.104
4	0.073	0.002	0.076
5	0.044	0.003	0.047
6	0.015	0.004	0.019
7	0.000	0.005	0.005
8	0.000	0.004	0.004
9	0.000	0.004	0.004
10	0.000	0.003	0.003
11	0.000	0.002	0.002
12	0.000	0.002	0.002
13	0.000	0.001	0.001
14	0.000	0.001	0.001
15	0.000	0.001	0.001
16	0.000	0.001	0.001
17	0.000	0.000	0.000
Total	0.294	0.034	0.329

- ii. El agua consumida en la formación de gas de RS = 0.160 kg/m³ del gas producido
- iii. El agua presente como vapor de agua en el gas de RS = 0.016 kg/m³ del gas producido
- iv. Peso específico de gas de RS = 1.339 kg/m³
- d) Capacidad de campo

La capacidad de campo en función del peso de sobrecarga se expresa como

$$FC = 0,6 - 0,55 \left(\frac{W}{4,536 + W} \right)$$

FC = la fracción de agua en los residuos basándose en su peso seco

W = el peso de sobrecarga calculado a una altura media de los residuos en el nivel en cuestión, kg

4. Cantidades de lluvia

- a) La lluvia que entra en el cubrimiento diario durante los primeros cinco años

de explotación = 10 cm/año

b) La lluvia que entra en el cubrimiento final después de cinco años = 2.5 cm/año

Ejemplo 11.12. Estimación de las tasas de infiltración de agua a través de la cubrimiento de un RS. Determinar la cantidad de agua que entraría en un RS si se utiliza una capa de marga arcillosa con un espesor de 0,9 m para el cubrimiento final. Suponer lo siguiente: 1) Son aplicables los siguientes datos de lluvia y de evapotranspiración. 2) El coeficiente medio de escurrimiento mensual es igual al 20 por 100. 3) El material de cubrimiento es una marga arcillosa con las características físicas dadas en la Tabla 11.20. 4) El contenido en humedad del material de cubrimiento es el 50 por 100 de su capacidad de campo.

Mes	Precipitación mm	Evapotranspiración mm
Enero	114.3	17.8
Febrero	88.9	38.0
Marzo	76.2	78.7
Abril	60.9	99.1
Mayo	40.6	132.1
Junio	12.7	165.1
Julio	2.5	177.8
Agosto	Trazas	165.1
Septiembre	5.1	111.8
Octubre	15.2	99.1
Noviembre	66.1	38.1
Diciembre	99.1	20.3
Total anual	581.6	1,143.0

Ejemplo 13. Compactación del RS durante la explotación y compactación/consolidación a largo plazo. Dada la siguiente información, calcular la capacidad adicional disponible en el RS del Ejemplo 11 después de cinco años como consecuencia de la compactación y la producción de gas. Estimar, también, la altura real del RS al final del quinto año y el asentamiento a largo plazo del RS después de su clausura. Los cálculos deberían seguir hasta que el RS llegue a su equilibrio.

Utilizar los mismos datos que aquellos dados en el Ejemplo 11. Suponer que el peso específico compactado inicial de los residuos es de 590 kg/m³ y que puede utilizarse

la siguiente relación para estimar el peso específico de los residuos compactados en función de la presión de sobrecarga. Suponer que no hay compactación en el material de cubrimiento.

$$SW_p = 590 \text{ kg/m}^3 + \frac{P, \text{ kg/m}^2}{15.76 \text{ (m}^3/\text{kg)} + (0.0016 \text{ m}^3/\text{kg}) (p, \text{ kg/m}^2)}$$

Donde:

SW_p = peso específico compactado de los residuos a una presión p , kg/m^3

Ejemplo 14. Selección de un sistema para la recolección de lixiviados y para la configuración de cubrimiento de un RS. Seleccionar los criterios de diseño apropiados para un sistema de recolección de lixiviados y de diseño de cubrimiento para un RS de RSM. Suponer que el municipio ha solicitado la utilización de un recubrimiento y diseño de cubrimiento compuesto. El recubrimiento será de arcilla y de una geomembrana con una capa de drenaje, y la cubrimiento incorporará la utilización de una capa de drenaje y una geomembrana. Comprobar, también, si se pueden transportar suficientes lixiviados a través de la capa de drenaje hasta el canal recolector de lixiviados para acomodar los lixiviados producidos en el RS en el Ejemplo 9.

Selección del sistema de aislamiento. El sistema seleccionado dependerá en gran parte de la geología local y de los requisitos ambientales de la zona del RS. Por ejemplo, en localizaciones donde no hay agua subterránea, quizás sea suficiente un aislamiento sencillo con arcilla compactada. En lugares donde se debe controlar la migración del lixiviado y del gas, será necesario un aislamiento mixto de arcilla y geomembrana, con una capa apropiada de drenaje y de protección del suelo.

Diseño de instalaciones para la recolección de lixiviados. Se han utilizado varios diseños para separar el lixiviado dentro de los RS. A continuación se hace una exposición sobre los diseños de terraza inclinada y de fondo con tubos.

Terrazas inclinadas. Para evitar la acumulación del lixiviado en el fondo de un RS, la zona del fondo se gradúa en una serie de terrazas inclinadas. Como se muestra en la Figura 30, las terrazas están construidas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas drene hasta los canales de recolección del lixiviado. Se utiliza una tubería perforada colocada en cada canal (Figura 30) para transportar el lixiviado recogido hasta una localización central, a partir de la cual se separa para su tratamiento o para su reaplicación sobre la superficie del RS.

La pendiente transversal de las terrazas es normalmente del 1 al 5 por 100, y la pendiente de los canales de drenaje es del 0.5 al 1.0 por 100. La pendiente

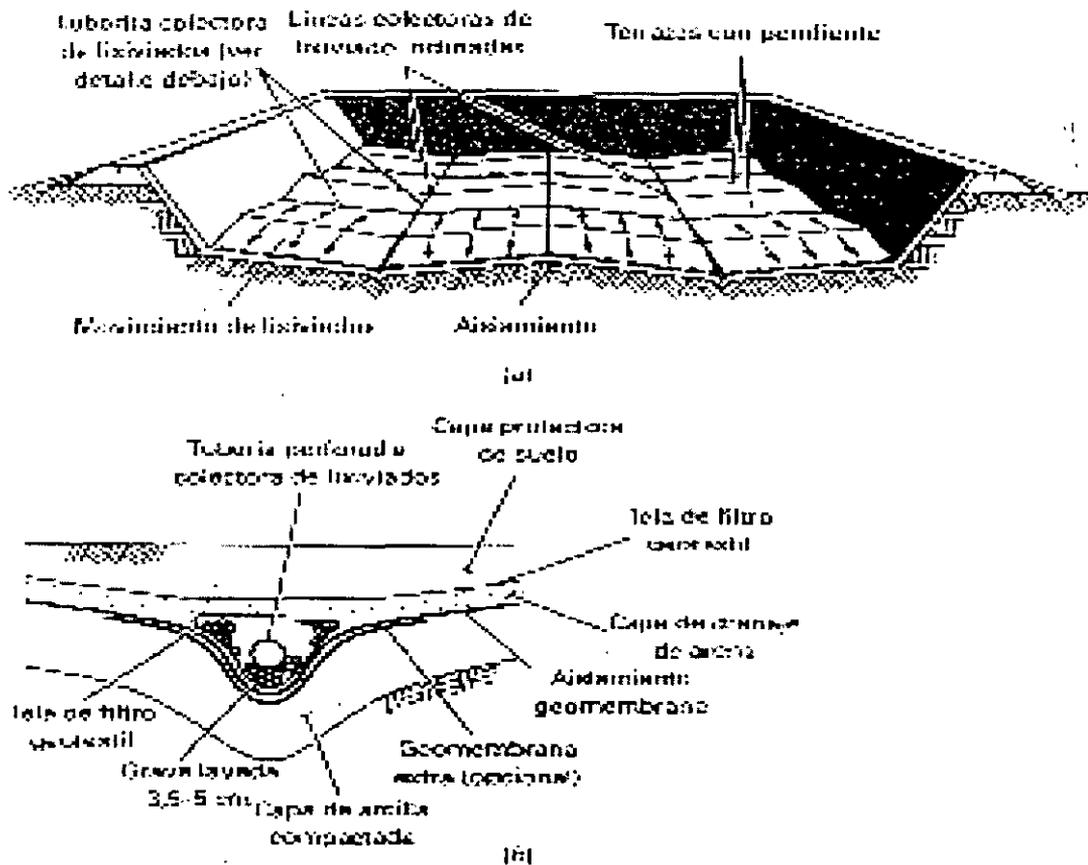


FIGURA 30

Sistema con terrazas inclinadas para la recolección de lixiviados: (a) vista y (b) detalle del tubo para la recolección de lixiviados.

y la longitud máxima del canal de drenaje se seleccionan en base a la capacidad de las instalaciones de drenaje. La capacidad de la tasa de flujo de las instalaciones se estima utilizando la ecuación de Manning. El objetivo del diseño es no permitir que el lixiviado se estanque en el fondo del RS, creando así una importante carga hidráulica sobre el aislamiento del RS (menos de 0.3 m en el punto más alto). La profundidad de flujo en el tubo perforado de drenaje se incrementa continuamente desde los tramos altos del canal de drenaje hasta los tramos bajos. En RS muy grandes se conectarán los canales de drenaje a un sistema más grande de recolección transversal.

Fondo con tuberías. Un plan alternativo para la recolección de lixiviados se muestra en la Figura 31. Como se puede observar, la zona del fondo se divide en una serie de tiras rectangulares con barreras de arcilla colocadas a distancias apropiadas (Figura 31). El espaciamiento de la barrera se corresponde con una celda del RS. Se procede a colocar la tubería, para la recolección del lixiviado, longitudinalmente encima de la geomembrana. Los tubos para la recolección del lixiviado son de 10 cm y tienen perforaciones cortadas con láser, similares a un colador, sobre la mitad de la circunferencia. Los cortes de láser están espaciados en 0.6 cm y el tamaño del corte es 0.00025 cm, que corresponde al tamaño más pequeño de la arena. Para proporcionar un drenaje efectivo, se inclina el fondo desde el 1.2 hasta el 1.8 por 100. Los tubos para la recolección del lixiviado, espaciados cada 6 m, se cubren con una capa de arena que mide 60 cm (Figura 31) antes de comenzar el vertido. El uso de un sistema con tubería múltiple para la recolección del lixiviado asegurará la rápida separación del lixiviado del fondo del RS. Además, el uso de una capa de arena de 60 cm sirve para filtrar los lixiviados antes de recogerlos para su tratamiento. La primera capa de 1 m de residuos sólidos, que se coloca directamente encima de la capa de arena, no se compacta.

Un rasgo único del diseño que se muestra en la Figura 31 es el método utilizado para separar las aguas pluviales de la porción no utilizada del RS. El método se detalla en la Figura 32. En la porción no utilizada del RS, se recogen las aguas pluviales en las líneas que al final se utilizarán para recolección del

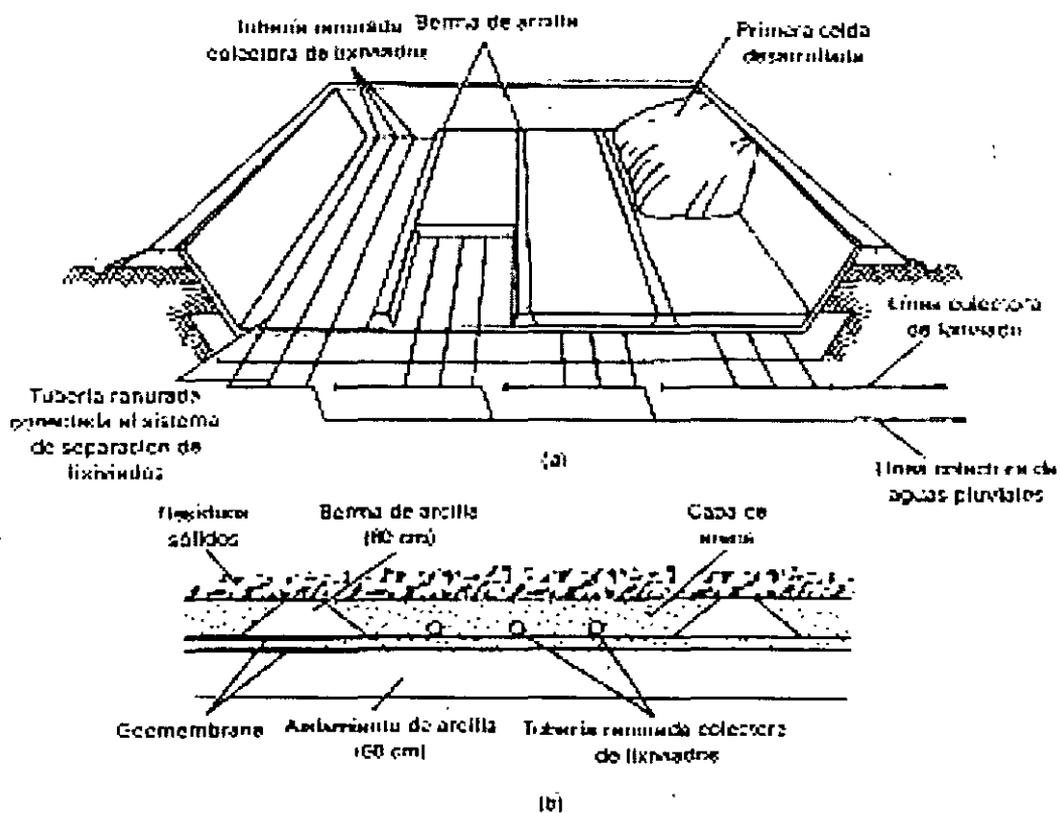


FIGURA 31

Sistema típico para la recolección de lixiviados utilizando una tubería múltiple: (a) vista panorámica y (b) detalle de tubos típicos para la recolección del lixiviado.

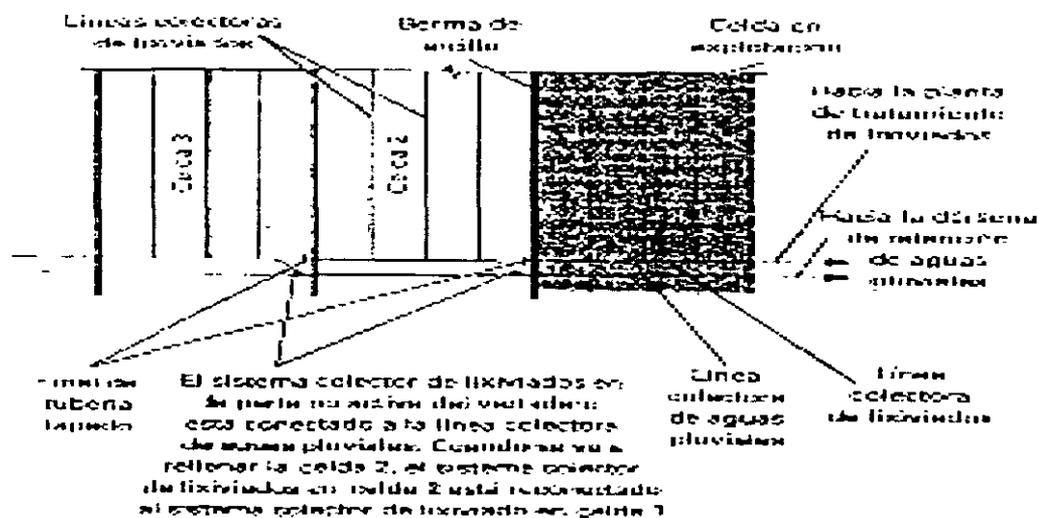


FIGURA 32

Gestión de aguas pluviales en un RS tipo área.

para la recolección del lixiviado. Cuando se va a poner en funcionamiento la siguiente celda del RS, se conecta la tubería para el lixiviado al sistema para la recolección del lixiviado, y se cubre el tubo que se extiende en la siguiente tira.

Instalaciones para separar, recoger y almacenar lixiviados. Se han utilizado dos métodos para la separación del lixiviado que se acumula dentro de un RS. En la Figura 33, se pasa el tubo para la recolección del lixiviado a través de un lateral del RS. Cuando se utiliza este método, debe tenerse mucho cuidado para asegurar que la estanqueidad donde el tubo penetra el RS sea total. Un método alternativo utilizado para la separación del lixiviado de los RS implica el uso de un tubo de recolección inclinado localizado dentro del RS (Figura 33). Se utilizan las instalaciones para la recolección del lixiviado cuando éste se va a reciclar o tratar en una localización central. En la Figura 34 se muestra una bóveda de acceso típica para la recolección del lixiviado. En algunas localizaciones, el lixiviado separado del RS se recoge en un depósito de retención, tal como se muestra en la Figura 34. La capacidad del depósito dependerá del tipo de instalaciones disponibles y de la tasa máxima de descarga permisible en la instalación de tratamiento. Normalmente los depósitos para la retención del lixiviado se diseñan para retener la producción de 1 a 3 días, durante el período de máxima producción de lixiviado. Se han utilizado depósitos con pared sencilla y doble, pero los depósitos con doble pared son preferibles frente a los de pared sencilla por la seguridad extra que proporcio-

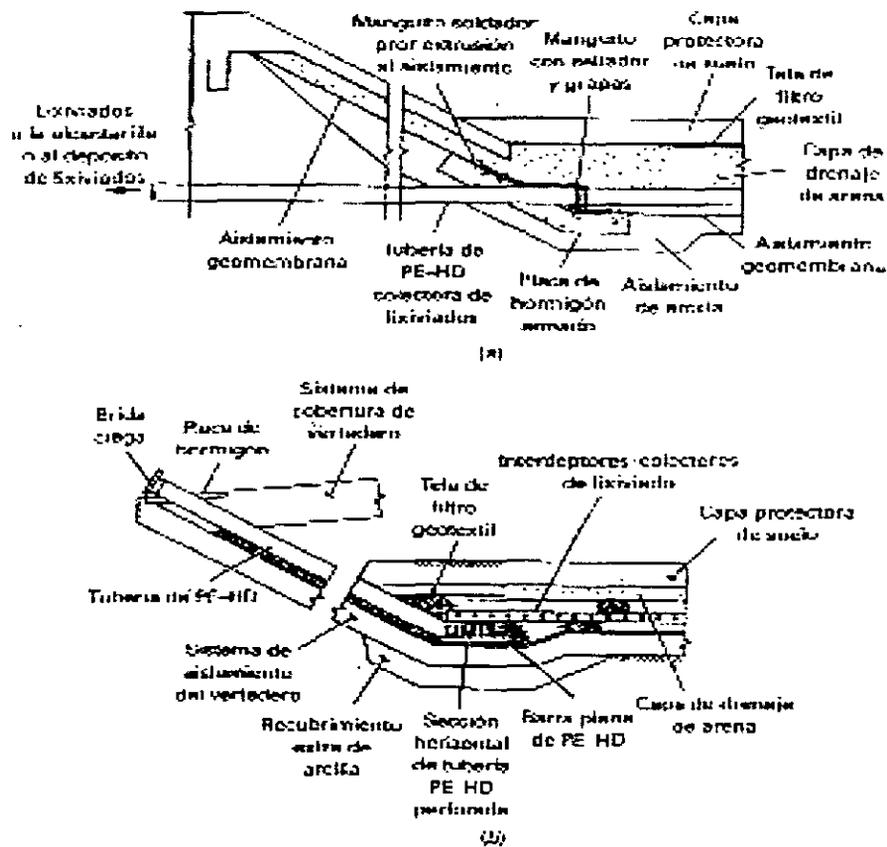


FIGURA 11.42

Sistemas utilizados para separar el lixiviado de los RS: (a) tubo para la recolección del lixiviado llevado a través del lateral de un RS y (b) tubo inclinado para la recolección del lixiviado localizado dentro de un RS. El lixiviado se separa con una bomba.

-nan. Aunque se han utilizado depósitos de plástico y de metal, los de plástico son más resistentes a la corrosión.

Alternativas en la gestión de lixiviados

La gestión de lixiviados es clave para la eliminación del potencial que tiene un RS para contaminar acuíferos subterráneos. Se han utilizado varias alternativas para gestionar el lixiviado recogido de los RS, incluyendo: 1) reciclaje del lixiviado, 2) evaporación del lixiviado, 3) tratamiento seguido por evacuación, y 4) descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales. Estas alternativas se argumentan brevemente a continuación.

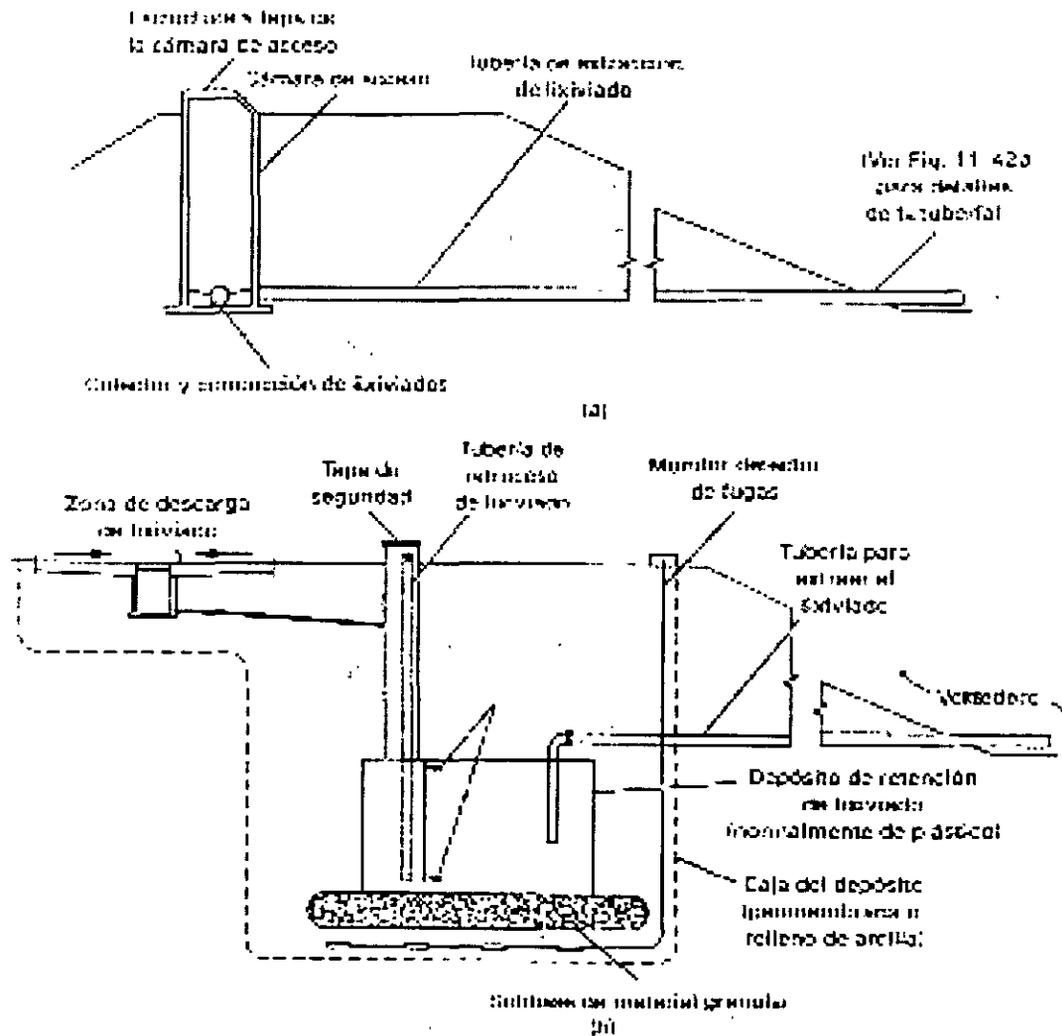


FIGURA 34

Ejemplos de instalaciones para la recolección de lixiviados: (a) bóveda para la recolección y transmisión de lixiviados y (b) depósito para la retención de lixiviados.

Reciclaje de lixiviados. Un método efectivo para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos (Figura 33) y recircularlos a través del RS. Durante las primeras etapas del funcionamiento del RS, el lixiviado contendrá cantidades importantes de TDS, DBO₅, DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado, se diluyen y atenúan los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del RS. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado se convertirán en CH₄ y CO₂. Por la subida del pH dentro del RS cuando se produce CH₄, los metales se precipitarán y serán retenidos dentro del RS. Un beneficio extra del reciclaje de los lixiviados es la recuperación del gas de RS que contiene CH₄. Normalmente la tasa de producción de gas es mayor en sistemas para la recirculación del lixiviado. Para evitar la emisión incontrolada de gases de RS cuando se recicla el lixiviado para su tratamiento, se debería equipar el RS con un sistema para la recuperación del gas. Finalmente será necesario recoger, tratar y evacuar el lixiviado residual. En RS grandes, quizás será necesario proporcionar instalaciones para el almacenamiento de lixiviados.

Evaporación de lixiviados. Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. El lixiviado que no se evapora se riega por encima de las porciones completadas del RS. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre durante el invierno con una geomembrana, para excluir las aguas de lluvia. Se evacua el lixiviado acumulado mediante evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y regando el lixiviado sobre las superficies del RS en activo o ya lleno. Los gases olorosos que pueden acumularse debajo de la tapa superficial se extraen hacia un filtro de compost o suelo. Los lechos de suelo normalmente tienen una profundidad de 0.6 a 0.9 m, con tasas de carga orgánica de aproximadamente 1.6 a 0.4 kg/m de suelo. Durante el verano, cuando se destapa el estanque, puede ser necesaria una aireación superficial para controlar los olores. Si el estanque no es grande se puede dejar tapado durante todo el año. Otro ejemplo implica el tratamiento del lixiviado (por lo

general biológicamente) con almacenamiento invernal y evacuación por riego sobre terrenos cercanos durante el verano. Si hay suficiente terreno disponible, se puede llevar a cabo el riego continuamente, incluso cuando llueve.

TABLA 15
Procesos y operaciones biológicos, químicos y físicos representativos,
utilizados para el tratamiento de lixiviados

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
Procesos biológicos Lodos activados	Separación de orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos de desespumamiento; necesario clarificador separador.
Reactores de lotes secuenciados	Separación de orgánicos	Similar a lodos activados, pero no se precisa un clarificador separado; solamente aplicable con tasas de flujo relativamente lentas
Estanques aireados de estabilización	Separación de orgánicos	Requiere una gran superficie de terreno
Procesos de película fija (filtros percoladores, contactores biológicos rotatorios)	Separación de orgánicos	Frecuentemente utilizado con efluentes industriales similares a los lixiviados, pero no ensayado con lixiviados de RS
Lagunas anaerobias	Separación de orgánicos	Requisitos de energía y producción de lodos menores que en los sistemas aerobios, requiere calefacción; mayor potencial para la inestabilidad del proceso; más lento que los sistemas aerobios
Nitrificación/ desnitrificación	Separación de nitrógeno	La nitrificación/desnitrificación puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de orgánicos
Procesos químicos Neutralización	Control del pH	De aplicación limitada para la mayoría de los lixiviados
Precipitación	Separación de metales y algunos aniones	Produce un lodo, que posiblemente requiera la evacuación como residuo peligroso

Oxidación	Separación de orgánicos; detoxificación de algunas especies inorgánicas	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos; el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmedo	Separación de orgánicos	Costoso; funciona bien con orgánicos refractarios
Operaciones físicas Sedimentación/ flotación	Separación de materia en suspensión	Sólo tiene una aplicación limitada; puede utilizarse conjuntamente con otros procesos de tratamiento
Filtración	Separación de materia en suspensión	Solamente útil como proceso de afino
Arrastre por aire	Separación de amoníaco u orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica
Separación por vapor	Separación de orgánicos volátiles	Altos costos energéticos, el vapor de condensado requiere un tratamiento adicional
Absorción	Separación de orgánicos	Tecnología probada; costos variables según lixiviado
Intercambio iónico	Separación de inorgánicos disueltos	Útil solamente como un paso de acabado
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de orgánicos con alto peso molecular	Propenso al atascamiento; de aplicación limitada para los lixiviados
Osmosis inversa	Disoluciones diluidas de inorgánicos	Costoso; necesario un pretratamiento extensivo
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los lodos resultantes pueden ser peligrosos; puede ser costoso excepto en zonas áridas

Sistema integral para la gestión de lixiviados. En la Figura 35 se muestra un ejemplo de un sistema integral para la gestión de lixiviados. El líquido (lixiviado) que baja a través de los residuos sólidos es filtrado mientras atraviesa la capa de arena en el RS. El lixiviado recogido se transporta a una laguna de tratamiento, donde se añaden lodos de depuración de aguas residuales urbanas. Se airea el líquido en la laguna para reducir el contenido orgánico y para controlar los olores. Después el líquido de la laguna se aplica a RSU triturados que van a fermentarse

residuales o donde se puede utilizar una alcantarilla a presión para conectar el sistema para la recolección del lixiviado a un sistema para la recolección de aguas residuales; a menudo se descarga el lixiviado en el sistema para la recolección de aguas residuales. En muchos casos, quizás, será necesario un pretratamiento, utilizando uno de los métodos presentados en la Tabla 15, para reducir el contenido orgánico antes de proceder a la descarga del lixiviado en la alcantarilla. En lugares donde no hay alcantarillas disponibles, y no es factible la evacuación mediante evaporación y riego, puede ser necesario un tratamiento completo seguido de una descarga superficial: