



MEDIO
AMBIENTE

Manual técnico para la gestión de lixiviados en rellenos sanitarios del Estado de Jalisco



Gobierno de Jalisco
Secretaría de Medio Ambiente
y Desarrollo Territorial



semadet.jalisco.gob.mx

Secretario de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial

Biól. María Magdalena Ruiz Mejía

Director General de Protección y Gestión Ambiental

Ing. Rigoberto Román López

Director de Gestión Integral de Residuos

M.C. Eduardo Parra Ramos

Técnico Especialista Ambiental

Ing. Alejandro Montelongo Romero

Técnico Especialista Ambiental

Ing. Martín Alejandro Villanueva García

Índice de contenido

Definiciones	7
Acrónimos	10
Presentación	11
1. Objetivo	12
1.1. Objetivos específicos	12
2. Justificación	13
3. Introducción	14
4. Marco legal	17
4.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	17
4.2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.....	17
4.3. Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco	17
4.4. NOM-083-SEMARNAT-2003	17
5. Elementos de ubicación, diseño y construcción de un relleno sanitario con influencia en el manejo de lixiviados	18
5.1. Especificaciones para la selección del sitio	18
5.1.1. Criterios en la selección del sitio con influencia sobre la generación de lixiviados	18
5.2. Componentes o características constructivas de un relleno sanitario.....	20
5.2.1. Suelo y condiciones geológicas	22
5.2.2. Características físicas de los residuos y los materiales de capas.....	23
6. Condicionantes operativas de rellenos sanitarios	24
6.1. Métodos operativos de rellenos sanitarios	24
6.2. Condiciones operativas de rellenos sanitarios	25
6.2.1. Información mínima requerida para el programa de monitoreo de lixiviados	25
7. Generación de lixiviados	27
7.1. Modelos de estimación de la generación de lixiviados	29
7.1.1. Modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (USDA, 1980)	30
7.1.2. SOILINER (1986).....	31
7.1.3. Modelo HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance)	31
7.1.4. Modelo Suizo	33
7.1.5. Métodos de balance hidrológicos	34
8. Caso de estudio	42
8.1. Aplicación del modelo Suizo.....	42
8.2. Aplicación de balance hidrológico simplificado	44

8.3.	Aplicación de modelo HELP	45
8.4.	Aplicación de balance hidrológico con valores morfológicos del relleno sanitario.	47
9.	Análisis de resultados de caso de estudio.	49
9.1.	Ventajas y desventajas de los modelos aplicados.....	52
10.	Manejo e infraestructura para el control de lixiviados.	54
10.1.	Recirculación de lixiviados.....	55
10.2.	Evaporación de lixiviados.	56
10.3.	Tratamiento de lixiviados.	56
10.4.	Descarga a planta municipal de tratamiento de aguas residuales.....	58
10.5.	Diseño de redes de distribución de lixiviados	58
10.6.	Determinación de volumen de fosas requerido	59
11.	Conclusiones	61
12.	Bibliografía.	62

Índice de ilustraciones

Ilustración 1	Etapas de una GIR exitosa. (Elaboración propia).....	11
Ilustración 2	Ciclo de vida de los residuos, enfoque en las 3R's. (Ministerio de Medio Ambiente del Japón)	16
Ilustración 3.	Componentes de un relleno sanitario. (Quian, Koerner, & Gray, 2002)	21
Ilustración 4	Métodos constructivos de rellenos sanitarios. (Quian, Koerner, & Gray, 2002).....	25
Ilustración 5	Vista esquemática de un perfil de relleno sanitario, con los componentes que evalúa el modelo HELP. (Schroeder, y otros, 1994)	33
Ilustración 6	Componentes de un balance de agua para estimación de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)	35
Ilustración 7	Proceso anaerobio de tratamiento de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	57
Ilustración 8	Proceso aerobio de tratamiento de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	57
Ilustración 9	Proceso de tratamiento químico para la remoción de metales pesados y contaminantes orgánicos seleccionados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)	58
Ilustración 10	Diagrama esquemático de dos tipos de sistemas de drenaje a) sistema de una sola línea b) sistema de revestimiento compuesto. (Munawar & Fellner, 2013).....	59

Índice de tablas

Tabla 1 Factores que intervienen en la producción de lixiviado.....	27
Tabla 2 Valores típicos de parámetros de lixiviados que varían con la edad del relleno sanitario.....	28
Tabla 3 Caracterización de lixiviados en distintos países.....	29
Tabla 5 Modelos usualmente empleados para la estimación de la generación de lixiviados.....	30
Tabla 5 Variables requeridas para la estimación de lixiviados por medio de un balance hidrológico.....	37
Tabla 7 Coeficientes de infiltración de acuerdo al tipo de suelo, pendientes y cobertura del suelo.....	39
Tabla 7 Estimación de la generación de lixiviados por medio del modelo Suizo, para el caso de un relleno sanitario del Estado de Jalisco.....	43
Tabla 9 Variables para el caso de referencia de un balance hidrológico simple. (Elaboración propia).....	44
Tabla 9 Resultados de un balance hídrico simple. (Elaboración propia).....	45
Tabla 10 Resultados del modelo HELP, para el caso de estudio (Schroeder, et al., 1994).....	46
Tabla 11 Variables para el caso de referencia de un balance hidrológico con valores morfológicos. (Elaboración propia).....	47
Tabla 12 Resultados de modelo hidrológico con variables morfológicas. (Elaboración propia).....	48

Índice de gráficas

Gráfica 1 Generación per cápita en países de la OCDE. (OECD, 2014).....	14
Gráfica 2 Generación total anual de RSU en México (1997-2012).(SEDESOL,2013).....	15
Gráfica 3 Comparación de resultados generados por diversos modelos de estimación de la generación de lixiviados para el caso de un relleno sanitario tipo A en el Estado de Jalisco. (Elaboración propia).....	50

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Estimación de la generación de lixiviados por el modelo Suizo. (Montejo, 2010).....	34
Ecuación 2 Reacción estequiométrica para la determinación de gases generados en un relleno sanitario, usualmente metano, dióxido de carbono y amoníaco. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	36
Ecuación 3 Peso de material de cubierta utilizado. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	37
Ecuación 4 Masa de residuos dispuesta. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	37
Ecuación 5 Masa de residuos secos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	37
Ecuación 6 Masa de humedad en residuos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	37
Ecuación 7 Masa de agua de escorrentía que ingresa en la celda. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	37
Ecuación 8 Infiltración media anual. (Schosinsky & Losilla, 2000).....	38
Ecuación 9 Masa de agua que se infiltra en la celda de disposición final sobre m2. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	39
Ecuación 10 Masa total dispuesta en un metro cuadrado de celda. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	39
Ecuación 11 Masa de agua presente en los residuos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	40
Ecuación 12 Peso medio (W) de la celda por metro cuadrado. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).....	40
Ecuación 13 Factor de campo (FC). (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	40

Ecuación 14 Masa de agua retenida por los residuos sólidos depositados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).	40
Ecuación 15 Ecuación para la estimación de lixiviados en un relleno sanitario. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010).....	40
Ecuación 16 Lixiviados generados en un relleno sanitario.....	41
Ecuación 17 Ecuación de un balance hidrológico general.....	41
Ecuación 18 Ecuación general de un balance hidrológico desglosada.....	42
Ecuación 19 Obtención de dato de infiltración para estimación de lixiviados.....	45
Ecuación 17 Capacidad requerida de una fosa de lixiviado. (Munawar & Fellner, 2013).....	60
Ecuación 18 Ecuación para estimar la relación entre la generación de lixiviados y la precipitación. (Elaboración propia)	60

Definiciones.

1. **Acuífero:** Cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas, que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.
2. **Agua subterránea:** Agua que se encuentra en el subsuelo, en formaciones geológicas parcial o totalmente saturadas.
3. **Altimetría:** Información topográfica relativa a la configuración vertical o relieve del terreno, expresada mediante el trazo de curvas de nivel referidas a la altitud de bancos al nivel medio del mar.
4. **Aprovechamiento de residuos:** Conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de residuos mediante su reutilización, re-manufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundarios o de energía.
5. **Área de emergencia:** Área destinada para la recepción de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, cuando por fenómenos naturales y/o meteorológicos no se permita la operación en el frente de trabajo diario.
6. **Áreas naturales protegidas:** Zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del hombre, y que han quedado sujetas al régimen de protección.
7. **Biogás:** Mezcla gaseosa resultado del proceso de descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y bióxido de carbono.
8. **Clausura:** Sellado del área de un sitio de disposición final después de la suspensión definitiva de la recepción de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
9. **Cobertura:** Capa de material natural o sintético, utilizada para cubrir los residuos sólidos urbanos, con el fin de controlar infiltraciones pluviales y emanaciones de gases y partículas, dispersión de residuos, así como el contacto de fauna nociva con los residuos confinados.
10. **Cobertura final:** Capa de material natural o sintético utilizada para cubrir los residuos sólidos al momento de concluir la vida útil de una celda o superficie para disposición final.
11. **Compactación:** Acción de aumentar la masa de residuos sobre un volumen determinado, con el fin de facilitar su transporte o disposición final.
12. **Conformación final:** Configuración geométrica y de los niveles finales del sitio de disposición final.
13. **Co-procesamiento:** Integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, como insumo a otro proceso productivo.
14. **Disposición final:** Acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones que permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la población y los ecosistemas.
15. **Estratigrafía:** Características y atributos de las capas de suelo y roca que permiten su interpretación, en términos de su estructura, superposición, origen, historia geológica y propiedades físicas.
16. **Generación:** Acción de producir residuos a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo.
17. **Generador:** Persona física o moral que produce residuos, a través del desarrollo de procesos productivos o de consumo.
18. **Gestión integral de residuos:** Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, optimización económica y aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

19. **Incineración:** Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición, física química o biológica de un residuo sólido líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la temperatura, el tiempo de retención, y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirolisis, la gasificación y plasma, sólo cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión.
20. **Infiltración:** Penetración de un líquido a través de los poros o intersticios de un suelo, subsuelo o cualquier material natural o sintético.
21. **Lixiviado:** Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene, en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.
22. **Manejo de residuos:** Las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar.
23. **Manual de Operación:** Manual técnico que describe los procedimientos relativos a la operación de un sitio de disposición final o relleno sanitario este puede dividirse en secciones que contengan aspectos básicos de la operación, conformación de celdas, control y manejo de biogás, lixiviados, monitoreo del acuífero y de medidas para mitigar o prevenir potenciales impactos ambientales negativos.
24. **Multas:** sanción administrativa o penal a una persona física o moral por incumplimiento de normas aplicables en materia de gestión de residuos.
25. **Reciclaje:** Transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud
26. **Relleno sanitario:** Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales.
27. **Remediación:** Conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos.
28. **Residuos:** Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólidos o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.
29. **Residuos de Manejo Especial (RME):** Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.
30. **Residuos Peligrosos (RP):** Son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad o inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

31. **Residuos Sólidos Urbanos (RSU):** Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.
32. **Responsabilidad compartida:** Principio mediante el cual se reconoce que los residuos sólidos urbanos y de manejo especial son generados a partir de la realización de actividades que satisfacen necesidades de la sociedad, mediante cadenas de valor tipo producción, proceso, envasado, distribución, consumo de productos, y que, en consecuencia, su manejo integral es una corresponsabilidad social y requiere la participación conjunta, coordinada y diferenciada de productores, distribuidores, consumidores, usuarios de subproductos, y que de los tres órdenes de gobierno según corresponda, bajo un esquema de factibilidad de mercado y eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.
33. **Reutilización:** El empleo de un material o residuos previamente usado, sin que medie un proceso de transformación.
34. **Separación primaria:** Acción de segregar los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en orgánicos, inorgánicos y sanitarios.
35. **Separación secundaria:** Acción de segregar entre sí los residuos sólidos urbanos y de manejo especial que sean inorgánicos y susceptibles de ser valorizados.
36. **Sitio de disposición final:** Lugar donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en forma definitiva.
37. **Suelo:** Material o cuerpo natural compuesto por partículas sueltas no consolidadas de diferentes tamaños y de un espesor que varía de unos centímetros a unos cuantos metros, el cual está conformado por fases sólida, líquida y gaseosa, así como por elementos y compuestos de tipo orgánico e inorgánico, con una composición variable en el tiempo y en el espacio.
38. **Talud:** La inclinación del material de que se trate, con respecto a la horizontal.
39. **Tratamiento:** Procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad.
40. **Valorización:** Principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica.

Acrónimos.

ANP	Área Natural Protegida
DBO₅	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
DGIR	Dirección de Gestión Integral de Residuos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIR	Gestión Integral de Residuos
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
ISWA	International Solid Waste Association (Asociación Internacional de Residuos Sólidos)
JIMA	Junta Intermunicipal de Medio Ambiente
LEEPA	Ley Estatal Del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
NAE	Norma Ambiental Estatal
PEPGIR	Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco
PMPGIRS	Programa Municipal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PROEPA	Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente
RME	Residuos de manejo especial
RSU	Residuos sólidos urbanos
SST	Sólidos suspendidos totales
SEMADET	Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMAR	Sistema Intermunicipal de Manejo de Residuos

Presentación.

El presente Manual fue elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco (**SEMADET**). Está dirigida principalmente a los operadores de sitios de disposición final ya sean públicos, privados o públicos descentralizados, a las autoridades municipales del Estado de Jalisco, funcionarios encargados de las administraciones financieras y de los servicios de limpia, recolección y en general a cualquier persona dedicada a prestar el servicio de la etapa última de manejo de residuos conocida como “Disposición Final”. No se omite señalar que esta etapa (ver Ilustración 1) es considerada la última alternativa de manejo de los mismos, de acuerdo a la normatividad vigente y conforme se establece en las estrategias asentadas en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco 2016-2022 **PEPGIR**, que tienen la finalidad de promover la valorización de los residuos con la intención de incorporarlos a cadenas productivas de valor. La presente guía pretende mejorar el control y manejo de los lixiviados generados en sitios de disposición final existentes en el Estado de Jalisco, así como de los sitios que están en desarrollo, con el propósito de minimizar los impactos asociados a esta etapa de manejo.



Ilustración 1 Etapas de una GIR exitosa. (Elaboración propia)

1. Objetivo.

Proporcionar a los gobiernos municipales, sistemas Intermunicipales de manejo de residuos (**SIMAR**), juntas intermunicipales de medio ambiente (**JIMA**) y empresas privadas todos ellos encargados de la operación de sitios de disposición final o rellenos sanitarios en el Estado de Jalisco, las herramientas necesarias para una operación efectiva de los procedimientos relacionados con el control y manejo técnicamente adecuado de estos sitios, específicamente para la estimación, manejo, y monitoreo de los lixiviados generados, con el fin de *prevenir* potenciales impactos ambientales negativos o externalidades asociadas comúnmente a un manejo inadecuado o deficiente de un sitio de disposición final.

La presente guía tiene como objetivo principal el otorgar una herramienta técnica que permita a los operadores de rellenos sanitarios estimar la generación de lixiviados en sus rellenos sanitarios, así como, ayudar en la formulación de su programa de monitoreo conforme a lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

1.1. Objetivos específicos.

- I. Exponer la influencia de criterios de selección del sitio y operación sobre la generación de lixiviados.
- II. Referir diversas metodologías para la estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios.
- III. Presentar un estudio de caso de un relleno sanitario en Jalisco, en el que se emplearon diversas metodologías para estimar la generación de lixiviados, y discutir los resultados obtenidos del estudio de caso.
- IV. Presentar alternativas de manejo de lixiviados.

2. Justificación

El presente manual técnico obedece una necesidad de mejorar la gestión los lixiviados en los sitios de disposición final del Estado de Jalisco, pues se ha detectado una deficiencia técnica importante a la hora de diseñar y dimensionar los equipos y medidas de contención de estos líquidos contaminantes¹. Se ha identificado una necesidad de brindar orientación técnica para la estimación de generación de lixiviados realizadas por municipios, intermunicipalidades o empresas que sean adecuadas y que consideren las estimaciones de generación en el diseño de sus sistemas de manejo.

Las metodologías en los capítulos posteriores de este documento ilustran diversas maneras de estimar la generación de lixiviados, y proponen diversas maneras de desarrollar un balance hidrológico como una alternativa factible en la estimación de la generación de lixiviados para sitios de disposición final operativos o en etapa de diseño, se plantean diversas metodologías que presentan diversos grados de certidumbre a la hora de generar estimaciones de estos líquidos altamente contaminantes, lo que permitirá mejorar las condiciones de manejo desde la parte de diseño de los rellenos sanitarios municipales, intermunicipales o privados.

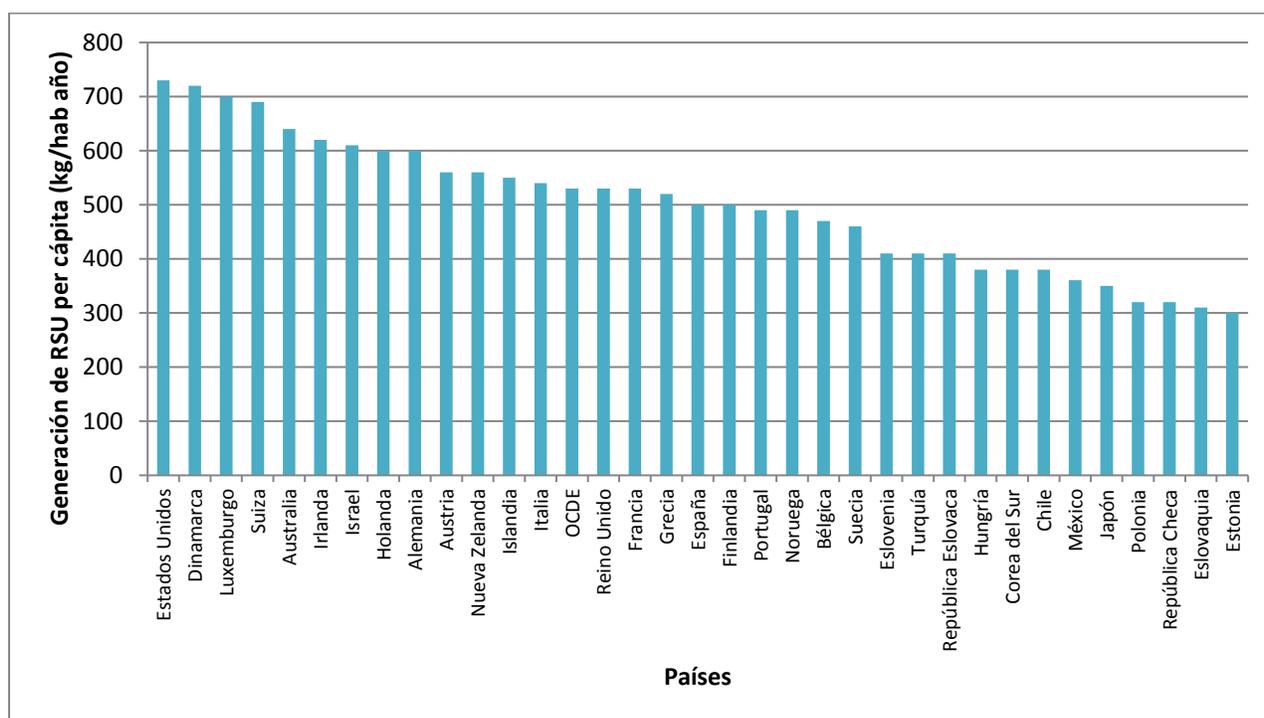
¹ La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos los define como Líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y **representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.**

3. Introducción.

De acuerdo a datos de la **ISWA** del año 2015, en el mundo se produjeron entre 7 y 10 billones de toneladas de **RSU** (UNEP; ISWA, 2015), la mayor parte de estos residuos provienen de países considerados como “desarrollados” pues existe una relación directa entre el poder adquisitivo de las personas y la generación de residuos per cápita.

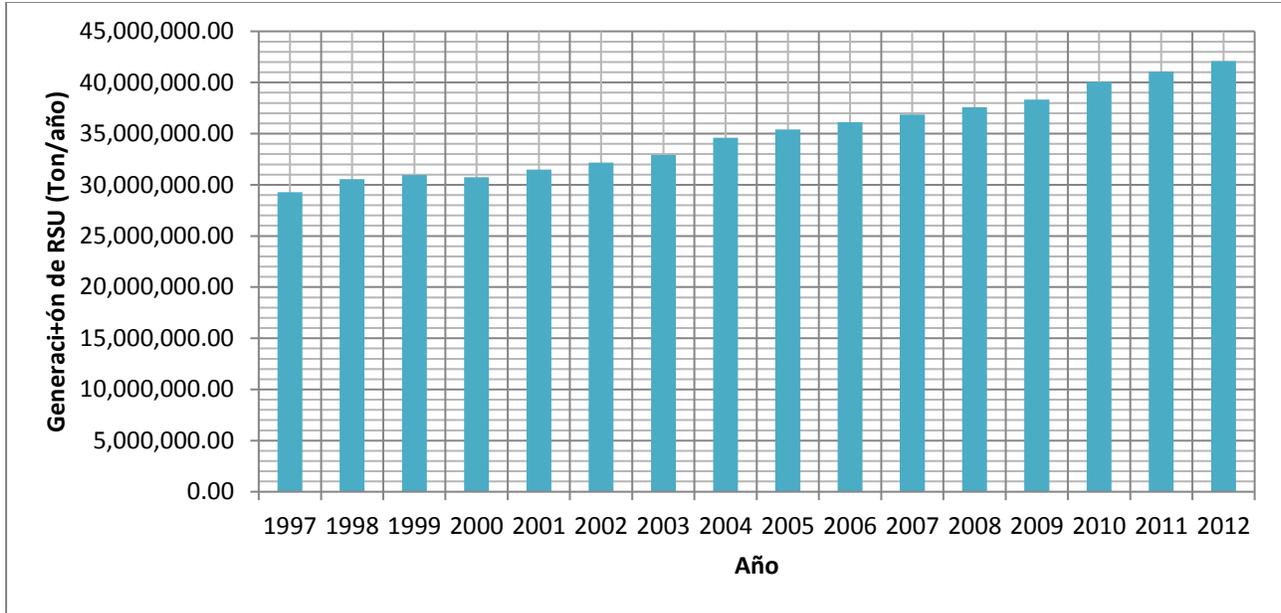
En comparación con los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos **OCDE**, la generación per cápita nacional en 2012 fue de 361.4 kg/habitante año, lo que resulta cerca de 32% menor al promedio de los países de la Organización en 2011 - ver gráfica 1. Generación per cápita en países de la **OCDE**. (OECD, 2014).

Es importante señalar que la tendencia en los países considerados en vías de desarrollo ha sido el incremento de la generación de sus residuos, tendencia que se replica a nivel nacional. De acuerdo a datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales **SEMARNAT** la generación de **RSU** se incrementó tan sólo entre 1997 y 2012 un 43.8%, pasando de 29.3 a 42.1 millones de toneladas de **RSU** generadas, de acuerdo a esto como resultado del crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas, y el cambio en los patrones o tendencias de consumo.



Gráfica 1 Generación per cápita en países de la OCDE. (OECD, 2014)

A pesar de que el volumen nacional de generación de **RSU** es relativamente bajo en comparación con otras economías, el país no es capaz de recolectarlos completamente ni posee la infraestructura para disponerlos adecuadamente. Se estima que en 2010 se recolectaron 84% de los **RSU** generados. (SEMADET, 2017)



Gráfica 2 Generación total anual de RSU en México (1997-2012) (SEDESOL, 2013)

De acuerdo a datos de SEDESOL recuperados en un sitio oficial de SEMARNAT (SEDESOL, 2014) las entidades federativas que generaron los mayores volúmenes de **RSU** en 2012 fueron el Estado de México (16% del total nacional, 6.789 millones de toneladas anuales), Distrito Federal ahora Ciudad de México (12%, 4.949 millones de toneladas anuales), Jalisco (7%, 3.051 millones de toneladas anuales), Veracruz y Nuevo León (5%, 2.301 y 2.153 millones de toneladas anuales), que brinda una noción de la problemática de generación de **RSU** en el Estado. Según el Programa Estatal para la Prevención y Gestión integral de los Residuos del Estado de Jalisco **PEPGIR 2016-2022** la generación per cápita es de 1.012 kg/habitante día.

En cuanto al manejo de los residuos, la tendencia global de los rellenos sanitarios en países considerados como desarrollados o que cuentan con un ingreso per cápita alto, es la desaparición de estos sitios de disposición final, pues en la mayor parte de los casos se han realizado inversiones desde los años 70's u 80's en tecnologías que permiten la cogeneración de energía por medio de la incineración de los residuos sólidos, usualmente, los rellenos sanitarios existentes en estos países concentran residuos como cenizas de plantas incineradoras y residuos que no son susceptibles a valorización, lo que aumenta la vida útil de éstos sitios y permite mantener un control y manejo relativamente económico.

En México de acuerdo a datos del 2012 ² el 72% de los residuos dispuestos terminaron en un relleno sanitario, mientras el 25% en sitios controlados y el 3% en sitios no controlados, para el Estado de Jalisco, los datos son del 81% de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, 17% en sitios controlados y 2% en sitios no controlados, sin embargo, se han encontrado sitios de disposición final que operan en condiciones precarias, al respecto un estudio de Bernache,2012 analiza los componentes de rellenos sanitarios, realizado a municipios en la región centro occidente de México los resultados de una muestra representativa de municipios arrojó que el 46 % de los sitios de disposición final no cuentan con una fosa para captar lixiviados, y que el 61 % no tiene instalada una capa protectora conocida comúnmente como geo membrana. Estos dos factores indican que sólo una parte de los

² Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, SEDESOL. México. 2013.

lixiviados se controla dentro de los sitios de disposición final, pues los lixiviados escaparían en la mitad de los casos, ya que no se tiene una fosa de captación o cárcamo y éstos escurren pendiente abajo. También se podrían estar filtrando al subsuelo ya que 6 de cada 10 sitios de disposición final en la región centro-occidente del país no tiene geo membrana para impermeabilizar la base del sitio, lo que a su vez origina que en algunos casos se incumpla con la normatividad, y generen una serie de problemáticas, principalmente ambientales y sociales conocidas como externalidades, las cuales pueden ser:

1. La muerte de animales que comen y pastorean en zonas contaminadas.
2. Los impactos a la salud pública (compra de medicinas, consultas médicas e inclusive la pérdida de ingresos o capital humano).
3. Contaminación de acuíferos o cuerpos de agua superficiales (costos asociados al saneamiento del agua o la necesidad de extraerla de forma más costosa).
4. Impactos en el turismo y la derrama económica que deja en las poblaciones.

El costo de estas externalidades puede variar, pero se encuentra entre 20-50 dls. Americanos per cápita por año lo que equivale a \$385.6-\$964.0 moneda nacional por persona por año (UNEP; ISWA, 2015)³. Es entonces muy sencillo el entender que es **económicamente más redituable el contar con una GIR** (ver Ilustración 1 e Ilustración 2), **que prevea estos impactos ambientales, sociales y económicos negativos asociados a las externalidades.**

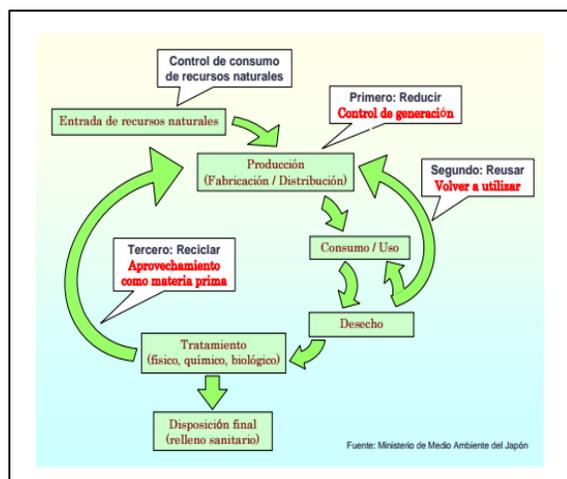


Ilustración 2 Ciclo de vida de los residuos, enfoque en las 3R's. (Ministerio de Medio Ambiente del Japón)

Este manual técnico pretende entonces fungir como una herramienta para el control de las externalidades asociadas a la generación de lixiviados, así como una herramienta que permita contemplar en el diseño de los rellenos sanitarios sistemas de manejo de lixiviados de acuerdo a la ubicación, necesidades y características de cada sitio de disposición final.

³ Presentado en el documento Global Waste Management Outlook de 2015, el cual fue desarrollado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMD) y la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA).

4. Marco legal.

La normatividad alrededor del adecuado manejo de los sitios de disposición final, y que incluye la gestión de lixiviados, parte desde la **Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**, que establece en el artículo 115, las funciones y servicios de los municipios, entre las que señala la disposición final de residuos, pudiendo establecer contribuciones e ingresos a su favor por la prestación de dicho servicio público.

4.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

Esta ley considera en sus artículos 134 a 139, la prevención y control de la contaminación del suelo por residuos, disposiciones en torno a los sitios de disposición final y aborda la contaminación por lixiviados.

4.2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación. Señala como facultad de los gobiernos estatales, el establecimiento de registro de planes de manejo y programas para la instalación de sistemas destinados a la disposición final de residuos.

4.3. Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco

La ley estatal señala en el artículo 70. que la disposición final de residuos en rellenos sanitarios es considerada como la última opción tras haber agotado otras opciones de valorización. También que es obligación prevenir la generación de lixiviados.

4.4. NOM-083-SEMARNAT-2003

Finalmente, esta norma técnica federal es la que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos de manejo especial.

5. Elementos de ubicación, diseño y construcción de un relleno sanitario con influencia en el manejo de lixiviados.

Para la selección del sitio de localización del relleno sanitario, su diseño, técnicas de manejo y plan de clausura, se deben considerar los factores determinantes en los procesos del relleno sanitario, durante y después de su operación.

La selección de un sitio para la puesta en marcha de un sitio de disposición final, es crítico en la planificación de este tipo de obras, incluyendo los agentes sociales que pudieran percibir un relleno sanitario como una amenaza ambiental. A esto se deberán considerar los costos de operación, que implican el transporte de los residuos sólidos, su disposición y el acarreo de materiales para su cobertura diaria (cuando las condiciones del sitio no permiten la disponibilidad de materiales naturales para la cobertura de los desechos).

Además, desde el punto de vista ambiental, la localización geográfica de un relleno sanitario es determinante con relación a la influencia de las variables climáticas en la producción y composición de los lixiviados (degradación de residuos, caudales y concentración de contaminantes de los lixiviados), lo que a su vez influye en la selección de sistemas para el manejo de las variaciones hidráulicas y de composición que pueden presentar los lixiviados, en distintas épocas del año y durante la evolución del relleno. Adicional a las condiciones climáticas, las características de los residuos mismos, las condiciones hidrogeológicas y topográficas del sitio, y otros factores, también juegan un papel importante como limitante o facilitadores en la operación del sitio de disposición final. (Vargas, 2009)

5.1. Especificaciones para la selección del sitio.

La selección del sitio es uno de los criterios que deben tomarse en cuenta ya que están regulados por el punto 6. De la NOM-083-SEMARNAT-2003 *“Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME”*. Se sugiere consultar dichos criterios.

La **SEMADET** cuenta con información geográfica estatal de todas aquellas superficies que cumplen con las especificaciones para la selección de sitios para rellenos sanitarios, por lo que **se recomienda presentar diversas propuestas de ubicación para la evaluación de la factibilidad de sitios para disposición final**, esta información se otorga de manera gratuita, de otra forma, el interesado tendría que realizar el análisis por su cuenta, utilizando algún software de sistemas de información geográfica; sin embargo, en la práctica puede resultar complejo.

5.1.1. Criterios en la selección del sitio con influencia sobre la generación de lixiviados.

Existen diversas problemáticas asociadas a una incorrecta selección del sitio. Como se ha mencionado, el aspecto social juega un rol importante al momento de seleccionar un predio para sitio de disposición final, resultado de valor la gestión y consulta que se realice con las comunidades para socializar los proyectos y llegar a un acuerdo sobre la ubicación del sitio. En este manual el enfoque se hará en los siguientes criterios técnicos en la selección de un sitio, asociados en específico a la generación de lixiviados:

Condiciones topográficas

La conformación que tenga el relleno, tendrá gran influencia no solo en su diseño, sino en el manejo de lixiviados durante la etapa de operación. Por ejemplo, las condiciones topográficas determinarán la dirección y forma que escurran los lixiviados y aguas pluviales.

Condiciones hidrológicas

Los factores hidrológicos se pueden establecer como determinantes para la localización, construcción y operación del relleno sanitario, debido a su influencia en la producción de lixiviados y los riesgos de contaminación por parte de estos líquidos en las fuentes de aguas superficiales y subterráneas. Con relación a lo anterior, es necesario considerar las reglamentaciones establecidas por las autoridades ambientales, para la localización del relleno sanitario con relación a corrientes de agua y acuíferos presentes en la zona del proyecto.

Condiciones climatológicas

Las variables climáticas del lugar de localización de un relleno sanitario tienen gran importancia en el diseño, construcción, operación y clausura del mismo. La precipitación es una de las variables que más reviste interés en las distintas fases del relleno sanitario, por ejemplo, para el diseño del sitio de disposición final y los sistemas de colección de lixiviados, se debe tener en cuenta la caracterización de la precipitación del lugar donde operaría el relleno sanitario. En zonas donde las precipitaciones son muy altas, se esperaría que los caudales de lixiviados que se generan en un relleno sanitario presenten magnitudes acordes con la cantidad de agua que cae en el interior del mismo; bajo estas condiciones, se puede considerar necesario para su diseño y operación, la construcción de capas y usos de coberturas con materiales cuyas características físicas ayuden a controlar la incorporación de grandes cantidades de agua, que, finalmente, llegan a dificultar la operación del relleno y aumentar los volúmenes de líquidos que escurren a lo largo de la celda. La precipitación no sólo juega un papel importante en la parte operativa y constructiva del sitio de disposición final; esta variable, junto con la evaporación, evapotranspiración y temperatura ambiente, interviene en la generación de los lixiviados, en la descomposición de los residuos, en las variaciones de los almacenamientos de humedad de las capas de suelo del relleno y en diversos procesos físicos, biológicos y químicos que ocurren en el interior del sitio de disposición final; por lo tanto, deben ser consideradas en los balances hídricos, en el análisis de la biodegradación de los residuos sólidos en el relleno, en los diseños de los sistemas de tratamientos de lixiviados, entre otros. Otra variable climática que tiene importancia en los rellenos sanitarios son los vientos, en especial por su relación con el transporte de olores y biogases que se producen en el interior del sitio de disposición final, siendo estas condiciones, parámetros determinantes en la localización y operación de un relleno sanitario. Para conocer las variables climatológicas de algún sitio en particular la **SEMADET** recomienda ubicar las normales climatológicas las cuales pueden ser consultadas en la página oficial del Sistema Meteorológico Nacional, estas normales climatológicas contienen la información de diversas estaciones meteorológicas e información relevante como temperaturas promedio, precipitación media anual, evaporación total normal, y usualmente se dividen en normales climatológicas para el periodo de 1951-2010, periodo 1971-2000, periodo 1981-2010, así como datos climatológicos diarios disponibles. La incorporación de datos reales de precipitación será un factor fundamental a la hora de estimar la generación de lixiviados de un relleno sanitario por medio de un balance hidrológico.

Composición del material edafológico

Por otra parte la composición de los materiales líticos o edafológicos de los sitios juegan un rol fundamental pues al tener materiales de alta densidad como el basalto, la dificultad de crear cárcamos o asoleaderos para la evaporación de lixiviados será significativamente más alta, es importante también identificar que el predio o sitio para disposición final no cuente con fracturas o materiales que faciliten la infiltración de lixiviados de acuerdo a los parámetros establecidos por la NOM-083-SEMARNAT-2003.

5.2. Componentes o características constructivas de un relleno sanitario.

Un relleno sanitario debe tener un diseño y una construcción cuidadosos, cuyo fin sea contener los residuos y prevenir el escape de los lixiviados al ambiente. En forma general, la composición de un relleno sanitario consiste básicamente de una cobertura superior, la cual puede estar conformada por capas de suelos como arcillas y arenas, capas de geomembrana y una cubierta final de suelo con vegetación.

El relleno sanitario lo conforman las celdas de residuos. En un diseño típico, la parte inferior, consta de un sistema de drenajes o filtros; capas de suelos con baja permeabilidad, las cuales se comportan como barreras; y capas de geomembranas en su fondo para la protección de las aguas subterráneas y el control de lixiviados.

Adicional al conjunto de capas que conforman el interior y exterior de un relleno sanitario, este sitio de disposición final de residuos sólidos debe presentar un sistema para la evacuación de los gases que se generan en su interior, comúnmente conocidos como “biogás”. En la mayoría de los rellenos sanitarios, este sistema está conformado por un conjunto de tuberías localizadas en diferentes puntos del sitio de disposición final o chimeneas, en otros rellenos sanitarios que presentan alternativas de aprovechamiento de los gases, el sistema de evacuación consta de una interconexión entre tuberías, que finalmente tienen como fin conducir los gases hasta un quemador o una planta de aprovechamiento de energía, en el Estado de Jalisco existe únicamente una empresa que quema el metano generado en su relleno sanitario.

Con relación a los lixiviados que se producen en un relleno sanitario, el monitoreo del nivel de estos líquidos en el interior del sitio de disposición final es de gran importancia, lo mismo que el sistema de recolección, recirculación (cuando se considere necesario) y tratamiento, por lo cual la instrumentación con piezómetros, las tuberías de conducción de los lixiviados y una planta o unidad de tratamiento, se consideran componentes esenciales de la operación adecuada de un relleno sanitario.

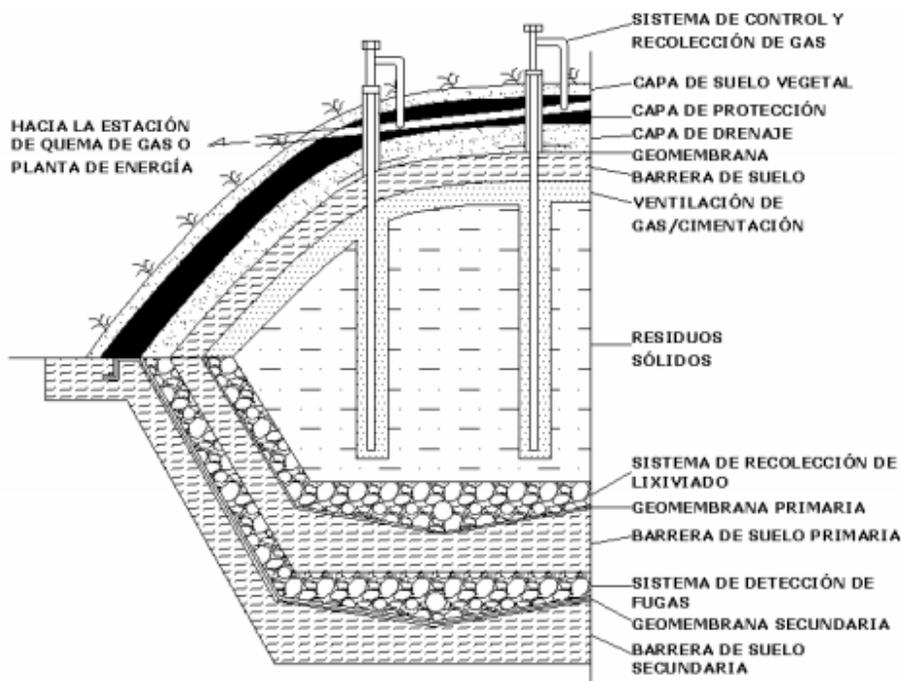


Ilustración 3. Componentes de un relleno sanitario. (Quian, Koerner, & Gray, 2002)

El lixiviado que se produce en el sitio de disposición final, a causa del líquido que expulsan los residuos durante su descomposición y por el agua que se infiltra dentro del relleno, y percola a través de las capas, debe manejarse por un sistema de colección y remoción de lixiviados, para prevenir la acumulación de estos líquidos en el interior del relleno, y transportarlos hasta una planta de tratamiento o a cárcamos donde puedan ser almacenados y evaporados. Además de los lixiviados, la descomposición de los residuos sólidos genera gases como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2); éstos deben controlarse durante la operación y clausura del relleno, para este propósito se instala en el sitio de disposición final un sistema cuyo propósito es la evacuación segura de gases, los cuales pueden emplearse para la producción de energía, o pueden ser quemados en condiciones de control.

Para el control de los lixiviados el sistema de manejo de estos contaminantes, se considera como el principal requerimiento en el diseño y operación de un sitio de disposición final. Para lograr un control sobre los riesgos que implica la producción de lixiviados, un sitio de disposición final debe contar con varios tipos de capas que impidan la infiltración y/o permitan el drenaje adecuado de los lixiviados hasta el sistema de recolección.

Muchos materiales, en su mayoría fabricados, se emplean para este propósito, como las capas de membranas flexibles llamada geomembranas. Para el drenaje de los lixiviados se utilizan los filtros y/o tuberías.

De acuerdo con (Qasim & Chiang, 1994), cada uno de los anteriores componentes del sistema de control de lixiviados es usado para condiciones especiales de acuerdo a sus características:

- Geomembranas: son usadas para proporcionar una barrera entre los contaminantes liberados por los residuos sólidos y las aguas subterráneas. En la clausura del sitio de disposición final, las geomembranas

se utilizan para proporcionar una barrera de cobertura con baja permeabilidad, lo cual ayuda a prevenir la infiltración del agua lluvia y reducir de esta forma la generación de lixiviados.

- Capas geosintéticas de arcilla: están fabricadas de bentonita sódica, la cual es distribuida en espesores uniformes entre dos geotextiles. La bentonita sódica tiene una baja permeabilidad, esto hace que este tipo de material sea una alternativa adecuada para conformar las líneas de barrera, que a su vez, son las que funcionan como capas impermeables dentro del sitio de disposición final.
- Tuberías: las tuberías plásticas se emplean para el drenaje en la recolección de lixiviados, en los sistemas de remoción y en el monitoreo de estos contaminantes.

De otra parte, el sistema de cobertura final, formado por capas impermeables y capas de drenaje, tienen como función proteger las coberturas internas del relleno sanitario de los efectos del ambiente, principalmente los producidos por la infiltración del agua exterior, ya que ésta puede aumentar la producción de lixiviados, después de la clausura del sitio de disposición final.

La función del sistema de cobertura final debe estar reforzada por el sistema de manejo de aguas lluvias, que tiene como finalidad ayudar a evacuar o drenar de forma rápida la cantidad de agua de precipitación que cae en el sitio de disposición final, facilitando así la escorrentía superficial, y disminuyendo las posibilidades de infiltración.

El sistema de monitoreo de aguas subterráneas consta de la instalación de por lo menos dos pozos, los cuales deben ser ubicados en las profundidades y lugares adecuados de las fronteras del sitio de disposición final, a fin de obtener muestras del acuífero que puede presentar impactos sobre la calidad del agua.

5.2.1. Suelo y condiciones geológicas

Las características del suelo presente en el sitio de localización del sitio de disposición final son un factor importante en el diseño y operación de los rellenos sanitarios. Dentro de estas características se pueden mencionar: la topografía, el tipo de suelo, en especial, cómo éste puede relacionarse con el movimiento del agua y de los gases; su estratigrafía y estructura, la permeabilidad, manejabilidad, la vegetación, etc.

Es importante considerar la clasificación y las propiedades físicas y químicas de los suelos, a la hora de establecer su uso para construir las capas que conforman el sitio de disposición final. Muchas de estas propiedades influyen en el movimiento del flujo en el interior del sitio a través de diferentes capas; por ejemplo, la arcilla compactada se ha utilizado tradicionalmente como cubierta en la parte superior de los sitios de disposición final para aislar los residuos de la intemperie, o también es utilizada para interceptar flujos verticales en el interior del sitio de disposición final (barreras de suelo); eso se debe principalmente a su baja conductividad hidráulica; sin embargo, algunas veces su baja plasticidad puede dificultar su colocación y compactación, y su grado de contracción – dilatación puede conducir a un agrietamiento que podría afectar la calidad del sitio.

De esta manera, desde el punto de vista técnico, el mejor material para la construcción de capas de barrera de suelo, será aquel que tenga el valor de conductividad hidráulica más bajo posible, que presente plasticidad adecuada para su manejo al compactarse, que logre controlar las infiltraciones de agua al interior del relleno sanitario y, en el caso de sitios de disposición final con aprovechamiento de biogás, el material de suelo debe minimizar la salida de gas hacia la atmósfera (Qasim & Chiang, 1994).

5.2.2. Características físicas de los residuos y los materiales de capas.

Las características de los residuos sólidos y de los materiales para la construcción de las capas y coberturas de un relleno sanitario, de interés, son las que se asocian al movimiento del fluido en el interior del sitios de disposición final y a la protección del medio ambiente frente los efectos adversos de la operación del relleno sanitario (escape de gases, fugas de lixiviados, contaminación de las corrientes de agua superficiales y subterráneas, etc.).

Entre las características físicas más importantes de los residuos sólidos y de los materiales artificiales y naturales a emplear en la operación y clausura del sitio de disposición final, se encuentran la permeabilidad y la densidad de compactación de los mismos, sobre todo, teniendo en cuenta que estas características influyen directamente en el movimiento del flujo (lixiviados y/o agua de infiltración) en el interior del relleno sanitario.

6. Condicionantes operativas de rellenos sanitarios.

6.1. Métodos operativos de rellenos sanitarios.

La disposición de los residuos sólidos en el relleno y su cobertura se puede realizar en diferentes configuraciones geométricas y espaciales. Estas configuraciones definen el método a utilizar para la operación del relleno sanitario y deben seleccionarse con base en las condiciones topográficas, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio seleccionado para la disposición final de los residuos.

De acuerdo con (Quian, Koerner, & Gray, 2002), los métodos de operación a implementarse en un relleno sanitario son:

- Método de trinchera:

Para este método los residuos sólidos son vertidos en zanjas profundas y estrechas, y son cubiertos con el material producto de la excavación de cada trinchera. Este método se utiliza generalmente para pequeñas cantidades de residuos.

- Método del área

Este método debe utilizarse en áreas relativamente planas, donde no es factible excavar trincheras para enterrar los residuos sólidos. Éstos pueden depositarse directamente sobre el área, en cuyo caso el material de cobertura deberá importarse de otros sitios, o si es posible, puede extraerse de la capa superficial. Este método también se adapta para rellenar depresiones naturales o artificiales. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno, procurando que sea lo más cerca posible, para evitar sobrecostos en el transporte.

- Método combinado

Los métodos de área y trinchera, por poseer técnicas similares de operación, pueden combinarse para obtener un mejor aprovechamiento del terreno del material de cobertura y rendimientos en la operación. Si las condiciones topográficas lo permiten, se pueden combinar los métodos.

- Método de valle

En este método, los residuos sólidos se depositan entre colinas o en terrenos ondulados. La operación del relleno puede planearse de manera que se formen escalones, haciendo pequeñas excavaciones para obtener el material de cubierta.

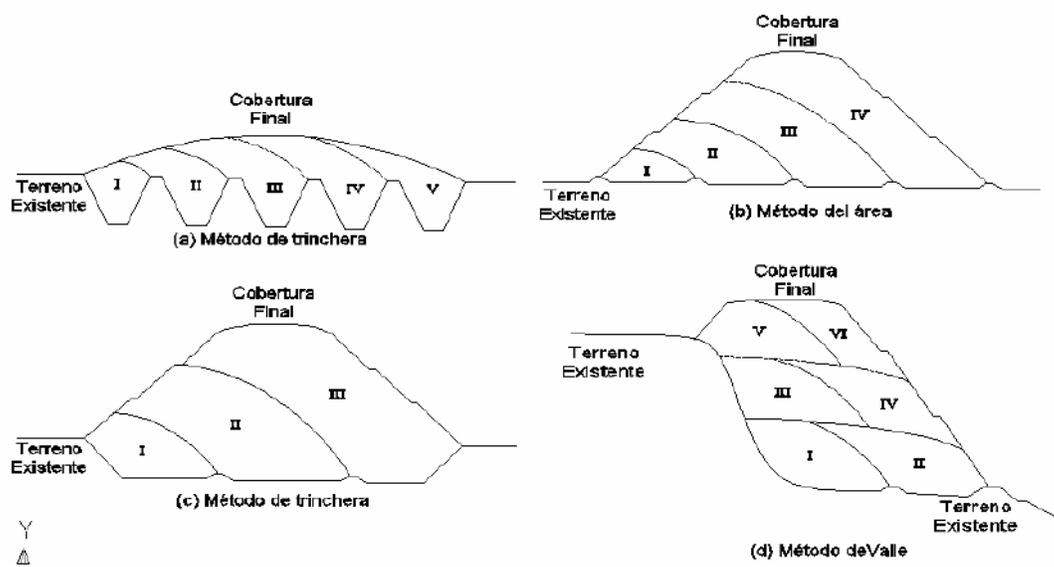


Ilustración 4 Métodos constructivos de rellenos sanitarios. (Quian, Koerner, & Gray, 2002)

6.2. Condiciones operativas de rellenos sanitarios.

La operación del sitio de disposición final deberá apegarse estrictamente a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana **NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos de manejo especial**, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de Octubre de 2004, haciendo cumplimiento a lo establecido en el punto 7 que refiere a las características constructivas y operativas del sitio de disposición final.

El sitio **de disposición final** deberá generar y mantener actualizado un manual de operación que tendrá que presentar a la **SEMADET** para su evaluación el cual deberá estar apegado a lo establecido en el punto 7.10 de la NOM-083-SEMARNAT-2003 y sus programas específicos.

6.2.1. Información mínima requerida para el programa de monitoreo de lixiviados.

El programa de monitoreo de lixiviados forma parte de los programas específicos que el promovente del sitio de disposición final deberá presentar ante la **SEMADET**. A modo de guía, dicho programa deberá contener la siguiente información mínima:

- I. Objetivo General.
- II. Diseño del Sistema de Monitoreo.
- III. Definición del área de Estudio:
 - III.1. Tipo y composición de los residuos:

- III.2. Localización del sitio de disposición final.
- III.3. Edad de los residuos.
- III.4. Tipo y composición de los residuos.
- III.5. Humedad de los residuos.
- III.6. Régimen de clima y humedad (efectos estacionales).
- III.7. Compactación, procesamiento y otros aspectos de la operación del relleno.
- III.8. Temperatura y pH en el relleno.
- III.9. Presencia de grandes cantidades de lodos municipales, industriales y residuos industriales de manejo especial.
- III.10. Espesor de la capa de residuos.
- III.11. Permeabilidad, espesor, compactación y pendiente de la cubierta diaria y final.
- III.12. Descripción del sistema de captación y de drenaje de lixiviados:
 - III.12.1. Rebombeo, volúmenes y periodos de bombeo.
 - III.12.2. Tratamiento o aprovechamiento.
 - III.12.3. Alternativas de manejo.
- III.13. Descripción del sistema de tratamiento de lixiviados:
 - III.13.1. Normatividad aplicable con base en las características del sistema de manejo y tratamiento de lixiviados.
 - III.13.2. Descripción del sistema de tratamiento:
 - III.13.2.1. Descripción de los procedimientos.
 - III.13.2.2. Diagramas de flujo.
 - III.13.2.3. Equipamiento para el manejo y tratamiento de lixiviados.
- III.14. Calidad y cantidad generada de lixiviado producido en el relleno sanitario y su afectación potencial a las aguas subterráneas:
- IV. Ubicación y descripción de puntos de monitoreo.
- V. Diseño de puntos de monitoreo.
- VI. Metodología y programa de muestreo.
- VII. Selección de parámetros a monitorear en base a la normatividad aplicable del sistema de tratamiento y técnicas de laboratorio.
- VIII. Toma de muestra.
- IX. Análisis de laboratorio (físico, químico y bacteriológico).
- X. Evaluación de resultados.
- XI. Metodología y evidencias recabadas del muestreo de lixiviados:
 - XI.1. Especificaciones de bitácoras de control.
 - XI.2. Especificaciones del muestreo del laboratorio acreditado por la EMA.
 - XI.3. Datos de la empresa que realiza el estudio, que incluya la autorización emitida por la EMA.
- XII. Conclusiones.

En el caso de que, por las particularidades del sitio de disposición final, alguno o más de los puntos que deberán contener el manual de operación y sus programas específicos no aplique, éste deberá ser justificado por el promovente con fundamento técnico y la aplicación de principios científicos que justifiquen la no presentación de alguno de los puntos requeridos.

7. Generación de lixiviados.

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes que se producen como resultado de la percolación del agua a través de los residuos sólidos confinados y también por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, pueden impactar potencialmente la calidad del agua subterránea, ya sea mantos freáticos o acuíferos, el líquido lixiviado, contiene una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos, debido a reacciones químicas y bioquímicas, produciéndose inclusive gases como el metano (CH₄), bióxido de carbono (CO₂) y amoníaco (NH₃), se estima que aun cuando se controle el ingreso de agua pluvial, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los mismos residuos confinados y la generada por actividad microbiana. La composición típica de los lixiviados es variable y dependerá del tipo y composición de los residuos a disponer (Montejo, 2010).

Tabla 1 Factores que intervienen en la producción de lixiviado.

Factores	Elementos	Componentes
Infiltración de agua	Precipitación pluvial Cobertura de los residuos sólidos municipales	-Ubicación geográfica -Época del año / aspectos climatológicos -Evaporación / Evapotranspiración -Espesor impermeabilidad -Tipos de materiales -Compactación -Pendientes
Características de los residuos	Tipología	-Composición -Humedad -Tamaño y grado de compactación
Actividades microbianas	Actividades aerobias, anaerobias	-Naturaleza de los materiales -Temperatura -Relación carbono/nitrógeno -Potencial de hidrógeno (pH) -Contenido de sustancias tóxicas
Operación del relleno	Eficiencia operativa	-Bermas temporales -Obras de desvío de aguas -Cobertura diaria de los residuos sólidos.
Intrusión de aguas subterráneas	Eficiencias constructivas	-Impermeabilización adecuada

(Montejo, 2010)

Los valores de los componentes de los lixiviados presentados en la **Tabla 2** están contenidos dentro de unos rangos típicos, que permiten variaciones dependiendo de la edad del sitio de disposición final; sin embargo, la localización geográfica del sitio de disposición final y los tipos de residuos depositados en el mismo, que, a su vez, están ligados a las crecientes actividades comerciales e industriales y a los estilos de vida de cada país, hacen que los valores de estos componentes puedan variar de un país a otro.

Tabla 2 Valores típicos de parámetros de lixiviados que varían con la edad del relleno sanitario.

Parámetro (Unidad)	Relleno de reciente creación (menor a 5 años)	Relleno maduro (mayor a 10 años)
DBO ₅ (mg/L)	2,000-30,000	100-200
Carbono Orgánico Total (mg/L)	1,500-20,000	80-160
DQO (mg/L)	3,000-60,000	100-500
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	200-2,000	100-400
N-org (mg/L)	10-800	80-120
NO ₄ (mg/L)	10-800	80-120
NO ₃ (mg/L)	10-800	5 a 10
P total (mg/L)	5-100	5 a 11
Ortofosfato (mg/L)	4 a 80	4 a 8
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	1,000-10,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6.6-7.5
Dureza total	300-10,000	200-500
Ca (mg/L)	200-3,000	100-400
Mg (mg/L)	50-1,500	50-200
K (mg/L)	200-1,000	50-400
Na (mg/L)	200-2,500	100-200
Cl (mg/L)	200-3,000	100-400
SO ₄ (mg/L)	50-1,000	20-50
Fe total (mg/L)	50-1,200	20-200

(Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Los investigadores (Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2007) recopilaron diferentes estudios de caracterización de lixiviados para varios rellenos en diversos países, también compilaron los valores encontrados para los principales parámetros de caracterización de lixiviados, estos valores se presentan en la Tabla 3, evidenciando que la edad del sitio de disposición final y el grado de estabilización de los residuos sólidos tiene un efecto significativo en la composición de los lixiviados.

Tabla 3 Caracterización de lixiviados en distintos países.

Edad	Ubicación del sitio	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	DBO/DQO (mg/L)	pH	SS (mg/L)	NTK	Nh3-N (mg/L)
J	Canadá ⁴	13,800	9,600	0.7	5.8		212	42
J	Canadá	1,870	90	0.05	6.6		75	10
J	China, Hong Kong	15,700	4,200	0.27	7.7		2,260	2,260
J	China, Hong Kong	17,000	7,300	0.43	7.0-8.3	>5,000	3,200	3,000
J	Grecia	70,900	26,800	0.38	6.2	950	3,400	3,100
J	Italia	19,900	4,000	0.2	8			3,917
J	Turquía	16,200-20,000	10,800-11,000	0.55-0.67	7.3-7.8	2,400		1,682
J	Colombia	25,622	17,456	0.68	7.9	2,069		1,649
EM	Canadá	3,210-9,190			6.9-9.0			
EM	China, Hong Kong	7,439	1,436	0.19	8.22	784		
EM	Grecia	5,350	1,050	0.2	7.9	480	1,100	940
EM	Italia	5,050	1,270	0.25	8.38			1,330
EM	Turquía	9,500			8.15		1,450	1,270
V	Brasil	3,460	150	0.04	8.2			800
V	Francia	500	7,1	0.01	7.5	130	540	430

(Vargas, 2009)

7.1. Modelos de estimación de la generación de lixiviados.

Para la estimación de la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos a nivel mundial, estos parten del análisis del balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área de relleno sanitario. Existen diferencias entre los modelos aplicados que se caracterizan por el uso de diferentes factores de generación, siendo algunos de los más usados los siguientes:

Recuperado de (Vargas, 2009), J: sitio de disposición final joven (menor o igual a 5 años), EM: sitio de disposición final de edad media (5-10 años) V: sitio de disposición final viejo (> 10 años) ⁴ Obtenido de (Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2007),

Tabla 4 Modelos usualmente empleados para la estimación de la generación de lixiviados.

Modelo	Características
Thornthwaite (Fenn)	Observaciones empíricas de periodo de tiempo por etapas del relleno sanitario, se apoya en datos climatológicos. No toma en cuenta las actividades microbianas. No toma en cuenta la posible intrusión de agua subterránea.
Modelo Suizo	Esta es una de las metodologías o modelos de cálculo de generación de lixiviados en rellenos sanitarios más generales, deja de lado aspectos importantes relativos a la capacidad de los residuos de absorber agua.
Modelo HELP	Es un modelo determinístico, cuasi-bidimensional se basa en información climatológica, edafológica, de diseño y geohidrológica, desarrolla un balance hídrico lateral y vertical.
Método de balance de agua	Es un modelo determinístico, se basa en información climatológica, la cantidad de humedad de los residuos, la cantidad microbiana, el suelo y material de cobertura, la época del año

(Montejo, 2010)

Debido a la popularidad del Modelo HELP, ampliamente utilizado en Estados Unidos, se abordan enseguida diversos modelos desarrollados para estimar la generación de lixiviados, que han servido en la construcción de dicho modelo. Posteriormente se refieren algunos de los modelos referidos en la tabla anterior.

7.1.1. Modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (USDA, 1980)

Fue desarrollado en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), por Knisel y Nicks (1980), para evaluar las fuentes de contaminación no puntual de las tierras agrícolas. El modelo se basa en el balance hídrico, y puede estimar la escorrentía, la erosión, el transporte de sedimentos, nutrientes vegetales y plaguicidas. La lógica general del modelo es que los procesos hidrológicos proporcionan el medio de transporte para sedimentos y productos químicos agrícolas. El CREAMS fue desarrollado para modelar los sistemas agrícolas, pero se ha utilizado en investigación para la gestión de los residuos, incluyendo estudios de erosión, investigación del balance hídrico y el diseño de coberturas para sitios de disposición final.

Entre las limitaciones del modelo se incluye: la simulación del movimiento de la humedad como un flujo por gravedad, suponiendo una relación lineal para la conductividad hidráulica, y una simulación unidimensional vertical para el movimiento de la humedad. El CREAMS también ha sido probado para comprobar su exactitud en estudios de la escorrentía y la erosión, y se ha encontrado que el modelo puede predecir la escorrentía promedio, pero tiene una tendencia a subestimar la sedimentación para grandes tormentas. (Murphy & Garwell, 1998) Recopilado de (Vargas, 2009).

7.1.2. SOILINER (1986)

Este modelo fue desarrollado por la GCA Technology Division, Inc., para la Office of Solid Waste de la EPA. El programa predice la tasa de flujo de lixiviados a través de revestimientos de arcilla dada la conductividad hidráulica saturada de las capas, el gradiente hidráulico y la porosidad efectiva. El SOILINER es un método de aproximación de diferencias finitas unidimensional, que resuelve una ecuación de flujo no saturado en dirección vertical. Las características del modelo incluyen la posibilidad de simular múltiples sistemas, el contenido variable de humedad inicial y los cambios de las condiciones de frontera. La salida del modelo es el tiempo de viaje de un contaminante (TOT) a más de 100 pies de distancia horizontal (Murphy & Garwell, 1998)

Daniel et al., (1991), estudiaron solutos inorgánicos a través de columnas de capas de arcilla en el laboratorio, con el fin de validar el modelo, pero encontraron una sobre predicción del tiempo de viaje (TOT), en algunos casos por un factor tan alto como 52. Ellos concluyeron que el error puede deberse a las suposiciones modeladas, como que las capas reales y las porosidades efectivas son iguales, mientras que en el hecho, la porosidad efectiva de una arcilla compactada puede variar con el gradiente hidráulico. Coates (1987) estudió los componentes hidrológicos de coberturas de multicapas experimentales para un sitio de disposición final, y encontró que las principales limitaciones del modelo son que no tiene en cuenta la dispersión y el tiempo de avance para la migración de contaminantes. Al-Jobeh (1994), en un estudio comparativo de varios modelos, también llegó a la conclusión de que el modelo no toma en consideración la fase gaseosa de flujo o presión, y el flujo sólo se considera en la dirección vertical (Murphy & Garwell, 1998)

7.1.3. Modelo HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance)

De acuerdo al manual de ingeniería del modelo **HELP** en su versión más reciente (Schroeder, y otros, 1994) el modelo es un programa de computadora que funciona de manera cuasi bidimensional estima el movimiento del agua en dos dimensiones a través del relleno sanitario (forma horizontal) y a razón de ingreso en el relleno sanitario (manera vertical) y se basa en modelos hidrológicos para la estimación de generación de lixiviados, el modelo requiere datos climatológicos diarios como:

- Datos diarios de precipitación
- Evapotranspiración
- Velocidad de viento anual media
- Humedades relativas
- Temperaturas medias mensuales
- Índice máximo de hojas por área

También requiere de información del diseño del relleno sanitario o sitio de disposición final, datos de los suelos que conforman el sitio donde los residuos serán dispuestos y arroja resultados que toman en cuenta componentes tales como:

- Capacidad de almacenamiento superficial
- Derretimiento de nieve
- Escorrentías

- Infiltración
- Evapotranspiración
- Crecimiento vegetal
- Capacidad de almacenamiento de humedad en los suelos
- Drenaje lateral subsuperficial
- Recirculación de lixiviados
- Drenaje vertical no saturado
- Fugas a través del suelo, geomembranas o revestimientos compuestos

El propósito principal de este modelo es ayudar en la comparación de alternativas de diseño según sus balances hídricos, sin embargo existe una dificultad inherente a su aplicación en México, dados los tipos de datos requeridos para ejecutar el modelo, pues muchos de los datos solicitados por el modelo son datos que no se tienen en bases de datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) como por ejemplo, los datos diarios de precipitación, datos diarios de irradiación o evapotranspiración, índices máximos de hojas por área o humedades relativas (en cuartiles estacionarios); es importante destacar que el modelo contiene bases de datos climatológicos de aproximadamente 139 ciudades de Estados Unidos, lo que facilita su aplicación en estas zonas.

El modelo es aplicable a sitios de disposición final abiertos, parcialmente cerrados y totalmente cerrados, es una herramienta para diseñadores y personas encargadas de otorgar autorizaciones para la construcción de estos sitios.

El modelo **HELP** usa muchas descripciones de proceso que se desarrollaron previamente, reportado en la literatura, y utilizado en otros modelos hidrológicos. El sintético opcional generador de clima es el modelo WGEN del Departamento de Agricultura de los EE. UU. (USDA) Servicio de Investigación Agrícola (ARS) (Richardson y Wright, 1984). Modelo de escorrentía se basa en el método de número de curva del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (SCS) presentado en la Sección 4 del National Engineering Handbook (USDA, SCS, 1985). Potencial la evapotranspiración se modela mediante un método Penman modificado (Penman, 1963). La evaporación del suelo se modela de la manera desarrollada por Ritchie (1972) y se utiliza en varios modelos de ARS, incluido el simulador de recursos hídricos en cuencas rurales (SWRRB) (Arnold et al., 1989) y los productos químicos, la escorrentía y la erosión de Sistema de gestión agrícola (CREAMS) (Knisel, 1980). La transpiración de la planta es computados por el método de Ritchie (1972) usado en SWRRB y CREAMS.

Los modelos de crecimiento vegetativo fueron extraídos del modelo SWRRB. Evaporación de la interceptación, la nieve y el agua superficial se basan en un balance de energía. La interceptación es modelada por el método propuesto por Horton (1919). El modelado de fusión de nieve se basa en SNOW-17 rutina del Sistema de Pronóstico del Río del Servicio Meteorológico Nacional (NWSRFS) Modelo de acumulación y ablación de nieve (Anderson, 1973). El submodelo del suelo congelado se basa en una rutina utilizada en el modelo CREAMS (Knisel et al., 1985). Vertical el drenaje es modelado por la ley de Darcy (1856) usando la ecuación de Campbell (1974) para conductividad hidráulica insaturada basada en la relación Brooks-Corey (1964). (Schroeder, y otros, 1994).

El drenaje lateral saturado se modela mediante una aproximación analítica al estado estacionario solución de la ecuación de Boussinesq empleando el Dupuit-Forchheimer (Forchheimer, 1930) suposiciones. La fuga a través de geomembranas está modelada por una serie de ecuaciones basado en las compilaciones de Giroud et al. (1989,

1992). Los procesos están vinculados juntos en un orden secuencial comenzando en la superficie con un balance hídrico superficial; entonces evapotranspiración del perfil del suelo; y finalmente el drenaje y el enrutamiento del agua, comenzando en la superficie con infiltración y luego siguiendo hacia abajo a través del perfil del sitio de disposición final hasta el fondo. El procedimiento de solución se aplica repetitivamente para cada día, ya que simula el enrutamiento del agua durante todo el período de simulación. (Schroeder, y otros, 1994)

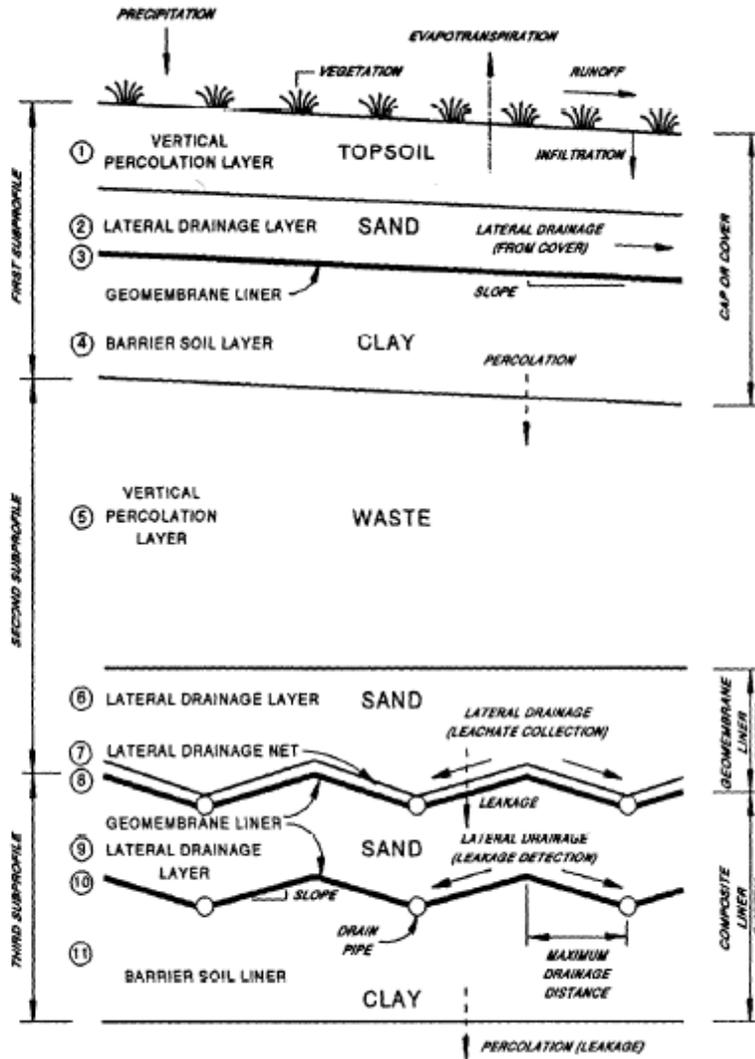


Ilustración 5 Vista esquemática de un perfil de relleno sanitario, con los componentes que evalúa el modelo HELP. (Schroeder, y otros, 1994)

7.1.4. Modelo Suizo

Es uno de los modelos más simples para estimar la generación de lixiviados en un relleno sanitario o tipo de disposición final y aunque los parámetros ligados a la generación de lixiviados son variados, este modelo ofrece

una opción sencilla pero es bastante general, pues deja de lado aspectos fundamentales como la capacidad de los residuos de absorber agua, la cantidad de agua empleada en el proceso de metanogénesis, la información requerida para emplear este modelo es la siguiente:

1. Caudal medio de lixiviado o líquido percolado Q (L/s)
2. Precipitación media anual P (mm/año)
3. Área superficial del relleno sanitario A (m^2)
4. Número de segundos en un año t (31,536,000 seg/año)
5. Coeficiente que depende del grado de compactación de los residuos, cuyos valores recomendados por el modelo son los siguientes k (dmnl)
 - a. Débilmente compactados 0.4 a 0.7 Ton/ m^3
 - i. 0.25 a 0.50 para residuos débilmente compactados.
 - b. Fuertemente compactados > 0.7 Ton/ m^3
 - i. 0.15 a 0.25 para residuos fuertemente compactados

Se utiliza la siguiente ecuación para estimar la cantidad de lixiviados generada en un relleno sanitario:

$$Q = \frac{PAk}{t}$$

Ecuación 1 Estimación de la generación de lixiviados por el modelo Suizo. (Montejo, 2010)

Como podemos apreciar la generación de lixiviados estimada por el modelo se encuentra en función de únicamente tres variables:

- I. Precipitación anual media
- II. Área o superficie de disposición final
- III. Coeficiente de compactación de residuos

7.1.5. Métodos de balance hidrológicos

Para cuantificar los lixiviados que se generan en un sitio de disposición final puede emplearse un balance hidrológico global, el cual, teniendo en cuenta la capacidad de retención de los residuos, los aportes, consumos y salidas de agua del sitio logra estimar la cantidad de lixiviado generado o a generarse en un relleno sanitario.

El balance hidrológico admite distintos modelos o métodos para cuantificar cada uno de sus términos, y por ello, surgen distintas formulaciones para aplicarlo. El planteamiento básico del método es que todo el agua que se infiltra a través de la capa superficial del sitio de disposición final y no es evapotranspirada, acaba apareciendo como lixiviado.

De acuerdo a (Tchobanoglous & Kreith, 2002) la información requerida para llevar a cabo un balance de agua en un relleno sanitario es la siguiente:

- Humedad en los residuos sólidos depositados

- Humedad en los lodos depositados
- Humedad en el material de cobertura
- Agua que ingresa por encima de la superficie (lluvia, recirculación, reinyección)
- Pérdida de agua en la formación de biogás
- Pérdida de agua por evaporación en las superficies
- Pérdida de agua por vapor de agua saturado en el biogás

Estos componentes pueden se presentan a manera de imagen en Ilustración 7

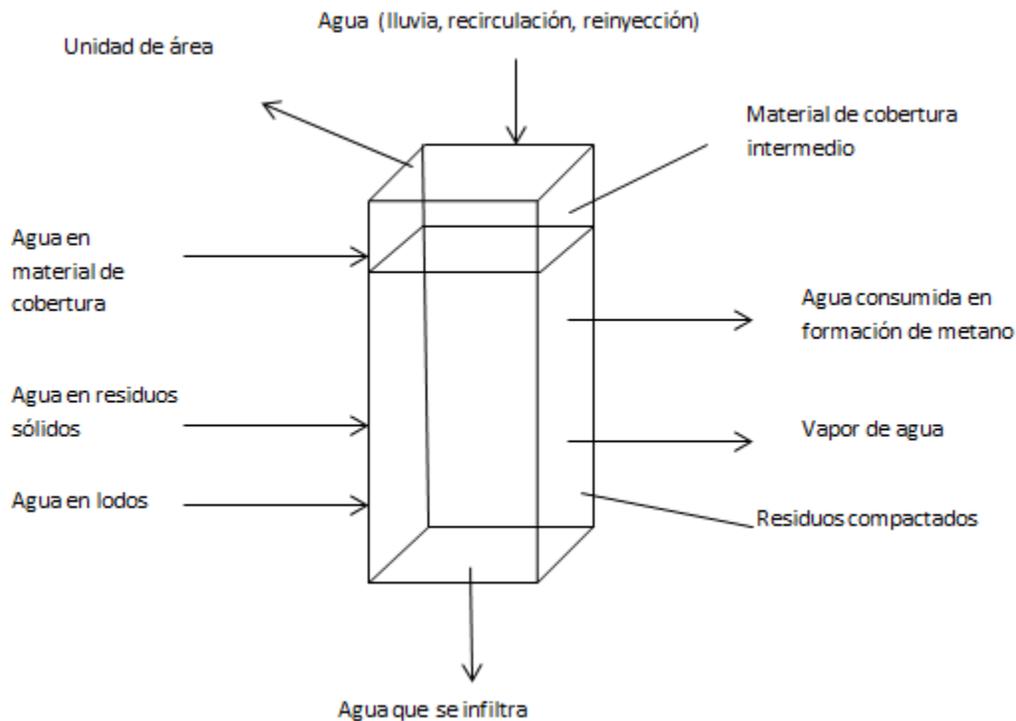


Ilustración 6 Componentes de un balance de agua para estimación de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Recurso hídrico en residuos sólidos: Agua que ingresa al sitio de disposición final con los residuos es la humedad que es inherente al material de desecho y a la humedad que ha sido absorbida de la atmósfera o de la lluvia (dadas las condiciones de humedad).

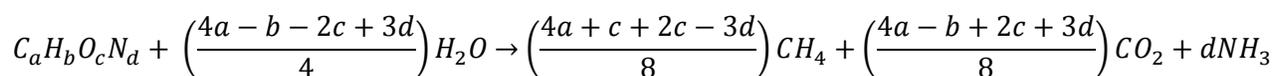
En climas secos, parte de la humedad inherente contenida en los desechos puede perderse, dependiendo de las condiciones de almacenamiento. El contenido de agua en los **RSU** residenciales y comerciales usualmente puede encontrarse entre el 15-35%.

Agua en el material de la cubierta: La cantidad de agua que ingrese con el material de cobertura depende del tipo y la fuente del material de cobertura y la estación del año. La cantidad máxima de humedad que puede estar

contenida en el material de cobertura se define por la capacidad de campo **FC** del material. La capacidad del campo se define como el líquido que permanece en el ritmo del poro sujeto a la atracción de la gravedad. Los valores típicos para los suelos varían del 6 al 12 por ciento para la arena a 23 a 31 por ciento para las margas⁵ arcillosas.

Agua que ingresa por la parte superior: Para la capa superior del sitio de disposición final, el agua de arriba corresponde a la precipitación que se ha filtrado a través del material de cobertura. Para las capas debajo de la capa superior, el agua de arriba corresponde al agua que se ha filtrado a través del sólido desperdicio arriba de la capa en cuestión. En sitios de disposición final con recirculación de lixiviados, el agua de arriba también incluirá el lixiviado recirculado. Uno de los aspectos más críticos en la preparación de un balance de agua para un sitio de disposición final es determinar la cantidad de lluvia que realmente se filtra a través de la capa de cubierta del sitio de disposición final.

Agua perdida en la formación de gas del relleno sanitario. El agua se consume durante el proceso anaeróbico de descomposición de los constituyentes orgánicos en los residuos sólidos orgánicos. La cantidad de agua consumida por la reacción de descomposición puede estimarse usando la Ecuación 2. La cantidad de agua consumida por pie cúbico de gas producido está típicamente en el rango de 0.012 a 0.015 lb H₂O / ft³ de gas, lo que equivale a 0.1922 a 0.2402 kgH₂O / m³.



Ecuación 2 Reacción estequiométrica para la determinación de gases generados en un relleno sanitario, usualmente metano, dióxido de carbono y amoníaco. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Agua perdida como vapor de agua. El gas de sitio de disposición final usualmente está saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que escapa del sitio de disposición final se determina suponiendo que el gas de sitios de disposición final está saturado con vapor de agua. El valor numérico de la masa de vapor de agua contenida por pie cúbico del gas de sitio de disposición final a 32.22 C° es aproximadamente 0.0352 kg H₂O / m³.

Agua perdida debido a la evaporación. Habrá algo de pérdida de humedad por evaporación los residuos se depositan en sitios de disposición final. Las cantidades no son grandes y a menudo se ignoran. La decisión de incluir estas variables en el análisis del balance hídrico dependerá de las condiciones locales.

Agua saliendo desde abajo. El agua que sale del fondo de la primera celda del sitio de disposición final se denomina lixiviado. Como se señaló anteriormente, el agua que sale de la parte inferior de la segunda y posterior las celdas corresponden al agua que ingresa desde arriba para la celda debajo de la celda en cuestión.

También serán requeridos los siguientes datos para aplicar la metodología de estimación propuesta por (Tchobanoglous & Kreith, 2002):

⁵ Tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente por calcita y arcillas.

Tabla 5 Variables requeridas para la estimación de lixiviados por medio de un balance hidrológico.

Variables	Unidades
Densidad de compactación de residuos	kg/m ³
Contenido de humedad	% en masa
Relación de cobertura de residuos	dmnl
Peso específico del suelo de cobertura (P_e)	kg/m ³
Cantidad de lluvia infiltrada	mm/(año.m ²)
Densidad del agua	kg/m ³
Altura de la celda (h)	m
Coefficiente de infiltración	dmnl

Las estimaciones de la generación de lixiviado se calculan por medio de las siguientes ecuaciones, de acuerdo a una metodología establecida por Tchobanoglous & Kreith, 2002; es importante establecer que cada ecuación estima un metro cuadrado (1 m²) de superficie del relleno sanitario.

$$Mc = P_e * r * h$$

Ecuación 3 Peso de material de cubierta utilizado. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

$$Mr = \rho_r * (1 - r) * h$$

Ecuación 4 Masa de residuos dispuesta. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

$$Mrs = Mr * \left(1 - \frac{\%hum}{100}\right)$$

Ecuación 5 Masa de residuos secos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

$$Mhr = Mr * \left(\frac{\%hum}{100}\right)$$

Ecuación 6 Masa de humedad en residuos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

$$Map = P * \left(\frac{\%hum}{100}\right)$$

Ecuación 7 Masa de agua de escorrentía que ingresa en la celda. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

Estas ecuaciones son el principio para conocer la cantidad de humedad que es retenida o liberada por los residuos dispuestos en la celda de disposición final para cada metro cuadrado de superficie del relleno, es importante resaltar que como las características de los residuos tales como densidad, humedad o composición no son homogéneas en la estimación del factor de campo existirá un porcentaje de error, pues existe una dificultad inherente en determinar estos componentes para cada descarga de residuos hecha en el sitio de disposición final.

10.1.5.1 Determinación de la masa de agua que ingresa a la celda por precipitación.

Hasta ahora el balance hidrológico únicamente nos ha dado los valores de humedad que ingresan a la celda por medio de los **RSU** depositados que usualmente y dependiendo el temporal del año pueden contener valores del 15% al 35% de su peso total como agua, sin embargo para la ecuación 8 es importante obtener datos climatológicos certeros. Para determinar la cantidad de agua que ingresa a una celda por medio de precipitaciones anuales se consiguen datos de las normales climatológicas más cercanas a la zona o se consigue un valor ponderado por la metodología de polígonos de Thiessen⁶, Isoyetas o algún otro método estadístico determinístico, el material de cobertura tendrá un rol fundamental en la cantidad de agua que ingresa a la celda de disposición final, puede dependerá del tipo de material de cobertura la cantidad de agua que terminara infiltrándose en la celda.

De acuerdo a un artículo publicado (Schosinsky & Losilla, 2000) en la Revista Geológica de América Central la infiltración se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$I = (1 - K_i)(K_p + K_v + K_{fc})P$$

Ecuación 8 Infiltración media anual. (Schosinsky & Losilla, 2000)

En donde K_i es igual al coeficiente de retención foliar el cual se estima entre 0.10-0.20 en bosques, para el caso del presente estudio se considera un valor de retención foliar de precipitación de 0.05 dado que usualmente en las celdas terminadas existe vegetación arbustiva secundaria, este factor podrá ser manejo por el usuario en función del sitio de disposición final del cual desee obtener un valor de infiltración adecuado.

⁶ Requiere el conocimiento de la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, identificando el área de influencia de cada pluviómetro, así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí y tratando que los triángulos sean lo más equiláteros posibles. A partir de allí se trazan líneas bisectoras perpendiculares a todos los lados de los triángulos, las que al unirse en un punto común dentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación. El área de influencia de cada estación considerada "Polígono" está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Tabla 6 Coeficientes de infiltración de acuerdo al tipo de suelo, pendientes y cobertura del suelo.

Componentes del coeficiente de infiltración	
Por textura del suelo K_{fc}	
Suelo	K_{fc}
Arcilla compacta impermeable	0.1
Limo y arcilla	0.2
Suelo limo-arenoso	0.4
Por pendiente	
K_p	
Plana (0.02%-0.06%)	0.3
Moderada (0.3%-0.4%)	0.2
Colinas (3-4%)	0.1
Por cobertura vegetal	
K_v	
Terrenos cultivados	0.1
Bosques	0.2

(Schosinsky & Losilla, 2000)

El usuario deberá determinar las variables que componen la composición de la ecuación de infiltración propuesta en función de las pendientes, cobertura vegetal del sitio y el tipo de suelo o material edafológico adyacente a la superficie del relleno sanitario.

Dado que el sitio de disposición final encuentra distintos niveles de pendientes en superficie se considerará un K_p de 0.05 ya que existen pendientes mayores a 4% en gran parte del sitio de disposición final, lo cual dificulta la infiltración en el sitio.

Una vez obtenido el dato de agua que se infiltra en la celda de disposición final del relleno sanitario se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar la masa que se infiltra:

$$M_{inf} = I * \rho$$

**Ecuación 9 Masa de agua que se infiltra en la celda de disposición final sobre m².
(Tchobanoglous & Kreith, 2002)**

Con esta ecuación y las propuestas por (Tchobanoglous & Kreith, 2002) es posible obtener el valor de la masa total dispuesta sobre un m² de superficie, es importante destacar que todas las estimaciones realizadas al momento se realizan para un metro cuadrado de superficie.

$$M_{tc} = M_c + M_r + M_{inf}$$

Ecuación 10 Masa total dispuesta en un metro cuadrado de celda. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Con este dato es posible obtener la masa de agua dispuesta por metro cuadrado la cual es necesaria para determinar el factor de campo que nos permitirá estimar la generación de lixiviados por metro cuadrado dispuesto, a continuación se presenta una ecuación para tal fin:

$$M_{AR} = M_{hr} + M_{inf}$$

Ecuación 11 Masa de agua presente en los residuos. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

10.1.5.2 Determinación del factor de campo y generación de lixiviados.

El factor de campo es un parámetro que nos permitirá determinar cuál es la capacidad de retención de agua de los residuos dispuestos, expresada como una fracción, a continuación se presentan las fórmulas para su determinación:

$$W = \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c$$

Ecuación 12 Peso medio (W) de la celda por metro cuadrado. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

$$FC = 0.6 - 0.55 \left(\frac{W}{4536 + W} \right)$$

Ecuación 13 Factor de campo (FC). (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

Una vez obtenido el valor del factor de campo se puede determinar la cantidad de agua retenida por los residuos sólidos dispuestos en la celda, por medio de la siguiente ecuación:

$$A_{rrs} = FC * M_{rs}$$

Ecuación 14 Masa de agua retenida por los residuos sólidos depositados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Para estimar la generación de lixiviados que dependen de la cantidad de agua que se infiltra sobre la celda, así como, la densidad de las capas que se utilizan como recubrimiento, la cantidad de residuos depositados, la superficie del relleno sanitario se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Lixiviado = M_{AR} - A_{rrs}$$

Ecuación 15 Ecuación para la estimación de lixiviados en un relleno sanitario. (Tchobanoglous & Kreith, 2002; Montejo, 2010)

Una vez obtenido el dato de generación de lixiviados es importante señalar que las estimaciones hasta ahora están planteadas para un m² de superficie en función de las variables las cuales deben ser obtenidas para cada sitio de disposición final para obtener la mayor certidumbre posible, por lo que el siguiente paso consiste en simplemente multiplicar la generación de lixiviados por m² por la superficie del relleno sanitario para el año en que se plantea obtener la estimación de la generación de lixiviados total:

$$\text{Lixiviado Total} = \text{Lixiviado} * \text{Superficie}$$

Ecuación 16 Lixiviados generados en un relleno sanitario.

El modelo adaptado para usar en el Estado de Jalisco corresponde a un modelo hidrológico y como bien se menciona cada modelo hidrológico presenta características distintas en función de los componentes y/o complejidad del sitio de disposición final del cual se desea obtener información, a continuación se presenta un diagrama realizado para un balance hidrológico usual:

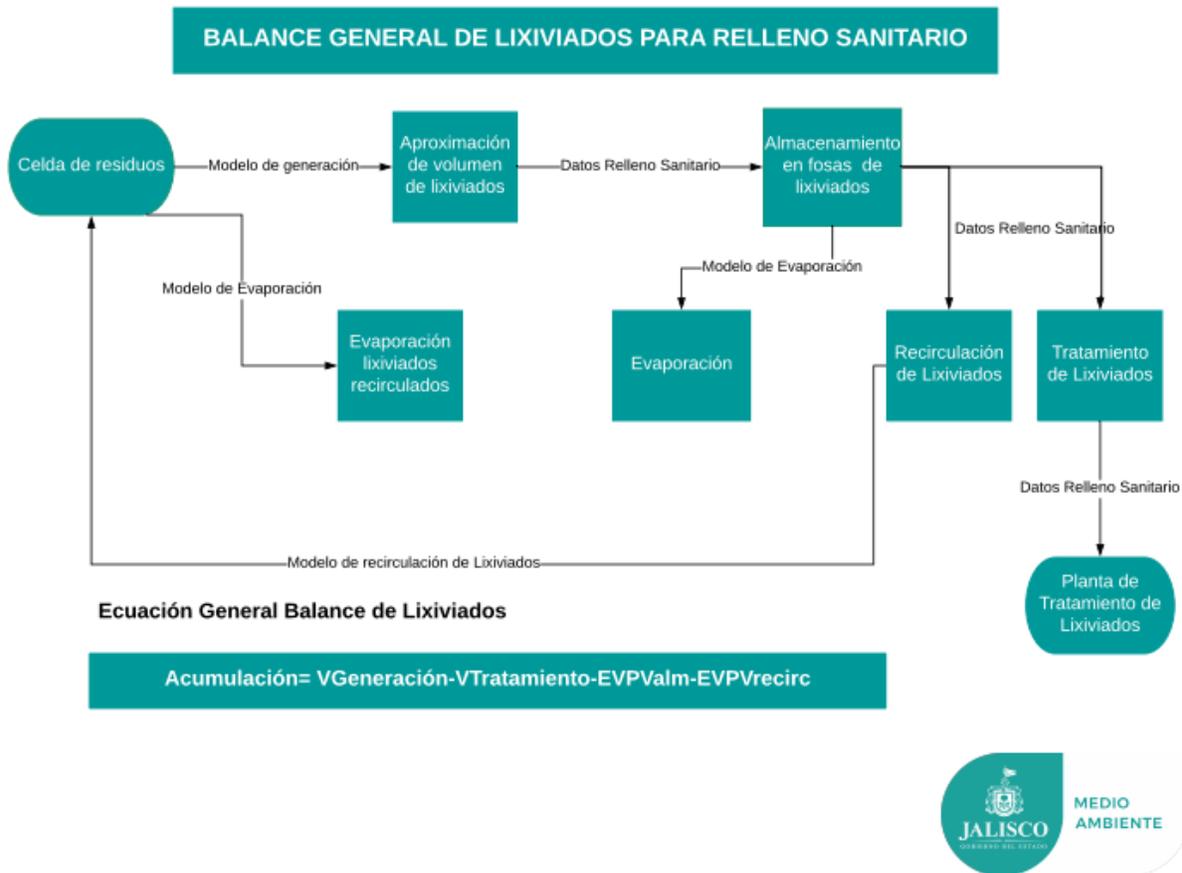


Figura 1 Diagrama de un balance general de lixiviados para relleno sanitario. (Elaboración propia)

El principio básico que interviene en un modelo de balance hidrológico es el siguiente:

$$\text{Acumulación} = V_{\text{Entrada}} - V_{\text{salida}}$$

Ecuación 17 Ecuación de un balance hidrológico general.

La acumulación por lo tanto será la cantidad de lixiviados generados en el relleno sanitario que no tiene una forma de migrar del sitio, por lo tanto será equivalente al volumen que debe considerarse para el manejo o tratamiento de lixiviados del relleno sanitario al que se está evaluando.

La ecuación general de un balance hidrológico también puede considerarse de la siguiente forma, una vez desglosados los términos de volúmenes de entrada y volúmenes de salida:

$$\text{Acumulación} = V_{\text{Lixiviados}} - V_{\text{evaporación}} - V_{\text{tratamiento}} - V_{\text{recirculación}} - V_{\text{reinyección}} - V_{\text{Gen biogás}} - V_{\text{almacenamiento}}$$

Ecuación 18 Ecuación general de un balance hidrológico desglosada.

Es por lo tanto indispensable que de encontrarse operativo el relleno sanitario deben mantenerse bitácoras que contemplen los aspectos diarios de los componentes de salida, el monitoreo de la recirculación, evaporación y reinyección diaria es fundamental para llevar a cabo un balance hidrológico adecuado y con el menor error posible.

8. Caso de estudio.

Como podemos ver existen una serie de modelos que pretenden estimar la generación de lixiviados, es importante destacar que todas las estimaciones presentan porcentajes de error y aunque existan modelos que se acerquen a la realidad, la complejidad de tener un factor de certidumbre adecuada radica en la cantidad de información requerida para adaptar un modelo para cada relleno sanitario.

Es importante destacar que los modelos de estimación de la generación de lixiviados empleados mundialmente han demostrado márgenes de error importantes en cuanto a los volúmenes generados y la generación real de acuerdo a estudios hechos por (Schroeder, Peyton, Mcenroe, & Sjostrom, 1988) en su manual de usuario del modelo **HELP** establecen que para métodos de balance de agua los errores pueden variar del orden del 83% al 154%.

A continuación se presenta un caso de aplicación de 4 modelos de estimación de generación lixiviados para un relleno sanitario (tipo A) ubicado en el Estado de Jalisco, que recibe aproximadamente 700 Ton diarias de residuos:

8.1. Aplicación del modelo Suizo.

El presente caso de aplicación de este modelo para la estimación de lixiviados se realizó para un periodo de tiempo determinado (2011-2030), y se utilizaron las siguientes variables de acuerdo a la ecuación 1:

1. Precipitación media anual P (mm/año) = 869mm/año (variable obtenida de las normales climatológicas de 1951-2010 de la estación meteorológica más cercana ubicada a aproximadamente 14.39km)⁷
2. Área superficial del relleno sanitario A (m²) = variable en función del año $A(t)$
3. Número de segundos en un año t (31,536,000 seg/año)

⁷ Para mayor precisión en la estimación de precipitación media anual, se recomienda incorporar la metodología conocida como polígonos de Thiessen.

4. Coeficiente que depende del grado de compactación de los residuos, cuyos valores recomendados por el modelo son los siguientes k (dmnl)
 - a. Débilmente compactados 0.4 a 0.7 Ton/m³
 - i. 0.25 a 0.50 para residuos débilmente compactados.
 - b. Fuertemente compactados > 0.7 Ton/m³
 - i. 0.15 a 0.25 para residuos fuertemente compactados

Para este caso dado que el relleno sanitario del caso de estudio tiene equipamiento específico para la compactación de residuos depositados en el relleno se optó por utilizar una k = 0.20, la cual es el factor de conversión de precipitación a generación de lixiviados. Con la información anterior, el modelo arrojó los siguientes resultados:

Tabla 7 Estimación de la generación de lixiviados por medio del modelo Suizo, para el caso de un relleno sanitario del Estado de Jalisco.

Modelo de estimación	Superficie (m ²)	Año	Generación de lixiviados estimada (m ³ /año)
Modelo SUIZO	108,905	2011	18,927.69
	121,886	2012	21,183.84
	134,868	2013	23,440.00
	147,849	2014	25,696.15
	160,830	2015	27,952.31
	173,812	2016	30,208.46
	186,793	2017	32,464.62
	188,076	2018	32,687.69
	189,360	2019	32,910.76
	198,304	2020	34,465.32
	207,249	2021	36,019.87
	216,193	2022	37,574.43
	225,138	2023	39,128.98
	231,101	2024	40,165.35
	237,064	2025	41,201.72
	243,027	2026	42,238.09
	248,990	2027	43,274.46
254,953	2028	44,310.83	
260,916	2029	45,347.20	
273,071	2030	47,459.74	

(Elaboración propia)

Esta metodología es una metodología para obtener una estimación de lixiviados bastante sencilla, sin embargo se detectó que no incorpora diversos elementos relacionados a la generación de lixiviados en sitios de disposición final como:

- a. Capacidad de campo o factor de absorción de humedad de los residuos.

- b. Gasto de agua en la generación de biogás en el sitio de disposición final.
- c. No influye el tipo de material de cobertura en el sitio de disposición final, lo cual es un factor determinante en la infiltración del agua que ingresa a las celdas de disposición final por medio de precipitación.
- d. No toma en cuenta valores de diseño del sitio de disposición a excepción de la superficie.

Como podemos apreciar el modelo de estimación Suizo permite de manera general, tener un acercamiento adecuado a la generación de los lixiviados pero no debe considerarse como determinante o concluyente.

8.2. Aplicación de balance hidrológico simplificado.

Este balance hidrológico para la estimación de lixiviados se conoce como simplificado debido a que únicamente se tomaron parámetros generales para la determinación del balance de lixiviados, este modelo no considera pérdidas de agua por la generación de biogás en el relleno sanitario, y va generando iteraciones para cada año de estimación de manera que estima la generación de lixiviados para cada año en función de los residuos depositados en el relleno sanitario. Sin embargo este modelo conlleva una sobre estimación de la generación de lixiviados pues asume una superficie de disposición final homogénea equivalente a la totalidad de la superficie de las celdas de disposición final existentes en el relleno sanitario, cuando en la realidad el llenado de una celda de disposición final se va realizando por etapas de manera que la superficie de disposición final se modifica anualmente.

En el caso de estudio del sitio de disposición final se utilizó las siguientes variables:

Tabla 8 Variables para el caso de referencia de un balance hidrológico simple. (Elaboración propia)

Variables para el caso de referencia de balance hidrológico simple	
Densidad de residuos (ρ_r) (kg/m ³)	750
Contenido de humedad % en masa	30%
Relación de cobertura de residuos dmnl	0.1
*Peso específico del suelo de cobertura (ρ_s) (kg/m ³)	1270
**Cantidad de lluvia infiltrada (mm/m ²)	200
Densidad del agua a Temperatura media anual (ρ_{agua}) (kg/m ³)	1000
Altura de la celda al final del año de operación (m/año)	4.5
Coefficiente de Infiltración dmnl	0.333

Los datos de valores de referencia fueron obtenidos de información proporcionada por la empresa, de acuerdo a la disposición final diaria, el equipo utilizado para compactar, así como de caracterizaciones hechas a la composición de los residuos; es importante destacar que una gran parte de error en la estimación de la generación de lixiviados proviene precisamente de que las variables son consideradas como constantes, cuando en la realidad estas fluctúan para cada m² para cada día, sin embargo, la dificultad de obtener los valores diarios para cada metro cuadrado de cada una de las variables es uno de los mayores retos a la hora de generar estimaciones de generación de lixiviados que sean confiables.

El valor de infiltración pluvial se obtuvo utilizando las ecuaciones 8.0 y los valores de la tabla 7.0, a continuación se desglosan los procesos:

$$I = (1 - 0.05)(0.15 + 0.0 + 0.1)P$$

Ecuación 19 Obtención de dato de infiltración para estimación de lixiviados.

Para el caso del sitio en específico la variable predominante y lo que genera sesgo en la información resultante es la superficie que no se modifica a través de cada iteración anual, la cual fue de 273,071 m², los resultados fueron los siguientes:

Tabla 9 Resultados de un balance hídrico simple. (Elaboración propia)

Modelo de estimación	Superficie (m ²)	Año	Generación de lixiviados estimada (m ³ /año)
Modelo de balance hídrico simple	273,071.00	2011	49,227.85
		2012	204,589.58
		2013	386,877.20
		2014	585,681.83
		2015	795,775.16
		2016	1,014,120.52
		2017	1,238,783.92
		2018	1,468,451.77
		2019	1,702,188.32
		2020	1,939,301.87
		2021	2,179,265.91
		2022	2,421,669.83
		2023	2,666,186.97
		2024	2,912,552.99
2025	3,160,550.81		

8.3. Aplicación de modelo HELP

El presente modelo se puede descargar desde la página web oficial de la EPA utiliza un emulador para equipos de 64 bit y se incluye un manual que describe paso a paso el proceso de instalación del programa que ejecuta el

modelo (Walkthrough to Install and Operate the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model v3.07, 2017)⁸

La aplicación de este modelo sin duda es la más compleja por la cantidad de información que requiere. La cantidad de tiempo que se invierte al ingresar los datos de modelación de manera manual (para el caso de ciudades en México) es sin duda el mayor reto que podría enfrentar un usuario que pretenda utilizar este modelo para la estimación de la generación de lixiviados en un sitio de disposición final, pues es necesario ingresar datos de tales como:

- Precipitación diaria para el tiempo que desee modelar.
- Evapotranspiración diaria para el tiempo que desee modelar.
- Temperatura máxima diaria para el tiempo que desee modelar.

Los parámetros de diseño utilizados en el caso práctico fueron obtenidos de la estación climatológica más cercana al sitio, pero la falta de datos disponibles en las estaciones permitió estimar la generación únicamente para los años en los que se contaba con datos diarios de precipitación, lo que presentó una problemática para la comparación de las distintas corridas de modelos pues los datos que fueron utilizados en las estimaciones de otros modelos corresponden a años recientes.

A continuación se presentan los resultados arrojados por el modelo:

Tabla 10 Resultados del modelo HELP, para el caso de estudio (Schroeder, et al., 1994)

Modelo de estimación	Superficies (m ²)	Años	Generación de lixiviados estimada (m ³ /año)
Modelo HELP	108,905	1998	93,595.19
	121,886	1999	115,521.89
	134,868	2000	28,185.42
	147,849	2001	57,147.89
	160,830	2002	47,609.14
	173,812	2003	39,527.14
	186,793	2004	79,282.82
	188,076	2005	40,605.31
	189,360	2006	26,862.40
	198,304	2007	40,854.39
	207,249	2008	99,295.68
	216,193	2009	46,707.23
225,138	2010	69,104.99	

⁸ El manual para la instalación de este modelo, así como el programa con el modelo y los manuales de ingeniería del mismo pueden ser descargados en la siguiente liga <https://www.epa.gov/land-research/hydrologic-evaluation-landfill-performance-help-model>

8.4. Aplicación de balance hidrológico con valores morfológicos del relleno sanitario.

Este balance hidrológico para la estimación de lixiviados se conoce como morfológico debido a que utiliza parámetros anuales de superficie de disposición final, lo que aumenta la certidumbre de las estimaciones, se tomaron parámetros generales para la determinación del balance de lixiviados. Este modelo sí considera pérdidas de agua por la generación de biogás en el relleno sanitario, y va generando iteraciones para cada año de estimación de manera que estima la generación de lixiviados para cada año en función de los residuos depositados en el relleno sanitario, por lo tanto este modelo no genera una sobre estimación de la generación de lixiviados como es el caso del modelo de balance hidrológico simplificado pues asume una superficie de disposición final que cambia año con año, y es equivalente a la totalidad de la superficie de las celdas de disposición final existentes en el relleno sanitario.

El caso de aplicación del sitio de disposición final se utilizó las siguientes variables:

Tabla 11 Variables para el caso de referencia de un balance hidrológico con valores morfológicos. (Elaboración propia)

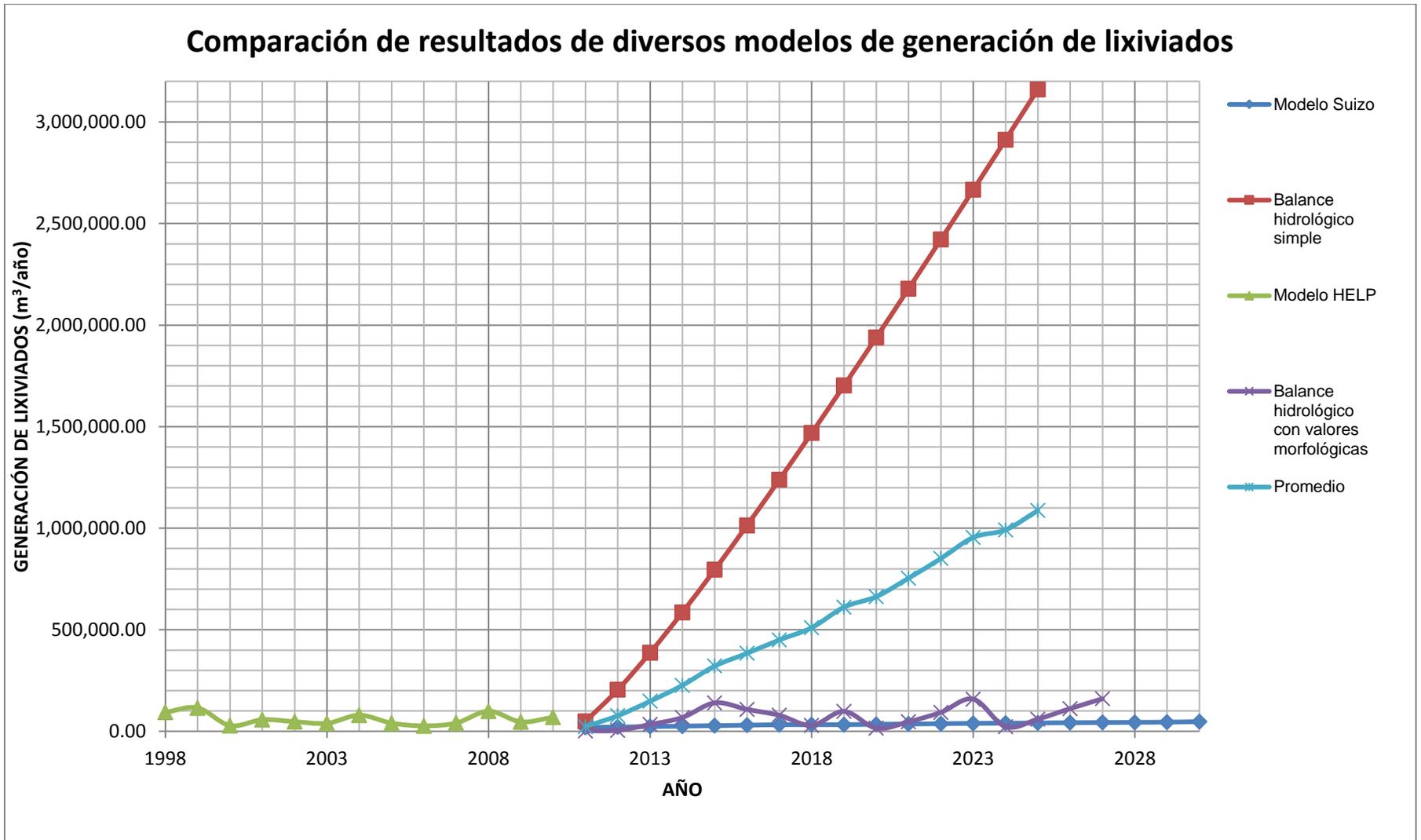
Variables para el caso de referencia de balance hidrológico simple	
Densidad de residuos (ρ_r) (kg/m ³)	750
Contenido de humedad % en masa	30%
Relación de cobertura de residuos dmnl	0.1
*Peso específico del suelo de cobertura (ρ_s) (kg/m ³)	1270
**Cantidad de lluvia (mm/m ²)	200
Densidad del agua a Temperatura media anual (ρ_{agua}) (kg/m ³)	1000
Altura de la celda al final del año de operación (m/año)	4.5
Densidad promedio del lixiviado (kg/m ³)	
Volumen piscinas de lixiviados L	5863.6
Volumen de lixiviados tratados L/año	0
Coefficiente de Infiltración dmnl	0.2

Para el caso del sitio en específico la variable predominante y lo que genera sesgo en la información resultante es la superficie que no se modifica a través de cada iteración anual, la cual fue de 273,071 m², los resultados fueron los siguientes:

Tabla 12 Resultados de modelo hidrológico con variables morfológicas. (Elaboración propia)

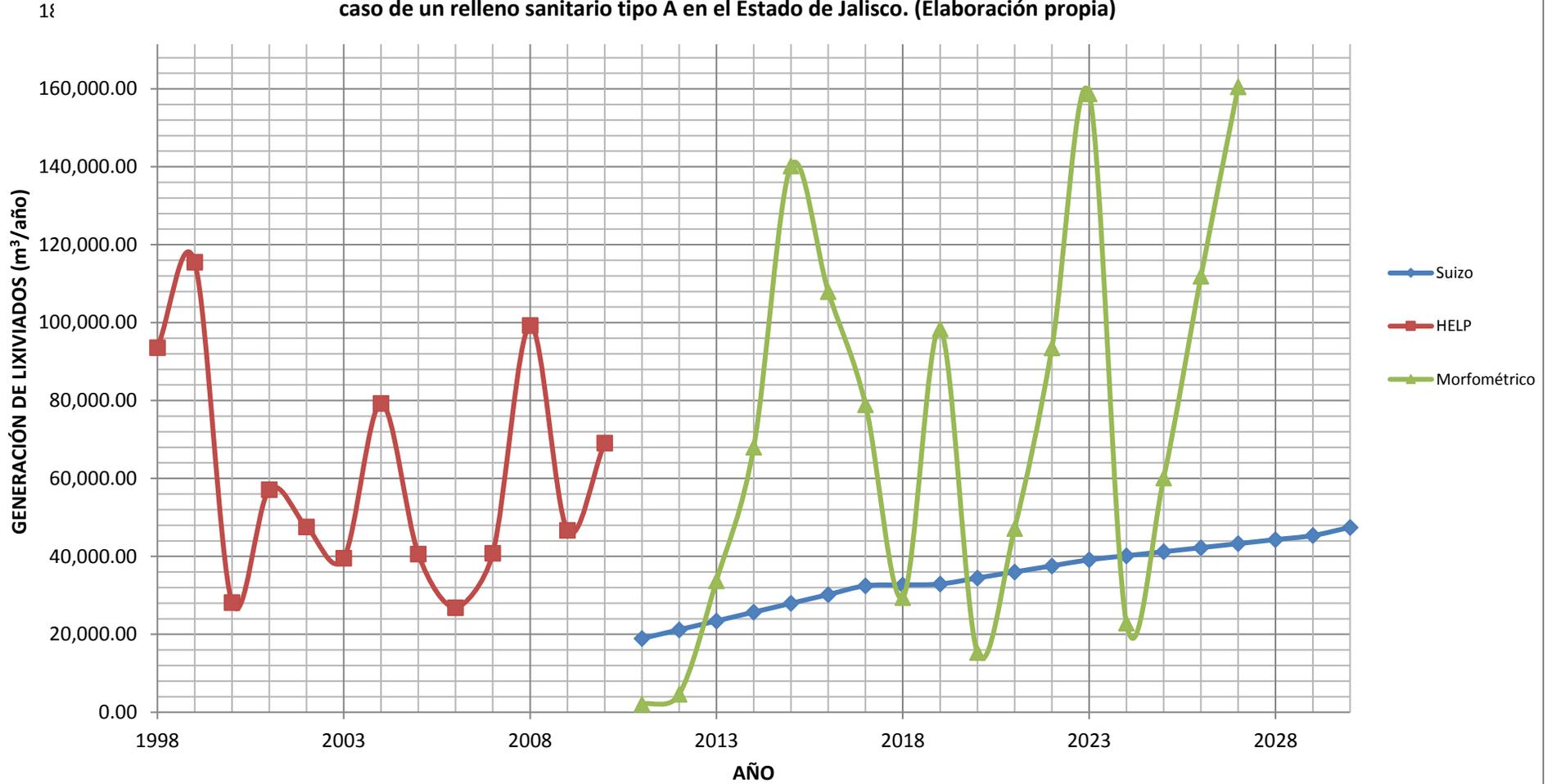
Modelo de estimación	Superficies (m ²)	Años	Generación de lixiviados estimada (m ³ /año)
Modelo Balance Hidrológico con valores Morfológicos	108,905	2011	2,114.00
	121,886	2012	4,636.00
	134,868	2013	33,763.00
	147,849	2014	68,065.00
	160,830	2015	140,231.00
	173,812	2016	107,965.00
	186,793	2017	78,949.00
	188,076	2018	29,423.00
	189,360	2019	98,426.00
	198,304	2020	15,367.00
	207,249	2021	47,182.00
	216,193	2022	93,528.00
	225,138	2023	158,706.00
	231,101	2024	22,927.00
	237,064	2025	60,127.00
	243,027	2026	111,898.00
	248,990	2027	160,555.00

9. Análisis de resultados de caso de estudio.



Gráfica 3 Comparación de resultados obtenidos para el caso de aplicación de diversos modelos para la estimación de la generación de lixiviados para un relleno sanitario tipo A del Estado de Jalisco.

Gráfica 4 Comparación de resultados generados por diversos modelos de estimación de la generación de lixiviados para el caso de un relleno sanitario tipo A en el Estado de Jalisco. (Elaboración propia)



Como se puede apreciar en la Gráfica 3 los resultados de los modelos difieren entre sí (además del período de tiempo que se consideró en el empleo de cada modelo), en particular los resultados del modelo de balance hidrológico simple, que se salen fuera del rango de generación de lixiviados que arrojaron los otros modelos. Con base en lo anterior, se generó la Gráfica 4 para apreciar de manera más precisa los resultados obtenidos de los modelos que arrojan valores dentro del mismo orden de estimación. La diferencia de años en las corridas como se mencionó anteriormente, difieren dada la cantidad de datos obtenidos de las normales climatológicas que contienen datos diarios de precipitación y evapotranspiración los cuales contienen un importante sesgo y dificultaron la aplicación del modelo HELP para que coincidieran con los años de análisis del modelo Suizo y los modelos de balance hidrológicos.

Según se puede apreciar en la Gráfica 4, el modelo Suizo es el modelo que estima una generación de lixiviados menor a lo largo de los años, sin embargo dada la cantidad de variables que emplea, debería considerarse un modelo a utilizar cuando se carecen de recursos o información climatológica; por otra parte la estimación de la generación de lixiviados entre el modelo HELP y el balance hidrológico morfológico no difieren tan significativamente una de la otra y en teoría la complejidad de ambos modelos permea para que estas estimaciones puedan considerarse como las más cercanas a la realidad, sin embargo existe todavía sesgo en la generación de estas estimaciones, pues al ser estimaciones tampoco deben considerarse como contundentes. Como ya se mencionó anteriormente la complejidad de utilizar el modelo HELP radica en la cantidad de información que este requiere la cual no se encuentra disponible en la mayor parte de las estaciones meteorológicas del Estado.

Existe una ventana de oportunidad para calibrar el modelo de balance hidrológico morfológico con datos de generación de lixiviados medidos en campo y así determinar el porcentaje de error que contienen estas estimaciones. De esta forma se cuenta con una herramienta que pueda mejorarse año con año y permita a los operadores de rellenos sanitarios tanto públicos, públicos descentralizados o privados utilizar una misma herramienta que logre los siguientes objetivos:

- I. Unificar los criterios de estimación para la generación de lixiviados en rellenos sanitarios del Estado de Jalisco.
- II. Desarrollar estimaciones confiables de la estimación de la generación de lixiviados para rellenos operativos en el Estado de Jalisco o para rellenos sanitarios que pretendan construirse a corto o mediano plazo.
- III. Evitar las externalidades asociadas a la generación de lixiviados en rellenos sanitarios.
- IV. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano, garantizando la calidad del agua de los cuerpos de agua cercanos a los rellenos sanitarios.

9.1. Ventajas y desventajas de los modelos aplicados.

MODELO DE ESTIMACIÓN DE LIXIVIADOS	ENTRADAS	SALIDAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Modelo Suizo	Precipitación media anual (mm/año)	Generación de Lixiviados (L/s)	Son estimaciones relativamente fáciles de llevar a cabo	Poca certidumbre en las estimaciones dada la falta de diversos criterios que se relacionan a la generación de lixiviados
	Área superficial del relleno (m ²)			
	Número de segundos en un año (31,536,000.00)			
	Coefficiente del grado de compactación de residuos de 400kg/m ³ a 700kg/m ³ se estima una producción de 25% a 50%, compactación mayor a 700kg/m ³ se estima una producción entre 15% y 25%			
Modelo balance hidrológico simple	Densidad de residuos (kg/m ³)	Lixiviado producido (m ³ /año)	Cada modelo de balance hidrológico es distinto por lo que puede adecuarse a las condiciones de cada sitio	Requiere información detallada del diseño del sitio, así como de las celdas diarias. Puede generar sobre estimación
	Contenido de humedad (%)			
	Relación de cobertura (dmnl)			
	Peso específico del material de cobertura (kg/m ³)			
	Cantidad de lluvia infiltrada (mm/año)	Masa de residuos depositada (Ton/año)		

Manual técnico para la gestión de lixiviados en rellenos sanitarios del Estado de Jalisco

MODELO DE ESTIMACIÓN DE LIXIVIADOS	ENTRADAS	SALIDAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Altura de la celda al final del año operativo (m/año)			
Modelo HELP	Profundidad de zona de evaporación (cm)	Promedios diarios de precipitación, evapotranspiración, escorrentías, infiltración y superficie de almacenamiento. (mm, m ³)	Cuenta con alta certidumbre, al ser un modelo generado por la US EPA	Requiere de información climatológica diaria, no siempre disponible en las bases de datos del sistema meteorológico nacional
	Índice máximo de área foliar (1-5)			
	Inicio y termino de la temporada de crecimiento foliar			
	Velocidad de viento promedio (km/hr)			
	Humedad relativa por cuartos del año (%)			
	Datos de Precipitación 1 a 100 años (mm)			
	Datos de Temperatura Promedio a 100 años (C°)			
	Datos de Evapotranspiración promedio 1 a 100 años			
	Datos de diseño de relleno (superficie, % de pendientes)			
	Diseño de cada capa del relleno sanitario			

MODELO DE ESTIMACIÓN DE LIXIVIADOS	ENTRADAS	SALIDAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	(Capacidad de campo, características del material, humedad inicial, entre otros)			
Modelo de balance hidrológico morfológico	Densidad de residuos (kg/m ³)	Lixiviado producido (m ³ /año)	Se adecua a las condiciones de cada sitio y es posible ingresar información relevante	Requiere personal técnico capacitado para generar las estimaciones, que adecuó las condiciones del sitio a una herramienta en excel
	Contenido de humedad (%)			
	Relación de cobertura (dmnl)			
	Peso específico del material de cobertura (kg/m ³)			
	Cantidad de lluvia infiltrada (mm/año)	Masa de residuos depositada (Ton/año)		
	Altura de la celda al final del año operativo (m/año)			
	Superficie para cada año de modelación (m ²)			

(Recopilación de modelos descritos en el capítulo 11)

10. Manejo e infraestructura para el control de lixiviados.

Una vez estimada la cantidad de lixiviados a generarse en un relleno sanitario, es importante contemplar la infraestructura necesaria para su control, manejo o tratamiento según sea el volumen de generación estimado.

El manejo de los lixiviados, en caso de que se forme, es clave para eliminar el potencial de un relleno sanitario para contaminar los acuíferos subterráneos o las aguas superficiales. Se han utilizado varias alternativas para manejar los lixiviados recolectados en los sitios de disposición final, incluidos:

- Recirculación de lixiviados
- Evaporación de lixiviados
- Tratamiento seguido de la eliminación por aspersión
- Tratamiento de lixiviados con humedales
- Descarga a las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales

10.1. Recirculación de lixiviados.

Un método efectivo para el tratamiento de lixiviados es recircular el lixiviado a través del sitio de disposición final. La velocidad a la que se recircula el lixiviado influirá en el proceso de descomposición de la materia orgánica (Watts & Charles, 1999). Un estudio europeo encontró que las tasas de recirculación más altas mejoran la solubilización de los residuos recientes y establecen condiciones metanogénicas más rápidamente. Los beneficios de las tasas de recirculación más altas deben equilibrarse con las preocupaciones operacionales asociadas con las limitaciones hidráulicas que pueden experimentarse a tasas más altas.

El enrutamiento hidráulico a través del sitio de disposición final es la consideración más importante. La investigación muestra que no es posible ver un sitio de disposición final como homogéneo o isótropo. Debe considerarse la canalización, la permeabilidad variable de los desechos y el efecto de las capas de suelo al recircular el lixiviado. Se han producido fallas en el sistema donde fluyó el lixiviado a través del sitio de disposición final lateral cubre y / o se ha acumulado en la superficie. El ingeniero de diseño debe proporcionar sistemas operativos flexibles y disposiciones para el almacenamiento de lixiviados fuera del sitio de disposición final. Durante el funcionamiento del sitio, debe evitarse la cobertura diaria e intermedia poco permeable o eliminado antes de que se coloque otra capa de residuos. Infiltración en el sitio y almacenamiento de agua dentro del sitio de disposición final debe ser administrado adecuadamente para agregar agua al sitio cuando se desee y limite el contenido de agua cuando el contenido de humedad se vuelve excesivo (Reinhart, 1996).

Durante las primeras etapas de la operación del sitio de disposición final, el lixiviado contendrá cantidades significativas de sólidos disueltos totales (**SDT**), **DBO₅**, **DQO**, nutrientes y metales pesados. Cuando el lixiviado se recircula, los constituyentes se atenúan por la actividad biológica y por otros químicos y las reacciones físicas que ocurren dentro del sitio de disposición final. Por ejemplo, los ácidos orgánicos simples presentes en el lixiviado se convertirán en metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 . Debido al aumento del pH dentro del relleno sanitario cuando se produce CH_4 , los metales se precipitarán y se retendrán dentro del relleno sanitario. Un beneficio adicional de la recirculación de lixiviados es la recuperación del gas de sitio de disposición final que contiene CH_4 .

Típicamente, la tasa de producción de gas es mayor en los sistemas que cuentan con recirculación de lixiviados. Para evitar la liberación incontrolada de gases de sitio de disposición final cuando el lixiviado se recicla para el tratamiento, el sitio de disposición final debe estar equipado con un sistema de recuperación de gases. En última instancia, será necesario recolectar, tratar y eliminar el lixiviado residual. En grandes sitios de disposición final será necesario proporcionar instalaciones de almacenamiento de lixiviados, como cárcamos o fosas de almacenamiento. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

10.2. Evaporación de lixiviados.

Uno de los sistemas de gestión de lixiviados más simples implica el uso de estanques de evaporación de lixiviados revestidos con geomembrana o capas que garanticen la impermeabilidad. El lixiviado que no se evapora se rocía en las celdas terminadas del relleno sanitario. En lugares con altas precipitaciones (usualmente sitios cercanos a la costa del Estado o con climas tropicales), la instalación de almacenamiento de lixiviados revestidos está cubierta con una geomembrana durante la temporada de invierno para excluir las precipitaciones. El lixiviado acumulado se elimina por evaporación durante los cálidos meses de verano al destapar la instalación de almacenamiento y al rociar el lixiviado en la superficie del sitio de disposición final en funcionamiento y completado. Los gases olorosos que pueden acumularse bajo la cubierta superficial se ventilan a un compost o filtro de suelo (Bohn & Bohn, 1988; Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). Durante el verano, cuando se descubre el estanque, es posible que se requiera aireación en la superficie para controlar los olores. Si el estanque de almacenamiento no es grande, puede dejarse cubierto todo el año. Otro ejemplo involucra el tratamiento del lixiviado (generalmente biológico) con el almacenamiento en el invierno y la eliminación por aspersión del efluente tratado en tierras cercanas durante el verano. Si hay suficiente tierra disponible, la fumigación de efluentes se puede llevar a cabo de manera continua, incluso cuando está lloviendo.

10.3. Tratamiento de lixiviados.

Cuando no se usa la recirculación y la evaporación de lixiviados, y la eliminación directa de lixiviados a una instalación de tratamiento no es posible, se puede realizar alguna forma de pretratamiento o tratamiento. Debido a que las características del lixiviado recolectado pueden variar ampliamente, se han utilizado varias opciones para el tratamiento del lixiviado. Las principales operaciones y procesos de tratamiento biológico y físico / químico utilizados para el tratamiento de lixiviados dependerán en gran medida de los contaminantes que se desean remover del líquido.

El tipo de instalaciones de tratamiento utilizadas dependerá principalmente de las características de los lixiviados y de forma secundaria de la ubicación geográfica y física del sitio de disposición final. Las características de lixiviado de preocupación incluyen **SDT**, **DQO**, **SO₄⁻²** y metales pesados, así como constituyentes tóxicos inespecíficos. El lixiviado que contiene concentraciones extremadamente altas de **SDT** (por ejemplo, > 50,000 mg / L) pueden ser difícil de tratar biológicamente. Los altos valores de **DQO** favorecen los procesos de tratamiento anaeróbico, ya que el tratamiento aeróbico es costoso. Las altas concentraciones de sulfato pueden limitar el uso de procesos de tratamiento anaeróbico debido a la producción de olores a partir de la reducción biológica de sulfato a sulfuro. La toxicidad por metales pesados también es un problema en muchos procesos de tratamiento biológico. Otra pregunta importante es qué tan grandes deben ser las instalaciones de tratamiento.

Las instalaciones de tratamiento dependerán del tamaño del sitio de disposición final y de la vida útil esperada. La presencia de constituyentes tóxicos no específicos es a menudo un problema con los sitios de disposición final más antiguos que recibieron una variedad de desechos, antes de que se establecieran las reglamentaciones ambientales que rigen la operación de los sitios de disposición final.

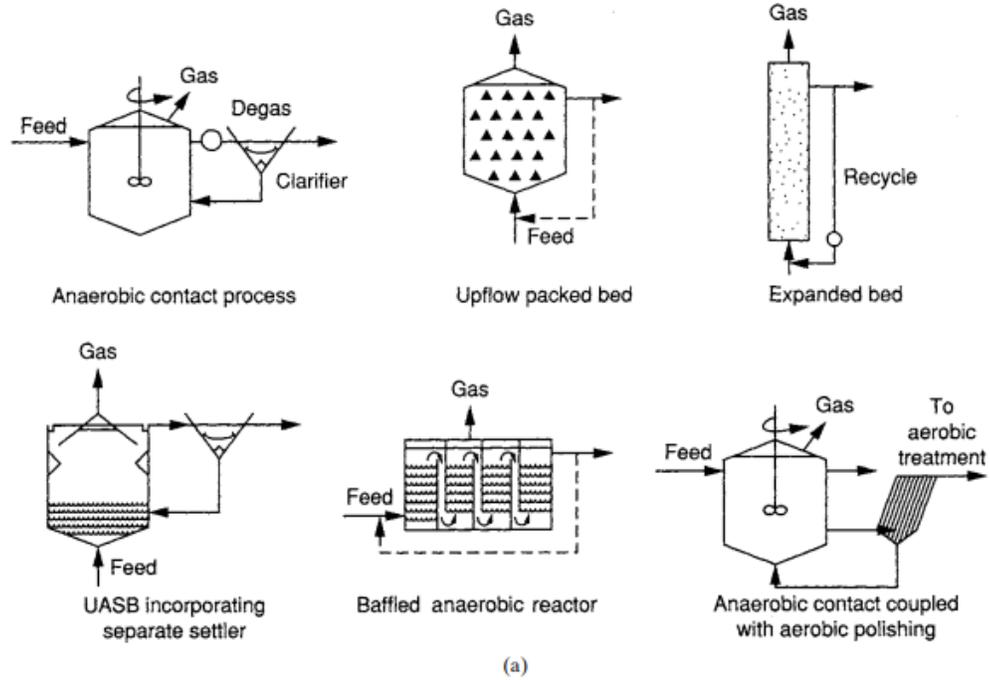


Ilustración 7 Proceso anaerobio de tratamiento de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

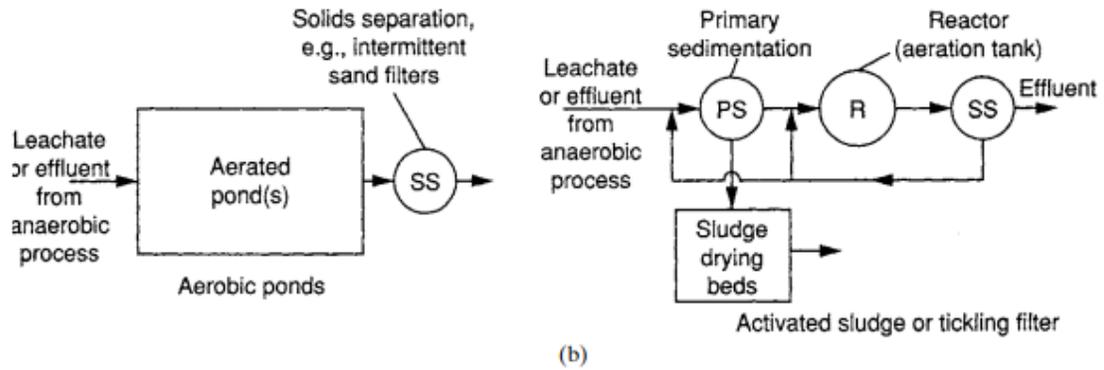


Ilustración 8 Proceso aerobio de tratamiento de lixiviados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

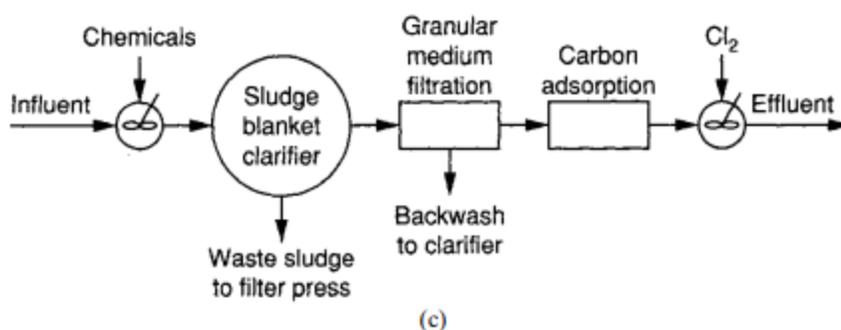


Ilustración 9 Proceso de tratamiento químico para la remoción de metales pesados y contaminantes orgánicos seleccionados. (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

10.4. Descarga a planta municipal de tratamiento de aguas residuales.

En aquellos lugares donde se encuentra un relleno sanitario cerca de un sistema municipal de tratamiento de aguas residuales, y si el diseño del sistema de tratamiento lo permite, el lixiviado puede ser descargado ahí. En muchos casos, será necesario aplicar algún pre tratamiento, o tratamiento primario para reducir el contenido orgánico antes de que el lixiviado se pueda descargar.

De acuerdo a (Tchobanoglous & Kreith, 2002) en los países en vías de desarrollo, donde las prácticas de residuos no controladas han dado lugar a la construcción de grandes rellenos sanitarios, la cantidad de lixiviados que se generan está generando importantes preocupaciones. Como estas instalaciones se están convirtiendo en sitios de disposición final convencionales, se ha descubierto que las cantidades de lixiviado que ahora requieren gestión y recolección son a menudo subestimadas. Esto ha resultado en más lixiviados que necesitan tratamiento de lo que se había previsto originalmente, sobrecarga de las instalaciones de tratamiento de lixiviados y, en algunos casos, contaminación significativa de los recursos hídricos superficiales o sub superficiales.

10.5. Diseño de redes de distribución de lixiviados

Todos los tipos de sistemas de revestimiento base (sub superficiales de baja permeabilidad, revestimiento de arcilla o geo membranas) están directamente cubiertos por una capa de material del curso (por ejemplo, grava), Dentro del sistema de recolección de lixiviados, las tuberías de drenaje deben instalarse en puntos bajos locales (consulte la Ilustración 10). La profundidad del sistema de recolección de lixiviados debe ser como mínimo de 50 cm con una conductividad hidráulica superior a 10^{-3} m/s y con una pendiente de al menos 2%. Una capacidad suficiente de drenaje de agua en el fondo del relleno sanitario es crucial en climas tropicales ya que las tasas de precipitación y, por lo tanto, las tasas de generación de lixiviados son altas, especialmente durante la estación de lluvias. Un drenaje insuficiente para la conducción del lixiviado generado, causaría zonas de residuos saturados de agua (remanso), en el fondo del sitio de disposición final, lo que reduciría la estabilidad mecánica y pone en peligro la estabilidad del relleno sanitario generando deslaves o derrames de residuos y/o lixiviados. Se han observado eventos de deslizamiento en sitios de disposición final después de los eventos de lluvias intensas. (Munawar & Fellner, 2013)

Existen comúnmente dos tipos de sistemas de drenaje de lixiviados:

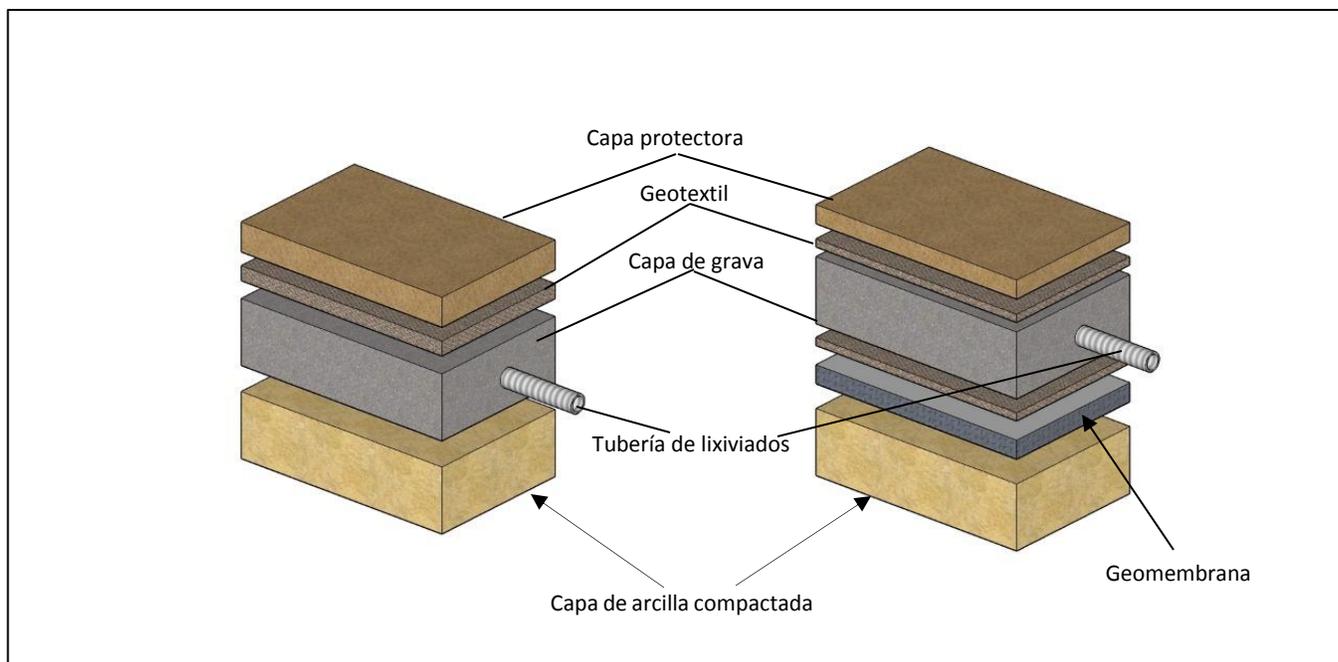


Ilustración 10 Diagrama esquemático de dos tipos de sistemas de drenaje a) sistema de una sola línea b) sistema de revestimiento compuesto. (Munawar & Fellner, 2013)

De acuerdo a (Munawar & Fellner, 2013) por encima de la capa de drenaje debe colocarse una capa protectora (de residuos triturados, compost u otros desechos de grano más pequeño) para garantizar la funcionalidad a largo plazo de la capa de drenaje (no se pueden mover partículas de desecho a la capa de drenaje o compactación). Las primeras capas de desechos destruirían la capa de drenaje y las tuberías de drenaje). La conductividad hidráulica de la capa protectora debe ser muy superior a 1×10^{-5} m/s para evitar la retención de lixiviados en la masa residual. Además, se puede colocar un geotextil entre la capa protectora y la capa de drenaje. Este geotextil también evita que las partículas de grano pequeño migren a la capa de grava y posteriormente obstruyan esta capa. El espesor recomendado de la capa protectora está en el rango de 30 a 50 cm. Los residuos deben ser depositados y compactados sobre esta capa.

10.6. Determinación de volumen de fosas requerido

Aproximación recomendada por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos ISWA

La capacidad requerida de un solo estanque de tratamiento de lixiviados puede determinarse simplemente utilizando la siguiente fórmula, que considera la tasa de precipitación diaria máxima, la relación entre lixiviado y precipitación, el área de superficie del sitio de disposición final y el tiempo de residencia requerido del lixiviado en el estanque:

$$V = \frac{P_{max} r A t_{ops}}{1000} * 0.5$$

Ecuación 17 Capacidad requerida de una fosa de lixiviado. (Munawar & Fellner, 2013)

Dónde:

V: Volumen de la fosa o cárcamo de lixiviados (m^3)

P_{max} : Precipitación máxima diaria (mm/día) para una tormenta diseño de un periodo de t_{ops}

r : radio entre la cantidad de lixiviados generados y la cantidad de lluvia máxima para un periodo de tiempo determinado (t_{ops})

A: Superficie de relleno sanitario

t_{ops} : Tiempo de residencia óptimo de lixiviados en la fosa de contención o tratamiento

1000: factor de conversión de (mm) a (m)

0.5: factor que considera que únicamente 50% del agua de lluvia infiltrada es directamente descargada como lixiviados

Como podemos apreciar esta fórmula nos pide cuantificar la cantidad de lixiviado que se genera para encontrar la relación entre la cantidad de lixiviados generada y la cantidad de lluvia máxima para un periodo de tiempo determinado (cantidad de lluvia máxima diaria en temporada de lluvias), esta relación puede estimarse de forma general de la siguiente manera:

$$r = \frac{\text{Lixiviados } \left(\frac{L}{m^2}\right)}{\text{Precipitación } (mm)}$$

Ecuación 18 Ecuación para estimar la relación entre la generación de lixiviados y la precipitación. (Elaboración propia)

Dada que la precipitación está dada en mm no es necesario tener un factor de conversión en cuenta pues mm de precipitación equivalen a L/m^2 .

11. Conclusiones

Siendo la disposición final la última alternativa para el destino de los residuos, e incluso existiendo esquemas de operación de rellenos sanitarios “secos”, en el presente Manual se refieren un gran número de herramientas que permiten asegurar una gestión adecuada de lixiviados, existiendo aún muchos ejemplos de estas obras en el Estado de Jalisco.

Existen diversos factores en la selección del sitio, diseño del relleno, construcción y operación que tienen influencia sobre la generación de lixiviados y que preferentemente deben ser tomados en consideración durante la planeación de estas obras.

A partir del empleo de diversos modelos (HELP, Suizo, Hidrológico simple, Hidrológico con variables morfológicas) para la estimación de generación de lixiviados, en un caso de estudio para un sitio de disposición final tipo A en el Estado de Jalisco, se puede concluir lo siguiente:

- Aunque existen diversas metodologías para estimar la generación de lixiviados en sitios de disposición final, el empleo de éstos requiere de personal técnico capacitado para aplicarlos de manera adecuada e interpretar sus resultados.
- Los resultados de la aplicación de modelos para la estimación de generación de lixiviados pueden emplearse para predecir y/o corroborar la suficiencia en cuanto a la capacidad instalada para manejar los lixiviados. Sin embargo, no se omite recordar que estos deberán ser tomados con cautela.
- Se recomienda instalar equipos de medición que permitan cuantificar la generación de lixiviados *in situ*, ya que podrían facilitar la generación de información confiable respecto a la generación de lixiviados en rellenos sanitarios, y así determinar las medidas de control adecuadas en función de la generación de lixiviados del sitio y prevenir potenciales externalidades asociadas a un manejo deficiente.

Existe un área de oportunidad para mejorar el control, manejo, y tratamiento de lixiviados tanto en el sector público como privado que podría permear como una colaboración entre entidades gubernamentales y empresas que busquen generar soluciones y/o alternativas de manejo, control o tratamiento no desarrolladas.

12. Bibliografía.

- Bernache, G. (2012). RIESGO DE CONTAMINACIÓN POR DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS. UN ESTUDIO DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 97-105.
- Bernache, G. (2015). La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 72-98.
- Bohn, H., & Bohn, R. (1988). Soil Beds Weed Out Air Pollutants. *Chemical Engineering*, , vol. 95, no. 6.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- EAWAG, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. (2015). Manejo integral de residuos sólidos en países en vías de desarrollo. Lausanne, Suiza.
- Elmenhorst, A., Aguilar, S., & Gómez, D. (2012). *Manual de estimación de costos para la gestión municipal de residuos sólidos*. San José: CYMA.
- H. Congreso de la Unión. (28 de Enero de 1988). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*.
- H. Congreso de la Unión. (08 de 10 de 2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial de la Federación*.
- H. Congreso del Estado. (6 de 06 de 1989). Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Periódico oficial de la federación*.
- H. Congreso del Estado. (24 de Febrero de 2007). Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco. *Periódico Oficial del Estado de Jalisco*.
- Montejo, J. C. (2010). *ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA EN EXCEL QUE PERMITA EL CALCULO DE LA CANTIDAD DE GAS METANO Y LIXIVIADOS PRODUCIDO EN UN RELLENO SANITARIO , APLICADO AL MUNICIPIO DE SABA DE TORRES, SANTANDER*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Munawar, E., & Fellner, J. (2013). *Guidelines for Design and Operation of Municipal Solid Waste Landfills in Tropical Climates*. Vienna: ISWA- The International Solid Waste Association.
- Murphy, R., & Garwell, J. (1998). *Infiltration Rates Through Landfill Liners*. Miami: Florida center for solid and hazardous waste management.
- NSW EPA. (2016). *Environmental Guidelines Solid waste landfills* . Sydney: NSW Environment Protection Authority (EPA) .

- OECD. (2014). *OECD Factbook: Economic, Environmental and Social Statistics*. Recuperado el 15 de Julio de 2018, de <https://read.oecd-ilibrary.org>: https://read.oecd-ilibrary.org/economics/oecd-factbook-2014_factbook-2014-en#page1
- Qasim, S., & Chiang, W. (1994). *Sanitary landfill leachate: generation, control and*. Dallas: CRC Press ISBN 1-56676-129-8.
- Quian, X., Koerner, R., & Gray, D. (2002). En X. Quian, R. Koerner, & D. Gray, *Geotechnical aspects of landfill design and construction* (págs. 1-25). New Jersey: Prentice Hall.
- Reinhart, D. (1996). Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: case studies. *Waste management & Research*, vol.14.
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2007). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 468-493.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL. *Revista Geológica de América Central*. 23, 43-55.
- Schroeder, P. R., Dozier, T., Zappi, P., McEnroe, B., Sjoström, J., & Peyton, R. (1994). *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*. Washington: Office of Research and Development.
- Schroeder, P., Peyton, R., Mcenroe, B., & Sjoström, J. (1988). En *he hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Volume III. User's guide for version 2* (pág. 87). Vicksburg: Us Army Engineer Waterways Experiment Station.
- SEDESOL. (2014). *El medio ambiente en México* . Recuperado el 1 de Agosto de 2018, de Residuos sólidos urbanos: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html
- SEMADET. (2017). *PROGRAMA ESTATAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS DEL ESTADO DE JALISCO*. Guadalajara: Periódico Oficial "El Estado de Jalisco".
- SEMARNAT. (2004). *GUÍA DE CUMPLIMIENTO DE LA NOM-083-SEMARNAT-2003*. Ciudad de México: gtz.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). Formation, Composition, and Management of Leachate. En G. Tchobanoglous, & F. Kreith, *Handbook of Solid Waste Management* (págs. 700-723). California: McGraw-Hills.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Nueva York: McGraw-Hill.
- UNEP; ISWA. (2015). *Global Waste Management Outlook*. Vienna: Tara Cannon.
- Vargas, M. (2009). *MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS GENERADOS EN LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DEL CENTRO INDUSTRIAL DEL SUR- EL GUACAL, HELICONIA - ANTIOQUIA*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Manual técnico para la gestión de lixiviados en rellenos sanitarios del Estado de Jalisco

Walkthrough to Install and Operate the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model v3.07. (16 de Junio de 2017). Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-04/documents/walkthrough_to_install_help307_508.pdf

Watts, K., & Charles, J. (1999). *Settlement Characteristics of Landfill Wastes*. Londres: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering.



**Manual técnico para la gestión de lixiviados
en rellenos sanitarios del Estado de Jalisco**



**MEDIO
AMBIENTE**