



Título del Trabajo Fin de Máster:

***EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
DE LIXIVIADOS EN VERTEDEROS DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS:
MÉTODOS DISPONIBLES Y
APLICACIÓN A VERTEDEROS DE
CUENCAS MEDITERRÁNEAS***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

LÓPEZ VELASCO, ROCÍO

Director/es:

DR. RODRIGO ILARRI, JAVIER

Fecha: **FEBRERO, 2015**



Título del Trabajo Fin de Máster:

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: MÉTODOS DISPONIBLES Y APLICACIÓN A VERTEDEROS DE CUENCAS MEDITERRÁNEAS

Autor: **LÓPEZ VELASCO, ROCÍO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	JAVIER RODRIGO ILARRI	Fecha de Lectura	FEBRERO '15
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

La tesis de máster defendida por Rocío López Velasco comprueba la aplicabilidad, y determina las limitaciones de uso correspondientes a dos modelos como son la ecuación de balance hídrico y el modelo VHELP, para la predicción de la producción de lixiviados en vertederos de residuos sólidos urbanos. La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es uno de los principales retos ambientales en todo el mundo. Dentro de estos, los impactos ambientales de mayor consideración están relacionados con el lixiviado que se genera en ellos. El lixiviado de rellenos sanitarios es uno de los principales contaminantes de fuentes de agua, tanto superficial como subterránea, y constituye un factor de gran preocupación. Este trabajo estima la producción y el volumen de lixiviados de un vertedero sintético y así, compara dichos modelos. Los resultados se obtienen a partir de la consideración de diferentes escenarios de análisis sintéticos pero fundamentados en una situación real como es el vertedero de Dos Aguas.

La aplicación de los dos modelos se realiza a través de los parámetros habituales de operación en el vertedero de Dos Aguas, y también se evalúa el grado de sensibilidad de dichos parámetros.

Una vez realizado todos los escenarios sintéticos, el modelo de la ecuación de balance hídrico me parece un método mejor, más sencillo y con mejores resultados en general, sin la necesidad de utilizar un programa más complejo como en este caso es VHELP, el cual tiene muchísimas limitaciones.

En la comparación de los dos métodos con el vertedero real de Dos Aguas, queda claro que se aproxima mucho más el modelo de la ecuación de balance hídrico.

Por último, se han planteado futuras líneas de investigación sobre este problema, introduciendo los aspectos a desarrollar para la elaboración en el futuro de un modelo específico de evaluación de la producción de lixiviados en vertederos de RSU de cuencas mediterráneas.

Palabras clave:

Lixiviados, RSU, Balance Hídrico, VHELP, Dos Aguas.

DEDICATORIA

A Pablo,

Por ser una persona ejemplar de la cual he aprendido muchas cosas tanto a nivel personal como profesional. Me ha demostrado que en la vida todo es posible con un poco de esfuerzo, y que si realmente quieres, puedes lograr lo que te propongas.

“Nunca te des por vencido, las grandes cosas llevan tiempo. Llegará el día que todo el esfuerzo valdrá la pena”

Rocío

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Fin de Máster ha sido posible gracias al apoyo y ayuda de muchas personas a las que me gustaría dar mi agradecimiento, pues con cada uno de esos momentos, por pequeños que fuesen, he aprendido y me han hecho estar más cerca de este momento.

En primer lugar, agradecer a mi Director de Tesis de Máster Javier Rodrigo Ilarri por las horas que me ha dedicado atendiendo mis inquietudes, y enriqueciendo con sus puntos de vista y conocimiento el ejercicio del debate y del perfeccionamiento de todos los detalles en la elaboración de esta Tesis.

Resaltar y destacar también el apoyo brindado por José Luis Bayala Valle, su ayuda a impulsarme a terminar este proyecto, su aliento de ánimo en todo momento durante el transcurso de este trabajo, y sin el cual, el desarrollo de esta Tesis de Master, hubiera resultado más tediosa.

A mi familia, por estar siempre ahí, por ser un apoyo incondicional y por confiar siempre en mí. Mis padres, Tirso y Amparo y mi hermano Víctor Manuel. Ellos son todo para mí.

Por otra parte, del resto de personas también agradezco el apoyo y ayuda en distintos aspectos, como son mis amigos y demás compañeros del máster.

Finalmente, expresar mi gratitud a todos y cada uno de los profesores que impartieron docencia en el máster.

A todos, GRACIAS.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	10
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. LOS VERTEDEROS EN LOS RSU	14
2.1.1 LOS VERTEDEROS DE RSU SEGÚN EL RD 1481/2001 Y SU DESARROLLO TÉCNICO.....	15
2.2 LIXIVIADO DE VERTEDERO.	44
2.2.1 CARACTERÍSTICAS	44
2.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA	45
2.2.3 BALANCE GENERAL DE AGUAS Y DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN UN VERTEDERO.....	47
2.2.4. IDENTIFICACIÓN DE LA EDAD DEL VERTEDERO Y DE LA FUENTE DE LIXIVIACIÓN.....	49
2.2.5 CUANTIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE LIXIVIADOS.....	50
2.2.6 MOVIMIENTO DEL LIXIVIADO EN VERTEDEROS Y HACIA EL EXTERIOR.	52
2.2.7 CONTROL DE LIXIVIADOS.....	56
2.2.8 SISTEMAS PARA LA RECOGIDA DE LIXIVIADOS	57
2.2.9 ALTERNATIVAS A LA GESTIÓN DE LIXIVIADOS	58
2.2.10 TRATAMIENTOS	59
2.2.11 IMPACTO AMBIENTAL	61
2.3 TECNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS.	63
2.3.1 MODELOS ANALÍTICOS	64
2.3.2 MODELOS NUMÉRICOS	68
3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LA EC. DE BALANCE	77
HÍDRICO	77
3.1 INTRODUCCIÓN	78
3.2. BALANCE GENERAL DE AGUAS Y DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN UN VERTEDERO.....	82
3.2.1 COMPONENTES DEL BALANCE	83
3.2.2 PLANTEAMIENTO DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL VERTEDERO	85
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO VHELP	87
4.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROGRAMA	88
4.2. EL MODELO HELP.....	88
4.3. DESCRIPCIÓN	89
4.3.1. DISEÑO DEL PERFIL DEL VERTEDERO.....	93
4.3.2 GENERACIÓN DE DATOS Y VALORES DE FÁBRICA	95
4.3.2.1 GENERACIÓN SINTÉTICA DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS.....	95
4.3.3 RETENCIÓN DE HUMEDAD Y PARÁMETROS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	98
4.3.4 COEFICIENTE DE EVAPORACIÓN.....	100

4.3.5 DEFECTO DEL SUELO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS.	101
4.3.6 INICIALIZACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO.....	102
4.3.7 INDICES DE AREA Y PROFUNDIDAD DE ZONA DE EVAPORACIÓN.	103
4.3.8. PERCOLACIÓN Y FUGAS.....	104
4.3.9. BALANCE HÍDRICO.....	104
4.4 METODO DE SOLUCIÓN.....	105
4.4.1. ESCORRENTÍA.....	106
4.4.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	109
4.4.3. INFILTRACIÓN.....	110
4.4.4. EVAPORACIÓN DEL AGUA DE SUELO.....	110
4.4.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	111
4.4.6. RUTA EN EL SUBSUELO DEL AGUA.....	113
4.4.7. DRENAJE VERTICAL.....	113
4.4.8. GEOMEMBRANA.....	114
4.5 SUPUESTOS Y LIMITACIONES.....	115
4.5.1 MÉTODOS DE SOLUCIÓN.....	115
4.5.2 LÍMITES DE APLICACIÓN.....	119
4.6 VISUAL HELP.....	121
5. APLICACIÓN PRÁCTICA.....	123
5.1. EL VERTEDERO DE DOS AGUAS (VALENCIA).....	124
5.1.1. ACCESOS.....	125
5.1.2 GEOLOGÍA.....	126
5.1.3. HIDROGEOLOGÍA.....	126
5.1.4. VEGETACIÓN.....	127
5.1.5. FAUNA.....	128
5.1.6. USOS DEL SUELO.....	129
5.1.7. CLIMATOLOGÍA.....	129
5.1.8. ASPECTOS A DESTACAR.....	130
5.2. APLICACIÓN DEL MODELO BASADO EN LA ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO A UN CASO SINTÉTICO.....	132
5.2.2.- RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO.....	141
5.3. APLICACIÓN DEL MODELO VHELP A UN CASO SINTÉTICO.....	152
5.3.1. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO.....	152
5.3.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS.....	153
5.3.3. SIMULACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS.....	153
5.3.4 RESULTADOS.....	154

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR AMBOS MODELOS AL VERTEDERO DE DOS AGUAS.....	157
5.4.1. BALANCE HÍDRICO DURANTE UN AÑO.	157
5.4.2. VHELP.....	158
5.5 COMPARACIÓN.....	174
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	175
7. LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN.....	175
REFERENCIAS.....	181

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Exigencia de revestimiento artificial impermeable y de sistema de recogida de lixiviados bajo la masa de residuos.	18
Tabla 2. Coeficientes de seguridad mínimos.	28
Tabla 3. Datos de sobre el vaso del vertido	38
Tabla 4. Características de los lixiviados de un vertedero.	45
Tabla 5. Composición típica de los lixiviados de vertedero y su variación con el tiempo.	46
Tabla 6. Parámetros de muestreo de los lixiviados.	47
Tabla 7. Datos típicos de la composición de lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.	49
Tabla 8. Datos típicos de humedad para diferentes fracciones típicas de los residuos no peligrosos.	51
Tabla 9. Principales operaciones y procesos de tratamientos biológicos y físico/químicos utilizados para el tratamiento de lixivados.	60
Tabla 10. Características de residuos por defecto.	102
Tabla 11. Características geosintéticas por defecto.	103
Tabla 12. Volumen generado de lixiviados durante un año en el vertedero de Dos Aguas (m3).	130
Tabla 13. Observaciones termométricas.	136
Tabla 14. Observaciones pluviométricas y de humedad relativa.	136
Tabla 15. Otros datos atmosféricos.	137
Tabla 16. Agua filtrada superiormente y escorrentía.	138
Tabla 17. Volumen de lixiviados generados.	142
Tabla 18. Volumen anual total durante un año.	155
Tabla 19. Volumen anual total durante un año (90 metros)	156
Tabla 20. Volumen total anual (m3).	172
Tabla 21. Ritmo total anual (m).	172
Tabla 22. Comparación de los tres volumen solución.	174

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Vertido de residuos inertes.....	19
Figura 2. Vertederos de residuos no peligrosos	20
Figura 3. Vertederos de residuos peligrosos	20
Figura 4. Puntos de control de lixiviados por cada celda.	34
Figura 5. Vertedero tipo valle.....	52
Figura 6. Afloramiento de lixiviado I.....	53
Figura 7. Afloramiento de lixiviado II.....	53
Figura 8. Zanja para reconducir el lixiviado.....	54
Figura 9. Canal de recogida de pluviales.	55
Figura 10. Camión para transportar lixiviados.....	55
Figura 11. Detalle de la tapa de acceso al depósito, una vez enterrado.....	56
Figura 12. Diagrama de un proceso de selección de un modelo analítico en zona saturada.....	65
Figura 13. Diagrama del proceso de selección de un modelo analítico en zona no saturada.....	65
Figura 14. Diagrama del proceso de selección de un modelo numérico.....	69
Figura 15. Términos del balance hidrológico.....	77
Figura 16. Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación del lixiviado de un vertedero.	82
Figura 17. Relación entre la humedad del suelo y los parámetros de retención.....	99
Figura 18. Relación entre escorrentía, precipitación y retención.....	108
Figura 19. Emplazamiento general de la zona de estudio.....	124
Figura 20. Planta vertedero de Dos Aguas (VLC)	125
Figura 21. Mapa hidrogeológico de la zona.....	127
Figura 22. Modelización para el cálculo de lixiviados.....	133
Figura 23. Identificación geográfica de la zona de estudio.....	134
Figura 24. Definición gráfica de la trayectoria del vertedero durante 9 años.	141
Figura 25. Lixiviados producidos totales.....	151
Figura 26. Perfil vertedero un año.	154
Figura 27. Perfil de vertedero (90 metros).....	155
Figura 28. Perfil comparación durante un año.....	159
Figura 29. Propiedades del perfil.....	159
Figura 30. Propiedades capa Silty Loam.....	160
Figura 31. Propiedades capa Municipal Waste.....	161

Figura 32. Propiedades capa High Density Poliethylene.....	162
Figura 33. Propiedades capa Barrier Soil.....	163
Figura 34. Configuración VHELP.....	163
Figura 35. Ajustes de aguas superficiales.	164
Figura 36. Generador de clima (proyecto).....	165
Figura 37. Generador de clima (Precipitación / Temperatura)	166
Figura 38. Generador de clima (Evapotranspiración).....	166
Figura 39. Generador de clima (Database).	167
Figura 40. Esquema del balance hídrico para la percolación.....	171
Figura 41. Gráfica del volumen de producción de lixiviados para un año.	173

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos principales a analizar según el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero es la producción de lixiviados. El presente documento presenta la aplicación comparada de dos modelos de evaluación de la producción de lixiviado a un vertedero sintético inspirado en datos reales.

El documento se estructura en seis capítulos diferentes:

1. En el primer capítulo se presenta el estado del arte, el cual se ha desarrollado en dos partes. Primero, se describen los vertederos de RSU y los lixiviados, según el RD 1481/2001. Se incluye también información sobre los lixiviados de vertedero, así como sus características, composición química, tratamientos e impacto ambiental entre otros. En la segunda parte del capítulo, se abordan las técnicas de cuantificación de la producción de lixiviados y se explica una a una con suficiente detalle, tanto aquellas que se refieren a modelos de transporte en zona saturada como no saturada. Algunas de las técnicas analizadas son la ecuación de balance hídrico y los modelos VHELP, VLEACH, MODFLOW, SUTRA y GEOSTUDIO entre otros. Entre todos estos, en esta TFM nos centraremos en la ecuación de balance hídrico y VHELP.
2. El capítulo dos presenta la descripción en profundidad del modelo de la ecuación del balance hídrico. Se explican paso a paso todos los componentes que integran la ecuación con varias ilustraciones.
3. En el capítulo tres se describe el modelo VHELP. En él se explica desde la identificación y descripción del programa hasta los supuestos y limitaciones que tiene cada parámetro y el funcionamiento del modelo en general.
4. El capítulo cuatro incluye una aplicación del modelo basado en la ecuación de balance hídrico y del modelo VHELP a un caso sintético (basado en el vertedero de Dos Aguas). Se explican todas las características y aspectos relevantes de los modelos de forma que se puedan extraer conclusiones de los mismos.
5. El capítulo cinco presenta el resumen y las conclusiones. En él resumo todo el contenido del trabajo y expongo mi punto de vista sobre los resultados obtenidos, haciendo hincapié en las ventajas e inconvenientes de los dos modelos analizados.
6. El último apartado se refiere a las líneas de futura investigación. En él se introduce la relación de los procesos de formación de biogás y lixiviados, así como otros aspectos de interés como son la calibración de parámetros

y la aplicación de diferentes programas distribuidos para vertederos de RSU más avanzados.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. LOS VERTEDEROS EN LOS RSU

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son los que se originan en la actividad doméstica y comercial de ciudades y pueblos. En los países desarrollados en los que cada vez se usan más envases, papel, y en los que la cultura de "usar y tirar" se ha extendido a todo tipo de bienes de consumo, las cantidades de basura que se generan han ido creciendo hasta llegar a cifras muy altas.

La evacuación segura y fiable, a largo plazo, de los residuos sólidos es una componente importante de la gestión integral de residuos. Los rechazos de los residuos sólidos son componentes de los residuos que no se reciclan, que quedan después de la recuperación de productos de conversión y/o energía.

La aplicación, el diseño y la operación de vertederos de RSU implica la aplicación de diversos principios científicos, ingenieriles y económicos.

Históricamente, los vertederos han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en todo el mundo. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, del reciclaje y de las tecnologías de la transformación, la evacuación en vertederos de los rechazos procedentes de los residuos sólidos sigue siendo un componente importante dentro de una estrategia para la gestión integral de los residuos sólidos. La gestión de vertederos implica la planificación, diseño, explotación, clausura y control postclausura de vertederos.

A continuación, se muestran algunas de las definiciones más importantes para una mejor comprensión de este trabajo final de máster:

Los vertederos son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. El término vertedero sanitario controlado se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSU, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública.

El líquido que se acumula en el fondo de un vertedero se conoce *como lixiviado*. En vertederos profundos, frecuentemente se recoge el lixiviado en puntos intermedios. En general el lixiviado es el resultado de la precipitación, de la escorrentía no controlada y del agua de irrigación que entra en el vertedero, así como de la pérdida de humedad de los propios residuos.

El lixiviado contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados en el vertedero y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del vertedero.

2.1.1 LOS VERTEDEROS DE RSU SEGÚN EL RD 1481/2001 Y SU DESARROLLO TÉCNICO.

El RD 1481/2001 y el borrador de desarrollo técnico del RD 1481/2001, hace varias referencias a los lixiviados y en general a los vertederos de RSU. A continuación se muestran las partes más características:

La Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos, establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos. Configuran las líneas básicas de su regulación la clasificación de los vertederos en tres categorías, la definición de los tipos de residuos aceptables en cada una de dichas categorías, el establecimiento de una serie de requisitos técnicos exigibles a las instalaciones, la obligación de gestionar los vertederos después de su clausura y una nueva estructura e imputación de los costes de las actividades de vertido de residuos.

La existencia de vertederos incontrolados y las obligaciones impuestas por la normativa comunitaria justifican la adopción del Real Decreto que incorpora al derecho interno la Directiva 1999/31/CE.

En el marco de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, y demás normativa aplicable, particularmente la legislación sobre prevención y control integrados de la contaminación, el Real Decreto 1481/2001 establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos. Este marco jurídico no ha sido modificado con la aprobación de la reciente legislación en materia de gestión de residuos sólidos, la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

El RD 1481/2001 delimita los criterios técnicos mínimos para su diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento. También aborda la adaptación de los vertederos actuales a las exigencias del Real Decreto y los impactos ambientales a considerar en la nueva situación.

No obstante, en este Real Decreto se regula el almacenamiento de residuos, estableciendo un plazo inferior al previsto con carácter general en la Ley de Residuos, para los supuestos en que se trate de residuos distintos a la peligrosa y dicha actividad se realice con carácter previo a la eliminación.

De acuerdo con la Directiva 1999/31/CE, los vertederos deberán incluirse en alguna de las siguientes categorías: vertederos de residuos peligrosos, vertederos de residuos no peligrosos y vertederos de residuos inertes.

Dado el carácter de normativa básica del Real Decreto, tal clasificación deberá adoptarse en todo el territorio nacional, con independencia de las subclasificaciones que puedan establecer las Comunidades Autónomas. Asimismo, se identifican los tipos de residuos aceptables en las diferentes categorías de vertederos, prohibiéndose expresamente la admisión de determinados residuos.

La creación, ampliación y modificación de vertederos estará sometida al régimen de autorizaciones de las actividades de eliminación de residuos previsto en la ley de residuos y, en su caso, a lo establecido en la legislación sobre prevención y control integrados de la contaminación.

En todo caso, deberán observarse las obligaciones exigidas por la normativa sobre impacto ambiental.

Asimismo, se acotan los requisitos mínimos de las solicitudes de autorización, las comprobaciones previas a realizar por las autoridades competentes y el contenido de aquella.

La autorización para la construcción y explotación de vertederos de residuos peligrosos contendrá la obligación de su titular de suscribir un seguro de responsabilidad civil y el depósito de una fianza, según lo previsto en el artículo 22.2 de la Ley de Residuos. La autorización para vertederos de residuos distintos a los peligrosos estará condicionada a lo que determine la legislación estatal sobre residuos en materia de constitución de seguro de responsabilidad civil y prestación de fianzas u otras garantías equivalentes.

El seguro de responsabilidad civil cubrirá el riesgo por los posibles daños causados a las personas y al medio ambiente, en tanto que mediante la prestación de la fianza el titular responderá del cumplimiento de todas las obligaciones que frente a la Administración se deriven del ejercicio de la actividad.

Por otra parte, el canon de vertido a establecer por la eliminación de residuos en vertedero ha de sufragar necesariamente todos los costes de dicha actividad, incluidos los costes de proyecto, construcción, explotación, clausura y mantenimiento del vertedero. Se pretendía así que la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero, cuyo precio actual era, como media, muy inferior al coste real del proceso y comparativamente menor al exigido por otras técnicas de gestión más respetuosas con el medio ambiente, tales como la reutilización o la valorización mediante reciclado, compostaje, biometanización o valorización energética, se utilizara únicamente para aquellos residuos para los que actualmente no existe tratamiento o para los rechazos de las citadas alternativas prioritarias de gestión.

Se configuran asimismo una serie de mecanismos, tanto para la admisión de residuos en los correspondientes vertederos como para el control y vigilancia de éstos durante la fase de explotación, clausura y mantenimiento posterior.

El Real Decreto 1481/2001 tiene la consideración de legislación básica sobre protección del medio ambiente, de acuerdo con el artículo 149.1.23.a de la Constitución, y en su elaboración fueron consultadas las Comunidades Autónomas, los entes locales y los agentes económicos y sociales interesados. Se incluyen a continuación los aspectos técnicos fundamentales a la hora de construir, explotar y clausurar un vertedero, que están incluidos en los anexos del RD 1481/2001.

ANEXO I- Requisitos generales para todas las clases de vertederos.

1. Ubicación

1. Para la ubicación de un vertedero deberán tomarse en consideración los requisitos siguientes:

- a) Las distancias entre el límite del vertedero y las zonas residenciales y recreativas, vías fluviales, masas de agua y otras zonas agrícolas o urbanas.
- b) La existencia de aguas subterráneas, aguas costeras o reservas naturales en la zona.
- c) las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona.
- d) El riesgo de inundaciones, hundimientos, corrimientos de tierras o aludes en el emplazamiento del vertedero.
- e) La protección del patrimonio natural o cultural de la zona.

2. El vertedero sólo podrá ser autorizado si las características del emplazamiento con respecto a los requisitos mencionados, o las medidas correctoras que se tomen, indican que aquél no planteará ningún riesgo grave para el medio ambiente.

2. Control de aguas y gestión de lixiviados

Se tomarán las medidas oportunas con respecto a las características del vertedero y a las condiciones meteorológicas, con objeto de: controlar el agua de las precipitaciones que penetre en el vaso del vertedero; impedir que las aguas superficiales o subterráneas penetren en los residuos vertidos; recoger y controlar las aguas contaminadas y los lixiviados; tratar las aguas contaminadas y los lixiviados recogidos del vertedero de forma que se cumpla la norma adecuada requerida para su vertido, o de forma que se evite su vertido, aplicando técnicas adecuadas para ello.

En el caso de vertederos de residuos inertes, y cuando una evaluación basada en la ubicación de la instalación, así como de los residuos que se admitan muestre que el vertedero presenta un riesgo admisible para el medio ambiente, las autoridades competentes podrán decidir que no se apliquen las anteriores disposiciones.

3. Protección del suelo y de las aguas

1. Todo vertedero deberá estar situado y diseñado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los

lixiviados en las condiciones establecidas en el apartado 2 anterior. La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales durante la fase activa o de explotación del vertedero se conseguirá mediante la combinación de una barrera geológica y de un revestimiento artificial estanco bajo la masa de residuos.

2. Existe barrera geológica cuando las condiciones geológicas e hidrogeológicas subyacentes y en las inmediaciones de un vertedero tienen la capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas.

La base y los lados del vertedero dispondrán de una capa mineral con unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado en materia de protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales sea por lo menos equivalente al derivado de los requisitos siguientes:

- a) Vertederos para residuos peligrosos: $k < 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s; espesor > 5 m.
- b) Vertederos para residuos no peligrosos: $k < 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s; espesor > 1 m.
- c) Vertederos para residuos inertes: $k < 1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s; espesor > 1 m.

(k = coeficiente de permeabilidad; m/s = metro/segundo.)

Cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones antes mencionadas, podrá complementarse mediante una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 metros.

3. Además de las barreras geológicas anteriormente descritas, deberá añadirse un revestimiento artificial impermeable bajo la masa de residuos y, con el fin de mantener en un mínimo la acumulación de lixiviados en la base del vertedero, un sistema de recogida de lixiviados, de acuerdo con las siguientes condiciones:

Clase de vertedero	Revestimiento artificial impermeable	Sistema de recogida de lixiviados (capa de drenaje de espesor $\geq 0,5$ m)
Para residuos no peligrosos .. Para residuos peligrosos	Sí Sí	Sí Sí

Tabla 1. Exigencia de revestimiento artificial impermeable y de sistema de recogida de lixiviados bajo la masa de residuos.

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

El Gobierno y, en su caso, las Comunidades Autónomas en las normas adicionales de protección que dicten al efecto, podrá establecer requisitos generales o específicos para los vertederos de residuos inertes y para las características de los medios técnicos anteriormente mencionados.

4. Para facilitar la interpretación de los requisitos anteriores, las barreras de protección mínimas de que dispondrán los vertederos bajo la masa de residuos y las condiciones mínimas a exigir a dichas barreras serán las que para cada clase se reflejan esquemáticamente en las figuras 1, 2 y 3.

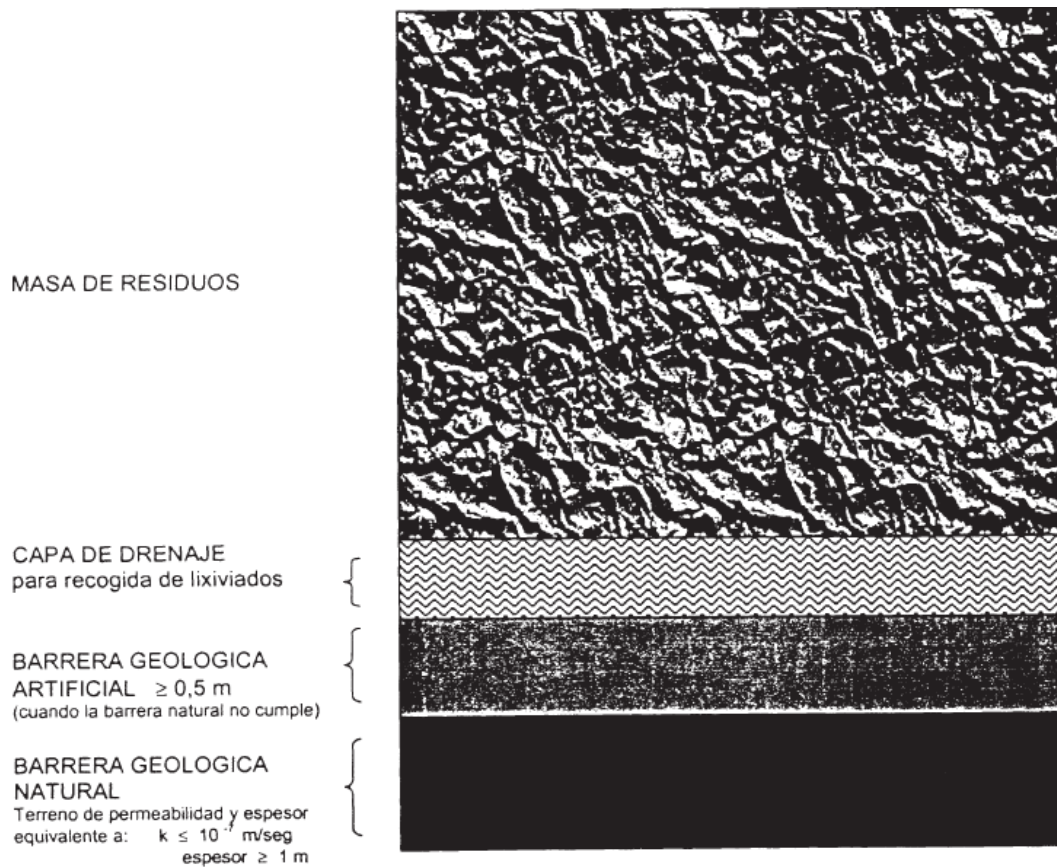


Figura 1. Vertido de residuos inertes.

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

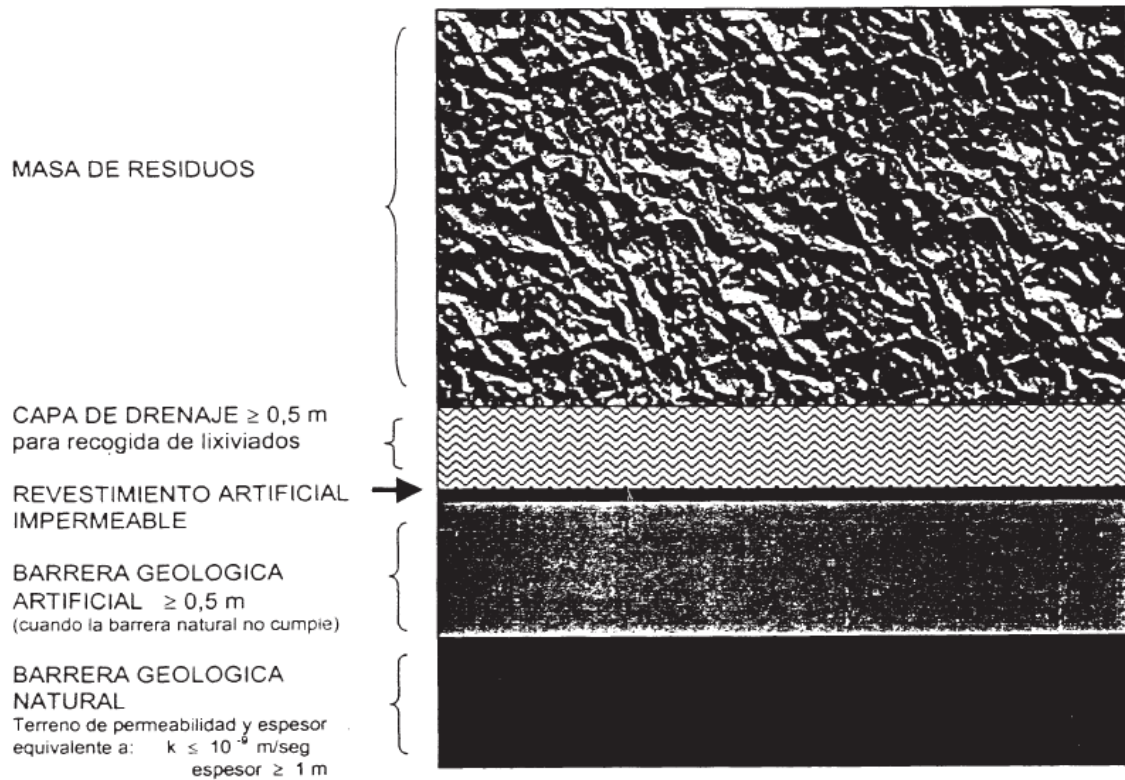


Figura 2. Vertederos de residuos no peligrosos

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

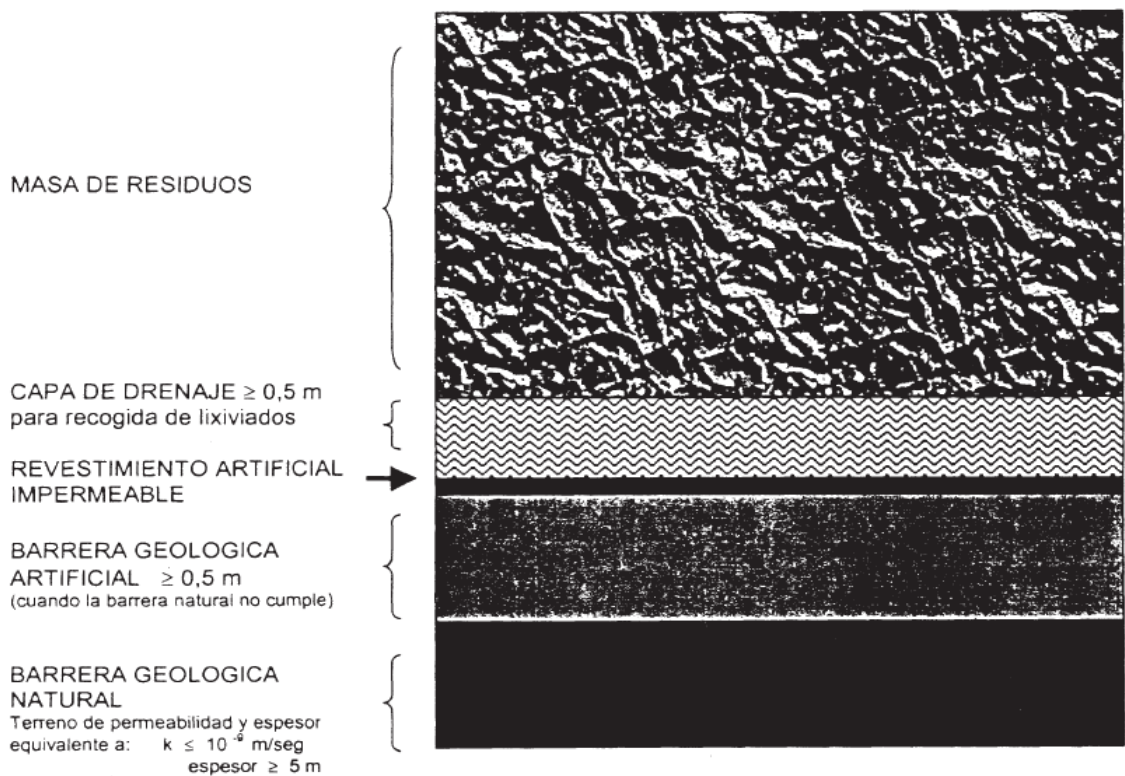


Figura 3. Vertederos de residuos peligrosos

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

5. Si el órgano competente en materia de medio ambiente de la Comunidad Autónoma en que se encuentre ubicado el vertedero decide, sobre la base de una evaluación de los riesgos para el medio ambiente que tenga en cuenta, en particular, la sección 3.a del capítulo II del Título III del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y modificado por Real Decreto 1315/1992 de 30 de octubre, y de acuerdo con la sección 2.a («Control de aguas y gestión de lixiviados»), que la recogida y tratamiento de lixiviados no son necesarios, o si se establece que el vertedero plantea un nivel de riesgo aceptable para el suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales, los requisitos podrán ser modificados o reducidos en consecuencia. En el caso de los vertederos para residuos inertes, estos requisitos podrán ser establecidos mediante una norma estatal y, en su caso, mediante las normas adicionales de protección que las Comunidades Autónomas dicten al efecto.

La evaluación del riesgo que servirá de base para la toma de la decisión se llevará a cabo mediante un estudio que comprenderá como mínimo las siguientes fases:

- a) Identificación y cuantificación de las emisiones probables de contaminantes y evaluación de las significativas.
- b) Identificación y cuantificación de las poblaciones y ecosistemas que pueden quedar expuestos a los contaminantes y de las rutas de exposición.
- c) Cuantificación de los contaminantes en cada ruta y de las dosis probables recibidas.
- d) Valoración de la toxicidad de los contaminantes para las poblaciones y ecosistemas expuestos.
- e) Evaluación, utilizando una metodología reglada o normalizada, del nivel de riesgo existente, sobre la base de los datos obtenidos o disponibles.

4. Captación de aguas superficiales y subterráneas.

Se especifican en este apartado los requisitos mínimos para el diseño de la infraestructura de captación de aguas superficiales y subterráneas.

Los sistemas de recogida y evacuación de las aguas superficiales se diseñarán de manera que eviten su entrada en el vaso de vertido o en otras instalaciones del vertedero donde puedan resultar contaminadas por contacto con los residuos.

Se diseñarán conducciones perimetrales u otro tipo de instalaciones que se calcularán para el caudal máximo correspondiente a un periodo de retorno mínimo de 25 años, en el caso de vertederos de residuos inertes y no peligrosos. En el caso de vertederos de residuos peligrosos este valor será de 50 años como mínimo.

Las aguas caídas en el vaso que no contacten con los residuos, o las precipitadas sobre coberturas impermeables de éstos, podrán evacuarse a cauce si cumplen los límites de vertido. En caso contrario deberán conducirse a una balsa exterior distinta de la recogida de lixiviados y recibirán tratamiento para cumplir los límites de vertido a cauce fijados en la autorización. Esta balsa se dimensionará para recoger las precipitaciones máximas de 24 horas para un periodo de retorno mínimo de 25 años, para vertederos de residuos inertes y no peligrosos. Para vertederos de residuos peligrosos este valor será de 50 años como mínimo.

Las aguas subterráneas no entrarán en ningún caso en contacto con los residuos, disponiendo en caso preciso un subdrenaje bajo la capa de impermeabilización.

5. Captación y tratamiento de lixiviados

Los lixiviados y todas las aguas que entren en contacto con los residuos se tratarán antes de su vertido de modo que cumplan los límites de vertido a cauce fijados en la autorización. No obstante, en el caso de vertederos de residuos inertes, cuando una evaluación basada en la ubicación y configuración de la instalación, así como de los residuos que se admitan, muestre que el vertedero presenta un riesgo admisible para el medio ambiente, las autoridades competentes podrán decidir que no se disponga de un sistema de recogida de lixiviados.

- Tanques Colectores de lixiviados

El diseño de los tanques o depósitos colectores se atenderá a los siguientes criterios:

- Impermeabilidad
- Constituido por materiales compatibles con los vertidos
- Localizados en una superficie plana, con una cimentación estable y capaz de admitir los lixiviados estimados y de adaptarse a su funcionamiento y a las operaciones previstas con ellos.
- Si se localiza en el exterior deberá cubrirse para evitar el acceso de los animales

- Balsa de almacenamiento

El diseño detallado del tratamiento de los lixiviados y de la balsa de almacenamiento deberá atenerse a los siguientes puntos:

- La balsa se diseñara para la recepción de un volumen suficiente de lixiviados en cualquier época del año. Su volumen estará duplicado para facilitar el mantenimiento y prevenir fallos de operación.

- Los cálculos del dimensionamiento mínimo de la balsa de lixiviados se justificarán en función de la cantidad de materia orgánica, pluviometría, evapotranspiración, recubrimientos, etc.
- También se calcularán los riesgos de una posible avenida de tormentas, de 24 horas, para periodos de recurrencia de cómo mínimo 25 años (vertederos de residuos inertes y no peligrosos) o 50 años (vertederos de residuos peligrosos), dotando a la balsa de la superficie libre suficiente para absorberlas.
- Los cálculos del dimensionamiento también contemplarán el tratamiento previsto de los lixiviados y las restricciones en las distintas operaciones estacionales.
- Los costados y el fondo se recubrirán de material sintético impermeabilizante cuyas características deberán ser similares a la geomembrana del fondo del vaso de vertido.
- Se instalará un sistema de drenaje perimetral y se diseñará un sistema de inspección para la detección de cualquier fuga o filtración al terreno.
- La balsa podrá cubrirse, bien de manera permanente, o bien de forma temporal, si las condiciones meteorológicas lo requieren.
- El sistema de detección de lixiviados se localizará en la base de las balsas de almacenamiento para determinar la profundidad de los lixiviados y la de los líquidos residuales.

- Tratamiento de los lixiviados

Si los lixiviados se tratan en una instalación “in situ” se deberá asegurar que se cumplen las condiciones de vertido a cauce fijadas en la autorización del vertedero.

La reducción de los parámetros nocivos de los lixiviados a valores aceptables para que, posteriormente, puedan ser tratados conjuntamente con las aguas residuales, se puede alcanzar mediante la aplicación de diferentes procesos, frecuentemente complementarios, entre los que se consideran como más habituales:

- Tratamiento biológico
- Tratamiento físico químico
- Tratamientos mixtos

6. Operación

Uno de los objetivos necesarios para conseguir una buena explotación del vertedero será limitar la producción de lixiviados. Esta restricción se conseguirá no solamente fijando el porcentaje de humedad de los residuos que son admitidos, sino la cantidad absoluta de agua que entre en el vertedero.

Para la disposición de las distintas zonas se tendrán en cuenta los siguientes criterios (se presenta a continuación una relación de mezcla no recomendable):

- Los residuos orgánicos aceptables se colocarán en una zona de nivel topográfico bajo, debido al alto potencial de sus lixiviados para incorporar metales.
- Los residuos que contienen metales reactivos se colocarán en la zona de nivel más alto, evitando su contacto con otros lixiviados.
- Los residuos de carácter básico se colocarán adyacentes y aguas debajo de la zona con residuos de metales reactivos, con el fin de inmovilizar, por precipitación, los metales incorporados en lixiviados.
- Los residuos ácidos se colocarán en la zona más baja de modo que estén separados de los residuos básicos por medio de los residuos orgánicos, evitando así las reacciones entre sus lixiviados.

7. Control de gases

Todos aquellos vertederos que reciban residuos biodegradables, en un porcentaje significativo (por ejemplo más del 15 % de los residuos vertidos) o que emitan gases en una cantidad significativa dispondrán de un sistema de recogida de gases, tratamiento y aprovechamiento. Si no se puede aprovechar se quemará. Se minimizarán los potenciales impactos de esta operación. En el diseño de la cobertura se justificará que el sistema de control garantiza la adecuada protección, no provocando levantamientos ni inestabilidades en el sellado.

Se evitará la acumulación de gases mediante los pertinentes puntos de evacuación durante la explotación del vertedero y fase postclausura.

El sistema de cobertura para extracción de gases se podrá potenciar mediante una red activa de pozos de captación de gas que garantice su total eliminación. En este caso será imprescindible el análisis de la situación una vez se pare la explotación de la red de pozos, de modo que se garantice que no se producirán levantamientos en la cobertura por acumulación de gases remanentes o generados con posterioridad, o bien de inestabilidad en los taludes. Se puede plantear un sistema mixto debidamente aislado, en el que una vez explotada la red de pozos exista una capa de drenaje de gases que evite el efecto descrito. Su espesor mínimo, de emplear una capa de gravas, será 0,3 m, y será de tipo no calizo. Su capacidad será suficiente para garantizar la captación de los gases.

Siempre y cuando los gases evacuados puedan representar un impacto significativo para las personas o el medio, la entidad explotadora del vertedero gestionará los gases evacuados.

Para controlar las emisiones de gas, se deberán seguir los siguientes criterios de diseño:

- Sistema flexible y adaptable a las variaciones en la tasa de producción de gas, a las modificaciones en los modelos de funcionamiento, a las variaciones de la composición química del gas y a una amplia variedad de posibilidades operacionales y ambientales.
- Los sistemas de control deberán diseñarse con un 100% de capacidad para apagar los incendios potenciales.
- Deberán incorporarse controles eficaces de combustión para prevenir igniciones accidentales en las chimeneas de salida de gases.
- Las tuberías incorporarán sistemas corta – apaga llamas para evitar incendios fuera del punto de combustión.
- Se dispondrá de un sistema de control continuo o periódico del contenido de O₂ y de CH₄ para detectar mezclas explosivas (O₂ entre el 5 y 14%) y poder actuar con antelación.
- Las unidades de combustión deberían equiparse con sistemas de ignición automática y de alarmas.
- Las conducciones principales deberán tener el 3% de pendiente mínima, después del asentamiento.

Para el diseño del sistema de control de gas del vertedero se deberá:

- Proceder a un sellado efectivo de las zonas de producción y gestión de gas.
- Manejar la tasa más alta de flujo de gas prevista para el vertedero.
- Estimar la variabilidad en la generación de gas, composición y otros factores.
- Extender tanto como pudiera necesitarse los colectores de gas, pensando en futuras celdas.

El diseño de los quemadores de gas de un vertedero tipo recogerá, entre otros los siguientes aspectos:

- Indicador y registrador de temperatura. Mide y registra la temperatura del gas en la chimenea del quemador que mientras esté en funcionamiento mantendrá una temperatura de 850°C o superior, 2 segundos después de pasar a través del quemador.
- Sistema de arranque del piloto automático
- Funcionamiento automático del sistema
- Sistema de alarma y aislamiento ante fallos del sistema: Aísla el quemador del suministro de gas, desactiva el ventilador y alerta al responsable.
- Rejillas de aire para la combustión controladas automáticamente.
- Equilibrio de la cantidad de aire de combustión y de la temperatura de la llama.

- Ventanillas de muestreo e inspección.
- Supervisión de la combustión, temperatura y muestreo de las emisiones atmosféricas.
- Pantallas de protección: Para el viento o para proteger las operaciones de muestreo e inspección.

El control del movimiento de los gases del vertedero tiene como objeto reducir las emisiones atmosféricas, minimizar la salida de emisiones olorosas, minimizar la migración subsuperficial del gas y facilitar la recuperación de energía a través de metano. Se distinguen entre sistemas de control pasivos y activos:

- Sistema de control activo:

- La recuperación de gas deberá hacerse por pozos perforados de al menos 0.5 m de diámetro. De modo justificado se podrán emplear diámetros menores.
- El revestimiento de los pozos de extracción y colectores laterales deberán ser de PVC, HDPE o acero inoxidable.
- Sistemas de combustión equipados con controladores de llama para la prevención de igniciones accidentales en el sistema de conducción y descarga de las chimeneas.
- Se equiparán las unidades de combustión con sistemas y alarmas de ignición automática.
- En los lugares con alto riesgo de migración de gas, se instalarán sistemas de alarma con capacidad de comunicación telefónica permanente con los centros de auxilio.
- El diseño del ámbito de actividad de cada uno de los pozos de extracción debe asegurar que el 100% del área susceptible de contener gas está cubierta.

- Sistema de control pasivo

- La migración lateral de los gases del vertedero se reduce rebajando la presión del gas en su interior, mediante la instalación de chimeneas a través de la cobertura final.
- La combinación adecuada de las coberteras de protección, constituidas por la geomembrana y las barreras naturales, optimiza el control de las emanaciones de gas y su recuperación, así como reduce la intromisión de aire en cada pozo.
- En el global de las instalaciones, excluidas las de control de gas y las del sistema de recuperación, la concentración de metano no excederá los límites admitidos por la autoridad competente.
- La mezcla de gases recuperables no contendrá más de un 5% de O₂ en volumen para no tener mezclas explosivas.

8. Molestias y riesgos

Se tomarán las medidas necesarias para reducir al mínimo inevitable las molestias y riesgos procedentes del vertedero debido a: emisión de olores y polvo, materiales transportados por el viento, ruido y tráfico, aves, parásitos e insectos, formación de aerosoles, incendios.

El vertedero deberá estar equipado para evitar que la suciedad originada en la instalación se disperse en la vía pública y en las tierras circundantes.

9. Estabilidad e integridad de la masa de residuos y de las capas de impermeabilización.

El conjunto formado por el terreno y vertedero será una estructura estable e íntegra a lo largo del tiempo, que garantizará la estabilidad de la masa de residuos. Del mismo modo los asentamientos previstos, tanto en la capa de impermeabilización como en el sellado, se comprobará necesariamente que serán compatibles con su integridad, función impermeable y drenante, sobretodo cuando el terreno de apoyo sea muy deformable y en el caso de vertederos de RSU con un alto contenido orgánico, que provocará importantes asentamientos en el sellado.

Respecto a la estabilidad se efectuarán al menos las siguientes comprobaciones:

- Estabilidad del conjunto vertedero-terreno.
- Estabilidad interna de la masa de residuos.
- Estabilidad local de la capa de sellado por deslizamiento del contacto de los distintos elementos del sellado.
- Estabilidad del conjunto vertedero – impermeabilización de fondo, si procede, por deslizamiento entre distintos elementos de la capa impermeable.

Para estas comprobaciones se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Se evaluará la resistencia al corte de los residuos considerando su origen. De ser preciso se efectuarán ensayos a gran escala.
- Se considerará el ritmo de explotación, sobre todo en materiales impermeables, que puede generar presiones intersticiales que se introducirán en la evaluación.
- La resistencia al deslizamiento entre geosintéticos y geosintéticos-suelo empleada en el cálculo se comprobará de modo obligatorio, con un número suficiente de ensayos, con los geosintéticos específicos que se vayan a utilizar en la obra. Del mismo modo se efectuará la comprobación de la capacidad drenante de un geocompuesto de drenaje, en función de su nivel de carga en dirección perpendicular al plano de drenaje.

- Los parámetros resistentes del resto de materiales empleados en el cálculo estarán igualmente justificados a partir de los reconocimientos y ensayos pertinentes. Dado que el comportamiento tensodeformacional es muy diferente para los distintos materiales (residuos, geosintéticos, terreno) se justificarán los parámetros resistentes a emplear en función de los niveles de deformación estimados, por lo que se podrán emplear distintos parámetros dependiendo del cálculo efectuado.

Los coeficientes de seguridad mínimos recomendados, en función de las consecuencias de una potencial inestabilidad y en situación estática son los siguientes:

RIESGO	TIPO DE VERTEDERO		
	INERTE	NO PELIGROSO	PELIGROSO
BAJO	1.3	1.4	1.5
MEDIO	1.4	1.5	1.6
ALTO	1.5	1.6	1.8

Tabla 2. Coeficientes de seguridad mínimos.

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

Las situaciones de bajo riesgo son aquéllas en las que una potencial inestabilidad provocaría exclusivamente daños materiales sin consecuencias significativas ambientales ni para la seguridad de las personas.

Por riesgo medio se entiende la situación de un vertedero cuya inestabilidad provocaría daños significativos para el medio ambiente pero no para la seguridad de las personas.

Las situaciones de alto riesgo son aquéllas en las que se pueden provocar daños a personas o bien impactos ambientales severos o irreversibles.

En situación dinámica, cuando de acuerdo con el apartado 2 (limitaciones), sea necesario un análisis de sismicidad, el coeficiente de seguridad será como mínimo de 1.2 en vertederos de residuos inertes, 1.3 en vertederos de residuos no peligrosos y 1,4 en vertederos de residuos peligrosos.

Se considerará en los cálculos de estabilidad la hipótesis de obturación de los drenajes. En dicha situación se estimará la posición del nivel de lixiviados y se calculará la estabilidad. Se admitirá una reducción de 0.10 en el coeficiente de seguridad sobre los valores especificados. Esta misma reducción se podrá adoptar durante el proceso de explotación del vertedero.

10. Cerramientos

El vertedero deberá disponer de medidas de seguridad que impidan el libre acceso a las instalaciones.

Las entradas estarán cerradas fuera de las horas de servicio. El sistema de control de acceso deberá incluir un programa de medidas para detectar y disuadir el vertido ilegal en la instalación.

ANEXO II-Criterios y procedimientos para la admisión de residuos.

1. Criterios provisionales de admisión de residuos.

La autorización de cada vertedero fijará la relación de los tipos de residuos (señalará sus códigos CER y, en su caso, su codificación con arreglo al anexo I del

Real Decreto 833/1988) admisibles en la instalación específica de que se trate.

Para poder figurar en la lista de residuos admitidos en un vertedero específico, los residuos deberán cumplir las condiciones siguientes:

- a) En vertederos para residuos inertes: deberán ajustarse a la definición de residuo inerte que son aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas.
- b) En vertederos para residuos no peligrosos: deberán ajustarse a la definición de residuo no peligroso incluida en el artículo 2, párrafo a), del presente Real Decreto. A los efectos de interpretación del párrafo c) del artículo 6.3 del presente Real Decreto, sólo se admitirán como estabilización de un residuo peligroso aquellos procesos que: cambien la peligrosidad de los constituyentes de dicho residuo, transformándolo de peligroso en no peligroso, o garanticen que los constituyentes peligrosos que no se hayan transformado completamente en constituyentes no peligrosos no pueden propagarse en el medio ambiente a corto, medio o largo plazo. No se admitirá como estabilización aquellos procesos que consistan en una mera solidificación, es decir que sólo cambien el estado físico del residuo mediante aditivos, sin variar sus propiedades químicas y toxicológicas.

- c) En vertederos para residuos peligrosos: deberán ajustarse a la definición de residuo peligroso incluida en la ley de residuos y mostrarán un contenido total o lixiviabilidad de componentes potencialmente peligrosos lo suficientemente bajos como para no suponer un riesgo para la salud de las personas o para el medio ambiente. Asimismo, no impedirán una estabilización suficiente de los residuos durante la vida útil prevista del vertedero. Las autoridades competentes podrán fijar en la autorización de un vertedero condiciones complementarias a las anteriores más restrictivas sobre la admisibilidad de residuos. Dichas condiciones complementarias podrán basarse en las propiedades de los residuos.

2. Procedimientos generales de prueba y admisión de residuos

Nivel 1. Caracterización básica:

Consistirá en la averiguación completa del comportamiento del residuo. Deberá conocerse: el origen del residuo y el proceso industrial que lo genera; las propiedades características que permiten comprobar que el residuo no incumple alguno de los criterios de admisión recogidos en el presente anexo; la composición química del residuo y sus propiedades físico-químicas; el código CER del residuo y, en su caso, la identificación del residuo según anexo I del Real Decreto 833/1988; su comportamiento de lixiviación mediante ensayo normalizado DIN 38414-S4 y las características físico-químicas del lixiviado. El productor del residuo estará obligado a notificar al gestor del vertedero cualquier cambio que signifique una variación de la anterior información.

Nivel 2. Pruebas de cumplimiento:

Cada 200 toneladas de residuo enviadas al vertedero y una vez al año si el tonelaje anual es menor o se trata de cargamentos de residuos de características uniformes y de la misma procedencia, se comprobarán las variables que la caracterización básica (nivel 1) haya identificado como significativas.

La autoridad competente podrá fijar una frecuencia superior a las recogidas en el párrafo anterior para las pruebas de cumplimiento.

Nivel 3. Verificación in situ:

Para confirmar que los residuos que lleguen al vertedero en un cargamento son los mismos que han sido sometidos a pruebas de cumplimiento (nivel 2) y que coinciden con los reflejados en los documentos que acompañan a los residuos, se aplicarán métodos de comprobación rápida, que podrán consistir en una

inspección visual del cargamento de residuos antes y después de su descarga en el vertedero.

Para poder ser admitido en una clase de vertedero, cada tipo concreto de residuos deberá ser caracterizado al nivel 1 y cumplir los criterios de admisión recogidos en el presente anexo para esa clase de vertedero. Para poder ser admitido en una instalación específica, cada tipo concreto de residuos deberá someterse a las pruebas de nivel 2 y cumplir los criterios específicos de la instalación recogidos en la autorización de la misma.

Por último, cada cargamento de residuos que llegue a la entrada del vertedero deberá someterse a la verificación de nivel 3.

Algunos tipos de residuos podrán quedar exentos, permanente o temporalmente, de las pruebas de nivel 1. Esto podrá ocurrir por ser impracticable la prueba, por no disponerse de procedimientos de prueba ni de criterios de admisión adecuados, o por prevalecer otra normativa.

La autoridad competente podrá eximir de las pruebas de nivel 1 y de las de nivel 2 a residuos no peligrosos que se generen por parte de un mismo productor en cantidades inferiores a 500 kilogramos en cuatro meses, cuando de la información disponible y de la inspección visual los residuos puedan admitirse como libres de sustancias peligrosas.

Los análisis necesarios para la caracterización básica, pruebas de cumplimiento y verificación in situ serán efectuados por laboratorios competentes, de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial.

3. Toma de muestras de los residuos

Hasta que se apruebe una norma europea de toma de muestras de residuos, se aplicarán las normas y procedimientos vigentes en el territorio de cada Comunidad Autónoma.

ANEXO III- Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de mantenimiento posterior.

La finalidad del presente anexo consiste en facilitar los procedimientos mínimos para el control que debe llevarse a cabo con objeto de comprobar que: los residuos han sido admitidos para su eliminación de acuerdo con los criterios fijados para la clase de vertedero de que se trate; los procesos dentro del vertedero se producen de la forma deseada; los sistemas de protección del medio ambiente funcionan plenamente como se pretende; se cumplen las condiciones de la autorización para el vertedero.

1. Fases de implantación del Plan de Vigilancia y Control del Vertedero

Las fases de aplicación del Plan de Vigilancia y Control del Vertedero serán:

- Construcción de la red de vigilancia.
- Obtención de datos preoperativos
- Programa Inicial de Vigilancia y Control
- Plan de Vigilancia y Control de Explotación
- Plan de Control, Vigilancia y Mantenimiento Posterior.

La caracterización del estado inicial o preoperacional deberá cumplir la condición de determinar la composición de aguas subterráneas y nivel freático en al menos tres puntos por cada unidad hidrogeológica que pudiera ser afectado por la instalación, la composición de las aguas superficiales pertenecientes a cauces (en al menos dos puntos por cauce) y en las masas de aguas o humedales (al menos un punto por elemento)

El Programa Inicial de Vigilancia y Control incluirá como mínimo:

- Control del sistema de evacuación aguas pluviales y lixiviados
- Localización de los puntos de toma de muestras de lixiviados y aguas superficiales
- Definición de los puntos de control de gases
- Diseño de la red de piezómetros de control
- Metodología utilizada para el seguimiento de la formación y estructura del vaso
- Inspección visual de la zonas de vertido y distintas instalaciones
- Definición de los elementos utilizados para el control de asientos y movimientos
- Especificación de la frecuencia de muestreo particular del vertedero
- Umbrales Provisionales de Control y Actuación.

En esta fase se realizará, por cada unidad hidrogeológica afectada por el vertedero, la medida de niveles y la determinación analítica al menos en tres puntos de aguas subterráneas y en dos puntos de aguas superficiales. El alcance analítico incluirá la determinación detallada de parámetros, como mínimo en un punto de aguas superficiales y en un punto de aguas subterráneas.

2. Requisitos de la red de vigilancia y control.

Para la aplicación de los Planes de Vigilancia y Control la instalación dispondrá de una red de control que permitirá obtener como mínimo los siguientes datos:

meteorológicos; de emisión de aguas, lixiviados y gases; de las aguas subterráneas y de la topografía de la zona de vertido.

- Datos meteorológicos.

Las autoridades competentes fijarán como deben recopilarse los datos meteorológicos en la zona de cada vertedero.

Para la obtención de dicha información la autoridad competente podrá dar como válidos la recopilación de datos meteorológicos de estaciones de organismos oficiales cuando:

- Las estaciones de referencia correspondientes al ámbito regional del vertedero puedan suministrar los datos necesarios para el balance.
- Se podrá emplear los datos de una única estación cuando, siendo esta la más próxima, se justifique convenientemente que el vertedero se encuentra dentro del ámbito de estudio de la misma, bajo condiciones geográficas semejantes (respecto a altitud y latitud), no existan accidentes relevantes del terreno que puedan dar lugar a comportamientos climáticos diferenciados y la estación disponga de un registro de datos de duración (en años) suficientemente representativo de acuerdo a los criterios del Instituto Nacional de Meteorología.
- En los demás casos se ponderarán los datos convenientemente a partir de los obtenidos de las tres estaciones más próximas que representen un comportamiento climático semejante al de la situación del vertedero y formen un triángulo en el que quede inscrito el mismo.

La autoridad competente podrá dar como válidos la recopilación de datos meteorológicos a partir de estaciones de medida instaladas en el vertedero cuando las mismas presenten capacidad de realizar registros automáticos independientemente de la presencia de personal de servicio en las instalaciones. La entidad explotadora deberá aportar la documentación justificativa relativa a la homologación y estandarización de los equipos de toma de datos instalados. Además el explotador deberá redactar y cumplir obligatoriamente un plan de calibración y mantenimiento de los sensores meteorológicos durante toda su vida útil.

- Datos de emisión: aguas superficiales y lixiviados.

Deberán recogerse muestras de lixiviados y aguas superficiales, si las hay, en puntos representativos.

La red de muestreo de aguas superficiales considerará cada uno de los cauces que drenen el vaso de vertido, las masas de aguas situadas en un ámbito de 1.000 m y puntos de descarga de la red de desvío de pluviales.

Se establecerán un mínimo de dos puntos de toma de muestras (uno aguas arriba de la instalación y otro aguas abajo) en el caso de las aguas superficiales asociadas a cauces; un punto para las masas de agua independientes situadas aguas abajo y un punto de toma de muestras en el último punto de descarga de cada tramo independiente de la red de desvío de pluviales.

La red de control de lixiviados deberá incluir dos puntos de control del nivel de lixiviados y muestreo en la masa del apilado de residuos y un punto de control de lixiviados por cada celda diferenciada en los casos especificados en el siguiente Cuadro.

- Vertederos con capacidad de gestión superior a 50.000 Tn/año
- Vertederos que supongan la formación de una masa de apilado de altura igual o mayor de 24 m
- Vertederos que presenten un talud frontal general con pendiente igual o superior a 2H : 1V
- Vertederos en los que la evacuación de lixiviados requiera de medios mecánicos o no pueda realizarse por gravedad
- Vertederos con almacenamiento de sustancias biodegradables
- Vertederos en los que la calificación de riesgos haya resultado con una valoración³ de media o alta.
- Vertederos de residuos peligrosos susceptibles de reaccionar entre si o entre sus lixiviados

Figura 4. Puntos de control de lixiviados por cada celda.

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

Las balsas superficiales de almacenamiento de lixiviados podrán ser utilizadas como puntos de muestreo en el caso de que dispongan de sistemas para la prevención de los cambios de composición por pérdida o entrada de aguas o líquidos.

Las instalaciones con tratamiento de lixiviados deberán disponer de puntos de control de la cantidad y calidad de los lixiviados a la entrada y la salida de la unidad de tratamiento.

Los vertederos que dispongan de celdas que contengan sustancias con capacidad de reaccionar entre si o entre sus lixiviados, dispondrán de un punto de control en cada una de las celdas, así como en la zona de separación entre

dos celdas contiguas situadas aguas abajo en la dirección del flujo de una potencial fuga.

Las tomas de muestras y medición (volumen y composición) del lixiviado deberán realizarse por separado en cada punto en que se descargue el lixiviado de la instalación según norma UNE-EN 25667:1995, sobre “Calidad del agua. Muestreo. Parte 2: guía para las técnicas de muestreo (ISO 5667-2: 1991)”.

Para el control de aguas y lixiviados se tomarán las precauciones necesarias para que las muestras sean representativas de la composición media.

- Datos de emisión: gases.

En los puntos de toma de muestras de gases de los vertederos en los que se depositen residuos biodegradables, los compuestos objeto de control serán: CH₄, CO₂, O₂, H₂S y H₂, etc. En los vertederos con capacidad de liberación de gases distintos de los de biodegradación, y en especial en los vertederos de residuos peligrosos, la autorización (en sus apartados relativos al Plan de Vigilancia y Control) deberá indicar específicamente, en función de la composición de los residuos a gestionar; los parámetros y frecuencias objeto de control.

El control de gases deberá ser representativo de cada sección del vertedero. En aquellos vertederos en los que no se proceda al aprovechamiento energético de los gases, su control se realizará en los puntos de emisión o quema de dichos gases.

Aquellos vertederos cuya morfología implique el apoyo lateral del vaso contra el terreno (en valle, en ladera o enterrado) y que gestionen residuos no peligrosos biodegradables o peligrosos con capacidad de liberación de gases, deberán contar con un sistema de control de la zona no saturada del terreno con el objeto de vigilar la migración de gases.

Por cada uno de los taludes de apoyo contra el terreno se dispondrá de un mínimo de dos puntos de control si se cumple la condición de barrera geológica natural para el tipo de residuo considerado, y de un mínimo de tres puntos de control si no cumple la condición de barrera geológica natural.

- Protección de las aguas subterráneas.

La instalación estará dotada de un sistema permanente de piezómetros de control que permitan la supervisión del nivel de las aguas subterráneas y la toma de muestras para la determinación analítica de su composición. La estructura y posición de los piezómetros se justificará ante la Autoridad Competente en función de la estructura hidrogeológica y del modelo conceptual del flujo hidrogeológico. En ningún caso el número de piezómetros de control

de la instalación será inferior a tres por cada uno de los sistemas hidrogeológicos independientes identificados.

Se podrán utilizar puntos de control de aguas subterráneas preexistentes cuando así lo autorice la autoridad competente dentro del plan de control, y siempre que garanticen condiciones de control y aislamiento equivalentes o superiores a las expresadas más adelante sobre las características de los mismos.

Las mediciones para controlar la posible afección del vertido de residuos a las aguas subterráneas se realizarán en, al menos, un punto de control situado aguas arriba del vertedero en la dirección del flujo de aguas subterráneas entrante (en la unidad hidrogeológica objeto de control) y en, al menos dos puntos situados aguas abajo del vertedero en la dirección del flujo saliente. Al menos uno de los puntos situados aguas abajo se localizará en la zona que el modelo conceptual identifique como el punto de salida de posición piezométrica más baja ocupada por la instalación de vertido y dentro del ámbito de la isócrona correspondiente a los 30 años establecida por el modelo conceptual de flujo. En caso de la presencia de más de una región de salida se ubicará un punto de control por cada punto de salida. El número de puntos de control podrá aumentarse sobre la base de los resultados del reconocimiento hidrogeológico específico y teniendo en cuenta la necesidad de la detección rápida de cualquier vertido accidental (en su caso) de lixiviados en las aguas subterráneas.

Cuando la superficie de zona de vertido sea superior a 3 Ha y se cumpla alguna de las condiciones indicadas seguidamente, se incrementará el número mínimo de piezómetros de control (hasta alcanzar un valor mínimo de seis). Las condiciones mencionadas son:

- Que se trate de un vertedero donde no se cumpla la presencia de barrera geológica natural.
- Que se trate de un vertedero de residuos no peligrosos de capacidad superior a 50.000 Toneladas de residuos anuales.
- Que se trate de un vertedero de residuos peligrosos.

Para cualquier tipo de vertedero, el número de piezómetros de control, por cada sistema hidrogeológico independiente, se tendrá que incrementar en un piezómetro adicional por cada 1,5 Ha o fracción en que la extensión de la zona de vertido supere la superficie de 3 Ha.

Los piezómetros estarán dotados de un sistema de cierre y protección de su parte superior para prevenir la entrada de aguas pluviales o líquidos desde superficie. Se ejecutarán en materiales de suficiente durabilidad disponiendo de una zona filtrante (protegida por una zona anular de material granular de naturaleza silíceo) para muestreo y control. En posición superior a la zona filtrante, el piezómetro se protegerá hasta la zona superficial mediante

revestimiento ciego y un anular sellado con material impermeable en una longitud no inferior a los 2 metros. Los piezómetros deberán profundizar un mínimo de 5 metros en la zona saturada y tener longitud suficiente para alcanzar la zona de nivel saturado, salvo autorización (en sentido distinto) por la Autoridad Competente bajo las siguientes premisas:

- En el caso de los vertederos en los que se verifique el cumplimiento de existencia de barrera geológica natural y en los que el nivel freático se sitúa a profundidades mayores de 50 m para residuos inertes y no peligrosos, y de 100 m para vertederos de Residuos Peligrosos; los piezómetros se instalarán en la zona no saturada con función preventiva con una longitud mínima unitaria de 15 m para vertederos de residuos inertes y no peligrosos y de 25 m para residuos peligrosos (ambas longitudes por debajo de la cota de fondo del vertedero).
- En el caso de vertederos en los que no haya garantía de existencia de barrera geológica natural por una diferencia en un orden de magnitud como máximo y existan evidencias razonables de que el nivel freático se sitúa a profundidades mayores de 100 m para residuos inertes y no peligrosos, y de 150 m para vertederos de residuos peligrosos; los piezómetros se instalarán en la zona no saturada con una función preventiva con una longitud mínima unitaria de 50 m para vertederos de residuos inertes y no peligrosos y de 100 m para residuos peligrosos.

Antes de iniciar las operaciones de vertido se tomarán muestras, como mínimo en tres puntos, a fin de establecer valores de referencia para posteriores tomas de muestras.

La toma de muestras se realizará según Norma ISO 5667-11 (1993), sobre "Guías para el muestreo de aguas subterráneas".

Los parámetros objeto de análisis en las muestras tomadas deberán establecerse en función de la composición prevista del lixiviado y de la calidad del agua subterránea en la zona. En la selección de parámetros se tendrá en cuenta la movilidad de las aguas subterráneas

5. Topografía de la zona: datos sobre el vaso de vertido.

Los elementos de control de la estabilidad consistirán en un mínimo de 10 puntos de medida. Los vertederos que presenten taludes frontales de altura superior a 24 m o pendientes mayores de 2,5H:1V, deberán contar como mínimo con dos secciones de control (una en la zona de pie y otra en la zona de coronación) definidas como resultado de un estudio de estabilidad específico. Las características de los elementos de control consistirán en las siguientes:

- Secciones permanentes de instrumentación de asientos.
- Elementos de instrumentación de movimientos horizontales en masa de vertido.
- Puntos de Identificación e Inspección de indicadores externos de inestabilidad o rotura.

Los datos para la descripción del vertedero durante la explotación incluirán: superficie ocupada por residuos, peso (en Tn), volumen (en m³) y composición de los residuos, datos de peso (en Tn) y Volumen (en m³) de la capa de tierras de cobertura intermedia, método de depósito y explotación, tiempo y duración del depósito, y cálculo de la capacidad restante en el depósito.

	Fase de explotación	Fase de mantenimiento posterior
Estructura y composición del vaso de vertido*.	Anualmente.	—
Comportamiento de asentamiento del nivel del vaso de vertido.	Anualmente.	Lectura anual.

* Datos para la descripción del vertedero: superficie ocupada por los residuos, volumen y composición de los mismos, métodos de depósito, tiempo y duración del depósito, cálculo de la capacidad restante de depósito que queda disponible en el vertedero.

Tabla 3. Datos de sobre el vaso del vertido

Fuente: Real Decreto 1481/2001. [17]

3. Operaciones de vigilancia y control

El Plan de Vigilancia y Control deberá comprender los aspectos y frecuencias. Estas condiciones podrán variar en el caso de que las condiciones particulares impuestas específicamente a cada instalación dentro del documento de autorización, de declaración de impacto ambiental, de aplicación de la Ley Prevención y Control Integrado de la Contaminación o de la legislación de las Comunidades Autónomas establezcan requisitos más estrictos.

El alcance analítico de aplicación al control de las aguas superficiales, subterráneas y lixiviados considerara tres niveles: Nivel de Indicadores básicos, Nivel simplificado y Nivel completo. En el caso de los vertederos de residuos peligrosos y no peligrosos para el cómputo de las frecuencias mínimas de control de analítico sólo se tendrán en cuenta las analíticas de los dos niveles más completos.

El nivel de indicadores básicos, consistirá en la determinación in situ mediante el empleo de equipos de campo adecuadamente verificados, calibrados y

mantenidos. Los parámetros indicadores serán como mínimo: pH (para aguas y lixiviados), temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, Eh, turbidez y nivel freático de las aguas subterráneas. Este control será de aplicación continua en la instalación para las aguas superficiales, subterráneas y lixiviados. Como mínimo se aplicarán las siguientes frecuencias de control:

TIPO FRECUENCIA

Vertederos de Residuos Peligrosos Semanal

Vertederos de Residuos No Peligrosos Quincenal

Vertederos de Residuos Inertes A establecer por la Autoridad competente

Los dos siguientes niveles (Nivel Simplificado y Nivel Detallado) constituirán la base de control analítico en laboratorio a partir de la toma de muestras de aguas superficiales, subterráneas y lixiviados. El nivel superior, Nivel Completo, también será objeto de determinación en laboratorio. Con respecto al alcance analítico de los controles de aguas (superficiales y subterráneas) y lixiviados se realizarán la determinación de los parámetros calidad a Nivel Completo con las características de las instalaciones que dispongan de barrera geológica natural, y con el doble de esta frecuencia para aquellas instalaciones que no cumplan con la disponibilidad de barrera geológica natural.

Durante las fases de estado preoperativo, puesta en marcha, explotación y postclausura se realizará la determinación de la calidad al Nivel Completo como mínimo en los siguientes puntos: una muestra de lixiviado, dos muestras (una aguas arriba y otra aguas abajo) de aguas superficiales si las hubiese y dos muestras de aguas subterráneas (aguas arriba y aguas abajo) para cada sistema hidrogeológico independiente.

El control de la composición de gases se realizará cuando las características del residuo determinen su potencial de generación.

Al finalizar la explotación se incorporarán al Plan de Control y Vigilancia Postclausura las tareas de los elementos integrantes del vertedero. Se revisarán los siguientes elementos:

- Cunetas y bajantes
- Red de control de lixiviados
- Taludes
- Presencia de erosiones
- Grietas
- Sellado superior
- Plantaciones
- Balsa de lixiviados
- Sistema de tratamiento de lixiviados
- Señalización

- Cerramientos
- Elementos de la red de vigilancia y control.

4. Niveles de intervención.

El seguimiento de los parámetros incluidos en el Plan de Vigilancia y Control será analizado de acuerdo a indicadores de control y umbrales de decisión, fijados específicamente para cada instalación en el documento de autorización siempre que sea posible.

Para su definición se tendrá en cuenta el modelo conceptual de flujo subterráneo en la instalación y los resultados de la caracterización del estado preoperativo.

Los indicadores serán de tres tipos:

- Indicadores de Verificación: patrones que evidencien la variación significativa de los resultados obtenidos en relación a los valores históricos observados durante el seguimiento.
- Indicadores de Evolución: consistentes en patrones que detecten cambios súbitos o aceleración no deseada en las tendencias de evolución de las series históricas obtenidas.
- Indicadores de Umbral de Actuación: consistentes en niveles de intervención jerarquizados con el objeto de no alcanzar o superar patrones basados en objetivos de calidad regionales o referencias normativas.

La superación (en función de la fluctuación real observada durante al menos los cuatro años anteriores) de los Indicadores de verificación supondrá un cambio de frecuencias en las lecturas.

Los Indicadores de Evolución considerarán el conjunto histórico de los datos obtenidos con respecto al punto de origen determinado en el estado preoperativo y la corrección (estimada a partir de los puntos blancos) de la variabilidad del nivel de fondo del medio.

La superación de indicadores de evolución implicará la realización de estudios para determinar las causas, así como la propuesta y puesta en marcha de actuaciones para atenuación y en los casos necesarios medidas la neutralización del cambio de tendencia.

Los Indicadores de Umbral de Actuación se establecerán en función de límites legales y objetivos de calidad para garantizar la protección del medio ambiente. Contemplarán un modelo de tres niveles:

- *Nivel de análisis (nivel cero)*: Su superación determinará el estudio de sí las tendencias pueden llevar a la superación de los siguientes niveles.
- *Nivel de Actuación Preventiva (nivel uno)*: su superación supondrá la activación del Plan de Emergencia en sus aspectos preventivos, la determinación de las causas y la identificación de las actuaciones a implantar para su neutralización.
- *Nivel de Intervención (nivel dos)*: nivel límite no susceptible de superación. En el caso de alcanzarse deberá cesar temporalmente la actividad de la instalación hasta que las medidas ejecutadas como consecuencia de la puesta en marcha del plan de diagnóstico de daños y del Plan de Emergencia correctivo confirmen la vuelta a situaciones de actividad normal (niveles de análisis uno o cero).

En el establecimiento de los niveles de intervención para fijar los valores que suponen un cambio significativo, la autoridad competente tendrá en cuenta las formaciones hidrogeológicas específicas, la calidad de las aguas subterráneas y sus variaciones locales; y los posibles ámbitos de utilización que se estén dando a las mismas. Estos niveles de intervención y valores límites establecidos por la Autoridad Competente serán específicos para cada instalación particular.

5. Informes

Como resultado de la aplicación de los Planes de Vigilancia y Control se facilitarán a la autoridad competente informes periódicos, extraordinarios y especiales.

Los informes periódicos recogerán, con una periodicidad mínima semestral, todos los datos referentes al programa de vigilancia y control. La administración competente podrá incrementar o reducir dicha frecuencia (hasta un mínimo anual) en función de la evolución del plan de control.

Los informes extraordinarios estarán vinculados a la superación de umbrales de actuación y al plan de emergencia. Cualquier anomalía será comunicada de modo inmediato, de acuerdo a los plazos máximos indicados, a la administración competente e indicando la propuesta de medidas a adoptar; así como cualquier otra que pudiese ser conveniente para garantizar la adecuada protección del medio ambiente, la salud humana y la operación segura de la instalación.

Como informes y estudios especiales se realizará durante la primera fase del programa de vigilancia y control una previsión de movimientos y un esquema del funcionamiento hidrogeológico que permita evaluar el comportamiento del vertedero frente a estas variables y definir con precisión los umbrales de actuación y las medidas correctoras de ser necesarias.

Los informes recogerán las observaciones registradas incorporando gráficos de control con normas y niveles de control establecidos para cada pozo situado aguas abajo en el caso de las aguas subterráneas.

6. Plan de Emergencia

Las instalaciones de vertido de residuos contarán con un Plan de Emergencia de acuerdo al artículo 10 del R.D. 1481/2001.

La entidad explotadora presentará un Programa Director del Plan de Emergencia vinculado a los diferentes umbrales e indicadores de control. El programa director contemplará las actuaciones de comprobación, análisis de causas, máximos tiempos estimados de respuesta, estudios de prevención y corrección y protocolos de comunicación a la autoridad competente vinculados al plan de emergencia.

Cuando la entidad explotadora detecte la superación de umbrales del Nivel de Actuación Preventiva deberá poner en marcha los aspectos preventivos del plan de emergencia en función de los resultados del análisis de causas de la superación.

Estos aspectos preventivos del plan de emergencia considerarán, al menos, los siguientes tipos de medidas: rediseño y refuerzo de la red de control; refuerzo de los elementos de aislamiento; pretratamiento del residuo a almacenar; rediseño e intensificación de los procedimientos de aceptación de residuos; y rediseño y reforzamiento de las instalaciones de captación, evacuación y depuración de lixiviados.

7. Plan de mantenimiento posterior

Antes de finalizar la explotación de la instalación y el comienzo de las operaciones de clausura y sellado, la entidad explotadora remitirá para su revisión por la autoridad competente el plan de mantenimiento postclausura, quien lo confirmará o modificará para adaptarlo a la situación real del vertedero, si esta fuera distinta a la prevista en el momento de la autorización.

Las tareas a incluir en el plan de mantenimiento deben considerar:

- Mantenimiento de la capa de sellado
- Conservación y operación del sistema de drenaje y evacuación de lixiviados
- Operación y Conservación del sistema de evacuación y tratamiento de gases
- Conservación de las zanjas de desvío de pluviales

- Estado de la red de pozos de control de lixiviados y aguas subterráneas
- Mantenimiento y gestión de la balsa de lixiviados
- Conservación y Funcionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados o (en su ausencia) retirada de lixiviados y transporte a instalación de tratamiento
- Conservación y Mantenimiento de Taludes, bermas y caminos de servicio
- Conservación y Mantenimiento de Plantaciones
- Mantenimiento de los elementos de cerramiento y señalización
- Reparaciones de desperfectos en taludes, sellado, láminas, cunetas y bajantes
- Conservación y mantenimiento del sistema de vigilancia y control.

2.2 LIXIVIADO DE VERTEDERO.

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. En la mayoría de los vertederos el lixiviado está formado por el líquido que entra en el vertedero desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS

El lixiviado tiene una naturaleza y una composición diferente dependiendo del tipo de residuo que lo genera, de las condiciones climáticas, de la edad del depósito controlado y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el PH será bajo y las concentraciones de DBO_5 , COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del rango de 6,5 a 7,5, y los valores de concentración de DBO_5 , COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Por lo general, los lixiviados presentan altos niveles de contaminación, principalmente debidos a:

- Elevadas concentraciones de materia orgánica
- Concentraciones de nitrógeno, principalmente en forma de amonio
- Altas concentraciones en sales, principalmente cloruros y sulfatos
- Baja presencia de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles.

Otra característica importante de los lixiviados es que su calidad va cambiando a lo largo de la vida del depósito controlado.

En general en el lixiviado según va pasando el tiempo:

- Disminuye la biodegradabilidad de la materia orgánica. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación DBO_5/DBO .
- Aumenta la concentración de amonio
- Aumenta la presencia de sales

CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS DE UN VERTEDERO	
Parámetros	Concentración (mg/l)
DBO	40-89.5
DQO	81-33.36
pH	3.7-8.5
Sólidos Disueltos	584-44.9
Sólidos en suspensión	10-700
Alcalinidad (CaCO ₃)	240-20.5
Dureza (Ca CO ₃)	540-22.8
Fósforo Total	0-130
NH ₃ -N	0-1106
NO ₂ + NO ₃ - N	0-10.3
Calcio	60-7200
Cloruro	5-2467
Sodio	34-7700
Potasio	28-3770
Sulfatos	1-1558
Manganeso	0.1-125
Magnesio	17-15.6
Hierro	0-2820
Zinc	0-370
Cobre	0-10
Cadmio	0-17

Tabla 4. Características de los lixiviados de un vertedero.

Fuente: Ingeniería civil y Medio Ambiente [9]

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

La presencia de oligocompuestos en el lixiviado dependerá de la concentración de estos compuestos en la fase gas dentro del vertedero.

2.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Cuando se filtra el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la tabla

se presentan los datos típicos sobre la composición de los lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.

COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS LIXIVIADOS DE VERTEDERO Y SU VARIACIÓN CON EL TIEMPO		
Parámetro (mg/l)	Vertedero nuevo	Vertedero antiguo
COT	6000	80-160
DBO₅	10000	100-200
DQO	18000	100-500
Alcalinidad (como CaCO₃)	3000	200-1000
Dureza total (como CaCO₃)	3500	200-500
pH	6	6,6-7,5
Sólidos en suspensión	500	100-400
Nitrato	25	5-10
Nitrógeno amoniacal	200	20-40
Nitrógeno orgánico	200	80-120
Fósforo total	30	5-10
Ortofosfato	20	4-8
Calcio	1000	100-400
Cloro	500	100-400
Hierro total	60	20-200
Magnesio	250	50-200
Potasio	300	50-400
Sodio	500	100-200
Sulfatos	300	20-50

Tabla 5. Composición típica de los lixiviados de vertedero y su variación con el tiempo.

Fuente: Tchobanoglous [20]

A continuación, se incluye una tabla en la que indica los parámetros de muestreo de los lixiviados (Tchobanoglous, 1994).

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

Tabla 6. Parámetros de muestreo de los lixiviados.

Fuente: Tchobanoglous [20]

2.2.3 BALANCE GENERAL DE AGUAS Y DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN UN VERTEDERO.

Es interesante conocer los diferentes componentes del balance hidrológico de un vertedero que conllevan la aparición de lixiviados dentro del vaso del mismo. Los diferentes factores verán su influencia condicionada por la fase de explotación en la que se encuentre el vertedero, el momento en que se clausuró o por las limitaciones que se hayan establecido para el control de flujos importantes como puede ser el agua filtrada superiormente o agua entrada dentro del vertedero.

- **Agua filtrada superiormente:** procede de la precipitación, durante la explotación es el término más importante. Los diferentes regímenes de precipitación según la climatología conllevan situaciones de filtración diferentes. Esta agua se filtra a través del material de cobertura y fluye dentro de la masa de residuos en función de las condiciones de humedad en que se encuentre el residuo. La determinación exacta del

agua que filtra en un vertedero es un factor de difícil determinación pero crucial para establecer el balance hidrológico del depósito de residuos.

- **Agua aportada por los residuos:** en este caso es el agua que aportan los propios residuos, como aquella que han absorbido de la atmósfera o de la lluvia. El tiempo de almacenamiento o de tránsito entre que el residuo es generado, recolectado y finalmente depositado en el vertedero puede conllevar variaciones sustanciales en la propia humedad del residuo. En climas áridos la humedad de los residuos puede llegar a ser baja (20% o menos). Sería necesario realizar una caracterización estacional de la humedad aportada por los propios residuos con el fin de proceder al establecimiento de un modelo de lixiviación fidedigno.
- **Agua aportada por el material de cubrición:** el material de cubrición, normalmente tierras, empleado en la explotación del vertedero puede aportar humedad. La naturaleza del material, su origen, así como las condiciones climáticas pueden influir en la cantidad de agua a considerar. La capacidad de campo del material de cubrición como suelo, condiciona igualmente la transferencia de humedad a la masa de residuos en contacto.
- **Agua perdida inferiormente:** es el efluente que percola en forma de lixiviado. Su salida normalmente se realiza en el sistema de captación de lixiviados que se dispone en el fondo del vaso de vertido, tal y como describiremos a continuación.
- **Agua consumida en la formación del gas:** la descomposición anaerobia de los residuos tiene, como hemos visto, un importante consumo de agua, siempre que ésta sea accesible y esté disponible para el proceso. La masa de agua consumida por kg de residuos Sólidos Volátiles Rápidamente Biodegradables (SVRB) es del orden de 0'165 kg de H₂O por kg de SVRB destruidos, lo que conlleva un consumo 7'38 kg de H₂O por m³ de gas producido. Como hemos indicado, es importante a la hora de considerar este flujo negativo el saber si está disponible para los procesos de degradación de la materia orgánica.
- **Agua perdida como vapor de agua:** el gas de vertedero normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad del vapor de agua que se escapa del vertedero se determina suponiendo que el gas del vertedero está saturado en vapor de agua. Para su determinación se utiliza la ley de los gases perfectos. Suponiendo una temperatura del gas de 32°C el agua evacuada con el gas es de 0'0352 kg de H₂O por m³ de gas producido.
- **Otros flujos de agua:** la pérdida por evaporación en la superficie del vertedero o bien sobre el residuo extendido o bien sobre la tierra de cobertura, puede llegar a ser apreciable en climas áridos como los que se dan en el clima mediterráneo y en determinadas estaciones del año, y

en algunos casos deberá ser tenida en cuenta a la hora de establecer el modelo que refleje el balance hidrológico del vertedero.

En este punto resulta obvio indicar que en el momento que se vaya a producir la clausura del vertedero, es decir el momento en que debemos actuar, tendremos una generación de lixiviados producida por los balances hidrológicos de los años anteriores. Por lo tanto si queremos realizar una evaluación fidedigna del lixiviado que aún se producirá a partir del momento de nuestra actuación, para por ejemplo evaluar el coste de gestión de depuración de ese lixiviado, nuestro estudio deberá remontarse al inicio de la explotación de aquel vertedero, de cómo se explotó, de cuáles fueron las entradas de agua exteriores (precipitaciones, escorrentías, aguas subterráneas), de qué tipo de residuo se depositó, de que alturas de explotación se mantenían en cada nivel de vertido, para poder establecer de esta manera un balance hidrológico (por metro cuadrado de vertedero), en función del momento de la explotación, para de esta forma poder conocer cuánto lixiviado quedará dentro del vertedero y al cual tendremos que hacer frente.

2.2.4. IDENTIFICACIÓN DE LA EDAD DEL VERTEDERO Y DE LA FUENTE DE LIXIVIACIÓN.

En la siguiente tabla (Tchobanoglous, 1994), se incluyen algunos datos típicos sobre la composición de lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.

<i>Parámetro (mg/l)</i>	<i>Vertedero nuevo (menos de dos años)</i>	<i>Vertedero maduro (mayor de 10 años)</i>
	<i>Rango</i>	<i>Rango</i>
DBO5	2.000-30.000	100-200
DQO	3.000-60.000	100-500
SST	200-2.000	100-400
pH	4,5-7,5	6,6-7,5
Sulfatos	50-1.000	20-50

Tabla 7. Datos típicos de la composición de lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.

Fuente: Tchobanoglous [20]

Estos datos orientativos, nos pueden servir para identificar en cierta medida, una vez localizados los lixiviados que puedan existir en la masa de residuos la edad del vertedero. En el caso de vertederos antiguos, parámetros anómalamente bajos respecto a los recogidos en la tabla anterior nos pueden permitir identificar una posible entrada de aguas exteriores en la masa de residuos. También parámetros anormalmente elevados para un vertedero nuevo, especialmente asociados a algún mineral o ión, asociado a determinadas litologías que podamos encontrar alrededor del vertedero nos pueden hacer detectar igualmente una posible entrada de aguas de escorrentía o subterráneas dentro de la masa de residuos.

Evidentemente el análisis de los datos anteriores deben ir acompañados de una inspección visual concienzuda a pie de todo el perímetro del vertedero, así como de su superficie para poder identificar y localizar escorrentías superficiales que puedan estar ocasionando la producción de lixiviados.

Igualmente un estudio geológico en profundidad del entorno del vertedero nos deberá llevar a la conclusión de poder descartar la presencia de aguas subterráneas. Para esta problemática hay que ser muy cuidadoso puesto que ocasionalmente pueden presentarse aguas subterráneas subsuperficiales en paquetes cuaternarios (gravas, glaciares de ladera, limos) que pueden estar ocasionalmente conectadas con la masa de residuos en algún punto y ser fuente de lixiviación.

Entendemos por lo tanto que el acometer un sistema de captación de lixiviados en un vertedero incontrolado pasa ineludiblemente por la identificación de la naturaleza de la lixiviación y por acometer la interrupción absoluta de cualquier entrada de aguas limpias exteriores que ocasionarían una fuente que podría llegar a ser notable de lixiviación.

2.2.5 CUANTIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE LIXIVIADOS.

Cuantificar el volumen de lixiviados dentro de una masa de residuos no es una cuestión sencilla, pues entran en juego numerosos factores, especialmente el relativo a la composición de los residuos allí depositados y la edad de los mismos. El lugar donde este emplazado el vertedero y el uso que se haya hecho del mismo, así como los residuos depositados condicionaran el volumen de lixiviados disponible desde el primer momento del inicio de la actividad de eliminación, hasta el momento en que se vaya a acometer el sellado del vertedero tras el final de su explotación.

En la siguiente tabla se recogen datos típicos de humedad (porcentaje en peso) para diferentes fracciones típicas de los residuos no peligrosos, con contenidos destacables de humedad:

Tipo de residuo	Rango	Típico
Fracciones de residuos (no compactados, antes de vertido)		
Residuos de comida mezcla	50-80	70
Textiles	6-15	10
Cuero	8-12	10
Residuos de jardín	30-80	60
Madera	15-40	20
Residuos domiciliarios mezcla		
En camión recolector	15-40	20
En vertedero de baja densidad (vertido y extendido con pala cargadora)	15-40	25
En vertedero de media densidad (compactación con medios mecánicos tipo buldozer)	15-40	25
Residuos comerciales		
Residuos de comida	50-80	70
Cajas de madera	10-30	20
Industriales		
Fangos de depuradora o de procesos	75-99	80
Restos de cuero	6-15	10
Serrín y viruta de madera	10-40	20
Residuos textiles	6-15	10
Madera mezcla	30-60	25
Agrícolas		
Agrícolas mezclados	40-80	50
Residuos de frutas (mezclados)	60-90	75
Estiércol (húmedo)	75-96	94
Residuos de vegetales (mezcla)	60-90	75

Tabla 8. Datos típicos de humedad para diferentes fracciones típicas de los residuos no peligrosos.

Fuente: COICCP [2]

2.2.6 MOVIMIENTO DEL LIXIVIADO EN VERTEDEROS Y HACIA EL EXTERIOR.

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los vertederos, por lo que dentro de la masa de residuos el movimiento en condiciones normales será vertical. Desde allí su movimiento en vertederos incontrolados, que no cuentan con aislamiento en el fondo del vaso, es hacia abajo a través del estrato inferior que corresponde al terreno natural donde se asienta. La naturaleza de este terreno condicionará la velocidad del flujo vertical, esa naturaleza puede motivar igualmente que el movimiento sea lateral, si existen paquetes granulares en el perímetro del vertedero en contacto con la masa de residuos.

La velocidad de filtración de los lixiviados en el fondo del vertedero puede estimarse mediante la Ley de Darcy, donde el coeficiente de permeabilidad depende de la naturaleza de los materiales del terreno natural, y donde el gradiente hidráulico va a influir en la velocidad de descarga.

Igualmente la configuración inicial del vertedero al inicio de su explotación condicionará la naturaleza del flujo de lixiviados. En este sentido, vertederos tipo valle, es decir vertederos configurados en un fondo de valle, facilitarán el movimiento horizontal del lixiviado hacia los puntos bajos del valle,



Figura 5. Vertedero tipo valle.

Fuente: COICCP [2]

mientras que vertederos tipo hueco, tenderán a almacenar el lixiviado en el fondo del hueco, desde donde se realizará el flujo del lixiviado hacia el terreno natural.

Ocasionalmente, y en vertederos donde su abandono es reciente, pueden producirse afloramientos puntuales de lixiviados en los taludes del mismo, ocasionados por niveles de baja permeabilidad (tipo arcillas) que hayan sido utilizados para la cubrición de los residuos en las fases de explotación.

En las siguientes fotografías se muestran el afloramiento de lixiviados desde el talud del vertedero y sobre el terreno anexo.



Figura 6. Afloramiento de lixiviado I.

Fuente: COICCP [2]



Figura 7. Afloramiento de lixiviado II.

Fuente: COICCP [2]

Se observa el inconfundible color pardo-negruzco del lixiviado, especialmente en vertederos de residuos no peligrosos con alto porcentaje de materia orgánica.

En la siguiente fotografía se puede observar como se ha excavado una zanja en el borde del vertedero con el camino, en perpendicular al flujo del lixiviado, y se ha colocado una lámina de impermeabilización, rellenándose la zanja con gravas. De esta manera, el lixiviado es conducido por gravedad hasta la zanja, y en vez de continuar por el terreno natural, es recogido en la zanja y conducido a un depósito.



Figura 8. Zanja para reconducir el lixiviado.

Fuente: COICCP [2]

En la siguiente fotografía se observa el canal de recogida de pluviales, construido sobre la zanja de recogida de lixiviados.



Figura 9. Canal de recogida de pluviales.

Fuente: COICCP [2]

Los lixiviados recogidos en la zanja drenante son conducidos a un depósito, que se sitúa en la zona de menor cota y enterrado, dejando una boca de acceso para proceder a su vaciado periódico.



Figura 10. Camión cisterna para transportar lixiviados.

Fuente: COICCP [2]



Figura 11. Detalle de la tapa de acceso al depósito, una vez enterrado.

Fuente: COICCP [2]

2.2.7 CONTROL DE LIXIVIADOS

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

Actualmente se utilizan, materiales aislantes de vertederos para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases del vertedero fuera de la zona del vertedero.

El uso de arcilla como material de aislamiento ha sido el método más utilizado para reducir o eliminar la filtración del lixiviado fuera de los vertederos. La arcilla es factible por su facilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado, y por su resistencia al flujo del lixiviado. Sin embargo, está ganando en popularidad el uso de aislantes formados por una combinación mixta de geomembrana y arcilla, especialmente por la resistencia proporcionada por las geomembranas al movimiento del lixiviado y de los gases del vertedero.

Sistemas de recubrimientos para RSU. El objetivo en el diseño de aislamientos para vertederos es minimizar la filtración del lixiviado en los suelos subsuperficiales por debajo del vertedero y eliminar, así, la contaminación potencial de las aguas subterráneas.

Sistemas de aislamiento para monorrellenos. Los sistemas de aislamientos para monorrellenos normalmente están formados por dos geomembranas, cada una con una capa de drenaje y un sistema de recogida de lixiviados.

Construcción de aislamientos de arcilla. El mayor problema de la arcilla es su propensión a agrietarse debido a la desecación. Es muy importante no dejar que la arcilla se seque durante su colocación. Para asegurar un buen rendimiento, el recubrimiento de la arcilla se debería instalar en capas de 10 a 15 cm, con una compactación adecuada antes de colocar las capas subsiguientes. Otro problema que puede plantearse cuando se utilizan arcillas de distintos tipos es la rotura debido a diferencias en el hinchamiento. Para evitar estas diferencias se debe utilizar un solo tipo de arcilla para la construcción del aislamiento.

2.2.8 SISTEMAS PARA LA RECOGIDA DE LIXIVIADOS

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

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

Diseño de instalaciones para la recogida de lixiviados. Hay varios diseños para separar el lixiviado dentro de los vertederos. A continuación se presentan dos tipos:

Terrazas inclinadas: Las terrazas están construidas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas drene hasta los canales de recogida del lixiviado. Se utiliza una tubería perforada colocada en cada canal para transportar el lixiviado recogido hasta una localización central.

Fondo con tuberías: En este caso se procede a colocar la tubería para la recogida del lixiviado, longitudinalmente encima de la geomembrana. Los tubos para la recogida del lixiviado son de 10 cm y tienen perforaciones cortadas con láser sobre la mitad de la circunferencia.

2.2.9 ALTERNATIVAS A LA GESTIÓN DE LIXIVIADOS

La gestión de lixiviados es clave para la eliminación potencial que tiene un vertedero para contaminar acuíferos subterráneos. A continuación se presentan varias alternativas.

- **Reciclaje de lixiviados:** Cuando se recircula el lixiviado, se diluyen y atenúan los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del vertedero.
- **Evaporación de lixiviados:** Este método es uno de los más sencillos para la gestión de lixiviados, e implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. El lixiviado que no se evapora se riega por encima de las porciones completadas del vertedero. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de los lixiviados se cubre durante el invierno con una geomembrana, para excluir aguas de lluvia. Se evacua el lixiviado acumulado mediante evaporación durante los meses cálidos de verano, destapando la instalación de almacenamiento y regando el lixiviado sobre las superficies del vertedero en activo o ya lleno.
- **Tratamiento de lixiviados:** Cuando no se utiliza el reciclaje y la evaporación de los lixiviados, y no es posible evacuarlos directamente a una instalación de tratamiento, será necesaria alguna forma de pretratamiento o un tratamiento completo. Dependiendo de las características de los lixiviados se pueden utilizar varias opciones de tratamientos.
- **Descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales:** En aquellas zonas donde el vertedero está localizado cerca de un sistema para la recogida de aguas residuales o donde se puede utilizar una alcantarilla a presión para conectar el sistema para la recogida del lixiviado a un sistema para la recogida de aguas residuales, a menudo se descarga el lixiviado en el sistema para la recogida de aguas residuales. En muchos casos, quizás, será necesario un pretratamiento, utilizando un método para reducir el contenido orgánico antes de proceder a la descarga del lixiviado en la alcantarilla. Pero en los lugares donde no hay alcantarillas

disponibles, y no es factible la evacuación mediante evaporación y riego, puede ser necesario un tratamiento completo seguido de una descarga superficial.

2.2.10 TRATAMIENTOS

Si los lixiviados se tratan en una instalación “in situ” se deberá asegurar que se cumplen las condiciones de vertido a cauce fijadas en la autorización del vertedero.

La reducción de los parámetros nocivos de los lixiviados a valores aceptables para que, posteriormente, puedan ser tratados conjuntamente con las aguas residuales, se puede alcanzar mediante la aplicación de diferentes procesos:

- Tratamiento biológico
- Tratamiento físico químico con reactivos.
- Tratamiento de absorción mediante carbón activo.
- Oxidación UV
- Ultrafiltración
- Osmosis inversa
- Tratamiento mixto.

En la tabla 9 se resumen los principales operaciones y procesos de tratamiento biológicos y físico/químicos utilizados para el tratamiento de lixiviados. El proceso o procesos de tratamiento elegidos dependerán en gran parte del contaminante o contaminantes que haya que separar.

PROCESO DE TRATAMIENTO	APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Procesos biológicos		
Fangos activados	Separación de orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos de desespumamiento; necesario clarificador separador.
Reactores de lotes secuenciados	Separación de orgánicos	Similar a los fangos activados, pero no se precisa un clarificador separado; solamente aplicable con tasas de flujo relativamente lentas
Estanques aireados de estabilización	Separación de orgánicos	Requiere una gran superficie de terreno
Procesos de película fija	Separación de orgánicos	Frecuentemente utilizado con efluentes industriales similares a los lixiviados, pero no ensayado con lixiviados de vertederos
Lagunas anaerobias	Separación de orgánicos	Requisitos de energía y producción de fangos menores que en los sistemas aerobios; requiere calefacción; mayor

		potencial para la inestabilidad del proceso; más lento que los sistemas aerobios.
Nitrificación/Desnitrificación	Separación de nitrógeno	La nitrificación/desnitrificación puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de orgánicos
Procesos químicos		
Neutralización	Control de PH	De aplicación limitada para la mayoría de los lixiviados
Precipitación	Separación de metales y algunos aniones	Produce un fango, que posiblemente requiera la evacuación como residuo peligroso
Oxidación	Separación de orgánicos; detoxificación de algunas especies inorgánicas	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos; el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmedo	Separación de orgánicos	Costoso; funciona bien con orgánicos refractarios
Operaciones físicas		
Sedimentación/flotación	Separación de materia en suspensión	Sólo tiene una aplicación limitada; puede utilizarse conjuntamente con otros procesos de tratamiento
Filtración	Separación de materia en suspensión	Solamente útil como proceso de afino
Arrastre por aire	Separación de amoníaco u orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica
Separación por vapor	Separación de orgánicos volátiles	Altos costes energéticos; el valor de condensado requiere un tratamiento adicional
Absorción	Separación de orgánicos	Tecnología probada; costes variables según lixiviado
Intercambio iónico	Separación de inorgánicos disueltos	Útil solamente como un paso de acabado
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de orgánicos con alto peso molecular	Propenso al atascamiento; de aplicación limitada para los lixiviados
Ósmosis inversa	Disoluciones diluidas de inorgánicos	Costoso; necesario un pretratamiento extensivo
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los fangos resultantes pueden ser peligrosos; puede ser costoso excepto en zonas áridas

Tabla 9. Principales operaciones y procesos de tratamientos biológicos y físico/químicos utilizados para el tratamiento de lixiviados.

Fuente: Tchobanoglous [20]

2.2.11 IMPACTO AMBIENTAL

Nuestros vertederos de residuos distan mucho de ser adecuados y seguros. Además, se olvida que antes de enterrar es necesario reducir, reutilizar y reciclar, es decir, minimizar los residuos. Los vertidos líquidos que generan los residuos en los vertederos, los lixiviados, originan graves problemas, sobre todo en cuanto a la contaminación de agua, pero sólo un exiguo 0,13% de los vertederos disponen de instalaciones para tratarlos.

En España, las grandes movilizaciones sociales contrarias a los vertederos de residuos industriales, como los de Baena y Nerva, en Andalucía, nos dan una pista clara de los peligros de enterrar estos residuos, sobre todo aquellos catalogados como peligrosos. Para estos últimos la opción de disposición mediante vertedero es inaceptable por la contaminación que generan, tanto visible, atmosférica y de aguas superficiales, como invisible a través de lixiviados subterráneos.

Los lixiviados arrastran las sustancias tóxicas producidas en el vertedero. La Agencia de Medio Ambiente de EE.UU. (USEPA) ha analizado hasta 200 compuestos diferentes presentes en los lixiviados de residuos sólidos urbanos. Algunos como cloruro de vinilo, cloruro de metilo, tetracloruro de carbono, clorobencenos (de los que destaca el hexaclorobenceno, por su toxicidad) y arsénico son sustancias cancerígenas. Al igual que el resto de las sustancias organocloradas, son persistentes y bioacumulativas en los eslabones de la cadena trófica. El plomo, cadmio y el mercurio son metales presentes en los lixiviados de vertedero. El plomo procede principalmente de las baterías de los coches y de aparatos electrónicos, plásticos, vidrio, cerámica, pigmentos, etc. El plomo ocasiona lesiones cerebrales en los niños e hipertensión arterial en adultos. El mercurio produce lesiones renales y neurológicas. Las fuentes de cadmio y mercurio proceden fundamentalmente de las pilas. El cadmio, además, se encuentra en los aparatos electrónicos, plásticos, etc., y produce lesiones renales y hepáticas. La contaminación del agua de los pozos y acuíferos tiene consecuencias muy perjudiciales para la salud humana.

A veces, las empresas camuflan los peligros de estos enterramiento con palabras equívocas como inertizar, tal como se pretende hacer en muchos sitios, donde se quiere enterrar residuos peligrosos de naturaleza orgánica (disolventes, restos de hidrocarburos, etc.) e inertizarlos cubriéndolos con cal, sepiolita y puzolana. Pero este proceso químico no convierte estos residuos en no peligrosos, porque siguen tan activos químicamente como en su composición original, ya que este tipo de procesos sólo diluye y estabiliza, no inertiza, las reacciones químicas en el paquete de residuos peligrosos.

En España hay 9.012 vertederos de residuos urbanos e industriales (la inmensa mayoría urbanos), de los cuales aún están operativos 3.700, y de éstos tan sólo unos 170 están mínimamente controlados. De los 170 vertederos controlados, tan sólo el 30% son adaptables, o están adaptados, a la transposición de la Directiva de Vertido de Residuos, aunque con muy diversas calidades en su gestión ambiental.

Sólo un 27% de los vertederos controlados en España aplica algún tipo de tratamientos a los líquidos que se extraen o que expulsa el depósito final de residuos urbanos.

Frente a los 9.012 vertederos de residuos existentes en España sólo el 0,13%, tienen capacidad para tratar de forma segura, sin percolaciones o fugas subterráneas, todos los lixiviados que genera esta actividad empresarial ambiental. Cabe señalar que este porcentaje ni siquiera refleja todo el impacto causado por todos los residuos enterrados, pues para ser precisos habría que añadir los más de 50.000 microvertederos incontrolados que hay en España.

Éste es el punto clave del preocupante problema que representan los vertederos de residuos en un Estado como el español, con zonas afectadas por restricciones casi cíclicas de agua y mayoritariamente calcáreo –lo cual supone que los lixiviados se filtren con más facilidad–, al menos en su vertiente mediterránea: la contaminación del agua. Este recurso estratégico puede contaminarse por los líquidos fermentados o lixiviados –a menudo cargados con pesticidas tóxicos– que se filtran a través de las capas freáticas hacia los ríos, o afectan a acuíferos que surten de agua para el riego o el consumo doméstico.

2.3 TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS.

En este apartado se van a analizar la diferentes técnicas para la cuantificación de la producción de lixiviados. Las técnicas que abordaremos con modelos de transporte analítico y/o numérico, se distinguen para zona saturada y para zona no saturada.

Flujo y transporte en la zona no saturada: El movimiento del agua u otros líquidos y gases en la zona no saturada presenta una elevada complejidad al ser función de parámetros como la infiltración, el grado de humedad o saturación en agua del suelo, la conductividad hidráulica, la capacidad de adsorción del suelo y las características del contaminante.

Las investigaciones empíricas del movimiento del agua en la zona no saturada suelen requerir instrumentación específica monitorizada durante prolongados periodos de tiempo. Por este motivo, la estimación de las condiciones hidráulicas en función de la succión del terreno se suele efectuar por aproximaciones teóricas basadas en ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas.

Hay casos en que la modelización del flujo a través de la zona no saturada se realiza mediante ecuaciones sencillas basadas en la ecuación de Darcy para el flujo de agua en zona saturada. Sin embargo, a veces hay que recurrir a ecuaciones complejas en las que intervienen algunos parámetros como: conductividad hidráulica, curva característica, saturación residual del terreno en agua, saturación residual del terreno en el contaminante y coeficiente de reparto agua/fase libre.

Flujo y transporte en la zona saturada: El modelo conceptual debe contemplar los siguientes aspectos referidos al flujo de aguas subterráneas: gradiente hidráulico horizontal y vertical, oscilaciones del nivel freático, variaciones en los patrones de flujo de las aguas, heterogeneidad y anisotropía del sistema de flujo, entradas y salidas.

Es necesario conocer los patrones de flujo regional del acuífero considerado, puesto que basar el modelo exclusivamente en los datos obtenidos del emplazamiento estudiado puede obviar tendencias del flujo regional que no se observan a pequeña escala. Este conocimiento del funcionamiento hidrogeológico a escala regional adquiere mayor importancia al incrementarse las dimensiones que se estimen del penacho de contaminación.

También es importante considerar los flujos verticales del agua, que en algunos emplazamientos pueden tener un significado importante y la distribución de la porosidad en el medio.

2.3.1 MODELOS ANALÍTICOS.

Los modelos analíticos proporcionan soluciones exactas a ecuaciones que describen la migración de los contaminantes. Deben utilizarse en las primeras fase de evaluación antes de pasar a modelos numéricos.

Entre sus ventajas, los cálculos son muy rápidos y son numéricamente estables, la relevancia de cada parámetro sobre el resultado se puede ver fácilmente, pueden utilizarse para examinar sistemas complejos, subdividiéndolos en un grupo de sistemas simplificados y se pueden acoplar técnicas estadísticas tipo Monte-Carlo de una forma más sencilla que a los numéricos.

Respecto a las desventajas, requieren que la mayoría de los parámetros permanezcan constantes en el espacio y en el tiempo, es posible que no exista una solución analítica si la física del sistema es complicada, y por último, se aplican a sistemas de flujo sencillos en los que es aceptable la simplificación.

Las aplicaciones más importantes son: representar el movimiento del contaminante y predecir posibles impactos, realizar un test sobre las hipótesis del modelo conceptual y chequear los modelos numéricos.

El soporte son cálculos simples mediante calculadora, hojas de cálculo y programas informáticos comerciales.

2.3.1.1 ZONA SATURADA.

A continuación, aparece el esquema con los modelos aplicables en zona saturada según el resultado que se desee obtener del modelo. En la aplicación práctica realizada en este trabajo final de Máster no se utilizan este tipo de modelos.

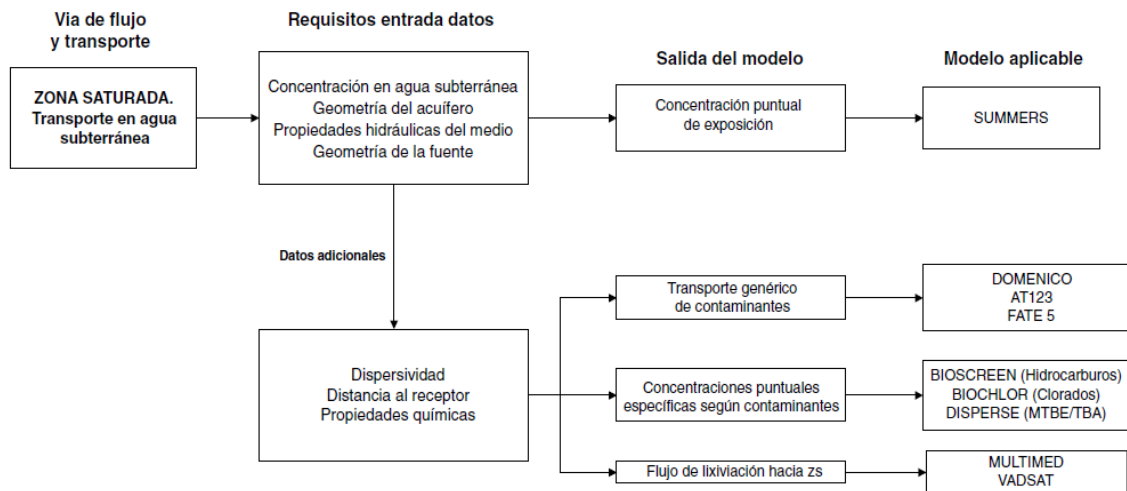


Figura 12. Diagrama de un proceso de selección de un modelo analítico en zona saturada.

Fuente: Departamento de Medio Ambiente del País Vasco [4]

2.3.1.2 ZONA NO SATURADA

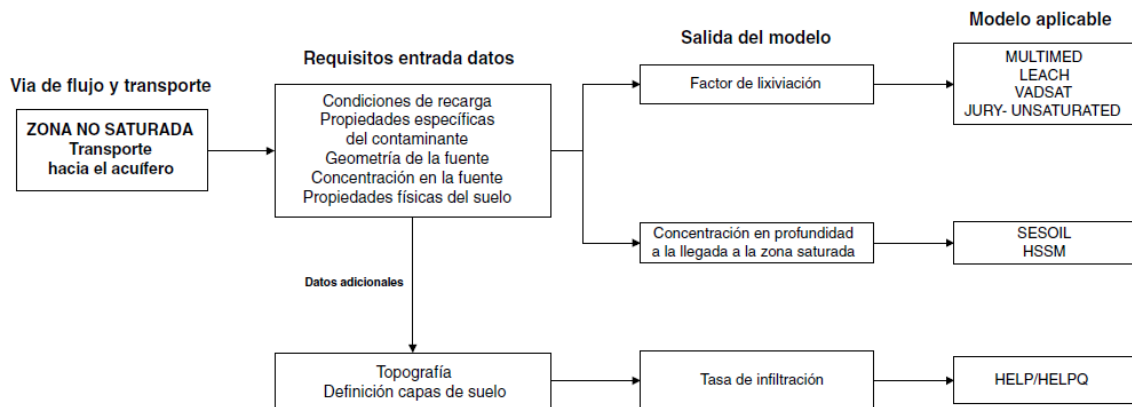


Figura 13. Diagrama del proceso de selección de un modelo analítico en zona no saturada.

Fuente: Departamento de Medio Ambiente del País Vasco [4]

Dentro de los modelos analíticos en zona no saturada, nos centramos en la descripción del modelo VHELP.

VHELP

DESCRIPCIÓN

- HELP (Hydrogeological Evaluation of Landfill Performance) es un modelo desarrollado por US Army Engineer Waterways Experiment Station para el diseño de vertederos.
- Se trata de un modelo quasi-bidimensional basando en el círculo de los balances de la masa de agua en los vertederos.
- HELPQ (Hydrologic Evaluation of Leachate Production and Quality) es un programa que calcula la generación de lixiviados como consecuencia de la percolación del agua a través de materiales contaminados, a partir de los datos suministrados por HELP.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE ENTRADA

- Evapotranspiración.
- Régimen de precipitaciones
- Temperatura/radiación solar
- Superficie del vertedero (o zona contaminada)
- Superficie que genera escorrentía
- Especificaciones de las geometrías y drenajes previstos.
- Características de las capas consideradas, porosidad, saturación residual, punto de marchitez, conductividad hidráulica.
- Sorción.
- Concentraciones iniciales de contaminantes.
- Densidad aparente, contenido en agua.
- Coeficientes de dispersión y reparto.

APLICACIÓN

- Es un modelo de uso ampliamente extendido y contrastado en el diseño de vertederos de residuos urbanos y peligrosos. Permite evaluar las alternativas de sellados, redes de drenaje, efectuar estimaciones de lixiviados, escorrentías, etc.
- Permite utilizarse también para cuantificar la generación de lixiviados en emplazamientos contaminados por hidrocarburos y evaluar la eficacia de las posibles medidas preventivas o correctoras para evitar la afección de las aguas subterráneas.

LIMITACIONES

Algunas limitaciones que presenta el modelo son:

- Considera intensidad homogénea de las lluvias, por lo que no se puede contemplar episodios aislados de lluvia intensa.
- No admite escorrentía procedente de áreas adyacentes al vertedero.
- No pueden presentarse vías de flujo preferentes.

- En el HELPQ no se considera la pérdida de contaminantes por volatilización.

RESULTADOS

Se obtienen en forma de tablas y gráficos los siguientes datos:

HELP: Escorrentía superficial, tasas de filtración, volumen de agua almacenada en los residuos, zona de evapotranspiración, balance de masas del agua en el sistema, volumen anual de agua drenada, volumen de agua que percola hacia los residuos.

HELPQ: Contaminante que sale de la masa de residuos a través de los drenajes y del agua que percola y contaminante que permanece en la masa de los residuos.

WHI UNSAT SUITE

APLICACIÓN

Las aplicaciones de WHI UNSAT SUITE son las siguientes:

Simulación a largo plazo del transporte y flujo de contaminantes (VOCs, PAHs, pesticidas y metales pesados) en la zona no saturada bajo condiciones variables de la estación del año actual empleando el modelo SESOIL;

Predicción de la migración vertical de hidrocarburos volátiles a través de la zona saturada, empleando el modelo VLEACH;

Estimación de la migración de los pesticidas procedentes de la agricultura a través de la zona no saturada con el modelo PESTAN;

Simulación del flujo y de los procesos de transporte de agua subterránea a través de medios heterogéneos y no saturados empleando el modelo VS2DT;

Predicción de la recarga estacional en medio heterogéneos bajo condiciones climáticas variables empleando el modelo HELP;

Generación, hasta 100 años, de datos climáticos estadísticamente fiables para prácticamente cualquier emplazamiento en el mundo utilizando el “WHI Generador de Clima”.

FUNDAMENTO

Programa que combina los modelos SESOIL, VLEACH, PESTAN, VS2DT y HELP en un solo modelo gráfico que reproduce el flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes a través de la zona no saturada.

DATOS DE SALIDA

Los mencionados en el apartado de “Aplicación”.

LIMITACIONES

Al ser unidimensional, WHI UNSAT SUITE no considera los flujos laterales, tan sólo los verticales.

2.3.2 MODELOS NUMÉRICOS.

Los modelos numéricos ofrecen soluciones aproximadas a las ecuaciones que gobiernan el transporte de contaminantes. En los modelos distribuidos, el espacio y el tiempo, se discretizan en intervalos.

Las ventajas de los modelos numéricos con respecto a los analíticos son: Permiten representar gran cantidad de aspectos del comportamiento del sistema (se pueden asignar diferentes parámetros a cada celda, lo que permite considerar variaciones laterales y verticales, la geometría del modelo puede diseñarse de forma que refleje la forma del sistema, permiten trabajar con varias capas...) y también se pueden obtener resultados con un alto grado de confianza, siempre que existan suficientes datos de partida.

Las desventajas son bastantes, ya que se requiere un importante grado de experiencia en hidrogeología y transporte de contaminantes, requieren una gran cantidad de datos de entrada, implican un coste económico y temporal elevado, la tendencia a considerar que los resultados del modelo son correctos incluso cuando existe una considerable incertidumbre acerca del sistema y por último, pueden llevar a inestabilidad numérica.

Generalmente se aplican cuando se necesita una aproximación más sofisticada que la proporcionada por soluciones analíticas, que sea capaz de reflejar variaciones espaciales, temporales, etc. También se aplican si se quiere simular actuaciones de remediación, ubicación y régimen de bombeo en pozos de extracción

El soporte en este caso son programas informáticos comerciales.

Entre los códigos y métodos de cálculo para este tipo de método, se encuentran:

- Diferencias finitas: las coordenadas de espacio/tiempo se dividen según una malla prismática rectangular, el flujo y el transporte se resuelven por aproximaciones directas.
- Elementos finitos: el dominio espacial se divide en elementos de formas diversas, habitualmente triangulares o en cuadriláteros, la variación de los parámetros a lo largo de un elemento se realiza según una función polinómica.

- Métodos de solución: seguimiento de partículas, métodos eulerianos, lagrangianos, método de las características (MOC).

2.3.2.1 TRANSPORTE EN ZONA NO SATURADA/SATURADA

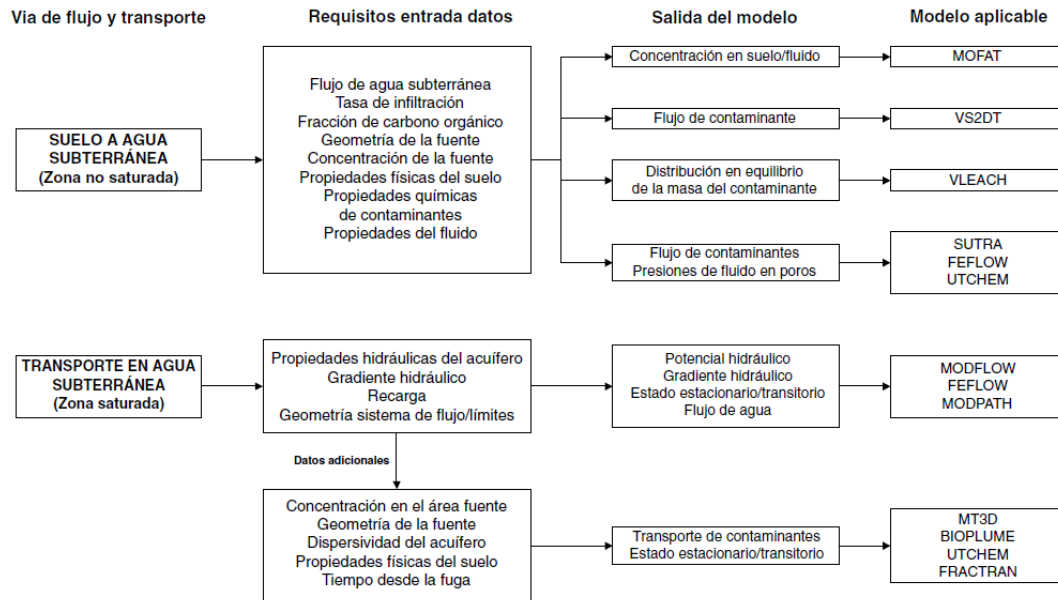


Figura 14. Diagrama del proceso de selección de un modelo numérico

Fuente: Departamento de Medio Ambiente del País Vasco [4]

VLEACH

DESCRIPCIÓN

- Desarrollado por la USEPA, VLEACH es un modelo unidimensional de diferencias finitas que permite simular la movilización y migración de contaminantes orgánicos en la zona no saturada.
- Mediante una discretización del medio en polígonos divididos a su vez en celdas horizontales, modeliza el transporte por advección y difusión en la fase vapor y líquida del contaminante.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE ENTRADA

Hidrogeología: Densidad aparente, porosidad eficaz, humedad del suelo, carbono orgánico en suelo, tasa de recarga.

Contaminantes: Coeficiente de distribución carbono orgánico, constante de Henry, concentración de agua de recarga, concentración inicial de contaminante, solubilidad y coeficiente de difusión en aire.

APLICACIÓN

- Se utiliza para evaluar el impacto sobre las aguas subterráneas de fuentes de contaminación industriales como son fugas de tanques enterrados o vertidos desde conducciones.
- Se aplica también para evaluar la volatilización de compuestos orgánicos volátiles.

LIMITACIONES

- Considera constante la tasa de infiltración (puede suponer una sobreestimación importante del impacto sobre el agua).
- No contempla dispersión de la fase líquida ni degradación de los contaminantes.
- No permite considerar heterogeneidad dentro de cada polígono.
- A pesar de ser un modelo conceptualmente sencillo, su manejo presenta cierta complejidad.

RESULTADOS

- VLEACH aporta resultados en formato de archivos texto, aunque pueden obtenerse gráficos en combinación con otros programas. Las versiones comerciales suministran estos gráficos directamente.
- La información que aporta VLEACH es la siguiente:
- Evolución de la masa de contaminante en la zona no saturada. Los cambios se expresan como advección y difusión a la atmósfera (fase vapor) o al agua subterránea (fase líquida).

- Impacto sobre las aguas subterráneas. Puede obtenerse para cada polígono o para toda el área considerada. Viene expresado por un periodo de tiempo dado o como masa total acumulada.
- Concentración de contaminante a una profundidad determinada en fase vapor, líquida o adsorbida al suelo.

SUTRA

DESCRIPCIÓN

- Se trata de un programa de modelización de flujo y transporte convectivo o calor. Utiliza un algoritmo híbrido de elementos finitos bidimensionales cuadráticos y diferencias finitas.
- Permite simular un flujo en función de la densidad en medio saturado, acoplarle si se precisa un flujo en medio no saturado, y bien un transporte de solutos, en el que se puede considerar fenómenos de adsorción por la matriz del suelo, y una cinética de primer orden o de orden cero, o bien, transporte de calor tanto en el agua subterránea como en la matriz del suelo.
- Es un modelo en dos dimensiones que permite simular tanto perfiles verticales como tramos horizontales.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE ENTRADA.

Geometría: Mallado que permita reflejar las heterogeneidades del medio.

Hidrogeología: Conductividad hidráulica, porosidad eficaz/coef. Almacenamiento, anisotropía de la conductividad hidráulica, condiciones de contorno, cargas hidráulicas iniciales y modelo de infiltración en la zona no saturada.

Contaminación: Concentraciones de contaminantes, parámetros de adsorción, parámetros de cinética.

Calor: Conductividad térmica, capacidad térmica y anisotropía.

APLICACIÓN

- Modelos de flujo en medios anisótropos y heterogéneos.
- Intrusión marina
- Evaluación de recursos geotérmicos.
- Transporte de contaminantes.
- Definición de perímetros de protección.
- Evaluación de impacto de bombeos y obras subterráneas.

LIMITACIONES

- Es fundamental el trazado de un mallado adecuado ya que puede condicionar la solución final, incluso generar inestabilidades en la solución.
- Se trata de un modelo bidimensional.
- El modelo de transporte de solutos es relativamente simple y no considera fenómenos de difusión ni dispersión.

- Necesita de una interfaz de pre y postproceso de datos para facilitar su manejo.

RESULTADOS

- SUTRA da como resultados ficheros numérico que precisan de un programa postproceso de datos para poder representarlos gráficamente. Las principales salidas gráficas que muestra son:
 - Piezometría en régimen estacionario/transitorio.
 - Planos de distribución de vectores de velocidad.
 - Distribución de temperaturas en régimen estacionario/transitorio.
 - Concentración de contaminantes/transitorio.
 - Distribución espacial de parámetros hidrodinámicos.

MODFLOW

DESCRIPCIÓN

- Modelo 2D/3D de diferencias finitas para simulación de flujo de agua subterránea, tanto en régimen permanente como transitorio.
- Desarrollado por el USGS, es el modelo matemático de flujo más ampliamente extendido debido a su versatilidad, rigor y disponibilidad.
- Permite incluir varias capas de diferentes características horizontales y verticales, simulando sus interacciones.
- Presenta una estructura modular, que permite diferentes opciones de modelización.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE ENTRADA

- Datos geométricos de los acuíferos (extensión, espesor).
- Condiciones de contorno (zonas de nivel constante, de flujo subterráneo nulo, etc.).
- Parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, transmisividad, parámetros de almacenamiento, etc.)
- Niveles piezométricos iniciales.
- Presiones al sistema (ubicación y régimen de extracción de pozos/drenes, recarga, evaporación, relación con aguas superficiales).

APLICACIÓN

- El sistema a modelizar se divide en celdas. Para cada una de ellas, se resuelve la ecuación del flujo, asumiendo el área de modelización subdividida en bloques de características homogéneas.
- Puede simular medios estratificados con capas semipermeables (admite heterogeneidad y anisotropía).
- Aunque desarrollado para medios porosos, se puede aplicar, con precauciones, a medios fracturados asimilables.

LIMITACIONES

- Sólo simula el flujo de agua subterránea, no admite transporte.
- Es necesario tener un conocimiento bastante preciso del sistema.
- Requiere el uso por parte de un hidrogeólogo experto.
- Es fácil introducir errores y poco visual.

RESULTADOS

- La salida son los niveles piezométricos (descensos, velocidades, etc.) de cada una de las celdas en que se divide el sistema a modelizar.
- Las salidas originales del programa, así como los datos de entrada, se estructuran en ficheros ASCII. Para facilitar la interpretación de estos datos, se emplean programas asociados, predominante gráficos.

- Funciona normalmente asociado a MODPATH (permite el trazado del movimiento de partículas aplicable al transporte advectivo).
- También cuenta con el WATER BUDGET, aplicación de cálculo de los balances de entradas y salidas de agua del sistema.

MT3D

DESCRIPCIÓN

- Modelo 3D de transporte de solutos para la simulación de procesos de advección, dispersión y reacciones químicas (lineales, no lineales, biodegradación) de contaminantes en zona saturada. Dispone de una estructura modular que permite simular cada opción y compuesto de forma independiente.
- Cuenta con una interfaz directa con MODFLOW, aunque también puede asociarse a cualquier otro modelo de flujo de diferencias finitas.
- MT3D incluye la opción de modelo de doble porosidad, aplicable a medios fracturados.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE ENTRADA

- Datos hidrogeológicos del sistema(modelización del flujo previa para obtener los niveles piezométricos y los flujos): geometría del acuífero, características hidráulicas, presiones al sistema y dispersividad.
- Datos químicos generales: constante de degradación, concentraciones de partida, condiciones de borde y número y distribución de partículas.

APLICACIÓN

- Sobre una discretización del sistema en celdas, se obtiene la evolución de plumas de contaminación de acuerdo a las condiciones de flujo subterráneo, considerando los principales procesos asociados al transporte de solutos: advección, dispersión y reacciones químicas.
- Es uno de los modelos más utilizados y contrastados.

LIMITACIONES

- El flujo subterráneo no se ve afectado por las concentraciones de compuestos.
- Requiere un conocimiento preciso del sistema y que se utilizado por un técnico experto.
- Su uso sin pre/post procesadores es tedioso, es fácil introducir errores, y poco visual.
- Es importante seleccionar el método de resolución más adecuado (MOC, MMOC, HMOC).

RESULTADOS

- Distribución espacial y temporal de concentraciones en el sistema y puntos seleccionados.
- Balance de masas.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LA EC. DE BALANCE

3.1 INTRODUCCIÓN

El agua, aunque se encuentra en un movimiento cíclico continuo, es cuantificable y debido a los requerimientos actuales del hombre, es necesario conocer con exactitud ese movimiento y definirlo, para aprovechar de forma racional los recursos hídricos y que no se modifiquen de forma irreversible, los componentes que intervienen en el ciclo del agua.

El balance hídrico tiene por objeto cuantificar los recursos y volúmenes de agua del ciclo hidrológico de acuerdo con el axioma de Lavoisier: "*nada se crea ni se destruye, sólo se transforma*". Este axioma en dinámica de fluidos se conoce como la Ecuación Continuidad. También permite establecer relaciones entre las distintas variables hidrológicas.

El establecimiento del balance hídrico en una cuenca o en una región determinada permite obtener información sobre:

- El volumen anual de escurrimiento o excedentes.
- El período en el que se produce el excedente y por tanto la infiltración o recarga del acuífero.
- Período en el que se produce un déficit de agua o sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en ese período.

El establecimiento de un balance supone la medición de flujos de agua (caudales) y almacenamientos de la misma (niveles). Se pueden establecer balances de forma *general*, incluyendo aguas superficiales y subterráneas y *parciales* de sólo aguas superficiales, de un acuífero, del agua del suelo, etc. En cualquier caso, a la hora de establecer el balance se examinarán las entradas y las salidas al sistema analizado.

La propia idea de balance supone la medida independiente de los términos que intervienen en la ecuación de balance. Como toda medida física, está sujeta a error, que, en algunos casos es grande debido a diversas circunstancias. Por ello ha de actuarse con gran prudencia a la hora de obtener datos del balance. Por medio de las precipitaciones atmosféricas (P), llega agua a la superficie de la Tierra. Parte de estas precipitaciones se evapora en contacto con el aire o es absorbida por las plantas y después transpirada por las mismas, fenómenos que denominaremos de forma general como evapotranspiración (E). El agua entonces sigue dos caminos: una parte fluye por la superficie de la corteza terrestre y otra parte se infiltra en el terreno. El agua de infiltración aún puede ser captada por el suelo y las plantas, sufriendo entonces fenómenos de evapotranspiración o puede circular hipodérmicamente junto con las aguas que circulan en superficie, denominándose el conjunto aguas de escurrimiento (R). La parte de agua infiltrada que alcanza una zona más profunda constituye la verdadera agua de infiltración (I) que se junta con las aguas subterráneas alimentando el acuífero.

La Ecuación de Continuidad se basa en que la diferencia que se produce entre las entradas y las salidas de agua se traduce en el agua que queda almacenada.

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación del Almacenamiento}$$

Aplicando estos conceptos, se expresa la precipitación como:

$$P = E + R + I + e$$

Siendo e el error cometido en las estimaciones o *error de cierre*, E la *evapotranspiración*, R el *escurrimiento* e I la *infiltración*.

Para poder aplicar esta ecuación hay que tener en cuenta dos condiciones importantes:

- *Unidad hidrogeológica*: es decir, que todas las aguas que se miden y comparan pertenezcan al mismo acuífero.
- *Período de tiempo*: el período de medición deberá de ser de al menos un año.

De modo más concreto podríamos reescribir la ecuación de forma que abarque todas las fuentes y sumideros de la zona en estudio de la siguiente forma:

$$e = P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S$$

Donde:

e = error de cierre

P = aportación pluviométrica

Q_{se} = caudal superficial entrante

Q_{te} = caudal subterráneo entrante

E = evapotranspiración real

Q_{ss} = caudal de superficie saliente

Q_{ts} = caudal subterráneo saliente

ΔS = variación del almacenamiento (final - inicial). En condiciones ideales de medida debe ser igual al error de cierre.

La E se calcula mediante el balance hídrico o mediante fórmulas empíricas (de Coutagne, de Turc, o de Makkink) o directamente mediante evapotranspirómetros. En cada caso, según el mecanismo de recarga y descarga del acuífero en estudio y del intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, cada uno de los términos de la ecuación podrá o no aparecer. Por ejemplo, si se trata de un acuífero limitado totalmente por fronteras impermeables, los términos Q_{te} y Q_{ts} no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo.

Si se trata de un solo acuífero que no tiene descarga por evapotranspiración ni por afloramientos, los términos Q_{ss} y E serán suprimidos de la ecuación. Por otra parte, la ecuación de balance para un mismo acuífero podrá variar de un intervalo de tiempo a otro. En todos los casos, es necesario tener una idea más o menos clara del comportamiento del acuífero para plantear su ecuación de balance.

El área utilizada para efectuar el balance de agua subterránea depende de varios factores: por una parte, lo ideal sería efectuar el balance para todo el acuífero (valle, planicie) a fin de conocer su potencialidad total; sin embargo, esto no siempre es posible, debido a que la aplicación del balance requiere del conocimiento del comportamiento del acuífero observado en pozos los cuales no siempre se encuentran distribuidos en toda el área, sino sólo en una porción de la misma. Por consiguiente, en muchas ocasiones el área de balance tiene que limitarse al área con datos disponibles.

El área de balance puede estar limitada por fronteras reales, geométricas e hidrológicas, tales como afloramientos o masas de agua (mar, lagos, etc), y por fronteras virtuales, imaginarias.

Para realizar un balance hídrico lo principal es la adquisición de datos, por lo cual se requiere que ésta se haga de la forma más precisa posible.

Se deben recoger los datos siguientes (Figura 15):

- Precipitación (P): Se mide por la altura que alcanzaría sobre una superficie plana y horizontal, antes de sufrir pérdidas. Para determinarla se usan los pluviómetros y la unidad de precipitación es el milímetro de altura (1 mm).
- Evapotranspiración (ET): Se determina mediante cálculos basados en la temperatura y humedad de la atmósfera y del suelo.
- Ecurrimiento superficial o directo (ED): Se determina por aforos de cursos fluviales.
- Ecurrimiento subterráneo o base (ES): Se calcula por diferencia, una vez conocidos los demás términos del balance hídrico, o por cálculos y experiencias basados en la porosidad y permeabilidad de diferentes rocas.

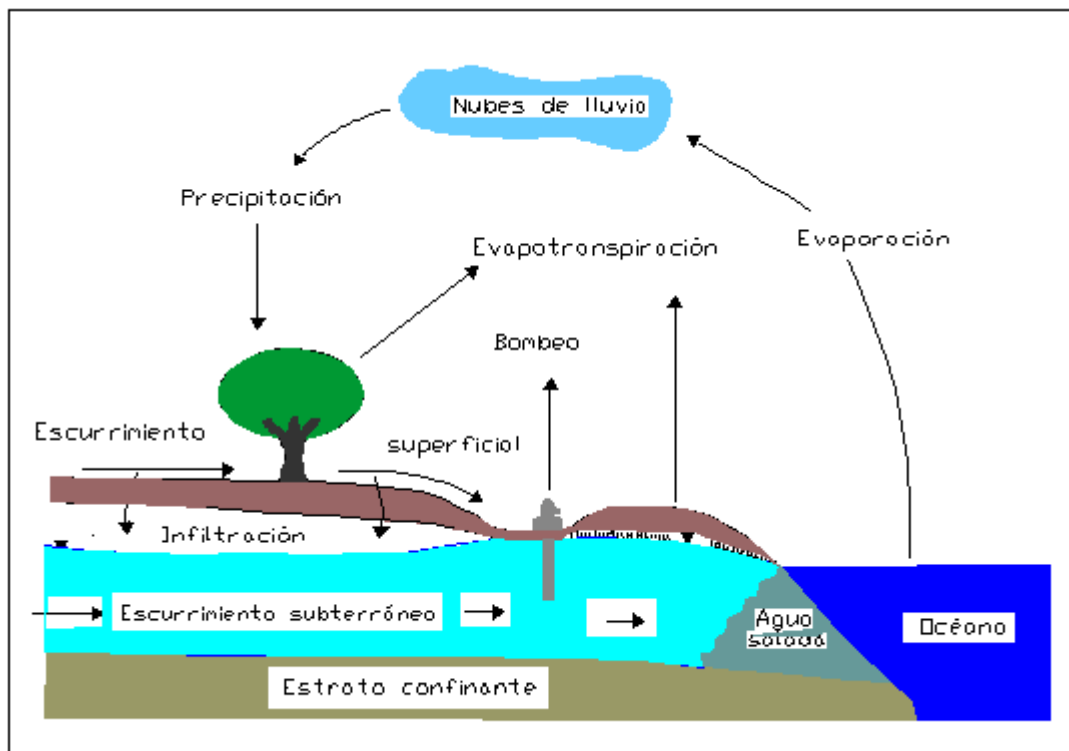


Figura 15. Términos del balance hidrológico.

Fuente: Unops [15]

Para establecer el *balance hídrico* se necesitan los datos de:

- Las precipitaciones medias anuales (con una serie de 5-10 años) del máximo de estaciones meteorológicas disponibles.
- La evapotranspiración potencial media anual (de la misma serie de años).
- La reserva de agua útil (RU) o el agua que puede almacenar el suelo y utilizar las plantas. Depende de:
 - El tipo de suelo
 - La capacidad de campo (C_c): grado de humedad de una muestra que ha perdido toda su agua gravitacional.
 - El punto de marchitez (P_m): grado de humedad de una muestra tal que la fuerza o succión que ejercen las raíces sobre el agua ya no les permite sacar más agua. Esto quiere decir que la fuerza de succión de las raíces no supera a la fuerza con la que dicho suelo retiene el agua.
 - La profundidad de las raíces.
 - La densidad aparente del suelo.

Estos datos se pueden obtener experimentalmente o mediante tablas conociendo el tipo de suelo.

3.2. BALANCE GENERAL DE AGUAS Y DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN UN VERTEDERO.

Es interesante conocer los diferentes componentes del balance hidrológico de un vertedero que conllevan la aparición de lixiviados dentro del vaso del mismo. Los diferentes factores verán su influencia condicionada por la fase de explotación en la que se encuentre el vertedero, el momento en que se clausuró o por las limitaciones que se hayan establecido para el control de flujos importantes como puede ser el agua filtrada superiormente o agua entrada dentro del vertedero.

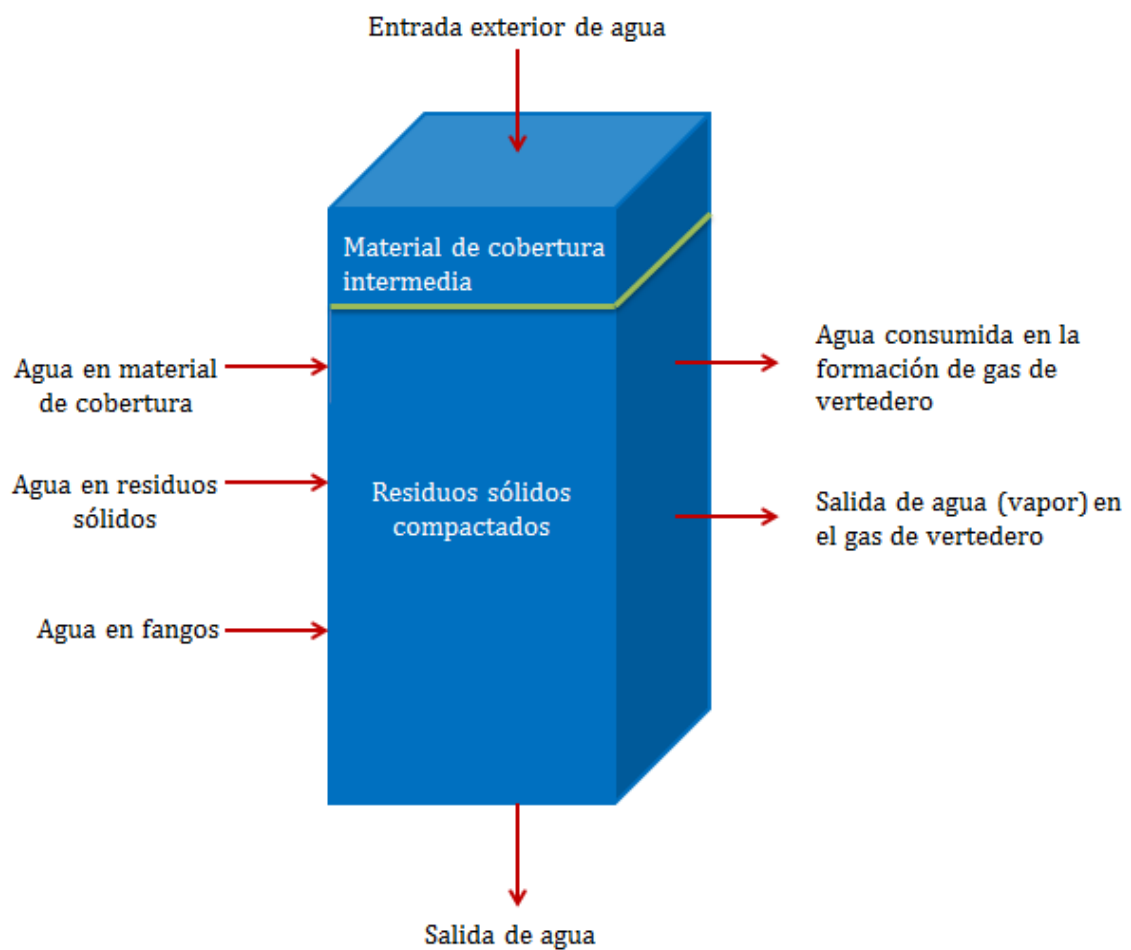


Figura 16. Esquema de definición para un balance de aguas utilizado para valorar la formación del lixiviado de un vertedero.

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 COMPONENTES DEL BALANCE

Agua filtrada superiormente: procede de la precipitación, durante la explotación es el término más importante. Los diferentes regímenes de precipitación según la climatología conllevan situaciones de filtración diferentes. Esta agua se filtra a través del material de cobertura y fluye dentro de la masa de residuos en función de las condiciones de humedad en que se encuentre el residuo. La determinación exacta del agua que filtra en un vertedero es un factor de difícil determinación pero crucial para establecer el balance hidrológico del depósito de residuos.

Cuando no se utiliza una geomembrana, se puede determinar la cantidad de lluvia que se filtra a través de la cubrición del vertedero utilizando el modelo de Evaluación Hidrológica del Rendimiento del Vertedero (HELP).

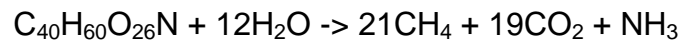
Agua aportada por los residuos: en este caso es el agua que aportan los propios residuos, como aquella que han absorbido de la atmósfera o de la lluvia. El tiempo de almacenamiento o de tránsito entre que el residuo es generado, recolectado y finalmente depositado en el vertedero puede conllevar variaciones sustanciales en la propia humedad del residuo. En climas áridos la humedad de los residuos puede llegar a ser baja (20% o menos). Aquí se considera la humedad de los residuos cuando son depositados en el vertedero. Se refiere tanto al agua intrínseca de los residuos como a la humedad absorbida de la atmósfera o lluvia antes de depositar los residuos en el vertedero. Sería necesario realizar una caracterización estacional de la humedad aportada por los propios residuos con el fin de proceder al establecimiento de un modelo de lixiviación fidedigno.

Agua aportada por el material de cubrición: el material de cubrición, normalmente tierras, empleado en la explotación del vertedero puede aportar humedad. La naturaleza del material, su origen, así como las condiciones climáticas pueden influir en la cantidad de agua a considerar. La cantidad máxima de humedad que el material de cubrición puede contener se define como capacidad de campo del material, es decir, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad.

Agua perdida inferiormente: es el efluente que percola en forma de lixiviado. El agua que sale desde el fondo de la primera fase del vertedero se llama lixiviado. Como se ha resaltado anteriormente, el agua que sale del fondo de la segunda y de las siguientes fases procede del agua que entra desde la fase superior a la fase en cuestión. En los vertederos donde se utilizan sistemas intermedios para la recogida de lixiviado, el agua que sale desde el fondo de la celda colocada directamente por encima del sistema para la recogida del lixiviado intermedio también se llama lixiviado.

Agua consumida en la formación de biogás: La descomposición anaerobia de los residuos tiene, como hemos visto, un importante consumo de agua, siempre que ésta sea accesible y esté disponible para el proceso. La cantidad de agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la fórmula para el material de descomposición.

Resumiendo esta fórmula, la masa de agua absorbida por kilogramo de residuos orgánicos secos consumidos puede estimarse de la siguiente forma:



Agua perdida como vapor de agua: El biogás suele estar saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que se escapa del vertedero se determina suponiendo que el gas del vertedero está saturado y aplicando la ley de los gases perfectos:

$$P_v \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Siendo :

P_v : Presión parcial (atmósferas) de vapor de agua a la temperatura T

V: volumen en litros (l)

n: número de moles de gas

R: constante de los gases perfectos ($R=0,082 \text{ atm} \cdot \text{l}/^\circ\text{K}$)

T: temperatura en grados Kelvin ($^\circ\text{K}$)

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

$$P_v = 4,82 \text{ KN/m}^2 \text{ (presión del vapor de agua a } 32^\circ\text{C)}$$

$$V = 1,0 \text{ l}$$

n= número de moles de gas

$$R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{l}/^\circ\text{K}$$

$$T = 305 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$n = \frac{P_v \cdot V}{R \cdot T} = \frac{4,82 \cdot 1,0}{0,082 \cdot 305} = 0,0019 \text{ mol} \frac{18 \text{ kg}}{\text{kg} \cdot \text{mol}} = 0,0352 \text{ kg } H_2O / \text{m}^3 \text{ biogás}$$

Otras pérdidas y ganancias en agua: la pérdida por evaporación en la superficie del vertedero o bien sobre el residuo extendido o bien sobre la tierra de cobertura, puede llegar a ser apreciable en climas áridos como los que se dan en el clima mediterráneo y en determinadas estaciones del año, y en

algunos casos deberá ser tenida en cuenta a la hora de establecer el modelo que refleje el balance hidrológico del vertedero.

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

$$CC = 0,6 - 0,55 \cdot \left(\frac{W}{4536 + W} \right)$$

Siendo

CC: capacidad de campo, es decir, la fracción de agua en los residuos basándose en el peso seco de los mismos.

W: peso (por metro cuadrado de superficie) de la sobrecarga calculada en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión (kg).

En este punto resulta obvio indicar que en el momento que se vaya a producir la clausura del vertedero, es decir el momento en que debemos actuar, tendremos una generación de lixiviados producida por los balances hidrológicos de los años anteriores. Por lo tanto si queremos realizar una evaluación fidedigna del lixiviado que aún se producirá a partir del momento de nuestra actuación, para por ejemplo evaluar el coste de gestión de depuración de ese lixiviado, nuestro estudio deberá remontarse al inicio de la explotación de aquel vertedero, de cómo se explotó, de cuáles fueron las entradas de agua exteriores (precipitaciones, escorrentías, aguas subterráneas), de qué tipo de residuo se depositó, de que alturas de explotación se mantenían en cada nivel de vertido, para poder establecer de esta manera un balance hidrológico (por metro cuadrado de vertedero), en función del momento de la explotación, para de esta forma poder conocer cuánto lixiviado quedará dentro del vertedero y al cual tendremos que hacer frente.

3.2.2 PLANTEAMIENTO DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL VERTEDERO

Los términos que componen el balance de aguas pueden colocarse en forma de ecuación:

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_{VA} - W_{F(L)}$$

Siendo

ΔS_{RS} : variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el vertedero (kg/m^3)

W_{RS} : agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes (kg/m^3)

W_{MC} : agua (humedad) en el material de cobertura (kg/m^3)

$W_{A(u)}$: agua filtrada superiormente (para la capa superior del vertedero el agua procede de la precipitación) (kg/m^3)

W_{GV} : agua perdida con la formación de gas en el vertedero (kg/m^3)

W_{VA} : agua perdida como vapor de agua saturado con el biogás (kg/m^3)

$W_{F(L)}$: pérdida de agua en la celda, la cual se considera lixiviado si la celda en cuestión está localizada directamente por encima de un sistema para la recogida de lixiviado (kg/m^3)

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

Para determinar si se produce lixiviado, se compara la capacidad de campo del vertedero con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se formará lixiviado.

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

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO VHELP

4.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROGRAMA

ESTUDIOS: Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model.

ESCRITORES: Paul R. Schroeder, Tamsen S. Dozier, John W. Sjostrom y Bruce M. McEnroe.

ORGANIZACIÓN: US Army Corps of Engineers, Estación Experimental de Vías Navegables (WES)

FECHA: 09 1994

Versión Número.: 3.00

4.2. EL MODELO HELP

El modelo HELP (Evaluación Hidrológica del Relleno Sanitario), es un completo programa para diseñar, evaluar y optimizar la hidrología vertedero y las tasas de recarga de aguas subterráneas. El modelo HELP es utilizado y reconocido en todo el mundo como el estándar aceptado para el modelado hidrológico de los vertederos, y se ha convertido en un componente integral para los proyectos de relleno sanitario de funcionamiento y permisos de cierre.

El modelo HELP es un modelo hidrológico cuasi bidimensional, multi - capa que requiere los siguientes datos de entrada para cada perfil de modelo:

- Los datos meteorológicos: precipitación, radiación solar, temperatura, parámetros de evapotranspiración.
- Las propiedades del suelo: porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, y conductividad hidráulica.
- Información de Diseño: revestimientos, sistemas de recolección de lixiviados y escorrentías, pendiente de la superficie.

La estructura de perfil del vertedero puede consistir en una combinación de los recursos naturales (suelo) y los materiales artificiales (residuos, geomembranas) con opciones para instalar capas de drenaje horizontales. El modelo HELP también representa el cambio en la pendiente para diferentes partes del perfil de vertedero.

HELP utiliza técnicas de solución numérica que dan cuenta de los efectos de almacenamiento en superficie, deshielo, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, el almacenamiento de humedad del suelo, subsuelo lateral, drenaje, recirculación de lixiviados, drenaje vertical insaturado, y las fugas a través del suelo, geomembranas, o revestimientos compuestos .

4.3. DESCRIPCIÓN

Las versiones 1,2 y 3 del programa HELP, fueron desarrolladas por el ingeniero del Ejército de EE.UU. de Vías Navegables Estación Experimental (WES), Vicksburg, MS, Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU (EPA), Laboratorio de ingeniería de Reducción de Riesgos, Cincinnati, OH, en respuesta a las necesidades de la Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) y la Respuesta Integral de Compensación y Responsabilidad (CERCLA, mejor conocida como Superfund) identificados por la Oficina de la EPA de los Residuos Sólidos, Washington, DC.

El propósito principal del modelo, como se ha comentado antes, es ayudar en la comparación de diseño de las alternativas del vertedero a juzgar por sus balances hídricos.

La Evaluación Hidrológica del modelo Landfill Performance (HELP) se desarrolló para ayudar a los diseñadores de confinamiento de residuos peligrosos y los reguladores que evalúan el rendimiento hidrológico de los diseños de vertederos propuestos. El modelo acepta clima, suelo y datos de diseño. Utiliza técnicas de solución que dan cuenta de los efectos de almacenamiento en superficie, deshielo, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, el almacenamiento de humedad del suelo, el drenaje lateral subsuperficial, la recirculación de lixiviados, el drenaje vertical insaturado, y fuga a través del suelo, geomembrana o revestimientos compuestos. Los sistemas de rellenos sanitarios incluidos varias combinaciones de vegetación, los suelos de cubierta, las células de desecho, las capas de drenaje laterales, los bajos suelos de permeabilidad de la barrera, y los revestimientos de geomembranas sintéticas, pueden ser modelados.

Los resultados se expresan como presupuestos de agua promedio diario, mensual, anual y de largo plazo.

El modelo HELP es un modelo de enrutamiento agua cuasi-bidimensional, determinista para determinación de balances hídricos. El modelo es una adaptación de la HSSWDS (Hidrológica Modelo de simulación para estimar la percolación en Sitios de Disposición de Residuos Sólidos) modelo de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Perrier y Gibson, 1980; Schroeder y Gibson, 1982), y varios modelos de los EE.UU. Servicio de Investigación Agrícola (ARS), incluyendo el modelo CREAMS (escorrentía química y la erosión de los sistemas de gestión agronómica) (Knisel, 1980), la SWRRB (Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rural) (Arnold et al., 1989), el SNOW-17 rutina del Servicio Meteorológico Nacional de Río (NWSRFS) Acumulación de nieve y modelo de ablación (Anderson, 1973), y el generador de tiempo sintético WGEN (Richardson y Wright, 1984).

La versión 1 del Modelo Help (Schroeder et al., 1984a y 1984b) representa un gran avance más allá del programa HSSWDS (Perrier y Gibson, 1980; Schroeder y Gibson, 1982), que también fue desarrollado en WES. El modelo simulado HSSWDS es un modelo de flujo no lateral a través de capas de drenaje, y manipula el drenaje vertical sólo de manera rudimentaria. La infiltración, la percolación y la evapotranspiración eran casi idénticos a los utilizados en el Chemicals, escorrentía y erosión de Sistemas de gestión agronómica del modelo (CREAMS), que fue desarrollado por Knisel (1980) para el Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA). La escorrentía y la infiltración se basó en gran medida en la Sección de Hidrología del Manual Nacional de Ingeniería (USDA, el Servicio de Conservación de Suelos, 1985). La Versión 1 del modelo HELP incorpora un modelo de drenaje subterráneo lateral y un mejor drenaje. Además, el modelo de ayuda proporciona la simulación de todo el relleno sanitario incluyendo la recolección de lixiviados y sistemas de revestimiento.

La versión 1 del programa HELP fue probado extensivamente usando tanto de campo como datos de laboratorio. Los resultados de la simulación se compararon con los datos de campo para 20 celdas de rellenos sanitarios de siete sitios (Schroeder y Peyton, 1987a). El drenaje lateral componente de HELP Versión 1 fue probado contra resultados experimentales de dos modelos físicos a escala de los sistemas de revestimiento / drenaje de vertedero (Schroeder y Peyton, 1987b). Los resultados de estas pruebas proporcionan motivación para algunas de las mejoras incorporadas en HELP Versión 2.

La Versión 2 (Schroeder et al., 1988a y 1988b) presentó una gran mejora de las capacidades del modelo HELP. El generador de tiempo sintético desarrollado por WGEN el Servicio de Investigación Agrícola del USDA (ARS) (Richardson y Wright, 1984) fue añadido al modelo para obtener valores diarios de precipitación, temperatura y radiación solar.

Esto reemplaza el uso de la temperatura media mensual normal y valores de radiación solar y mejora el modelado de la nieve y la evapotranspiración. Además, un modelo de crecimiento vegetativo del simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB) modelo desarrollado por la ARS (Arnold et al., 1989) se fusionó con el modelo HELP para calcular la hoja de índices diarios de la zona. En el modelado de la conductividad hidráulica y el flujo insaturado y lateral se mejoraron los cálculos de drenaje. Se mejoraron los datos de suelos por defecto, y el modelo hizo uso de más capas de inicialización y del contenido de humedad del suelo permitido.

En la Versión 3, el modelo HELP se ha mejorado en gran medida más allá de la versión 2. El número de capas que puede ser modelado se ha incrementado. La lista de texturas del suelo se ha ampliado para incluir los materiales de

desecho, geomembranas, redes de drenaje geosintéticos y suelos compactados. El modelo también permite el uso de una biblioteca construida por el usuario de texturas de suelo. Los cálculos de la recirculación de lixiviados y aguas subterráneas se han añadido al drenaje en el relleno sanitario. Por otra parte, la versión 3 facilita las cuentas para fugas a través de las geomembranas debido a defectos de fabricación (agujeros de alfiler) y la instalación de defectos (pinchazos, roturas y defectos de costura) y por la difusión de vapor a través del revestimiento basado en las ecuaciones compiladas por Giroud et al. (1989, 1992). La estimación de la escorrentía desde la superficie del vertedero se ha mejorado. El modelo de deshielo ha sido reemplazado con un modelo basado en energías; el modelo de evapotranspiración potencial Priestly-Taylor ha sido reemplazado con un Método de Penman, la incorporación de los efectos del viento y la humedad, así como radiación de onda larga (pérdida de calor por la noche). Un modelo de suelo congelado se ha añadido para mejorar la infiltración y predicciones de escorrentía en las regiones frías. El modelo de drenaje vertical insaturado también ha sido mejorado para ayudar en los cálculos de almacenamiento. La entrada y edición se han simplificado aún más con pantalla completa interactiva.

El modelo HELP requiere datos diarios climatológicos, características del suelo, y el diseño de especificaciones para realizar el análisis. Los datos de precipitaciones diarias pueden ser introducidos por el usuario, generados estocásticamente, o tomados de la base de datos histórica del modelo.

Los datos diarios de temperatura y radiación solar son generadas estocásticamente o pueden ser de entrada por el usuario. Los datos de suelo necesarios incluyen porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica saturada, y el Servicio de Conservación de Suelos (SCS). El modelo contiene las características del suelo por defecto de 42 tipos de materiales para su uso cuando las mediciones o estimaciones específicas del sitio no están disponibles.

Las especificaciones de diseño incluyen cosas tales como la pendiente y la distancia máxima de drenaje para las capas laterales de drenaje, espesores de capa, el procedimiento de recirculación de los lixiviados, la superficie para cubrir las características e información sobre cualquier geomembrana.

Las capas en el relleno sanitario se escriben por la función hidráulica que realizan. Los cuatro tipos de capas disponibles son: capas de percolación vertical, capas de drenaje laterales, revestimientos de suelos de barrera y revestimientos de geomembranas. Las capas superiores del suelo y los residuos son generalmente capas de percolación verticales. Las capas de arena por encima de los revestimientos son típicamente capas de drenaje laterales; las capas de arcilla compactadas son típicamente revestimientos de barrera de suelo. Los revestimientos compuestos se modelan como dos capas.

Los geotextiles no se consideran como capas a menos que realicen una única función hidráulica.

El flujo en una capa de percolación vertical es la baja debido a un drenaje por gravedad o extraídos por evapotranspiración. El drenaje vertical no saturado se supone que se produzca mediante drenaje por gravedad cada vez que la humedad del suelo es mayor que la capacidad de campo (mayor que el punto de marchitez de los suelos de la zona de evaporación) o cuando la succión del suelo de la capa debajo de la capa de percolación vertical es mayor que la succión del suelo en la capa de percolación vertical. La tasa de drenaje por gravedad (percolación) en una capa de percolación vertical se supone que es una función de la tierra de almacenamiento de humedad y en gran medida independiente de las condiciones en las capas adyacentes. La tasa puede ser restringida cuando la capa de abajo está saturada y drena más lento que la capa de percolación vertical. Capas, cuya función principal es proporcionar almacenamiento de la humedad y la detención de drenaje, normalmente deben ser designados como capas de percolación vertical. Las capas de residuos destinados a apoyar la vegetación deben ser designados como capas de percolación verticales, a menos que las capas proporcionan drenaje lateral a sistemas de recogida.

Las capas de drenaje lateral son capas que promueven el drenaje lateral a los sistemas de recogida en o por debajo de la superficie de sistemas de revestimiento. El drenaje vertical en una capa de drenaje lateral se modela en la misma manera que para la vertical. La conductividad hidráulica saturada de una capa de drenaje lateral generalmente debe ser mayor que 1×10^{-3} cm/s. Una capa de drenaje lateral puede ser sustentada por un sólo revestimiento u otra capa de drenaje lateral. La pendiente de la parte inferior de la capa puede variar de 0 a 40 %.

Los revestimientos de barrera de suelo, pretenden restringir fluidos verticales. Estas capas deben tener conductividades hidráulicas sustancialmente inferiores a los de los otros tipos de capas, típicamente por debajo de 1×10^{-6} cm/s. El programa sólo permite flujo descendente en revestimientos de barrera de suelo. Por lo tanto, cualquier agua que se mueva en un forro eventualmente percola a través de él. La (percolación) tasa de fuga depende de la profundidad de suelo saturado de agua (cabeza) por encima de la base de la capa, el espesor del revestimiento y la conductividad hidráulica saturada del suelo de barrera. Las fugas se producen cada vez que el contenido de humedad de la capa por encima de la camisa es mayor que la capacidad de campo de la capa. El programa supone que la barrera de suelo está saturada permanentemente y que sus propiedades no cambian con el tiempo.

Los revestimientos de geomembranas son capas de material casi impermeable que restringe una fuga significativa a pequeñas áreas alrededor de los defectos.

La fuga (percolación) se calcula que es el resultado de tres fuentes: la difusión del vapor, defectos de fabricación (agujeros de alfiler) y defectos de instalación (perforaciones, grietas, roturas y mal costuras). Las fugas por difusión de vapor se calcula que se produzca a través de toda el área del revestimiento como una función de la cabeza sobre la superficie del revestimiento, el espesor de la geomembrana y su difusividad de vapor. Las fugas a través de los agujeros y de los defectos de instalación se calculan en dos etapas. En primer lugar, el área de suelo o material que contribuye a la fuga es computado como una función de la cabeza en el revestimiento, el tamaño de agujero y la conductividad hidráulica saturada de los suelos o materiales adyacentes a la geomembrana. En segundo lugar, la tasa de fugas en el área mojada se calcula como una función de la cabeza, el espesor del suelo y membrana y la conductividad hidráulica saturada de los suelos o materiales adyacentes a el revestimiento de la geomembrana.

4.3.1. DISEÑO DEL PERFIL DEL VERTEDERO

Perfiles en HELP

Para realizar la simulación hidrológica, se compone un perfil que representa una sección transversal del vertedero, representativa y que contiene todas las capas de este. Contiene además detalles ingenieriles como el drenaje subterráneo, sistemas de recirculación de lixiviado, geomembranas, geonets, etc. También es posible dar pendientes a las superficies sobre todo a las superficies exteriores del vertedero. Los taludes de residuos serán cubiertos por distintas capas, las cuales formarán la superficie exterior.

Un vertedero puede ser representado por varios perfiles. Esto puede hacerse creando varios perfiles en un proyecto. Esto es útil porque permite utilizar un perfil para simular la sección central del vertedero y otros perfiles para simular los bordes, donde la sección se estrecha.

Generalmente para las dimensiones del vertedero no hará falta realizar un cambio en los datos climáticos, aunque es posible realizarlo para los diferentes perfiles.

El balance que el modelo simula es precipitación, intercepción de agua de lluvia que sale, evaporación exterior, escorrentía superficial, evaporación desde el suelo, transpiración de las plantas, acumulación de nieve y fusión, y percolación de agua a través del perfil. Los datos que representan las condiciones meteorológicas pueden ser introducidos desde un fichero o simulados sintéticamente desde el “weather generator”.

Las diferentes capas del perfil pueden ser clasificadas por sus funciones hidráulicas y dispuestas según su realización. Existen 4 tipos de capas disponibles que son: capas de percolación vertical (CPV), capas de drenaje lateral (CDL), capas de barrera de suelo (CSB) y líneas de geomembrana (G). La capa exterior y las capas de sólido se clasifican como CPV. Capas de arena sobre líneas son CDL. Capas DE Arcilla compactada son CSB y las geomembranas pertenecen al grupo de líneas de G.

Existen también unas reglas de colocación de las distintas capas de obligado cumplimiento. Además el máximo número de capas barrera y geomembranas son 5 de cada perfil.

A cada una de las diferentes capas del perfil del vertedero se les puede dar una humedad inicial almacenada.

El programa permite la entrada del área de escorrentía que drena al vertedero, así como la clase de vegetación y tipo de suelo existente.

Propiedades de las capas

Todas las capas tienen los mismos parámetros, excepto las líneas de geomembranas. Los parámetros son los siguientes:

- Porosidad total: porcentaje total de huecos en el material.
- Capacidad de campo: humedad almacenada después de un periodo prolongado de drenaje por gravedad. Corresponde a la succión de 1/3 bar.
- Punto de marchitez: el punto de humedad almacenada más bajo que puede lograr una planta por transpiración o acción del viento. Corresponde a la succión de 15 bares.
- Conductividad hidráulica saturada: permeabilidad del material saturado bajo el gradiente de presión unitario.
- Corriente subterránea: Existencia de corriente de flujo que entra desde el exterior hacia las capas del vertedero.
- Contenido de humedad inicial: humedad inicial de la capa.

Además de estas, las líneas de geomembranas tienen una conductividad hidráulica saturada y se definen otros parámetros especiales que son:

- Densidad de agujeros: el número de agujeros por unidad de área resultado de la manufactura de las láminas. Se asume que el diámetro de los agujeros es igual al espesor de la geomembrana.
- Defectos de instalación: el número de defectos por unidad de área como consecuencia de la instalación. Se asume que el diámetro de los agujeros es mayor que el espesor de la geomembrana.

- Calidad del terreno: calidad del contacto entre la línea de geomembrana y el terreno. Este parámetro puede tomar los distintos valores: a) Perfecto, b) Excelente, c) Bueno, d) Pobre, e) Caso malo: donde el contacto lamina terreno no es el límite de drenaje, f) geotextil separador de la geomembrana y el límite del drenaje.
- Transmisividad del geotextil: Es el producto de la conductividad hidráulica saturada y el espesor del geotextil.

4.3.2 GENERACIÓN DE DATOS Y VALORES DE FÁBRICA

El modelo HELP requiere datos climáticos generales de la evapotranspiración potencial, datos climatológicos diarios, las características del suelo, y especificaciones de diseño para realizar el análisis. Los datos sobre el clima requeridos en general incluyen estación de crecimiento, velocidad media anual del viento, humedades relativas medias trimestrales, media normal mensual de temperaturas, el máximo índice de área foliar, profundidad de la zona de evaporación y de la latitud. Por defecto los valores de estos parámetros fueron compilados o desarrollados a partir de los "climas de los Estados" (Ruffner, 1985) y "Atlas Climático de los Estados Unidos" (National Oceanic and Atmospheric Administration, 1974).

Los requisitos de los datos climatológicos diarios (tiempo) incluyen la precipitación, la temperatura media y la radiación solar global total.

Los datos de precipitaciones diarias pueden ser introducidos por el usuario, generados estocásticamente, o tomado de la base de datos histórica de modelo.

Los datos diarios de temperatura y radiación solar son generados estocásticamente o puede ser introducido por el usuario.

Los datos de suelo necesarias incluyen porosidad, capacidad de campo , punto de marchitez , conductividad hidráulica saturada , el almacenamiento inicial de humedad , y el número de condición de humedad de la curva de Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

4.3.2.1 GENERACIÓN SINTÉTICA DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

El programa HELP incorpora una rutina para generar valores diarios de precipitación, la temperatura y la radiación solar media. Esta rutina fue desarrollada por el USDA Servicio de Investigación Agrícola (Richardson y Wright, 1984) sobre la base de un procedimiento descrito por Richardson (1981). El usuario HELP tiene la opción de generar datos de precipitación diaria en lugar de utilizar por defecto o datos históricos especificados por el usuario.

Del mismo modo, el usuario HELP tiene la opción de generar la temperatura media diaria sintética y datos de radiación solar en lugar de utilizar datos históricos especificados por el usuario. El generador de la rutina está diseñado para preservar la dependencia en el tiempo, la correlación entre las variables y las características estacionales de los datos meteorológicos reales en el lugar especificado.

La precipitación diaria se genera usando una cadena de Markov de dos parámetros de modelo de distribución. Un modelo de cadena de Markov de primer orden se utiliza para generar la ocurrencia de días húmedos o secos. En este modelo, la probabilidad de lluvia en un día dado es condicionada en el estado húmedo o seco del día anterior. Un día húmedo se define como un día con 0,01 pulgadas de lluvia o más. El modelo requiere de dos probabilidades de transición:

$P_i (W / W)$, la probabilidad de que un día húmedo en el día i da un día húmedo en el día $i-1$; y $P_i (W / D)$, la probabilidad de un día húmedo en el día i dieron un día seco en el día $i-1$.

Cuando se produce un día húmedo, la función de distribución gamma de dos parámetros, que describe la distribución de las cantidades de lluvia diarias, se usa para generar la cantidad de precipitación. La función de densidad de la distribución gamma de dos parámetros está dada por:

(1)

$$f(p) = \frac{p^{\alpha-1} e^{-p/\beta}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

Donde

- f (p) = función de densidad
- p = probabilidad de parámetros a y b = distribución
- G = la función gamma de un
- e = la base de los logaritmos naturales

Los valores de $P (W / W)$, $P (W / D)$, a y b varían de forma continua durante el año para la mayoría de lugares. La rutina de generación de precipitaciones utiliza valores mensuales de los cuatro parámetros.

Los valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y la radiación solar son generados utilizando la ecuación:

(2)

$$t_i(j) = m_i(j) [\chi_i(j) \cdot c_i(j) + 1]$$

Donde

$T_i(j)$ = valor diario de la temperatura máxima ($j = 1$), mínimo temperatura ($j = 2$), o la radiación solar ($j = 3$)
 $m_i(j)$ = valor en el día significa i
 $c_i(j)$ = coeficiente de variación en el día i
 $\epsilon_i(j)$ = estocástica generada elemento residual para el día i

El cambio de temporada en los medios y coeficientes de variación se describe por la ecuación armónica.

(3)

$$u_i = \bar{u} + C \cos\left[\frac{2\pi}{365}(i - T)\right]$$

Donde

u_i = valor de $m_i(j)$ o $c_i(j)$ en el día i
 \bar{u} = valor medio de u_i
 C = amplitud del armónico
 T = posición de la armónica en días

El Servicio de Investigación Agrícola calcula los valores de estos parámetros para las tres variables en los días húmedos y secos de 20 años de datos meteorológicos.

Los elementos residuales para la ecuación 2 se generan utilizando un procedimiento que conserva correlaciones seriales importantes y correlaciones cruzadas. La ecuación de generación es:

(4)

$$\chi_i(j) = (A \cdot \chi_{i-1}(j)) + (B \cdot \epsilon_i(j))$$

Donde

$c_i(j)$ = 3×1 de la matriz para el día i cuyos elementos son residuos de máxima temperatura ($j = 1$), la temperatura mínima ($J = 2$), y la radiación de la energía solar ($J = 3$)
 $\epsilon_i(j)$ = 3×1 de la matriz de componentes aleatorios independientes para cada elemento j

A y B = 3 x 3 matrices cuyos elementos se definen de tal manera que las nuevas secuencias tienen la correlación serial deseada y los coeficientes de correlación Richardson cruzados (1981).

4.3.3 RETENCIÓN DE HUMEDAD Y PARÁMETROS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El programa HELP requiere valores para la porosidad total, la capacidad de campo, el punto de marchitez, y la conductividad hidráulica saturada de cada capa que no es un forro. Los valores de estos parámetros pueden ser especificados por el usuario o seleccionado de una lista de valores por defecto proporcionados en el programa HELP. Los valores se utilizan para calcular el almacenamiento de humedad, drenaje vertical insaturado, cabeza en revestimientos y la evaporación del agua del suelo.

4.3.3.1. PARÁMETROS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD.

La retención de humedad relativa o de almacenamiento utilizado en el modelo HELP difiere de los contenidos del agua normalmente utilizados por los ingenieros.

La porosidad total es un valor efectivo, que se define como el contenido volumétrico de agua (volumen de agua por volumen total) , cuando los poros que contribuyen a los cambios en el almacenamiento de humedad son en la saturación. La porosidad total se puede utilizar para describir el volumen de espacio de poro activo presente en las capas del suelo o de desecho . La capacidad de campo es el contenido volumétrico de agua en un suelo de succión de agua de 0,33 bares o restante después de un período prolongado de drenaje por gravedad sin suministro de agua adicional. El punto de marchitez es el contenido volumétrico de agua en una succión de 15 bares o el contenido volumétrico de agua más bajo que se puede alcanzar por la planta de transpiración. Estos parámetros de retención de humedad se utilizan para definir el almacenamiento de la humedad relativa y la conductividad hidráulica no saturada.

El programa HELP requiere que el punto de marchitez sea mayor que cero pero menor que la capacidad de campo. La capacidad de campo debe ser mayor que el punto de marchitamiento y menos de la porosidad. La porosidad total debe ser mayor que la capacidad de campo, pero menor que 1.

El usuario puede especificar el contenido inicial de agua volumétrica de todas las capas no liner. En los revestimientos de suelo se asume que se mantiene saturada en todo momento. Si no se especifica, el programa asume valores cercanos a los valores de estado estacionario (no permitiendo ningún cambio en la humedad de almacenamiento a largo plazo) y corre de un año de la

simulación para inicializar el contenido de humedad más cerca de estado estacionario.

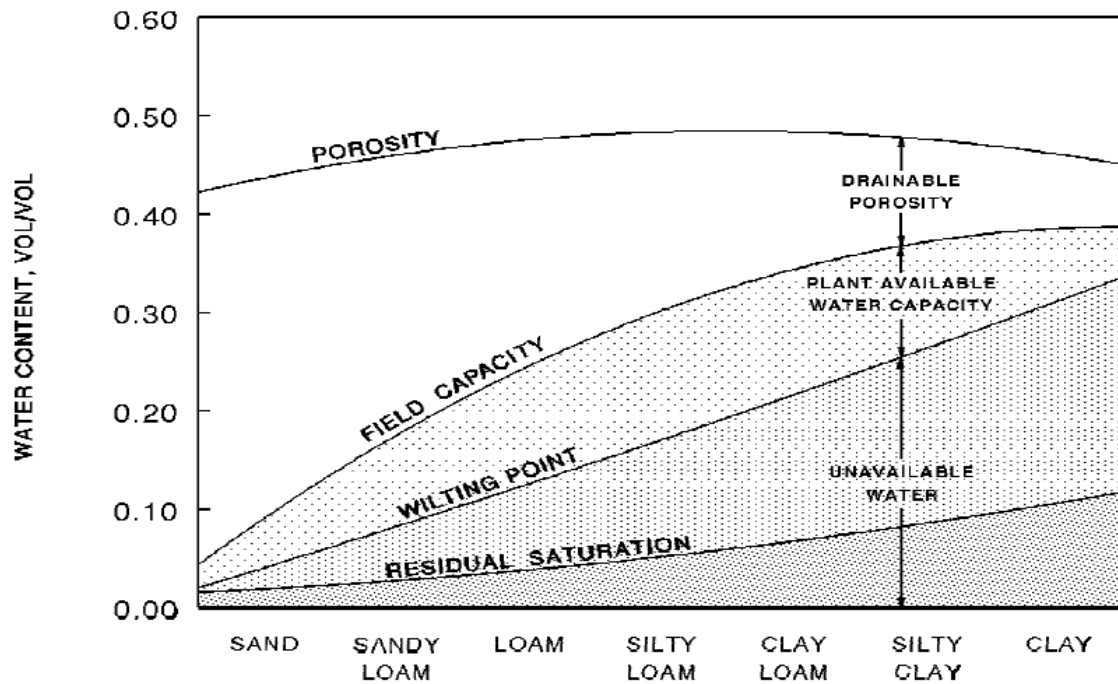


Figura 17. Relación entre la humedad del suelo y los parámetros de retención.

Fuente: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model* [19]

El contenido de agua del suelo a finales de este año está sustituido como los valores iniciales para el período de simulación. Entonces, el programa corre la simulación completa, comenzando de nuevo desde el principio del primer año de datos. Los resultados del período de inicialización del contenido volumétrico de agua no son reportados en la salida.

4.3.3.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA NO SATURADA.

La constante de Darcy de flujo que regula la proporcionalidad a través de medios porosos es conocida cuantitativamente como la conductividad hidráulica o el coeficiente de permeabilidad y cualitativamente como permeabilidad. La conductividad hidráulica es una función de las propiedades de los medios de comunicación, tales como tamaño de partículas, relación de vacíos, la composición, la tela, el grado de saturación, y la viscosidad cinemática del fluido en movimiento a través de los medios de comunicación. El programa HELP utiliza la conductividad hidráulica saturada y no saturada de capas de suelo y residuos para calcular drenaje vertical, drenaje lateral y percolación revestimiento de suelo. La difusividad de vapor para las

geomembranas es especificado como una conductividad hidráulica saturada para calcular fugas a través de las geomembranas por difusión de vapor.

La conductividad hidráulica insaturada se usa para describir el flujo a través de una capa cuando los espacios vacíos se llenan tanto con la humectación y el fluido no humectante (por ejemplo, agua y aire). El programa calcula la conductividad hidráulica no saturada de cada suelo y los residuos de cada capa usando la siguiente ecuación, reportado por Campbell (1974):

(5)

$$K_u = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right]^{3 + \left(\frac{2}{\lambda} \right)}$$

Donde:

K_u = conductividad hidráulica no saturada, cm / seg

K_s = conductividad hidráulica saturada, cm / seg

q = contenido volumétrico de agua real, vol / vol contenido volumétrico de agua del q_r = residual, vol / vol

f = porosidad total, vol / vol

l = de tamaño de poro índice de distribución, sin dimensiones

4.3.4 COEFICIENTE DE EVAPORACIÓN

El coeficiente de evaporación indica la facilidad con la cual el agua se puede extraer hacia arriba a través de la capa de tierra o los residuos por evaporación. Utilizando los datos de laboratorio de suelos Ritchie (1972) indicó que el coeficiente de evaporación estar relacionado con la conductividad hidráulica insaturada a 0,1 bar la presión capilar.

El programa HELP utiliza la siguiente forma de la ecuación de Ritchie para calcular el coeficiente de evaporación:

(6)

$$CON = \begin{cases} 3.30 & (K_u)_{0.1 \text{ bar}} \leq 0.05 \text{ cm/day} \\ 2.44 + 17.19 (K_u)_{0.1 \text{ bar}} & 0.05 \text{ cm/day} < (K_u)_{0.1 \text{ bar}} < 0.178 \text{ cm/day} \\ 5.50 & (K_u)_{0.1 \text{ bar}} \geq 0.178 \text{ cm/day} \end{cases}$$

Donde

CON = coeficiente de evaporación,

$(K_u)_{0.1 \text{ bar}}$ = conductividad hidráulica insaturado en 0,1 bar de presión capilar, cm/s

El programa HELP impone límites superior e inferior en el coeficiente de evaporación para no producir un flujo capilar fuera del rango para los suelos reportados por Knisel (1980).

Si el valor calculado del coeficiente de evaporación es inferior a 3,30, entonces se fija igual a 3,30, y si el coeficiente de evaporación es mayor que 5,50, entonces se fija igual a 5,50.

El usuario no puede entrar el coeficiente de evaporación de forma independiente.

El programa HELP impone controles adicionales en el coeficiente de evaporación sobre la base de la capacidad de campo relativa y la conductividad hidráulica saturada de cada capa de suelo y residuos. El cálculo de la capacidad de campo es relativa utilizando la siguiente ecuación (7):

$$FC_{rel} = \frac{FC - \theta_r}{\phi - \theta_r}$$

Donde

FC_{rel} = capacidad de campo relativa, sin dimensiones

FC = capacidad de campo, vol / vol

Si la capacidad de campo relativa es menor que 0,20 (típico de arena), a continuación, el coeficiente de evaporación se fija igual a 3,30. Además, si la conductividad hidráulica saturada es menos de 5×10^{-6} cm/s (el rango de arcilla compactada), el coeficiente de evaporación se ajusta a 3.30.

4.3.5 DEFECTO DEL SUELO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS.

La densidad total de las capas del suelo y los residuos se puede definir como la masa de sólidos y partículas de agua por unidad de volumen de los medios de comunicación. La densidad total de estas capas es depende de la densidad de las partículas sólidas, el volumen de espacio de los poros, y la cantidad de agua en cada capa. Como se discutió previamente, la porosidad total se puede utilizar para describir el volumen de espacio de poro en una capa de suelo o residuos. Por lo tanto, la porosidad total se puede utilizar para indicar la densidad de las capas del suelo y residuos. La densidad de las capas de suelo y los residuos se puede aumentar mediante la compactación, la carga estática, y/o la deshidratación de las capas del suelo y residuos. La compactación aumenta la densidad a través de la aplicación de energía mecánica. La carga estática aumenta la densidad por la aplicación del peso de las capas del suelo, de barrera, o los residuos adicionales. La deshidratación aumenta la densidad

de la eliminación de agua de los poros y/o la reducción de las presiones de poro en la capa. La deshidratación puede ser lograda mediante la instalación horizontal y/o vertical de desagües, zanjas, pozos de agua, y/o la aplicación de corrientes eléctricas.

El programa HELP proporciona valores predeterminados para la porosidad total, capacidad de campo, punto de marchitez, y la conductividad hidráulica saturada de numerosos materiales del suelo y los residuos, así como materiales geosintéticos.

Waste Identification		Total Porosity vol/vol	Field Capacity vol/vol	Wilting Point vol/vol	Saturated Hydraulic Conductivity cm/sec
HELP	Waste Material				
18	Municipal Waste	0.671	0.292	0.077	1.0×10^{-3}
19	Municipal Waste with Channeling	0.168	0.073	0.019	1.0×10^{-3}
30	High-Density Electric Plant Coal Fly Ash*	0.541	0.187	0.047	5.0×10^{-5}
31	High-Density Electric Plant Coal Bottom Ash*	0.578	0.076	0.025	4.1×10^{-3}
32	High-Density Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash**	0.450	0.116	0.049	1.0×10^{-2}
33	High-Density Fine Copper Slag**	0.375	0.055	0.020	4.1×10^{-2}

Tabla 10. Características de residuos por defecto.

Fuente: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model [19]*

4.3.6 INICIALIZACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo de las capas puede ser inicializada por el usuario o el programa. Si ha inicializado por el programa, la humedad del suelo se inicializa cerca de estado estacionario utilizando una de los tres procedimientos de trámites. El primer paso establece la humedad del suelo de todos los revestimientos a la porosidad o la saturación y la humedad de todas las otras capas a la capacidad de campo.

En el segundo paso, el programa calcula una humedad del suelo para cada capa por debajo de la parte superior del sistema de revestimiento. Esta humedad del suelo se calcula para producir una conductividad hidráulica no saturada, igual a 85% de la conductividad hidráulica saturada efectiva más baja

de todos los sistemas de revestimiento encima de la capa, incluyendo la consideración de revestimientos de geomembranas. Si la conductividad hidráulica insaturada es mayor que 5×10^{-7} cm/s o si el suelo tiene la humedad inferior a la capacidad de campo, la humedad del suelo se ajusta para igualar la capacidad de campo.

Geosynthetic Material Description		Saturated Hydraulic Conductivity cm/sec
HELP	Geosynthetic Material	
20	Drainage Net (0.5 cm)	1.0×10^{-1}
34	Drainage Net (0.6 cm)	3.3×10^{-1}
35	High Density Polyethylene (HDPE) Membrane	2.0×10^{-13}
36	Low Density Polyethylene (LDPE) Membrane	4.0×10^{-13}
37	Polyvinyl Chloride (PVC) Membrane	2.0×10^{-11}
38	Butyl Rubber Membrane	1.0×10^{-12}
39	Chlorinated Polyethylene (CPE) Membrane	4.0×10^{-12}
40	Hypalon or Chlorosulfonated Polyethylene (CSPE) Membrane	3.0×10^{-12}
41	Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM) Membrane	2.0×10^{-12}
42	Neoprene Membrane	3.0×10^{-12}

Tabla 11. Características geosintéticas por defecto.

Fuente: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model [19]*

En todos los demás casos, se utilizan las humedades del suelo calculados. El tercer paso consiste en la inicialización de ejecutar el modelo para un año de simulación utilizando el primer año de datos climatológicos y las humedades iniciales del suelo seleccionado.

4.3.7 INDICES DE AREA Y PROFUNDIDAD DE ZONA DE EVAPORACIÓN.

Los valores por defecto recomendados para el índice de área foliar y la profundidad de evaporación se dan en el programa.

La distribución geográfica de Máximo Índice de Área Foliar de profundidades de la zona de evaporación se basan en datos de precipitación, temperatura y humedad para las regiones climáticas. Las estimaciones correspondientes a

profundidades mínimas se basan libremente en valores de la literatura (Saxton et al., 1971) e insaturados resultados del modelo de flujo para suelos francos desnudos (Thompson y Tyler, 1984; Fleenor, 1993), mientras que las profundidades máximas son para suelos francos con un muy buen soporte de la hierba, asumiendo profundidades de enraizamiento que varían regionalmente con las especies de plantas y el clima. Las zonas y los valores para el índice máximo de área foliar son basados en las recomendaciones de la documentación para el Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rural (SWRRB) (Arnold et al., 1989), teniendo en cuenta tanto la precipitación como temperatura.

4.3.8. PERCOLACIÓN Y FUGAS

La percolación a través de revestimientos de suelo es modelada por la ley de Darcy.

(8)

$$Q = K * i * A$$

Siendo,

Q= caudal en m³/s.

I= gradiente hidráulico

K= Conductividad hidráulica

A= Área de la sección transversal de la muestra en m².

Cuando el revestimiento tiene una fuga, todo el forro se está escapando a la misma velocidad. Los revestimientos se supone que son homogéneos y temporalmente uniformes. Las fugas a través de la geomembrana se modelan por ecuaciones empíricas.

En la parte de supuestos y limitaciones hay un apartado referente a este tema.

4.3.9. BALANCE HÍDRICO.

Para calcular el potencial de recarga neta a las aguas subterráneas de la precipitación en sitios específicos del suelo, vegetación, y las condiciones climáticas para un sitio ficticio, se realiza utilizando el método de balance hídrico.

Este método calcula el potencial de recarga neta por diferencia en los componentes del resto del agua y se expresa como:

(9)

$$R = P - D - DITE - DW$$

Donde

R es potencial recarga neta, P es la precipitación, D es la escorrentía neta, ETA es la evapotranspiración real, y DW es el cambio en el almacenamiento de agua del suelo.

4.4 METODO DE SOLUCIÓN

El programa HELP simula el movimiento del agua a diario, a través y fuera de un vertedero. En general, los procesos hidrológicos modelados por el programa pueden dividirse en dos categorías: procesos superficiales y procesos bajo la superficie. Los procesos modelados de la superficie son deshielo, la interceptación de las precipitaciones por la vegetación, la escorrentía superficial, la evaporación del agua, la interceptación y la nieve de la superficie.

Los procesos del subsuelo modelado son la evaporación del agua del suelo, transpiración de la planta, drenaje vertical insaturado, fugas de revestimiento de geomembrana, percolación, barrera de revestimiento de suelo y drenaje lateral saturado. Los modelos de crecimiento vegetativo y de suelo congelado también se incluyen en el programa de modelado de ayuda de los procesos de enrutamiento de agua.

La infiltración diaria en el relleno sanitario se determina indirectamente a partir de una superficie de equilibrio. Cada día, la infiltración se supone que es igual a la suma de las precipitaciones y el deshielo, menos la suma de la escorrentía, la superficie de almacenamiento y superficie de evaporación. La contabilidad diaria de las aguas superficiales procede como sigue. Las nevadas y precipitaciones se añaden al almacenamiento de la nieve de la superficie, si está presente, y después del deshielo, más almacenamiento de exceso de precipitación es computarizada. La salida total de la capa de nieve se trata como precipitación en la ausencia de una capa de nieve con el fin de calcular la escorrentía. Una relación lluvia-escorrentía se utiliza para determinar la escorrentía. La evaporación de la superficie no se le permite exceder la suma de almacenamiento de la nieve de la superficie y precipitaciones interceptado. La interceptación se calcula solamente para las precipitaciones, no para la salida de la cubierta de nieve. El derretimiento de la nieve y la lluvia que no escurra o se evapore se supone que se infiltra en el relleno sanitario. La infiltración computarizada en exceso se envía de vuelta a la superficie y se añade a la escorrentía o almacenamiento en la superficie.

Los primeros procesos bajo la superficie que se consideran son: la evaporación del suelo y la planta de transpiración de la zona de evaporación del subperfil superior. Estos se calculan en una base diaria. La demanda de

evapotranspiración se distribuye entre los siete segmentos modelados en la zona de evaporación.

Los otros procesos bajo la superficie se modelan uno a la vez, de arriba hacia abajo, usando un paso dependiente del tiempo de diseño, variando de 30 minutos a 6 horas. El drenaje vertical insaturado se calcula para cada segmento modelado a partir de la parte superior del subperfil. El programa realiza un balance de agua en cada segmento para determinar el almacenamiento de agua y el drenaje para cada segmento, lo que representa para la infiltración o drenaje desde arriba, flujo subsuperficial, recirculación de los lixiviados, contenido de humedad y las características del material.

Si el subperfil contiene un forro, un transporte alternativo de agua o drenaje en el segmento directamente por encima de la camisa se calcula como la fuga o filtración a través del revestimiento, y drenaje lateral para el sistema de recogida, si está presente. La suma del drenaje lateral y fugas / percolación se calcula primero para calcular el almacenamiento de humedad y la cabeza en el liner. El uso de la cabeza, la fuga y el drenaje lateral se calculan y se compararon con sus conjeturas iniciales. Si la suma de estos dos flujos de salida no es suficientemente próxima a la estimación inicial, las nuevas estimaciones se generan y el procedimiento se repite hasta que se logra la convergencia. El almacenamiento de humedad en sistemas de revestimiento se supone que es constante. Por lo tanto, cualquier drenaje en un revestimiento da como resultado un drenaje. Si el subperfil no contiene un revestimiento, el drenaje lateral es cero y el drenaje vertical de la parte inferior del subperfil se calcula de la misma manera que el segmento modelado de la parte superior.

4.4.1. ESCORRENTÍA

La escorrentía se calcula utilizando el método SCS (Soil Conservation Service) que se ajusta para diferentes tipos de suelo y está basado en cantidades diarias de precipitaciones y deshielo.

Este procedimiento fue seleccionado por cuatro razones: (1) se acepta ampliamente, (2) es computacionalmente eficiente, (3) la entrada requerida es generalizada y (4) se puede convenientemente manejar una variedad de tipos de suelo, usos del suelo y las prácticas de gestión.

El procedimiento SCS fue desarrollado a partir de datos de lluvia-escorrentía para las grandes tormentas en las cuencas pequeñas.

El desarrollo es el siguiente:

El escurrimiento se trazó como función de la precipitación en papel cuadrado aritmético para tener escalas iguales, produciendo una curva que

se vuelve asintótica a una línea recta con una 1: 1 en la pendiente alta. La ecuación de la parte lineal de la curva de escorrentía, suponiendo que no hay desfase entre los momentos en los que las precipitaciones y la escorrentía comienzan, es:

(10)

$$Q = P' - S'$$

Donde

Q = escorrentía real, pulgadas.

P ' = máximo escurrimiento potencial (precipitación real después de comenzar la segunda vuelta o lluvia real cuando no se produce la abstracción inicial), pulgadas.

S = potencial máximo de retención después de que comienza la escorrentía, pulgadas.

La siguiente ecuación empírica se encontró para describir la relación entre la precipitación, escorrentía y la retención (la diferencia entre la precipitación y la escorrentía) en cualquier punto de la curva de escorrentía:

(11)

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P'}$$

donde

F = retención real después comienza el escurrimiento, pulgadas

= P ' - Q

Sustituyendo F,

(12)

$$\frac{P' - Q}{S'} = \frac{Q}{P'}$$

Si se considera la abstracción inicial, la curva de escorrentía se traduce a la derecha, como se muestra en la Figura 18, por la cantidad de precipitación que se produce antes de que comience la escorrentía. Esta cantidad de precipitación se denomina la abstracción inicial, Ia. Para ajustar la ecuación para la abstracción inicial, esta cantidad se resta de la precipitación,

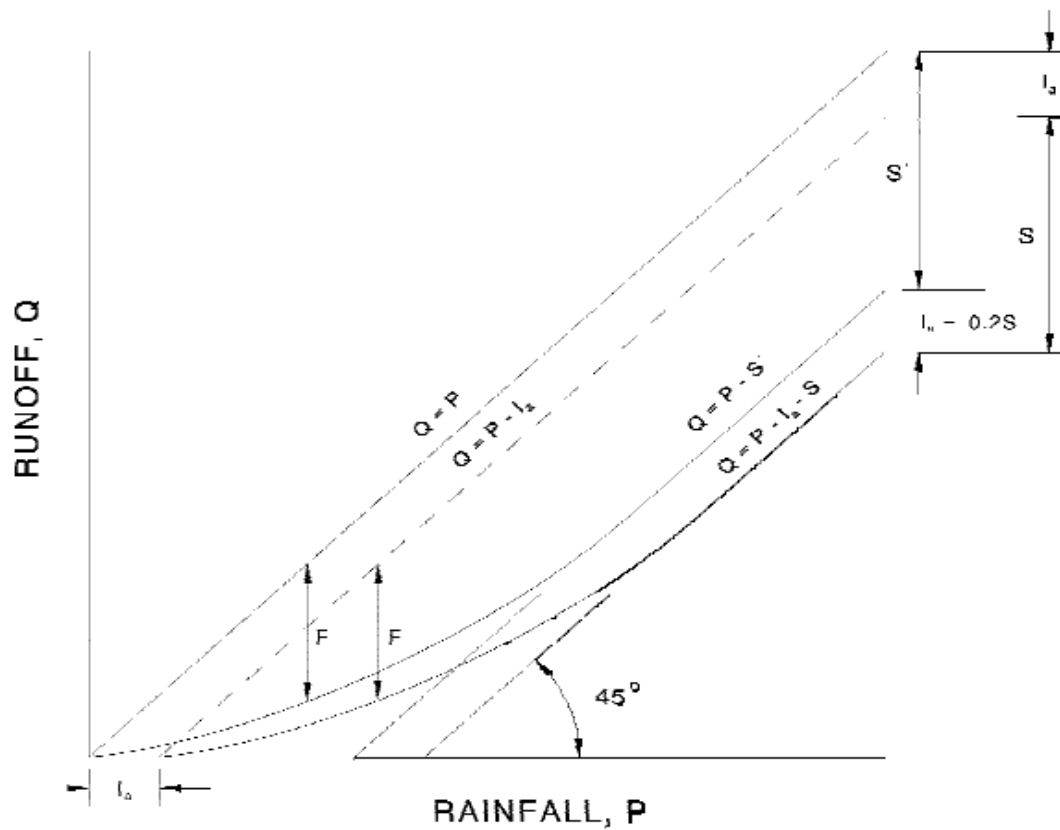


Figura 18. Relación entre escorrentía, precipitación y retención

Fuente: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model* [19]

(13)

$$P' = P - I_a$$

Se convierte en:

(14)

$$\frac{P - I_a - Q}{S'} = \frac{Q}{P - I_a}$$

Donde

P = precipitación efectiva, pulgadas

I_a = abstracción inicial, pulgadas

La figura 18 muestra que los dos parámetros de retención, S' y S, son iguales.

Las precipitaciones y la escorrentía datos de un gran número de pequeñas cuencas experimentales indican que, como una aproximación razonable (USDA, SCS, 1985).

(15)

$$I_a = 0.2 S$$

Sustituyendo: (16)

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)}$$

El parámetro de retención, S, se transforma en un número de la llamada curva de escorrentía, CN. La relación entre el CN y S es:

$$CN = \frac{1000}{S + 10} \quad (17)$$

4.4.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

El método utilizado en el programa para calcular la evapotranspiración era modelado después del enfoque recomendado por Ritchie (1972). Este método utiliza el concepto de evapotranspiración potencial como base para la predicción de la superficie y el suelo, la evaporación del agua y los componentes de transpiración de las plantas. El término "evapotranspiración potencial" se refiere a la cantidad máxima de velocidad de evaporación que la atmósfera puede extraer de una parcela en un día. La ecuación modificada de Penman (1963) es utilizada para calcular la energía disponible para la evapotranspiración.

La evapotranspiración potencial es modelada por un método de Penman-basado en la energía. La evapotranspiración real es una función con otros datos. La radiación solar y los datos de temperatura son a menudo generados sintéticamente.

Los datos de la vegetación son generados por un modelo de crecimiento vegetativo. Este, se basa en un modelo de crecimiento de cultivo.

(18)

$$LE_i = PENR_i + PENA_i$$

Donde

LE_i = energía disponible en el día i de la evapotranspiración potencial en la ausencia de una capa de nieve.

$Penr_i$ = componente radiactivo de la ecuación de Penman en el día i.

$Penai$ = componente aerodinámico de la ecuación de Penman en el día i.

4.4.3. INFILTRACIÓN

En la ausencia de una capa de nieve ($AVLSNO_i = 0$), la infiltración es igual a la suma de la precipitación (precipitación a temperaturas $> 0^\circ \text{C}$) y groundmelt menos la suma de intercepción (evaporación de la humedad de la superficie) y la escorrentía. (19)

$$INF_i = PRE_i + GM_i - INT_i - Q_i$$

4.4.4. EVAPORACIÓN DEL AGUA DE SUELO

Cuando el suelo no está congelado, cualquier demanda en exceso de la superficie del agua disponible es ejercida sobre la columna de suelo a través de la evaporación del agua del suelo y luego a través de la planta de transpiración.

El potencial de evaporación del suelo se estima a partir de la siguiente ecuación basada en la obra de Penman (1963) cuando la evaporación no está limitada por la velocidad a la que el agua puede ser transmitida a la superficie:

$$ES_{o_i} = \frac{(PENR_i + K_{E_i} PENA_i) e^{(-0.000029 CV_i)}}{25.4 (59.7 - 0.0564 T_{c_i})} \quad (20)$$

Donde

- Esoi = Potencial de evaporación de agua del suelo en el día i, pulgadas
- PENRi = componente radiactivo de la ecuación Penman en el día i, langleys 55
- Penai = componente aerodinámico de la ecuación Penman en el día i, langleys
- CVi = biomasa aérea en el día i, kg / ha
- Tci = Temperatura media del aire en el día i, ° C
- Kei = Fracción de componente aerodinámico contribuye a la evaporación de agua en el suelo
- = 1-0,0000714 CVi, pero no inferior a 0

Esta ecuación supone que la biomasa por encima del suelo de define 14.000 kg / ha o más un dosel de la cubierta completa de tal manera que el efecto de

la expresión viento y la humedad, PENA, es insignificante en el potencial de la ecuación de la evaporación del suelo.

Como modelado después de Ritchie (1972), en la evaporación del agua del suelo se producen dos etapas.

En la etapa 1 la demanda de evaporación se controla únicamente por la energía disponible, mientras que en la etapa 2 la demanda de evaporación está limitada por la velocidad a la cual el agua puede ser transmitida a través de la superficie del suelo.

4.4.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración real del subsuelo en i día, ETSI, es a menudo menor que la suma de la demanda evaporativa de agua del suelo en el día i , ESD $_i$, y la demanda de transpiración de las plantas en i días, EPDI, debido a la escasez de agua en el suelo. Las demandas de segmentos son entonces ejercidas sobre el perfil del suelo desde la superficie hacia abajo. Si hay almacenamiento insuficiente de agua por encima del punto de marchitez en el segmento para satisfacer la demanda, la evapotranspiración del agua del suelo a partir del segmento está limitado en el almacenamiento y el exceso de demanda (insatisfecho), que se añade a la la demanda en el siguiente segmento inferior dentro de la zona de evaporación.

La demanda de la evaporación del agua del suelo se ejerce primero desde la superficie hacia abajo. La evaporación real del agua del suelo a partir de un segmento es igual a la demanda, ESD $_i$ (j), además de cualquier exceso de demanda, ESX (j), pero no mayor que el agua disponible, SMJ - WPJ. La evaporación del agua en el suelo es: (21)

$$ES_i(j) = \begin{cases} ESD_i(j) + ESX(j) & \text{for } ESD_i + ESX(j) \leq SM(j) - WP(j) \\ SM(j) - WP(j) & \text{for } ESD_i + ESX(j) > SM(j) - WP(j) \end{cases}$$

$$ESX(j+1) = ESD_i(j) + ESX(j) - ES_i(j)$$

Donde

ESI (j) = evaporación del agua del suelo del segmento j en el día i , pulgadas

La demanda de transpiración de las plantas se ejerce hacia abajo al lado de la superficie. La transpiración real de un segmento es igual a la demanda, EPDI (j), más cualquier exceso de demanda, EPX (j), pero no mayor que el agua disponible, AWI (j), después de extraerla evaporación del agua del suelo. La

transpiración de la planta de un segmento también está limitado a un cuarto de la planta de capacidad de agua disponible, más el agua drenable disponible.

(22)

$$EP_i(j) = \begin{cases} EPD_i(j) + EPX(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) \leq AW_i(j) \\ & \& EPD_i(j) + EPX(j) \leq EPL_i(j) \\ AW_i(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) > AW_i(j) \\ & \& AW_i(j) \leq EPL_i(j) \\ EPL_i(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) > AW_i(j) \\ & \& AW_i(j) > EPL_i(j) \end{cases}$$

$$EPX(j+1) = EPD_i(j) + EPX(j) - EP_i(j)$$

$$AW_i(j) = SM_i(j) - [ES_i(j) + WP(j)]$$

$$EPL_i(j) = \begin{cases} 0.25 [FC(j) - WP(j)] & \text{for } SM_i(j) - ES_i(j) < FC(j) \\ \text{else} \\ SM_i(j) - [ES_i(j) + FC(j)] + 0.25 [FC(j) - WP(j)] \end{cases}$$

Donde

$EP_i(j)$ = planta transpiración de segmento j en el día i , pulgadas

$EPL_i(j)$ = Límite de transpiración de las plantas de segmento j en el día i , pulgadas

$WP(j)$ = punto de segmento j marchitamiento, pulgadas

$FC(j)$ = capacidad de campo del segmento j , pulgadas

La evapotranspiración real del segmento j en el día i , $ET(j)$, es la suma de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas.

$$ET_i(j) = ES_i(j) + EP_i(j) \quad (23)$$

El perfil de la extracción de agua concuerda muy bien con los perfiles para pastos permanentes medido por Saxton et al. (1971).

La evapotranspiración total del subsuelo en i día, ETS_i , es la suma de la evapotranspiración de los siete segmentos, de la zona de evaporación.

$$ETS_i = \sum_{j=1}^7 ET(j) \quad (24)$$

La evapotranspiración total del i días, ET , es la suma de la evapotranspiración de la subsuperficie y la evaporación superficial.

(25)

$$ET_i = ETS_i + ESS_i$$

4.4.6. RUTA EN EL SUBSUELO DEL AGUA

El enrutamiento del agua subsuperficial procede del subperfil, de arriba a abajo. El agua se dirige hacia abajo desde un segmento al siguiente usando un enrutamiento de almacenamiento, con el almacenamiento evaluado en el punto medio de cada intervalo de tiempo. El punto medio de enrutamiento proporciona una simulación precisa y eficiente de los procesos simultáneos de entrada y salida de drenaje, donde el drenaje es una función de la media durante el paso de tiempo. El punto medio de enrutamiento tiende a producir cambios relativamente suaves y graduales de flujo, evitando los cambios más bruscos que resultan de aplicar la cantidad completa de la humedad a un segmento en el comienzo de la etapa de tiempo. El proceso se alisa aún más mediante el uso de pasos de tiempo más cortos que el período de interés. El punto medio de enrutamiento se basa en la siguiente ecuación de continuidad para un segmento:

(26)

$$\Delta Storage = Drainage In - DrainageOut - Evapotranspiration + Leachate Recirculation + Subsurface Inflow$$

4.4.7. DRENAJE VERTICAL

La velocidad a la cual el agua se mueve a través de un medio poroso como un flujo saturado gobernado por fuerzas de gravedad está dada por la ley de Darcy:

(27)

$$q = K i = K \frac{dh}{dl}$$

Donde

q = velocidad de flujo (flujo por unidad de tiempo por unidad de área normal a la dirección del flujo), pulgadas / día.

K = conductividad hidráulica, pulgadas / día.

i = gradiente de carga hidráulica, adimensional.

h = altura piezométrica (elevación más la presión de la cabeza), pulgadas.

l = longitud en la dirección del flujo, pulgadas.

Esta ecuación también es aplicable a las condiciones insaturadas, siempre que la conductividad hidráulica se considera una función de la humedad del suelo y que la cabeza piezométrica incluye la cabeza de succión.

El programa HELP asume la carga de presión (que incluye la aspiración) sea constante dentro de cada segmento de percolación vertical y capas de drenaje laterales. Este supuesto es contenido razonable a contenidos de humedad por encima de la capacidad de campo (humedad donde el drenaje ocurre principalmente). En circunstancias en que una capa restringe el drenaje vertical y cabeza se acumula en la parte superior de la superficie de la capa, como con revestimientos de suelo de barrera y algunos bajas capas de percolación verticales de permeabilidad, el programa asume que la carga de presión es disipada de manera uniforme en el segmento de baja permeabilidad. En un momento dado paso estos supuestos producen un gradiente de carga constante en todo el espesor del segmento. para capas de percolación verticales con presión constante, el gradiente de altura piezométrica en la dirección del flujo es la unidad, y la tasa de flujo es igual a la conductividad hidráulica:

$$i = \frac{dh}{dl} = 1$$

$$q = K$$

(28)

(29)

4.4.8. GEOMEMBRANA

En la Versión 3 de los revestimientos de geomembranas se identifican como capas en el perfil del vertedero. Las geomembranas se pueden usar solas o como un revestimiento en conjunción con suelo de baja permeabilidad para formar un revestimiento compuesto. El suelo sería definido como un revestimiento de suelo en una capa separada. El programa permite que la membrana este encima, por debajo o entre alta, media o suelos de baja permeabilidad. La fuga se calcula para las secciones intactas de geomembrana y para secciones con agujeros o defectos de instalación.

4.5 SUPUESTOS Y LIMITACIONES

4.5.1 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Los procedimientos de modelado documentados en la sección anterior se basan necesariamente en muchos supuestos simplificadores. La mayoría de estos se encuentran expresados en las secciones que documentan los procedimientos individuales. Generalmente, estas suposiciones son razonables y coherentes con los objetivos del programa, cuando se aplica a los diseños estándar de relleno sanitario. Sin embargo, algunos de estos supuestos pueden no ser razonables para diseños inusuales.

Los supuestos y limitaciones del programa se resumen a continuación:

Las precipitaciones en días en que la temperatura media del aire es bajo cero se supone que ocurren como la nieve. El deshielo se supone que es una función de la energía a partir de la temperatura del aire, la radiación solar y precipitaciones. Los efectos de la radiación solar se incluyen en una masa de factor empírica. Además, groundmelt se supone que se produzca a una velocidad constante de 0,5 mm/día siempre y cuando el suelo no está congelado. La nieve y el deshielo están sujetos a la evaporación antes de la escorrentía e infiltración. El programa no tiene en cuenta los efectos del ángulo de aspecto o la deriva en su contabilidad de comportamiento de nieve.

La predicción de las condiciones del suelo congelado es una rutina simple, basada en el antecedente de las temperaturas del aire. Los deshielos se basan en las temperaturas del aire y los datos climáticos. Los suelos, mientras están congelados se supone que están suficientemente mojados, así como para impedir la infiltración y para promover escorrentía. Del mismo modo, la no evapotranspiración y el drenaje están permitidos en la evaporación mientras que la zona esté congelada.

La escorrentía se calcula utilizando el método SCS basado en cantidades diarias de precipitaciones y deshielo. El programa asume que las áreas adyacentes al relleno sanitario no drenan hacia el vertedero. No se considera la distribución del tiempo de intensidad de lluvia. El programa no puede esperar para dar estimaciones precisas de los volúmenes de escorrentía de las tormentas individuales en la base de datos de precipitación diaria. Sin embargo, debido a la relación SCS lluvia-escorrentía sobre la base de considerables datos de campo diarias, las estimaciones a largo plazo de la escorrentía deben ser razonables.

El método SCS no considera explícitamente la longitud y la pendiente de la superficie sobre la que se produce el flujo superficial; sin embargo, una rutina basada en un modelo de onda cinemática fue desarrollado para dar cuenta de la pendiente de la superficie y la longitud.

La evapotranspiración potencial es modelada por un método de Penman-basada en la energía. Como aplicación, el programa utiliza la humedad relativa promedio trimestral y la media anual de la velocidad del viento. Se supone que estos datos arrojan resultados mensuales representativos. Del mismo modo, el programa asume que la humedad relativa es del 100% en días en que se produce la precipitación. El programa utiliza un 0,23 para los suelos y la vegetación y 0,60 para la nieve. La evapotranspiración real es una función de otros datos también. La radiación solar y los datos de temperatura son a menudo generados sintéticamente. Los datos de la vegetación son generados por un modelo de crecimiento vegetativo. La profundidad de la zona de evaporación se supone que es constante durante todo el período de simulación. Sin embargo, fuera de la temporada de crecimiento, la profundidad real de evapotranspiración se limita a la profundidad máxima de la evaporación del agua del suelo, que es una función de la conductividad hidráulica del suelo saturado.

El crecimiento vegetativo se basa en un modelo de crecimiento del cultivo. El crecimiento se asume que ocurre durante el primer 75% de la temporada de crecimiento basado en las unidades de calefacción. Las recomendaciones para la estación de crecimiento se basa principalmente para pastos de verano y se supone que la creciente temporada es la parte del año, cuando la temperatura está por encima de 50 a 55 °F. Sin embargo, el usuario puede especificar una estación de crecimiento más apropiado para diferentes vegetaciones. La temperatura de crecimiento óptimo y la temperatura de base se basan en una mezcla de invierno y el verano. Se supone además que la vegetación no se cosecha.

El programa HELP supone un flujo de Darcy para el drenaje vertical homogéneo a través de capas temporalmente uniformes de suelo y residuos. No se tiene en cuenta el flujo preferencial a través de canales tales como grietas, agujeros de raíz o madrigueras de animales. Como tal, el programa tenderá a sobreestimar el almacenamiento de agua durante la primera parte de la simulación y sobreestimar el tiempo necesario para que se genere lixiviados. Los efectos de estas limitaciones pueden minimizarse mediante la especificación de una conductividad hidráulica saturada mayor y una capacidad de campo más pequeño. El programa no aumenta la conductividad hidráulica saturada de los suelos por defecto para efectos de la vegetación.

El drenaje vertical se asume para ser accionado por gravedad solamente y sólo está limitada por la conductividad hidráulica saturada y de almacenamiento disponible de segmentos inferiores. Sin restricciones, se supone que la tasa de drenaje vertical de un segmento para igualar la conductividad hidráulica no saturada del segmento correspondiente a su contenido de humedad, siempre que el contenido de la humedad es mayor que la capacidad de campo o la succión del suelo del segmento es menor que el de succión del segmento directamente debajo. La conductividad hidráulica no saturada es calculada por la ecuación Campbell hidráulico utilizando parámetros de Brooks-Corey. Se supone que todos los materiales conductores de drenaje vertical insaturados tienen características de retención de humedad que pueden ser bien representados por los parámetros de Brooks-Corey y la Campbell. El gradiente de presión o succión del suelo se tiene en cuenta al aplicar la ecuación de Campbell. Por lo tanto, el drenaje insaturado y velocidad del frente de humectación pueden ser subestimadas. Para condiciones de estado estacionario, esta limitación tiene poco o ningún efecto.

La rutina de drenaje vertical no permite el ascenso capilar de agua desde debajo de la profundidad de la zona de evaporación. La evapotranspiración no se modela como el ascenso capilar, sino más bien como una extracción distribuida que emula ascenso capilar. Esta es la limitación para condiciones secas donde el almacenamiento de agua para satisfacer la demanda evaporativa es crítica y para diseños en los que la profundidad a la camisa es poco profunda. Esta limitación se puede reducir aumentando la capacidad de campo en la zona de evaporación y la profundidad de la zona de evaporación.

La percolación a través de revestimientos de suelo es modelado por la ley de Darcy, asumiendo el drenaje libre desde la parte inferior de la camisa. Los revestimientos se supone que son saturados en todo momento, pero la fuga se produce sólo cuando la humedad del suelo de la capa por encima de la camisa es mayor que la capacidad de campo. El programa supone que una cabeza hidráulica promedio puede ser calculada de la humedad del suelo y que se aplica esta cabeza sobre toda la superficie del revestimiento. Como tal, cuando el revestimiento tiene una fuga, todo el forro se está escapando a la misma velocidad. Los revestimientos se supone que son homogéneos y temporalmente uniformes.

Las fugas a través de la geomembrana se modelan por ecuaciones empíricas. En todos los casos, la fuga es una función de carga hidráulica. El programa asume que los agujeros en la geomembrana se dispersan uniformemente y que la cabeza hidráulica promedio es representativa de la cabeza en los agujeros. El programa supone además que los agujeros son predominantemente circulares y consisten en dos tamaños. Los poros se supone que son 1 mm de

diámetro mientras que los defectos de instalación se supone que tienen un área de sección transversal de 1 cm². La fuga través de agujeros en las geomembranas es a menudo restringida por una capa adyacente o el suelo o el material denominado control de la capa de suelo. Los materiales que tienen una conductividad hidráulica saturada mayor o igual a 1x10⁻¹ cm/seg se considera que son un material de alta permeabilidad; los materiales que tienen una conductividad hidráulica saturada mayor que o igual a 1x10⁻⁴ cm/seg, pero menos de 1x10⁻¹ cm/seg son considerados como un material de permeabilidad media; y materiales que tienen una conductividad hidráulica saturada menos de 1x10⁻⁴ cm/seg se considera que es un material de baja permeabilidad. El programa supone que hay envejecimiento del revestimiento, el cual se produce durante una simulación.

El modelo de drenaje lateral se basa en la suposición de que la tasa de drenaje lateral y el promedio de la relación profundidad saturado que existe para el drenaje de estado estacionario también tienen para el drenaje inestable. Esta suposición es razonable para la recogida de lixiviados, particularmente para los vertederos cerrados en los que las condiciones de drenaje deben ser bastante estables. Cuando las condiciones de drenaje son más variables, tales como en el sistema de drenaje de la cubierta, la tasa del drenaje lateral es subestimada cuando la profundidad saturada está construyendo y sobreestimado cuando la profundidad está cayendo. En general, este supuesto hace que la profundidad máxima va a ser ligeramente sobreestimada y la tasa de drenaje máximo también. El largo efecto sobre la magnitud de los componentes del balance hídrico debe ser pequeño. Al igual que con fugas o percolación a través de los revestimientos, la profundidad saturada promedio se calcula a partir de las propiedades del agua por gravedad y de retención de humedad de la capa de drenaje y otras capas cuando la capa de drenaje está saturada. El programa supone que la conductividad hidráulica vertical y horizontal saturada sea de magnitud similar y que el valor horizontal es especificado para la capa de drenaje lateral.

El flujo subsuperficial se supone que se produce a una velocidad constante y para ser espacialmente uniformemente distribuido por toda la capa, a pesar de entrar en el lado. esta suposición provoca un retraso en su aparición en la recogida de lixiviados y el logro más rápido de las condiciones de humedad de estado estacionario. Esta limitación puede ser minimizada mediante la división del vertedero en secciones donde se produce la entrada y secciones sin entrada.

La recirculación de lixiviados se supone que se distribuye uniformemente a través de la capa por un sistema de colector o distribución. Los lixiviados recogidos en un solo día para la recirculación son distribuidos de manera constante durante todo el día siguiente.

En las regiones áridas y semi-áridas la aplicación del método de balance de agua es más difícil de aplicar que en las regiones húmedas porque las precipitaciones en estas regiones son sólo un poco más grandes que la evapotranspiración. Por lo tanto, los pequeños errores de medición en cualquiera de estos dos componentes de la ecuación de balance de agua pueden causar grandes errores en las estimaciones de la tasa de recarga (. Simmers, I., et al, 1998; Lerner, D. et al, 1990.). Por tanto, deben ser tomadas al aplicar el método de balance de agua en regiones con escasez de agua, y debe ser utilizado para calcular los eventos de recarga para intervalos de uno a diez días para eventos comunes a estas regiones. La condición del vertedero, propiedades del suelo, espesores, densidad de los agujeros de la geomembrana, el nivel máximo de la vegetación, etc., se suponen que son constantes durante todo el período de simulación.

4.5.2 LÍMITES DE APLICACIÓN

El modelo puede simular agua a través de enrutamiento o almacenamiento en un máximo de veinte capas de suelo, los residuos, los geosintéticos u otros materiales por un período de 1 a 100 años. Todos los sistemas de revestimiento, ya sea barrera suelo, geomembrana o revestimientos compuestos, pueden ser utilizados. El modelo tiene límites en el orden en que las capas pueden estar dispuestas en el perfil del vertedero. Cada capa debe ser descrita como uno de los cuatro tipos de funcionamiento: percolación vertical, drenaje lateral, barrera de revestimiento de suelo o revestimiento de geomembrana. El modelo no permite capa vertical de percolación para ser colocado directamente debajo de una capa de drenaje lateral. Un revestimiento de barrera de suelo no se puede colocar directamente debajo de otro revestimiento de barrera suelo. Un revestimiento de geomembrana puede no colocarse directamente debajo de otro revestimiento de geomembrana. Tres o más revestimientos, la barrera de suelo o geomembrana, no se pueden colocar adyacentes entre sí. La capa superior puede que no sea una barrera de suelo o revestimiento de geomembrana. Si un revestimiento no se coloca directamente debajo de la capa más baja de drenaje lateral, las capas de drenaje laterales en la sub-perfil bajo son tratados por el modelo de percolación como capas verticales. Si se especifica un revestimiento de geomembrana como la capa inferior, el suelo o el material por encima de la camisa se supone que es la capa que controla el suelo. No hay otras restricciones, se colocan en el orden de las capas.

La ecuación de drenaje lateral fue desarrollada y probada para el rango esperado de especificaciones de diseño de vertederos de residuos peligrosos. Los rangos examinados por la pendiente y la máxima longitud de drenaje de la

capa de drenaje eran 0 o 30 por ciento y de 25 a 2000 pies; sin embargo, la formulación de las ecuaciones indica que el rango de la pendiente podría ser fácilmente extendido a 50 % y la longitud podría extenderse indefinidamente.

Varias relaciones deben existir entre las propiedades de retención de humedad de un material. La porosidad, capacidad de campo y punto de marchitamiento teóricamente pueden variar de 0 a 1 en unidades de volumen por volumen, pero la porosidad debe ser mayor que la capacidad de campo, y la capacidad de campo debe ser mayor que el punto de marchitamiento.

El contenido inicial de humedad del suelo no puede ser mayor que la porosidad o menor que el punto de marchitez. Si el contenido de humedad inicial se inicializa por el programa, los contenidos de humedad están cerca de los valores de estado estacionario. Sin embargo, los contenidos de humedad de las capas por debajo del sistema de revestimiento superior o sistema de cobertura se especifican demasiado altos para las zonas áridas y semi-áridas y demasiado baja para lugares muy húmedos, en especial cuando los perfiles son modelados gruesos.

Los valores para el índice de área foliar máxima pueden variar desde 0 para suelo desnudo a 5,0 que es un excelente soporte de la hierba. Los mayores índices de área foliar pueden ser utilizados, pero tienen poco impacto en los resultados. Las recomendaciones detalladas para los índices de área foliar y profundidades evaporativas son dadas en el programa. Para la estabilidad numérica, la profundidad mínima de la zona de evaporación debe ser al menos 3 pulgadas.

El programa calcula el coeficiente de evaporación para los suelos de cubierta en función de las propiedades del suelo. Los valores predeterminados para el coeficiente de evaporación se basan en resultados experimentales reportados por Ritchie (1972) y otros. El modelo impone límites superior e inferiores de 5,50 y 3,30 para el coeficiente de evaporación a fin de no exceder el rango de datos de experimentación.

El programa realiza análisis de balance de agua durante un periodo mínimo de un año. Todas las simulaciones comienzan el 1 de enero y terminan el 31 de diciembre. El programa no puede simular la operación de llenado real de un relleno activo. Los vertederos activos se modelan una vez al año.

4.6 VISUAL HELP

Visual HELP, el estándar internacional para el modelado hidrológico de vertederos y el cálculo de la tasa de recarga de aguas subterráneas. Visual HELP combina la última versión del modelo HELP con una interfaz de fácil uso y potentes funciones gráficas para diseñar el modelo de aguas subterráneas y evaluar los resultados de modelado. También utiliza las últimas tecnologías en ingeniería de software para introducir múltiples métodos nuevos que le permitirán:

- Visualizar y gestionar sus proyectos.
- Generar datos de entrada, presentar resultados de modelado.
- Compartir datos entre modelos

Este entorno de modelado totalmente integrado permite al usuario:

- Crear gráficamente varios perfiles que representen partes diferentes de un vertedero.
- Generar automáticamente datos meteorológicos estadísticamente fiables para prácticamente cualquier lugar del mundo (o crear los suyos propios).
- Ejecutar simulaciones de modelos completas.
- Visualizar resultados en alta resolución y a todo color.
- Elaborar un documento de resumen (tablas y gráficos) para su informe.

Principales funciones

El paquete de aguas subterráneas Visual HELP incluye múltiples herramientas y elementos de diseño que le permitirán producir visualizaciones profesionales.

Interfaz de Visual Help

Visual HELP utiliza una estructura de interfaz muy sencilla y herramientas gráficas innovadoras para facilitarle el acceso a las funciones básicas y avanzadas del modelo HELP.

Creación de un proyecto

La estructura lógica de la interfaz de Visual HELP facilita una curva de aprendizaje muy rápida que le permitirá generar y modificar un perfil típico en cuestión de minutos.

SWS Weather Generator

SWS Weather Generator es un componente integrado para generar condiciones meteorológicas estadísticamente fiables para prácticamente cualquier lugar del mundo, para periodos de hasta 100 años. Esta potente herramienta utiliza una base de datos de más de 3.000 estaciones meteorológicas internacionales con datos climatológicos históricos para cada lugar.

Visualización y documentación de resultados de modelado

Visual HELP le ofrece todas las herramientas gráficas que necesita para analizar e interpretar correctamente los resultados, así como para producir cifras y resúmenes de datos con calidad para informes.

Aplicaciones profesionales de Visual Help

Diseño y optimización de vertederos. Simula perfiles de vertederos múltiples para encontrar el diseño más adecuado. Evalúa montículos de lixiviado o problemas de fugas con los vertederos actuales. Determina la eficacia de los topes de vertederos para reducir los montículos de lixiviado. Diseña y optimice los sistemas de recogida de lixiviado.

Cálculo de la recarga de aguas subterráneas

Visual HELP también ha demostrado ser una herramienta extremadamente valiosa para predecir con exactitud la recarga estacional de aguas subterráneas para periodos de hasta 100 años para su uso en modelos MODFLOW. Se ha demostrado que estos datos de recarga estacional influyen considerablemente en la migración vertical de contaminantes a través de zonas insaturadas.

Visual HELP está disponible como parte de la WHI UNSAT suite Plus. Esta suite de modelos de flujo insaturados en una dimensión está compuesto de Visual HELP, VS2DT, VLEACH y PESTAN. Ahora se puede modelar la hidrología del vertedero, predecir los lixiviados y la migración de contaminantes, y mostrar la degradación de los todos los plaguicidas con el mismo paquete de software fácil de usar.

5. APLICACIÓN PRÁCTICA

5.1. EL VERTEDERO DE DOS AGUAS (VALENCIA)

La zona del vertedero de dos aguas es un paraje escarpado, formado por el encajonamiento del Río Júcar entre las Sierras del Ave y del Caballón y su prolongación al Oeste en la Sierra de Martés en todo el margen Norte del Río y la muela de Cortes de Pallás en el margen Sur.

La cota más alta de las instalaciones es la 403 y la más baja la 337. Las coordenadas UTM aproximadas referidas al centro geográfico del área de vertido son:

$$X = 684.106$$
$$Y = 4.350.579$$

(Aproximadamente zona señalada en rojo en el mapa).

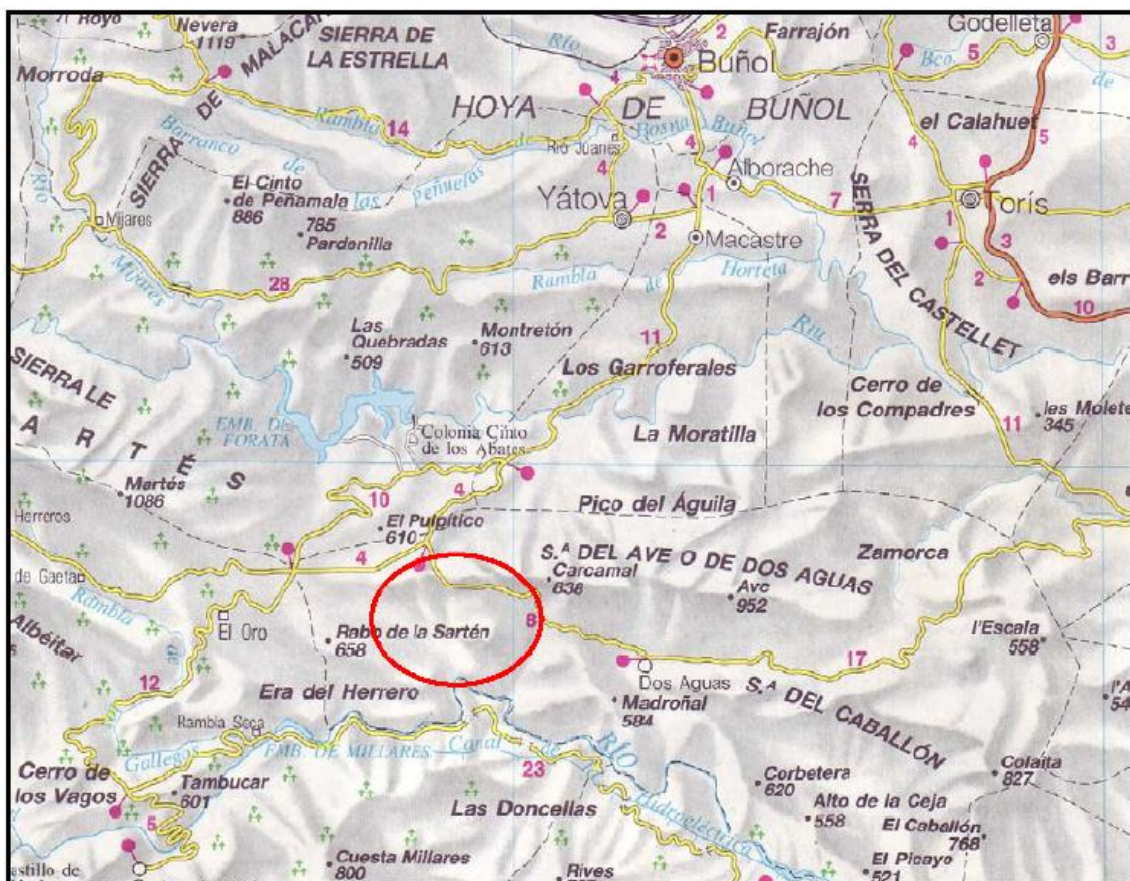


Figura 19. Emplazamiento general de la zona de estudio.

Fuente: Grupotec [8]

El término municipal de dos Aguas se sitúa en pleno macizo rocoso. Dentro de este término municipal, en un valle, se sitúa en una zona de difícil acceso el vertedero de Dos Aguas.



Figura 20. Planta vertedero de Dos Aguas (VLC)

Fuente: Grupotec [8]

La zona por tanto es muy montañosa, de aquí que el vertedero es inapreciable visualmente, hasta que no se entra de lleno en el valle que lo contiene

El vertedero se encuentra en la cabecera de un barranco, luego en fase de proyecto se realizaron estudios de precipitaciones máximas, y como consecuencia de ello se proyectó un canal de drenaje de dimensiones considerables.

5.1.1. ACCESOS.

A la zona se accede desde la A-3, tomando la salida de Buñol en dirección a Macastre hasta alcanzar el punto en el que la carretera se bifurca hacia Cortes de Pallás hacia el Suroeste y hacia Dos Aguas al Este. Desde la carretera CV-425, a la altura del P.K. 9 y en su margen oriental, parte una carretera asfaltada que conduce a la presa del Naranjero. Recorriendo esta carretera unos 5,5 Km se llega al camino por el que se accede al nuevo vaso de vertido.

Este desvío conduce directamente a la plataforma de control y al vial perimetral proyectado. Desde dicha plataforma y a través de un camino terraplenado se dará acceso a las plataformas de servicios auxiliares ya a las celdas de vertido.

5.1.2 GEOLOGÍA

La zona de estudio se enmarca desde un punto de vista geológico en el sector Oriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, caracterizado por predominar en sus estructuras tectónicas la dirección de deformación Ibérica (sentido ESE-ONO), ejemplo de estas direcciones son las sierras de Martes, del Caballón o del Ave. No obstante, el margen Sur de la zona de estudio lo constituye la Muela de Cortes, relieve con estructura subtabular que conforma el límite con la zona Bética y sus direcciones OSO – ENE, como son las sierras de la zona de Enguera y la Canal.

Desde un punto de vista litológico en este sector Valenciano u Oriental predominan los materiales de edad Mesozoico y fundamentalmente Cretácico, de naturaleza predominantemente calcárea, acompañados de diversas intrusiones del Triásico Superior en la típica facies Keuper.

Puntualmente, y asociado a pequeñas cuencas interiores, aparecen diversos afloramientos terciarios, de edad Neógeno y naturaleza terrígena.

5.1.3. HIDROGEOLOGÍA.

El nivel freático siempre se ha localizado a mucha profundidad. En el vertedero se dispone de dos piezómetros de control, uno de ellos en la cabecera del vertedero y otro a varios cientos de metros aguas abajo.

La zona de estudio pertenece desde un punto de vista hidrogeológico al sistema acuífero del Caroch, Sistema nº 52, y dentro de este al subsistema del “Caroch Norte”, 52.3 y concretamente se dispone en el límite entre los acuíferos del Ave y de las Muelas según se recoge en el siguiente esquema hidrogeológico, justamente sobre el Keuper que actúa como separación natural entre ambos acuíferos:

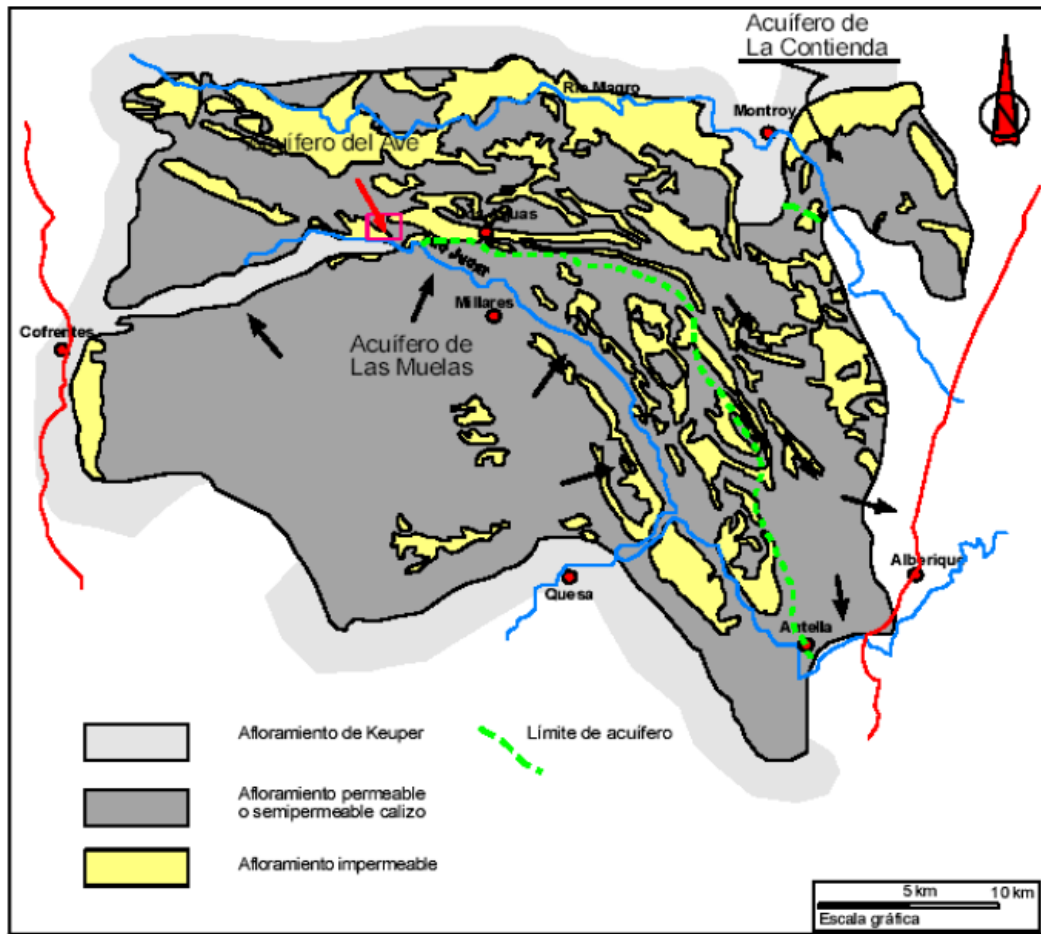


Figura 21. Mapa hidrogeológico de la zona.

Fuente: Grupotec [8]

Como se puede observar, la zona de estudio (recuadro malva con la flecha del mismo color) se emplaza en el límite entre los acuíferos de Las Muelas y del Ave, dentro de este último.

5.1.4. VEGETACIÓN

La vegetación potencial se corresponde a carrascales con lentisco y palmito (Rubio- Quercetum rotundifoliae), en los que como taxones más destacables aparecen:

- *Quercus rotundifolia* (carrasca)
- *Pistacia lentiscus* (lentisco).
- *Chamaerops humilis* (palmito)
- *Rubia peregrina* ssp. *longifolia*
- *Rhamnus oleoides* ssp. *angustifolia*.
- *Olea europea* var. *Sylvestris* (acebuche).
- *Rhamnus alaternus* (aladierno).

- *Asparagus acutifolius*.
- *Smilax aspera* (zarzaparrilla).
- *Lonicera implexa* (madreselva).
- *Phillyrea angustifolia*.

Cuando estos bosques se degradan son sustituidos por coscojares con lentisco (*Quercolentiscetum*) dominados fisionómicamente por la coscoja (*Quercus coccifera*), acompañada generalmente por los elementos anteriormente citados. Si la degradación es más intensa se desarrollan romerales (*Rosmarino-Ericion*), en los que abundan los elementos siguientes:

- *Erica multiflora* (brezo).
- *Rosmarinus officinalis* (romero).
- *Cistus clusii*.
- *Anthyllis cytisoides*.
- *Ulex parviflorus* (aliaga).
- *Stipa tenacissima*.
- *Thymus piperella* (pebrella).
- *Helianthemum* sp.pl.

Como última fase de la degradación, se desarrollan pastizales (*Teucrio-Brachypodium retusi*), en los que destacan por su abundancia:

- *Brachypodium retusum*.
- *Teucrium pseudo-chamaepitys*.
- *Dactylis glomerata* var. *Hispánica*.
- *Phlomis lychnitis*.
- *Eryngium campestris*.

En general, la vegetación actual de la zona se corresponde con etapas seriales degradativas de la vegetación climax, cultivos y vegetación arvense y nitrófila asociada a los cultivos. En los terrenos forestales abundan las especies del matorral-tomillar siendo la cobertura vegetal media y observándose una marcada tendencia hacia el tomillar. Los cultivos existentes en la zona son olivos, almendros y alguna viña junto con la vegetación arvense y nitrófila que los acompaña. En los barrancos se observa la presencia de vegetación edafófila típica de los mismos dominada por la adelfa y la zarzamora.

5.1.5. FAUNA.

La fauna presente en la zona es la típica de cultivos de áreas naturales degradadas y cultivos de secano arbolados.

Entre las aves se pueden mencionar tanto especies generalistas, mirlos (*T. merula*), tordos (*Turdus sp.*), escribanos (*Emberiza sp.*), como otras más específicas de estas áreas: currucas (*Sylvia sp.*), tarabillas (*Saxicola sp.*), collalbas (*Oenanthe sp.*) y pardillos (*A. Cannibina*).

Entre los mamíferos son abundantes los roedores, sobre todo el ratón de campo (*A. Sylvaticus*) e insectívoros, tanto musarañas (*C. Russula* y *S. etruscus*) como erizos (*E. Europaeus* y *E. algirus*) y aparecen ya frecuentemente los carnívoros, especialmente zorro (*V. Vulpes*) y comadreja (*M. nivalis*).

Por último, la herpetofauna es bastante variada en estos ambientes secos, siendo típicos la lagartija colilarga (*Ps. Algirus*) y el lagarto ocelado (*L. Lepida*). Es de destacar la presencia en estas áreas de las principales especies de caza menor; tanto la perdiz (*A. rufa*) como la liebre y el conejo (*Lepus capensis* y *O. cuniculus*) encuentran aquí las condiciones más propicias para su desarrollo.

5.1.6. USOS DEL SUELO.

El paisaje del área es una especie de mosaico en el que se combinan los cultivos de secano con los usos forestales de monte bajo.

Los cultivos de secano ocupan las áreas de topografía más suave y mejor suelo, mientras que los usos forestales ocupan áreas de topografía más abruptas y de peor suelo.

La zona en general presenta un elevado grado de antropización que se refleja en la artificialización del paisaje.

La cuenca visual del área de actuación se circunscribe a los relieves circundantes de mayor altura, que son poco frecuentados por las personas. La calidad paisajística de la zona es media y su fragilidad es también media.

A nivel de detalle, el vaso proyectado se localiza en una vaguada cuyo fondo está ocupado por cultivos de secano y cuyas márgenes son un monte bajo. La calidad paisajística de la zona es baja y su cuenca visual reducida, debido a las características topográficas del entorno.

5.1.7. CLIMATOLOGÍA.

El clima de toda la Comunidad Valenciana es un clima mediterráneo que se caracteriza por tener temperaturas suaves y escasas precipitaciones, con sequías en verano. Esto se debe a varios factores como son los desniveles orográficos de la región más septentrional, la orientación del relieve y de la costa, y la presencia del Mediterráneo como fuente de humedad y agente termonivelador. Los datos climáticos que aparecerán en el siguiente punto para realizar la aplicación práctica han sido sacados de una estación agroclimática situada en el término municipal de Turís perteneciente a la red SIAR (Sistema

de Información Agroclimática para el Regadío) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

5.1.8. ASPECTOS A DESTACAR.

El contenido en materia orgánica es inferior al caso de vertederos de RSU. Aunque en ocasiones se ha podido comprobar la llegada de residuos sin embalar, es decir, que en el momento que se producen puntas grandes de residuos domésticos, son llevados directamente a vertedero.

Los residuos que proceden de las plantas de tratamiento de RSU llegan al vertedero en forma de balas que se apilan unas sobre otras alcanzando una altura de 2.5 metros aproximadamente, tras lo cual se procede a la colocación de una capa de arcilla compactada. Se entiende que en ningún caso se han aceptado residuos clasificados como tóxicos y peligrosos.

Por los responsables de la planta se conoce que habitualmente se realizan recirculaciones de lixiviado mediante la extracción con camiones bombas y llevados de nuevo hasta el vaso de vertido.

En los últimos años se han hormigonado todos los caminos de acceso al vaso para que los días de lluvia, los camiones no tengan dificultades de acceso para el vertido de los residuos.

El vertedero está situado en una zona montañosa, de apreciado interés paisajístico. En su día las presiones ambientales hicieron que se dimensionase una gran obra de drenaje.

A continuación se muestra la tabla del volumen generado de lixiviados en un año de una parte del vertedero de Dos Aguas.

	Volumen generado (metros cúbicos)	Gestión de lixiviados	
		Tn	Destino / Tratamiento realizado
Enero	1.020	852,74	
Febrero	1.290	1.084,98	
Marzo	1.020	831,62	
Abril	870	707,4	
Mayo	960	792,07	
Junio	840	694,15	
Julio	300	248,7	
Agosto	690	568,32	
Septiembre	600	486,93	
Octubre	780	667,16	
Noviembre	1.140	935,22	
Diciembre	2.462	907,92	
TOTAL	11.972	8.777,21	

Tabla 12. Volumen generado de lixiviados durante un año en el vertedero de Dos Aguas (m3).

Fuente: Memoria anual del vertedero de Dos Aguas [13]

El resultado aproximado total de volumen de lixiviado en un año para el vertedero de dos aguas es $11.972 m^3$.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al utilizar los modelos de la ecuación de balance hídrico y VHELP a un vertedero sintético que, en la medida de lo posible, reproduce la información disponible procedente del vertedero de Dos Aguas.

Primero, se simula el vertedero de Dos Aguas para los 9 años que está activo, y ese caso solamente puede reproducirse con la ecuación de Balance Hídrico, ya que VHELP no puede simular vertederos activos. Después, utilizando VHELP se realizó la simulación para el año 1 y para el año 9 con sus capas correspondientes.

Al ver la diferencia entre los dos modelos, se hizo una simulación para un año con los máximos datos iguales y así poder comparar de una manera más detallada.

El objetivo del trabajo, no es tanto justificar el correcto calibrado de los modelos sino comparar los resultados obtenidos entre sí al basarse en los mismos datos de partida: características geométricas del modelo, régimen pluviométrico, etc...

5.2. APLICACIÓN DEL MODELO BASADO EN LA ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO A UN CASO SINTÉTICO.

Para la realización de los cálculos de producción de lixiviados se han considerado ciertas simplificaciones e hipótesis básicas. Se tienen en cuenta dichas hipótesis puesto que, dada la naturaleza de los vertederos de residuos sólidos urbanos, no es posible conocer al 100% la producción real de los lixiviados, puesto que son numerosos los factores de los que depende la misma. En primer lugar, no será posible conocer la composición específica real de los residuos vertidos. A partir de ahí, es evidente que tampoco se conocerá con certeza la cantidad de agua procedente de precipitaciones que infiltrará en el vaso del vertedero, ni el volumen de agua que se evaporará, etc.

Las hipótesis que se han tenido en cuenta son las siguientes:

- Se rellena un nivel horizontal con residuos cada año. En este caso, consideraremos que el vertedero se colmata en 9 años (uno por cada fase). Esta hipótesis no supone un error muy elevado y está del lado de la seguridad.
- El biogás y los huecos de aire se encuentran totalmente saturados de agua.
- No hay aporte de fangos durante el proceso.
- La capacidad de campo de un nivel depende de la sobrecarga que tenga encima en ese instante.
- Los lixiviados producidos en un nivel, alcanzarán el nivel inferior (Nivel 1) en el mismo año en que se producen. Sólo se considerarán lixiviados los líquidos que salgan de este Nivel 1 inferiormente, como resultado del balance hídrico del vertedero.
- El material de cubrición se considera inerte, es decir, no se degrada ni con el tiempo ni con los agentes externos. Su humedad es su capacidad de campo.
- La humedad inicial de los RSU es constante en toda la masa de residuos.
- No se consideran los asientos totales ni los diferenciales en estos cálculos, a pesar de ser importantes.
- La densidad del lixiviado se asumirá que es de 1000 kg/m^3 ; se considera igual que la del agua. En la realidad no varía mucho de ella.
- Después de la clausura del vertedero, la infiltración de agua de lluvia y/o nieve es nula, debido a la capa drenante y a la de sellado.

Se modelizará el vaso del vertedero suponiendo que será un prisma rectangular. El volumen de relleno total ($3.183.311 \text{ m}^3$) será el mismo. La cota inferior y superior (365 m y 455 m) también se mantendrá. Lo que se variará será la superficie. Por tanto, se considerará un vaso de superficie $35.370,12 \text{ m}^2$, que se llenará en 9 fases, una por año, de 10 metros de altura cada una. Dentro de estos 10 metros se incluye el material de cobertura. En cada fase se verterán 262.500 m^3 de residuos.

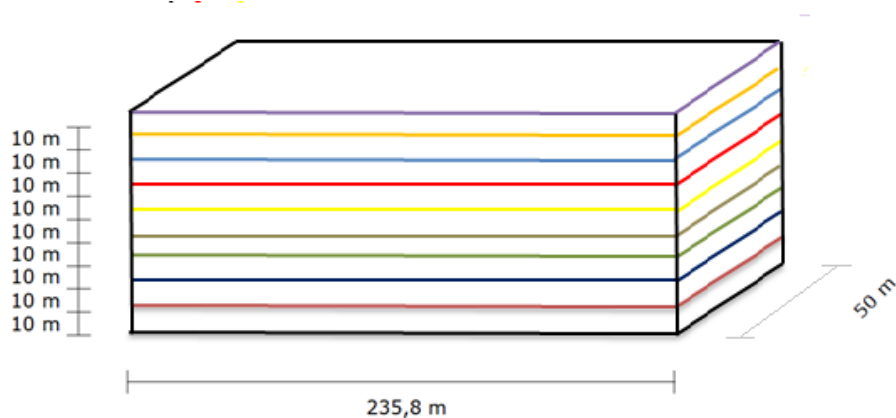


Figura 22. Modelización para el cálculo de lixiviados.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. DATOS CLIMÁTICOS

Para empezar a ir describiendo los datos de partida del vertedero sintético, nos vamos a situar en una zona localizada, que es una cuenca mediterránea.



Figura 23. Identificación geográfica de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Esta zona pertenece a la estación agroclimática (RED SIAR) de Turís. Las características climáticas y geográficas de la zona son:

La situación geográfica de la zona le confiere ciertas singularidades, ya que se encuentra ubicada en el área central de la provincia de Valencia, lo cual le otorga cierta continentalidad. Esto se aprecia por la dificultad que presentan para llegar las masas cargadas de aire húmedo procedentes del oeste. La acción de barrera debida a los relieves ibéricos y la depresión natural que da nombre a la comarca dificultan los aportes hídricos en la comarca.

El régimen de precipitaciones de la comarca ronda los 500 mm. anuales, siendo la irregularidad una de las características más destacables. Es en otoño cuando se recogen las máximas precipitaciones anuales, existiendo un segundo máximo en primavera. Además de la irregularidad de las precipitaciones, otro rasgo característico es el reducido número de días de lluvia al año, unos 40 ó 50, y la torrencialidad: para periodos de retorno de 10 años se esperan lluvias superiores a 100 mm/día.

En cuanto a las temperaturas de la zona, se recogen valores elevados en los meses de verano, oscilando la temperatura media entre 23,1 y 26,1°C, y valores medios reducidos en invierno, oscilando la temperatura media entre 5,5

y 11,3°C. Se producen heladas en la parte más baja de la zona unos 15 días al año.

Debido a que en verano se juntan elevadas temperaturas con momentos de menor precipitación, se establece un largo periodo anual de sequía, muy marcado en los meses de verano. Las tasas de evapotranspiración son elevadas (la evapotranspiración potencial estimada es casi el doble de la precipitación) lo que condiciona el uso agrícola y a la vegetación.

Datos climáticos

Los datos necesarios para la realización del presente estudio climático se han obtenido de una estación agroclimática situada en el término municipal de Turís perteneciente a la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. De las distintas estaciones pertenecientes a dicha red, ninguna de ellas situadas en Dos Aguas, se ha optado por emplear los datos de la estación de Turís. El histórico de datos considerado consta de 10 años, desde enero de 2003 hasta diciembre de 2013, ambos incluidos.

La estación agroclimática de Turís está diseñada para medir y registrar de modo automático y continuo diferentes variables meteorológicas. Consta de una serie de elementos que recogen datos físicos del medio: temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, radiación y precipitación.

Observaciones termométricas

A continuación, se muestra una tabla resumen con las temperaturas medias mensuales de los datos recogidos durante 10 años por la estación climatológica mencionada anteriormente. Además se muestran las temperaturas máximas y mínimas mensuales registradas.

MES	TEMPERATURA (°C)		
	Media	Máxima	Mínima
Enero	8,76	25,37	-8,14
Febrero	9,77	26,81	-3,92
Marzo	12,09	31,61	-3,59
Abril	14,36	35,28	1,02
Mayo	17,56	35,41	2,47
Junio	21,78	37,63	0,00
Julio	24,30	42,03	11,02
Agosto	24,36	41,85	10,77
Septiembre	20,99	38,50	6,50
Octubre	17,17	33,54	1,35
Noviembre	12,14	28,43	-3,46
Diciembre	9,44	26,56	-3,73
MEDIA	16,06	33,59	0,86

Tabla 13. Observaciones termométricas.

Fuente: Elaboración propia en base a [5].

Observaciones pluviométricas y humedad relativas

MES	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)	HUMEDAD MEDIA (%)
Enero	45,42	69,00
Febrero	32,10	67,14
Marzo	47,15	64,36
Abril	61,11	65,55
Mayo	59,07	66,15
Junio	13,65	63,42
Julio	7,88	64,50
Agosto	7,58	64,73
Septiembre	40,95	70,18
Octubre	89,17	71,80
Noviembre	36,01	68,70
Diciembre	48,66	69,95
TOTAL	488,75	67,12

Tabla 14. Observaciones pluviométricas y de humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia en base a [5].

Otros fenómenos atmosféricos.

Además de datos sobre precipitaciones, temperatura y humedad, la estación agroclimática de la red SIAR ubicada en Turís también aporta datos de radiación, insolación, velocidad y dirección del viento, horas de sol, etc. En la Tabla 15 se muestran algunos de estos datos obtenidos durante los diez años del histórico de datos empleado en el presente estudio.

MES	EVAPOTRANS-PIRACIÓN (mm)	VELOCIDAD VIENTO (m/s)	HORAS DE INSOLACIÓN
Enero	45,33	1,82	7,41
Febrero	51,93	1,72	8,44
Marzo	84,02	1,84	9,63
Abril	100,93	1,70	11,10
Mayo	125,05	1,28	12,06
Junio	144,23	1,06	12,98
Julio	152,89	1,01	12,80
Agosto	135,54	1,00	11,92
Septiembre	93,49	0,98	10,40
Octubre	66,94	1,14	8,92
Noviembre	44,92	1,50	7,64
Diciembre	36,88	1,66	6,74

Tabla 15. Otros datos atmosféricos.

Fuente: Elaboración propia en base a [5].

A continuación, se muestran los valores adoptados según los componentes del balance, descritos anteriormente para la realización de los cálculos:

Agua filtrada superiormente y escorrentía

Son consideradas entradas en el balance hidrológico el agua filtrada superiormente y el agua de escorrentía de la precipitación caída sobre la superficie del vertedero en explotación, ya que ésta deberá ser conducida a la red de lixiviados. Esta tabla es aportada por los cálculos realizados de la estación agroclimática de Turís

MES	PRECIPIT. (mm)	EVAPOTRANSP. REAL (mm)	BALANCE HÍDRICO	ESCORRENTÍA	AGUA FILTRADA SUPERIORMENTE (mm)
Enero	45,42	18,23	27,19	0	27,19
Febrero	32,10	21,57	10,53	0	10,53
Marzo	47,15	37,66	9,49	7,37	16,86
Abril	61,11	54,07	7,04	14,4	21,44
Mayo	59,07	83,62	-24,55	0	0
Junio	13,65	120,59	-106,94	0	0
Julio	7,88	146,92	-139,04	0	0
Agosto	7,58	138,18	-130,60	0	0
Septiem.	40,95	95,08	-54,13	0	0
Octubre	89,17	62,87	26,30	0	26,30
Noviem.	36,01	30,93	5,08	0	5,08
Diciembre	48,66	19,89	28,78	0	28,78
TOTAL	488,75	829,60	0	21,77	136,18

Tabla 16. Agua filtrada superiormente y escorrentía.

Fuente: Elaboración propia en base a [5].

Se considera que el agua filtrada superiormente a lo largo de un año será de 136,18 mm, lo que es lo mismo 136,18 kg agua/m².

Agua aportada por lo residuos

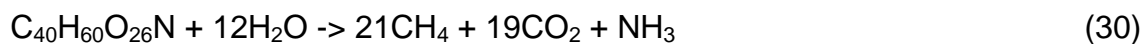
Se considera una humedad media inicial de los residuos vertidos del 37%, y una densidad de los mismos de 800 kg/m³. Por tanto, el agua que aportan los residuos es de 296 kg/m³.

Agua aportada por el material de cubrición

Se considera que el contenido en humedad del material empleado para la cubrición es su capacidad de campo. De todos modos, y puesto que parte del material de cubrición es retirado, este término no se tendrá en cuenta para el cálculo del volumen de lixiviados.

Agua consumida en la formación del biogás

Se consume agua durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los R.S.U. La cantidad de agua consumida en las reacciones de descomposición se puede estimar utilizando la fórmula para el material de descomposición. Resumiendo esta fórmula, la masa de agua absorbida por kilogramo de residuos orgánicos secos consumidos puede estimarse de la siguiente forma:



Se generan 0,91 m³ de biogás por cada kilogramo de residuos rápidamente biodegradables, se puede obtener el agua consumida para generar un metro cúbico de biogás. (31)

$$\begin{aligned} \text{Agua consumida} &= \frac{12 \cdot (2 \cdot 1,01 + 16)}{40 \cdot 12 + 62 \cdot 1,01 + 26 \cdot 16 + 14,01} = \frac{216,24}{972,63} \\ &= 0,222 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg SVRB}} \end{aligned}$$

$$\text{Agua consumida} = 0,222 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg SVRB}} \cdot \frac{1 \text{ kg SVRB}}{0,91 \text{ m}^3 \text{ gas}} = 0,244 \frac{\text{kg agua}}{\text{m}^3 \text{ gas}}$$

Por lo tanto, para la formación de 1m³ de biogás se emplean 0,244 kg de H₂O.

Agua perdida como vapor de agua en el biogás del vertedero

El biogás suele estar saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que se escapa del vertedero se determina suponiendo que el gas del vertedero está saturado y aplicando la ley de los gases perfectos: (32)

$$P_v \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Siendo P_v : presión parcial (atmósferas) de vapor de agua a la temperatura T

V: volumen en litros (l)

n: número de moles de gas

R: constante de los gases perfectos (R=0,082 atm·l/°K)

T: temperatura en grados Kelvin (°K)

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

$$P_v = 4,82 \text{ KN/m}^2 \text{ (presión del vapor de agua a 32 °C)}$$

$$V = 1,0 \text{ l}$$

n= número de moles de gas

$$R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{l/}^\circ\text{K}$$

$$T = 305 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$n = \frac{P_v \cdot V}{R \cdot T} = \frac{4,82 \cdot 1,0}{0,082 \cdot 305} = 0,0019 \text{ mol} \frac{18 \text{ kg}}{\text{kg} \cdot \text{mol}} = 0,0352 \text{ kg } H_2O / \text{m}^3 \text{ biogás}$$

Capacidad de campo del vertedero

Las hipótesis consideradas para estimar la capacidad de campo de la masa de residuos son:

- densidad residuos = 800 kg/m³
- humedad de los residuos = 37 %
- altura fase = 10 m
- densidad material cubrición = 2040 kg/m³
- espesor capa cubrición = 0,75 m (30 cm cada 4 m de residuos, por lo que por cada 10 m de residuos el material de cubrición tiene un espesor de 75 cm)
- espesor residuos = 9,25 m

Tal y como se ha indicado anteriormente, la capacidad de campo se calculará como: (33)

$$CC = 0,6 - 0,55 \cdot \left(\frac{W}{4536 + W} \right)$$

Siendo:

CC: capacidad de campo, es decir, la fracción de agua en los residuos basándose en el peso seco de los mismos

W: peso (por metro cuadrado de superficie) de la sobrecarga calculada en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión (kg).

5.2.2.- RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO

En este apartado, se explicará y se mostrará la producción de lixiviados para cada año y cada nivel.

El esquema de definición pertinente del vertedero se muestra a continuación:

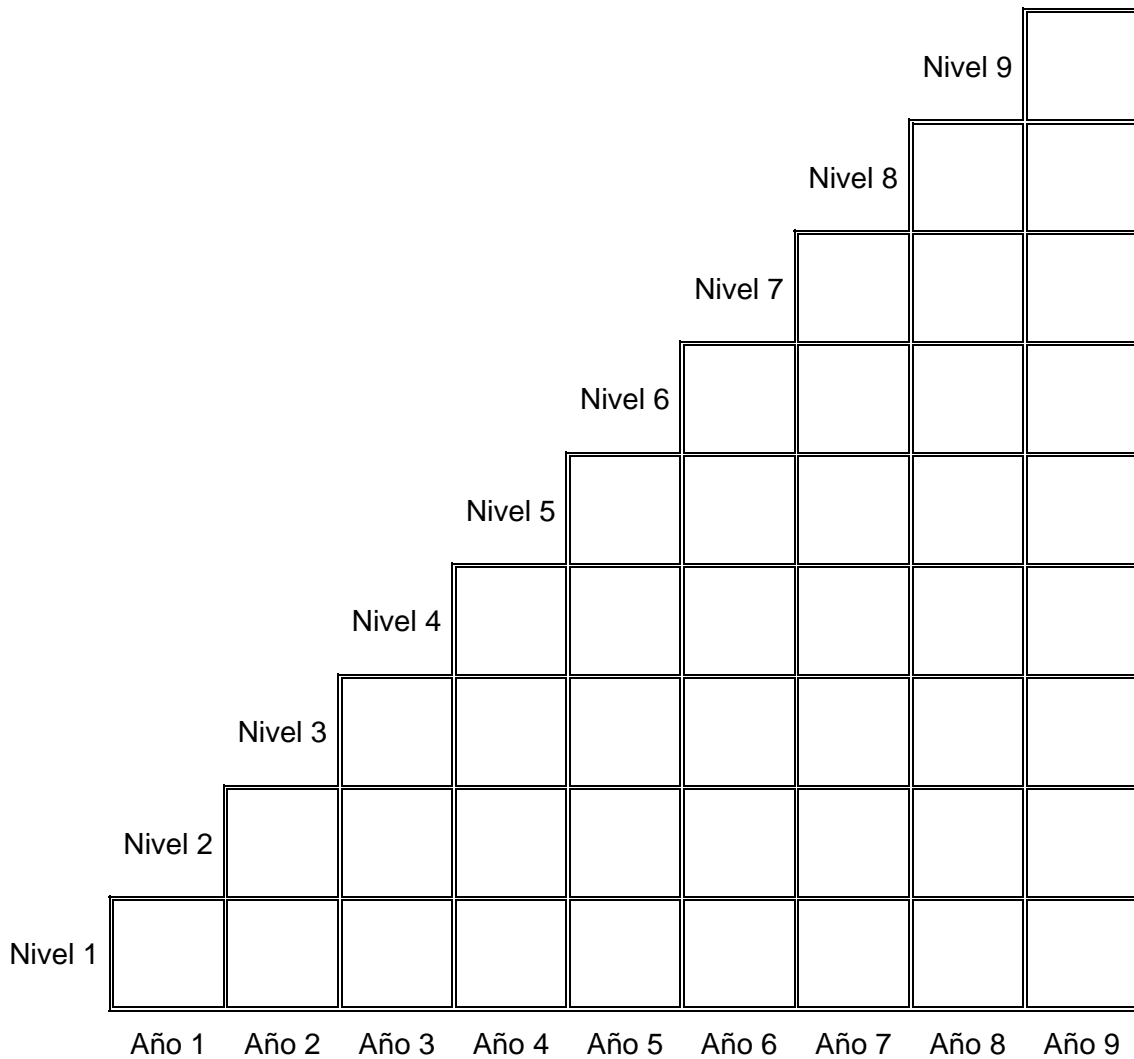


Figura 24. Definición gráfica de la trayectoria del vertedero durante 9 años.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la metodología ya descrita en el apartado anterior y teniendo en cuenta las hipótesis, los parámetros y las características del vertedero elegido, se llega a la siguiente producción de lixiviados:

AÑO	LIXIVIADOS GENERADOS (m ³)
1	51583.15
2	65868.14
3	67646.96
4	69553.57
5	70401.50
6	71133.06
7	71592.91
8	71726.05
9	71830

Tabla 17. Volumen de lixiviados generados.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se mostrarán todas las tablas con los resultados obtenidos por fase para calcular los lixiviados producidos.

Elementos del balance de aguas para el nivel 1

Datos:

Peso del material de cubrición(kg)	1530
Peso de residuos sólidos(kg)	7400
Peso total(kg)	8930

Peso seco residuos sólidos (kg)	4662
Cont. Humedad RSU (kg)	2738
Peso lluvia (kg)	136.18
Peso TOTAL NIVEL(kg)	9066.18

NIVEL FASE 1

Primeramente, se indica la tabla de producción de biogás que se ha utilizado para calcular el gas producido en cada nivel.

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (m³/kg residuo seco)	
Final del año 1	0
Final del año 2	0,1047504
Final del año 3	0,1859412
Final del año 4	0,138822
Final del año 5	0,0917028
Final del año 6	0,0445836
Final del año 7	0,0199728
Final del año 8	0,0178704
Final del año 9	0,015768

Balance nivel 1

Gas producido (m3)	0
Peso del gas producido (kg)	0
Peso del agua consumida en el gas (kg)	0
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	0
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	2874,18
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 1(kg)	4662
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	5298,09
Factor de capacidad de campo CC	0,303689
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	1415,798
Lixiviados producidos (kg)	1458,382

Agua restante en el nivel 1 al final del año 1	1415,798
Peso total del nivel 1 al final del año 1	7607,798

El área como hemos comentado anteriormente es 35370,12 m². Se ha determinado el factor de conversión para poder convertir los kilogramos de lixiviado obtenidos a m³/año, y el resultado ha sido:

LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m ³ /año)
1458.382099	51583.14985

NIVEL 2

Hay que resaltar que los cálculos para los distintos niveles son iguales a los cálculos para el nivel 1 en el año 1. A partir de esta fase, solo se indicará el nivel 1 ya que el total es la suma de los anteriores ya calculados con el nivel 1 correspondiente a cada fase.

Gas producido (m³)	488,3464
Peso del gas producido (kg)	679,7781
Peso del agua consumida en el gas (kg)	119,1565
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	17,18979
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	1279,452
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 2(kg)	4101,378
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	13566,91
Factor de capacidad de campo CC	0,187812
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	875,5801
Lixiviados producidos (kg)	403,8714
Agua restante en el nivel 1 al final del año 2	875,5801
Peso total del nivel 1 al final del año 2 (kg)	4976,959

Por lo tanto, sumando el nivel 1 más el nivel 2 se obtiene:

LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1458.382099	51583.14985	51583.14985
403.8715967	14284.98684	65868.13669

NIVEL 3

Gas producido (m ³)	762,6152
Peso del gas producido (kg)	1061,56
Peso del agua consumida en el gas (kg)	186,0781
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	26,84406
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	662,658
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 3(kg)	3225,896
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	20586
Factor de capacidad de campo CC	0,149307
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	612,3661
Lixiviados producidos (kg)	50,29186
Agua restante en el nivel 1 al final del año 3	612,3661
Peso total del nivel 1 al final del año 3 (kg)	3838,262

Por lo tanto, sumando los tres niveles se obtiene:

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268

NIVEL 4

Gas producido (m³)	447.8253491
Peso del gas producido (kg)	623.3728859
Peso del agua consumida en el gas (kg)	109.2693852
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	15.76345229
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	487.3332218
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 4(kg)	2711.792604
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	25037.55
Factor de capacidad de campo CC	0.134359166
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	433.4287088
Lixiviados producidos (kg)	53.90451302
Agua restante en el nivel 1 al final del año 4	433.4287088
Peso total del nivel 1 al final del año 4 (kg)	3145.221313

Lixiviados producidos totales al final del año 4:

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178

NIVEL 5

Gas producido (m³)	248.6789748
Peso del gas producido (kg)	346.1611329
Peso del agua consumida en el gas (kg)	60.67766985
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	8.753499913
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	363.997539

Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 5(kg)	2426.309141
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	28557.09
Factor de capacidad de campo CC	0.125387339
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	340.024459
Lixiviados producidos (kg)	23.973079
Agua restante en el nivel 1 al final del año 5	340.024459
Peso total del nivel 1 al final del año 5 (kg)	2766.3336

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178
5	23.97307998	847.9307157	70401.50249

NIVEL 6

Gas producido (m³)	108.1735962
Peso del gas producido (kg)	150.5776459
Peso del agua consumida en el gas (kg)	26.39435748
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	3.807710587
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	309.8223909
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 6(kg)	2302.125853
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	31532.49
Factor de capacidad de campo CC	0.119168407
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	289.1393955

Lixiviados producidos (kg)	20.68299546
Agua restante en el nivel 1 al final del año 6	289.1393955
Peso total del nivel 1 al final del año 6 (kg)	2591.265248

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178
5	23.97307998	847.9307157	70401.50249
6	20.68299546	731.5600315	71133.06253

NIVEL 7

Gas producido (m³)	45.97989923
Peso del gas producido (kg)	64.00401973
Peso del agua consumida en el gas (kg)	11.21909541
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	1.618492453
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	276.3018076
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 7(kg)	2249.340928
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	34219.47
Factor de capacidad de campo CC	0.114372849
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	263.3006914
Lixiviados producidos (kg)	13.00111619
Agua restante en el nivel 1 al final del año 7	263.3006914
Peso total del nivel 1 al final del año 7 (kg)	2512.64162

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178
5	23.97307998	847.9307157	70401.50249
6	20.68299546	731.5600315	71133.06253
7	13.00111619	459.8510396	71592.91356

NIVEL 8

Gas producido (m ³)	40.19662212
Peso del gas producido (kg)	55.953698
Peso del agua consumida en el gas (kg)	9.807975798
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	1.414921099
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	252.0777945
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 8(kg)	2203.195206
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	36772.73
Factor de capacidad de campo CC	0.110394014
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	248.3137729
Lixiviados producidos (kg)	3.764021587
Agua restante en el nivel 1 al final del año 8	248.3137729
Peso total del nivel 1 al final del año 8 (kg)	2451.508979

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178
5	23.97307998	847.9307157	70401.50249
6	20.68299546	731.5600315	71133.06253
7	13.00111619	459.8510396	71592.91356
8	3.764021587	133.1338952	71726.04746

NIVEL 9

Gas producido (m³)	34.73998201
Peso del gas producido (kg)	48.35805496
Peso del agua consumida en el gas (kg)	8.47655561
Peso del vapor agua presente en el gas (kg)	1.222847367
Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	1.222847367
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 9(kg)	2163.313707
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	39255.56
Factor de capacidad de campo CC	0.106969882
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	235.6755309
Lixiviados producidos (kg)	2.938839047
Agua restante en el nivel 1 al final del año 9	235.6755309
Peso total del nivel 1 al final del año 9 (kg)	2398.989238

NIVEL	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m3/año)	LIXIVIADOS TOTALES (m3/año)
1	1458.382099	51583.14985	51583.14985
2	403.8715967	14284.98684	65868.13669
3	50.29177143	1778.82599	67646.96268
4	53.90451302	1906.609094	69553.57178
5	23.97307998	847.9307157	70401.50249
6	20.68299546	731.5600315	71133.06253
7	13.00111619	459.8510396	71592.91356
8	3.764021587	133.1338952	71726.04746
9	2.938839047	103.9470898	71829.99455

A continuación se muestran la gráfica referente a los resultados obtenidos en este balance hídrico:

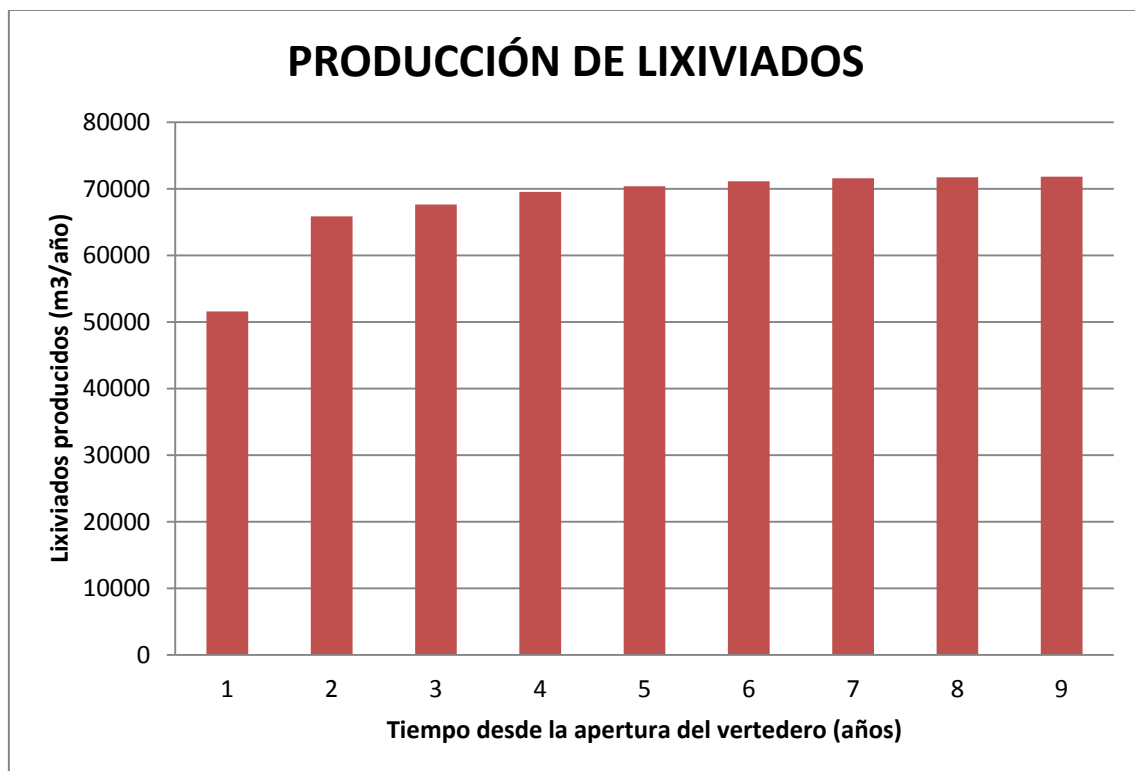


Figura 25. Lixiviados producidos totales.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. APLICACIÓN DEL MODELO VHELP A UN CASO SINTÉTICO.

Se condujo un estudio para simular la producción de lixiviados en un relleno sanitario sintético de cuencas mediterráneas. Para realizar esta simulación se utilizó el modelo para la Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP por sus siglas en inglés). Este modelo fue desarrollado para asistir a diseñadores y evaluadores de rellenos sanitarios en la estimación de la producción de lixiviados y el movimiento de agua a través del relleno. Fue desarrollado por la Estación Experimental Waterways del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para la Agencia de Protección Ambiental Federal (USEPA).

El modelo computadorizado HELP puede ser utilizado para realizar análisis de secuencia diarios, mensuales y anuales para generar estimados de escorrentía, evapotranspiración, drenaje lateral, infiltración a través de las cubiertas y generación de lixiviados. La fracción de lluvia que se infiltra en el relleno sanitario, estimada utilizando HELP, y la oxidación de la materia orgánica entre los desperdicios enterrados, son las fuentes principales de la producción de los jugos de lixiviación en el relleno sanitario. La lluvia que se infiltra resulta ser el componente mayor de la generación de lixiviados, esta pasa a través de las capas de desperdicios enterrados y es recogida en el sistema de recolección de lixiviados.

Para estimar la generación de lixiviados se utiliza el modelo HELP el cual ha sido utilizado en diversos lugares alrededor del mundo para la simulación de producción de lixiviados.

5.3.1. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO UTILIZADO.

Se estimó la generación de lixiviados en un vertedero sintético de la zona del mediterráneo utilizando el modelo HELP. Este modelo requiere de datos climatológicos generales y datos climatológicos diarios, características de suelo y especificaciones de diseño para realizar el análisis de generación de lixiviados. Los datos generales de climatología incluyen: promedio de la velocidad del viento, promedios trimestrales de humedad relativa, temperaturas mensuales promedio, índice máximo de área de follaje ("maximum leaf index"), profundidad de la zona de evaporación y latitud. Los datos diarios de climatología incluyen: precipitación, temperatura promedio y radiación solar total. La temperatura y la radiación solar diaria pueden ser generadas estocásticamente por el modelo.

El modelo HELP requiere de datos del suelo y otros componentes a ser utilizados para hacer las diferentes simulaciones. Los datos de suelo incluyen: porosidad, capacidad de campo, punto de marchitado ("wilting point"), conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad inicial y el número de

curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). El modelo contiene características de suelo preestablecidas, para 42 tipos diferentes de material para ser utilizados cuando las mediciones de campo no están disponibles. La porosidad, capacidad del campo, punto de marchitado y la conductividad hidráulica saturada son utilizados para calcular el coeficiente de evaporación de agua y los parámetros de retención de humedad de Brooks- Corey. Las especificaciones de diseño incluyen: pendiente, distancias máximas de drenaje, capas de drenaje lateral, espesor de las capas, descripción de las capas, área, procedimiento para la recirculación de lixiviados, flujos de entrada, características de la superficie y características de la geomembrana.

5.3.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS.

Los datos de precipitación utilizados para la simulación de la producción de lixiviados fueron extraídos del resumen de valores de precipitación diaria provistos por NOAA. Se utilizaron quince (15) años de precipitación histórica para estaciones meteorológicas de las cuencas mediterráneas. Estos datos son característicos de la zona de estudio y del periodo de tiempo.

Los datos para radiación solar y temperatura fueron generados estocásticamente para los quince años de precipitación utilizados. HELP incorpora una rutina desarrollada por el Departamento de Agricultura Federal (USDA), para generar datos diarios de temperatura promedio y radiación solar. La generación sintética de la temperatura y la radiación solar se hacen en función de la precipitación, por lo tanto, el usuario del modelo debe proveer primero los datos de precipitación. La generación de datos de temperatura y radiación solar están limitados al número de años de precipitación disponibles.

5.3.3. SIMULACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS.

Para las simulaciones realizadas utilizando el modelo HELP las diferentes capas o revestimientos y obras diseñadas tales como drenajes laterales, geomembrana sintética, y barreras de suelos impermeables a ser utilizadas en el relleno sanitario son simuladas. El espesor de la capa, la inclinación de la pendiente, el largo de drenaje y las características de la geomembrana pueden ser cambiadas durante la evaluación, ayudando al diseñador en la optimización de la configuración del relleno sanitario y del sistema de recolección de lixiviados.

Se simularon dos escenarios en el relleno sanitario sintético utilizando HELP. Bajo esta condición se modelaron celdas de un acre bajo dos condiciones de operación, inicial y final utilizando el modelo HELP y quince (15) años de precipitación histórica en el área. La operación inicial se refiere a una capa de desperdicios sólidos de 10 metros, y la final se refiere a una capa de 90 metros

con la cubierta final similar a la que será colocada en ese vertedero una vez se complete la operación o se llegue al final de su vida útil.

5.3.4 RESULTADOS.

La operación inicial como se ha comentado anteriormente es una capa de 10 m de espesor. El perfil corresponde a la siguiente imagen:

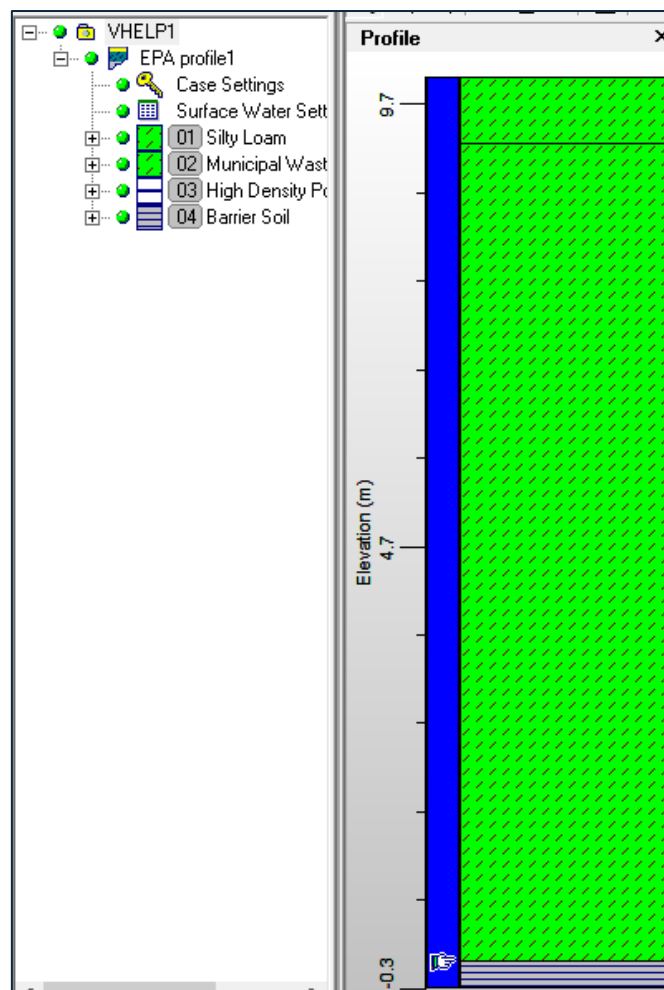


Figura 26. Perfil vertedero un año.

Fuente: Elaboración propia.

La solución se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Annual Totals volume (m3)	
	Total (m3)
Precipitation (m3)	3.2980E+03
Runoff (m3)	3.2517E+01
Evapotranspiration (m3)	4.0672E+03
Change in water storage (m3)	-8.0303E+02
Water budget balance (m3)	-4.9531E-05
Soil water (m3)	3.0684E+04
Snow water (m3)	0.0000E+00
Percolation or leakage through Layer 4 (m3)	1.3384E+00

Tabla 18. Volumen anual total durante un año.

Fuente: Elaboración propia.

Para la situación final, de 90 metro de espesor, el perfil es el siguiente:

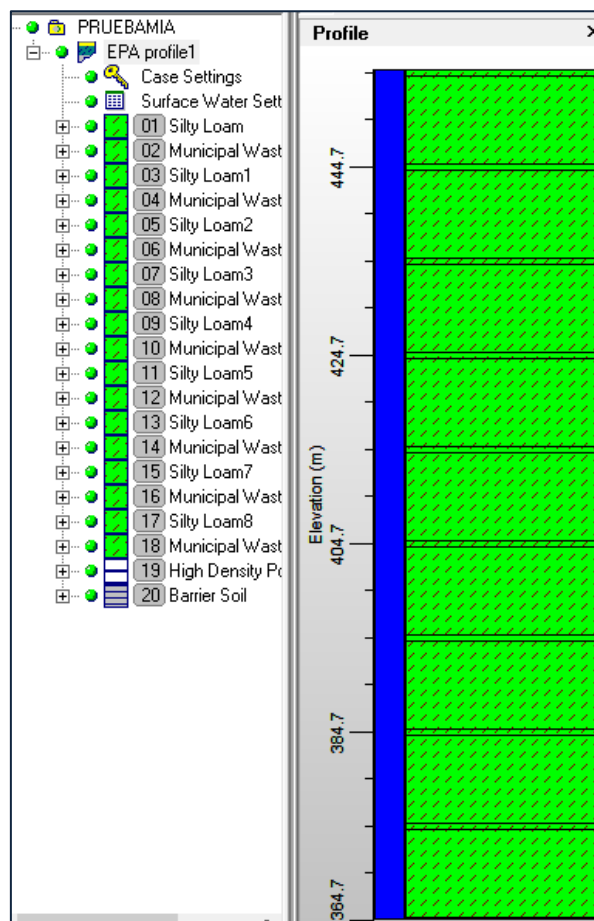


Figura 27. Perfil de vertedero (90 metros)

Fuente: Elaboración propia.

Y el resultado final que se obtiene para un año, aparece en la siguiente tabla:

	Annual Totals volume (m3)	
	Year-1 (m3)	Total (m3)
Precipitation (m3)	3.2980E+03	3.2980E+03
Runoff (m3)	3.6614E+01	3.6614E+01
Evapotranspiration (m3)	3.2845E+03	3.2845E+03
Change in water storage (m3)	-7.0091E+02	-7.0091E+02
Water budget balance (m3)	-4.9531E-05	-4.9531E-05
Soil water (m3)	3.3358E+05	3.3358E+05
Snow water (m3)	0.0000E+00	0.0000E+00
Percolation or leakance through Layer 20 (m3)	6.7777E+02	6.7777E+02

Tabla 19. Volumen anual total durante un año (90 metros)

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar la diferencia es muy elevada, en esta última situación el vertedero está cerrado ya que no puede admitir más cantidad de lixiviado. La vida del vertedero es de 9 años.

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR AMBOS MODELOS AL VERTEDERO DE DOS AGUAS

Los cálculos de ambos modelos se han realizado con los máximos datos posibles del Vertedero de Dos Aguas. El motivo es para así poder hacer una comparación entre estos dos modelos y el vertedero de Dos Aguas durante 1 año, y lograr que la comparación sea lo más similar posible.

5.4.1. BALANCE HÍDRICO DURANTE UN AÑO.

Según la metodología empleada anteriormente en el punto 5.2 y los nuevos datos que aparecen a continuación, se ha creado el siguiente modelo de balance:

Datos

Residuos totales	2.36E+09	kg
Número de días de explotación	365	días
Residuos colocados por año	2.62E+08	kg
Peso específico de los residuos	312	kg/m ³
Humedad inicial residuos	0.37	
Altura de nivel	10	m
Número de niveles	9	
Peso específico del suelo	2040	kg/m ³
Agua consumida gas vertedero	0.244	kg/m ³
Agua presente vapor agua	0.0352	kg/m ³
Peso específico gas vertedero	1.392	kg/m ³
Lluvia	32.98	cm/año
Peso específico material de cubrición	2040	kg/m ³

Peso del material de cubrición(kg)	1530	Peso seco residuos sólidos (kg)	1818.18
Peso de residuos sólidos(kg)	2886	Cont. Humedad RSU (kg)	1067.82
Peso total(kg)	4416	Peso lluvia (kg)	329.8
		Peso TOTAL NIVEL	4745.8

1 AÑO

Peso agua de los residuos en el nivel (kg)	1397.62
Peso seco residuos sólidos restantes en nivel 1 al final del año 1(kg)	1818.18
Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (kg)	3137.9
Factor de capacidad de campo CC	0,37510
Agua retenida en res. sólidos en el nivel 1 (kg)	682
Lixiviados producidos (kg)	715.62
Agua restante en el nivel 1 al final del año 1	682
Peso total del nivel 1 al final del año 1	4030.18

El área como hemos comentado anteriormente es 35370.12 m². Se ha determinado el factor de conversión para poder convertir los kilogramos de lixiviado obtenidos a m³/año, y el resultado ha sido:

LIXIVIADOS PRODUCIDOS (kg)	LIXIVIADOS PRODUCIDOS (m ³ /año)
715.62	25311.46

5.4.2. VHELP

A continuación, se ha creado un modelo igual que en el balance hídrico, como se ha comentado anteriormente. El modelo ha simulado la producción de lixiviados para un año.

Se han podido utilizar los mismos datos que en el balance hídrico y el vertedero de Dos Aguas únicamente en el peso específico de los residuos, espesor, precipitación, humedad inicial y tiempo.

El esquema para un año sería:

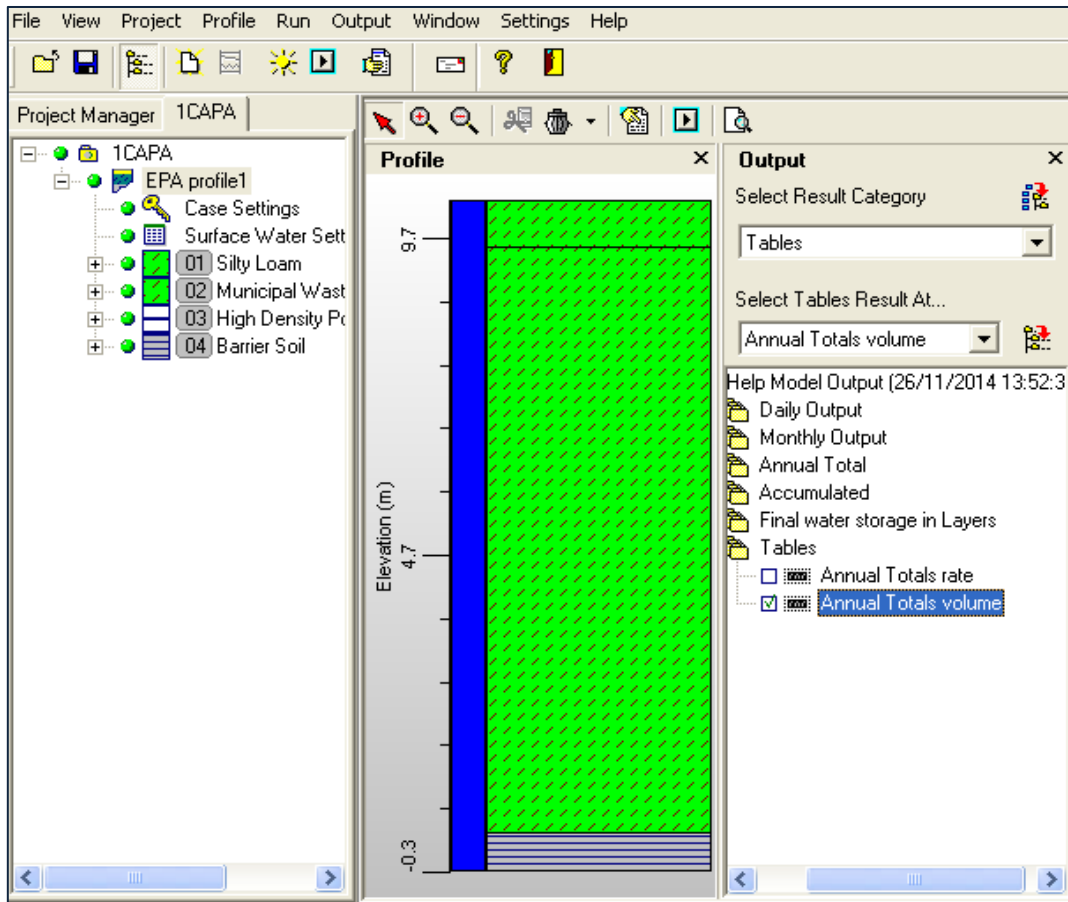


Figura 28. Perfil comparación durante un año.

Fuente: Elaboración propia.

Las características generales del vertedero modelo son:

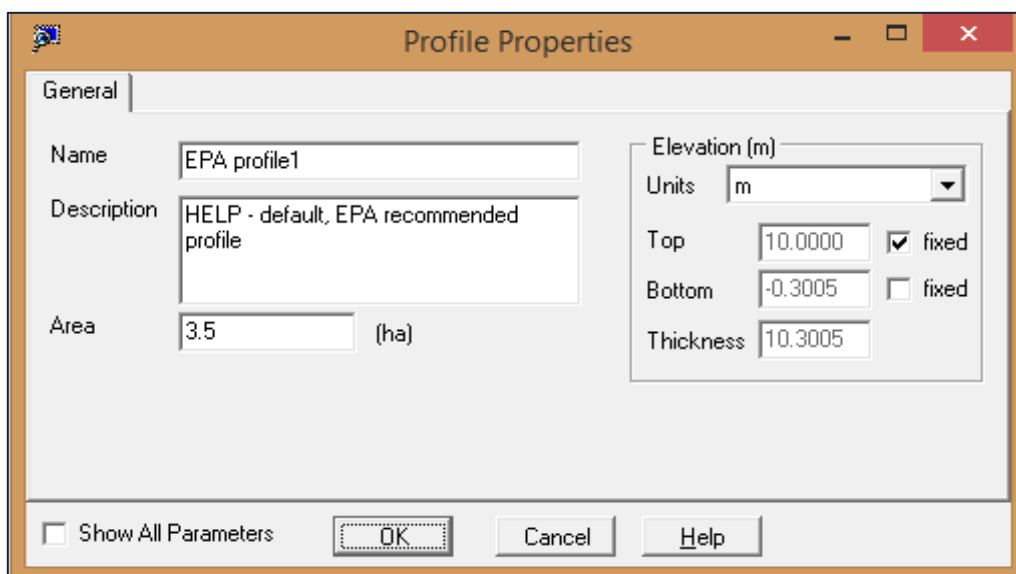


Figura 29. Propiedades del perfil.

Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las capas tiene una pantalla de propiedades. Como se puede ver en el perfil, hay una capa de limos en la parte superior, la cual tiene las siguientes características:

Material Category: [HELP] Vertical Percolation Layer | Material: Silty Loam

General | Vertical Perc. Layer Parameters

Name: Silty Loam
Description: HELP texture # 9

Layer Specific:
 No Slope Slope Drained Drainage
If no "Drainage" function is specified for drainage layers, a drainage spacing of 10000 is assigned by default.

Layer's Top:
 Elevation (m): 10.3000
 Surface Slope (%): 0.0000
 Surface Slope Length (m): 0.0000

Layer's Bottom:
 Elevation (m): 9.5500
 Slope (%): 0.0000
 Slope Length (m): 0.0000

Info:
 Thickness: 0.7500 m
 Leachate Recirculation (%): 0.00
 To Layer: none

Parameter	Value	Units	Comment
total porosity	0.501	vol/vol	Total fraction of voids
field capacity	0.284	vol/vol	Moisture content at 1/3 bar
wilting point	0.135	vol/vol	Moisture content at 15 bar
sat.hydr.conductivity	1.9E-4	cm/sec	permeability under unit pressure gradient
subsurface inflow	0	mm/year	inflow from external source into the layer
Initial moisture content	0.28	vol/vol	Initial moisture content

Figura 30. Propiedades capa Silty Loam.

Fuente: Elaboración propia.

De esta pantalla se permite el diseño de la capa, material, pendiente y drenaje y otros parámetros de la capa. La opción de drenaje y de la pendiente sólo se aceptan para las capas de drenaje lateral y geotextiles.

La opción de drenaje se debe aplicar sólo en el caso de que existan chimeneas de aireación.

Además también se puede indicar los datos de espesor de la capa a través de las distintas cotas.

El programa también permite el movimiento de los espesores de las capas a través de la interfaz, acto seguido pidiendo las coordenadas exactas de la situación de la misma.

Además entre las capas existentes se pueden añadir otras, borrarlas, restaurarlas en caso de error, dividir capas grandes en varias secciones, por si se quieren dar valores distintos de parámetros de cada una de las secciones.

También se pueden formar grupos de capas por si se quieren realizar análisis de los mismos grupos, dando espesores de grupo, propiedades de grupo, etc.

La siguiente capa está formada por residuos urbanos municipales, cuyas características también aparecen a continuación:

Material Category: [HELP] Vertical Percolation Layer | Material: Municipal Waste (312 kg/cub.m)

General | Vertical Perc. Layer Parameters

Name: Municipal Waste (312 kg/cub.m)1
Description: HELP texture # 18

Layer Specific:
 No Slope Slope Drained Drainage
If no "Drainage" function is specified for drainage layers, a drainage spacing of 10000 is assigned by default.

Layer's Top	Layer's Bottom	Info
Elevation (m): 9.5505	Elevation (m): 0.3005	Thickness: 9.2500 m
Slope (%): 0.0000	Slope (%): 0.0000	Leachate Recirculation (%): 0.00
Slope length (m): 0.0000	Slope Length (m): 0.0000	To Layer: none

Parameter	Value	Units	Comment
total porosity	0.671	vol/vol	Total fraction of voids
field capacity	0.292	vol/vol	Moisture content at 1/3 bar
wilting point	0.077	vol/vol	Moisture content at 15 bar
sat.hydr.conductivity	0.001	cm/sec	permeability under unit pressure gradient
subsurface inflow	0	mm/year	inflow from external source into the layer
Initial moisture content	0.29	vol/vol	Initial moisture content

Figura 31. Propiedades capa Municipal Waste.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente capa, se ha puesto una geomembrana de alta densidad:

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, the 'Material Category' is '[HELP] Geomembrane Liner' and the 'Material' is 'High Density Polyethylene'. The 'General' tab is active, showing 'Geomembrane Liner Parameters'. The 'Name' is 'High Density Polyethylene' and the 'Description' is 'HELP texture # 35'. Under 'Layer Specific', the 'No Slope' radio button is selected. Below this, there are three groups of input fields: 'Layer's Top' (Elevation: 0.3010, Slope (%): 0.0000, Slope length (m): 0.0000), 'Layer's Bottom' (Elevation: 0.3000, Slope (%): 0.0000, Slope Length (m): 0.0000), and 'Info' (Thickness: 0.0010 m, Leachate Recirculation (%): 0.00, To Layer: none). A note states: 'If no "Drainage" function is specified for drainage layers, a drainage spacing of 10000 is assigned by default.'

Parameter	Value	Units	Comment
sat hydr. conductivity	2E-13	cm/sec	permeability under unit pressure gradient
pinhole density	2	#/ha	# of holes (1 mm) per unit area resulting from manufacturing flaws
installation defects	2	#/ha	# of holes (1 cm ²) per unit area in result of installation
placement quality	4	-	quality range of contact between the geomembrane liner and the undersoil: 1 - perfect, 2
geotextile transmissivity	0	cm ² /sec	the product of saturated hydraulic conductivity and thickness of the geotextile

Figura 32. Propiedades capa High Density Poliethylene.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, hay una barrera de suelo “barrier soil” cuyas características y espesor son:

Material Category: [HELP] Barrier Soil Liner | Material: Barrier Soil

General | Barrier Soil Liner Parameters

Name: Barrier Soil
Description: HELP texture # 16

Layer Specific:
 No Slope Slope Drained Drainage
If no "Drainage" function is specified for drainage layers, a drainage spacing of 10000 is assigned by default.

Layer's Top:
 Elevation (m): 0.3005
 Slope (%): 0.0000
 Slope length (m): 0.0000

Layer's Bottom:
 Elevation (m): -0.2995
 Slope (%): 0.0000
 Slope Length (m): 0.0000

Info:
 Thickness: 0.6000 m
 Leachate Recirculation (%): 0.00
 To Layer: none

Parameter	Value	Units	Comment
total porosity	0.427	vol/vol	Total fraction of voids
field capacity	0.418	vol/vol	Moisture content at 1/3 bar
wilting point	0.367	vol/vol	Moisture content at 15 bar
sat.hydr.conductivity	10E-7	cm/sec	permeability under unit pressure gradient
subsurface inflow	0	mm/year	inflow from external source into the layer

Figura 33. Propiedades capa Barrier Soil

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las propiedades del perfil, hay dos opciones en las que se pueden modificar los datos de diversos parámetros. Por una parte, está “case settings”:

Parameter	Value
Runoff Method	User specified
Initial Moisture Settings	User specified

Figura 34. Configuración VHELP.

Fuente: Elaboración propia.

Y por otra, “Surface water settings”:

Surface Water Settings		
Parameter	Value	Units
Runoff Area	100	%%
Initial Surface Water	0	m
Runoff Curve Number	75	-

Figura 35. Ajustes de aguas superficiales.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez diseñado el perfil, tenemos que ir a “weather generator. HELP requiere tres tipos distintos de datos meteorológicos que son: precipitación (lluvia o nieve), radiación solar y temperatura.

Además HELP requiere un grupo de parámetros constantes para simular la evapotranspiración.

HELP utiliza todos estos datos climáticos para:

- Realizar el cálculo del volumen de entrada al vertedero, simular la escorrentía, evaporación, crecimiento de la vegetación y transpiración, la infiltración durante periodos.
- Para simular el almacenamiento en superficie, escorrentía y infiltración en los periodos fríos.

Los datos climáticos diarios pueden ser importados desde una fuente externa a través de un archivo o pueden ser generados sintéticamente a través del generador de clima del programa.

La pantalla inicial de generador de clima es la siguiente:

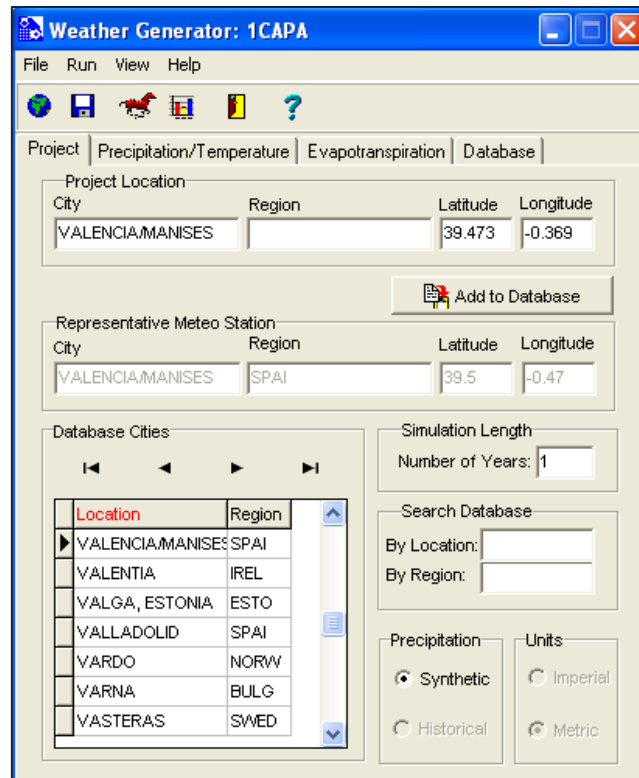


Figura 36. Generador de clima (proyecto).

Fuente: Elaboración propia.

De este menú puede elegirse los datos de una ciudad que contiene la base, en este caso es VALENCIA/MANISES.

Los datos medios mensuales de precipitación y temperatura pueden escogerse por defecto o generar unos nuevos, a través de la siguiente pantalla. Estos datos servirán al generador para generar las series de datos sintéticos.

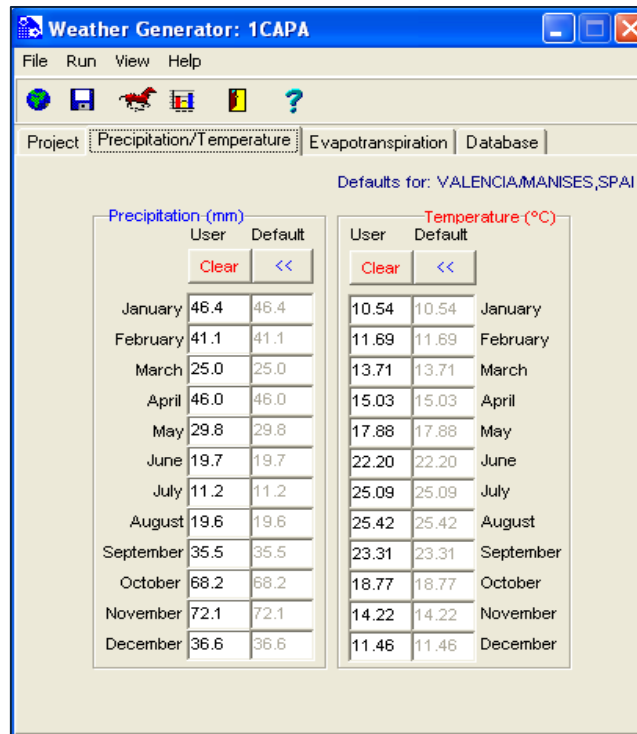


Figura 37. Generador de clima (Precipitación / Temperatura)

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el generador de clima, también pueden modificarse los parámetros de evapotranspiración en la siguiente pantalla.

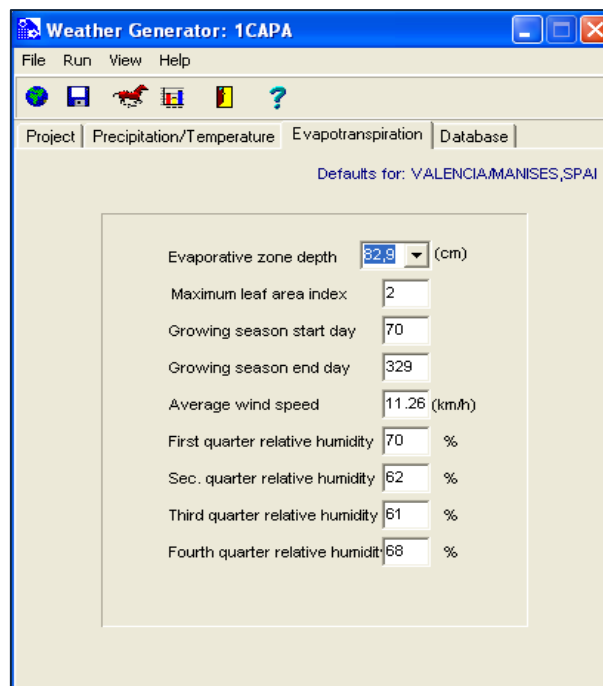


Figura 38. Generador de clima (Evapotranspiración).

Fuente: Elaboración propia.

- La profundidad de la zona de evaporación, es la máxima profundidad en la que el agua puede ser evapotranspirada. Los tres valores por defecto que propone el programa son para suelo sin vegetación, suelo con vegetación media y suelo con excelente capa de hierba. El valor puede ser entre 2 y 3 veces mayor para suelos arenosos y entre 2 y 5 veces mayor para suelos arcillosos.
- El índice de máxima área de influencia, sirve para el cálculo del crecimiento de la vegetación en el tiempo. Los valores aproximados son para suelo sin vegetación 0, para suelos pobres 1, para suelos medios 2, para suelos buenos 3.5 y para suelos excelentes 5.
- Periodo de crecimiento, que suele cifrarse cuando la temperatura diaria alcanza los 10-12 °C.
- Velocidad media anual del viento.
- Cuartos para la humedad relativa.

Finalmente en la pantalla Database pueden modificarse muchos parámetros que condicionan la generación de series sintéticas, marcando la opción Edit.

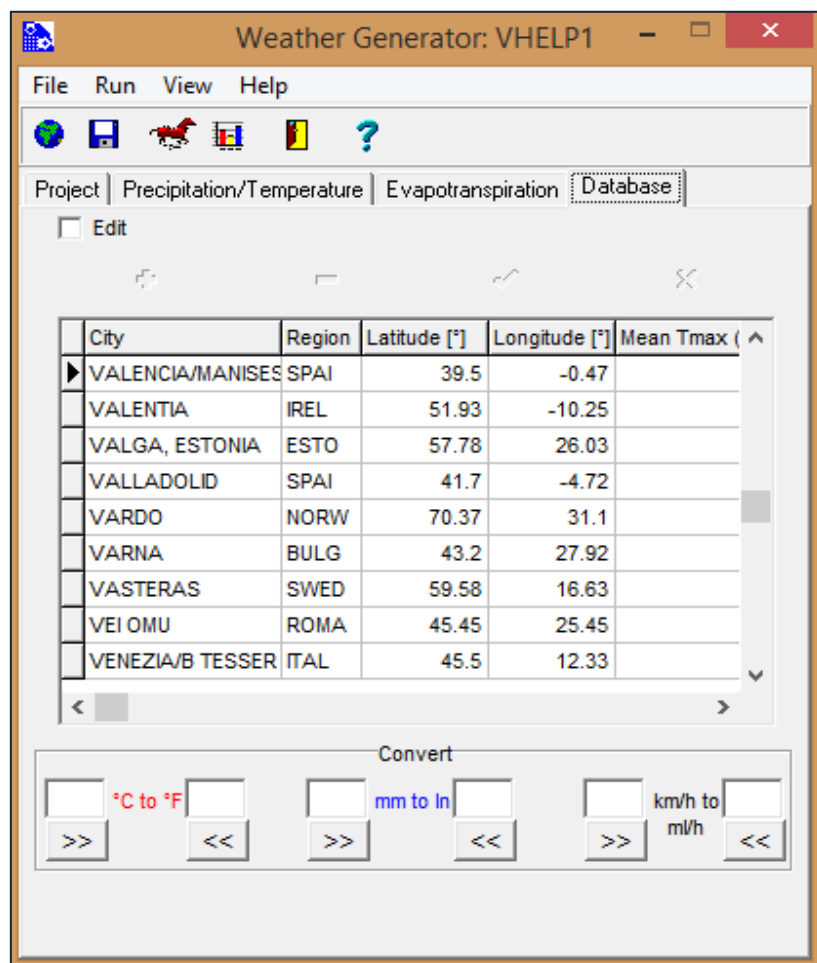


Figura 39. Generador de clima (Database).

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizados los cambios oportunos se puede generar la serie y observar los datos a distintos niveles temporales, anual, mensual y diario.

También pueden generarse tablas de datos para todos los años y a distintas escalas.

Una vez generado el clima y pulsando la opción de guardar, ya se tiene el programa listo para funcionar.

Mediante la opción Run HELP se ejecuta el modelo de cálculo y ya obtienes la solución.

La mayor incógnita es cómo calcula VHELP, pues bien, antes de dar los datos que aparecen en la tabla de la simulación, voy a explicar paso a paso los diferentes parámetros que aparecen en las tablas.

Precipitación

La precipitación viene especificada en el programa, ya que al inicio de éste se ha introducido la localización de VALENCIA/MANISES. Para la generación de datos sintéticos de precipitación, temperaturas medias diarias y radiación solar, HELP utiliza un generador de datos del departamento de agricultura de los Estados Unidos. Utiliza datos de los últimos 20 años para las precipitaciones y de los últimos 10 años para las temperaturas y la radiación solar. Las precipitaciones diarias son generadas utilizando un modelo de Cadenas de Markov y un modelo de distribución con dos parámetros Gamma.

La ocurrencia de lluvia en un día dado que está influenciado por los valores de temperatura y radiación solar en ese día. El programa genera primero las precipitaciones y a partir de estas genera la temperatura y la radiación solar en función de si el día es seco o lluvioso.

Por lo tanto, la precipitación anual total es fija para la zona de este trabajo y es 0.32980 metros.

Escorrentía

En segundo lugar, la escorrentía es un parámetro ya explicado anteriormente en el apartado 4 y que tiene una serie de fórmulas para llegar a la solución. En los datos hemos introducido un área de escorrentía de un 100% y una curva de 75.

Una vez realizado todos estos cálculos, el valor de la escorrentía es 3,2517E - 03 metros. Este valor no es muy elevado, ya que no hay pendiente.

Evapotranspiración

El componente de evapotranspiración en el balance de agua es calculado utilizando el método recomendado por Ritchie (1972). Este método utiliza la evapotranspiración potencial para predecir la evaporación superficial, del agua en el suelo y la transpiración de las plantas. El término “evapotranspiración potencial” se refiere a la razón máxima de evaporación que la atmósfera puede extraer de un punto en un día. Para este cálculo el usuario debe proveer al modelo de algunos parámetros para definir el caso de estudio. Para la simulación de este modelo los parámetros utilizados están especificados a continuación: profundidad de la Zona de Evaporación 82,9 cm; índice máximo del área de follaje de 2 pulgadas (suelo solamente); humedad relativa para el primer, segundo, tercer y cuarto cuatrimestres de cada año (70%, 62%, 61% y 68% respectivamente).

HELP utiliza un procedimiento de muchos niveles para calcular los distintos tipos de evaporación y evapotranspiración. En total utiliza aproximadamente 70 ecuaciones para describir el proceso, aunque el número de parámetros para calcularlas es mucho menor y son los que aparecen descritos en el apartado 4.

Entre esas ecuaciones comentadas anteriormente se encuentran:

La demanda de la evaporación del agua del suelo se ejerce primero desde la superficie hacia abajo. La evaporación real del agua del suelo a partir de un segmento es igual a la demanda, $ESD_i(j)$, además de cualquier exceso de demanda, $ESX(j)$, pero no mayor que el agua disponible, $SMJ - WPJ$. La evaporación del agua en el suelo es: (21)

$$ES_i(j) = \begin{cases} ESD_i(j) + ESX(j) & \text{for } ESD_i + ESX(j) \leq SM(j) - WP(j) \\ SM(j) - WP(j) & \text{for } ESD_i + ESX(j) > SM(j) - WP(j) \end{cases}$$

$$ESX(j+1) = ESD_i(j) + ESX(j) - ES_i(j)$$

donde

$ES_i(j)$ = evaporación del agua del suelo del segmento j en el día i , pulgadas

La demanda de transpiración de las plantas se ejerce hacia abajo al lado de la superficie. La transpiración real de un segmento es igual a la demanda, $EPDI(j)$, más cualquier exceso de demanda, $EPX(j)$, pero no mayor que el agua disponible, $AWI(j)$, después de extraerla evaporación del agua del suelo. La transpiración de la planta de un segmento también está limitado a un cuarto de la planta de capacidad de agua disponible, más el agua drenable disponible.

$$EP_i(j) = \begin{cases} EPD_i(j) + EPX(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) \leq AW_i(j) \\ & \& EPD_i(j) + EPX(j) \leq EPL_i(j) \\ AW_i(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) > AW_i(j) \\ & \& AW_i(j) \leq EPL_i(j) \\ EPL_i(j) & \text{for } EPD_i(j) + EPX(j) > AW_i(j) \\ & \& AW_i(j) > EPL_i(j) \end{cases}$$

$$EPX(j+1) = EPD_i(j) + EPX(j) - EP_i(j)$$

$$AW_i(j) = SM_i(j) - [ES_i(j) + WP(j)]$$

$$EPL_i(j) = \begin{cases} 0.25 [FC(j) - WP(j)] & \text{for } SM_i(j) - ES_i(j) < FC(j) \\ \text{else} \\ SM_i(j) - [ES_i(j) + FC(j)] + 0.25 [FC(j) - WP(j)] \end{cases}$$

Donde (22)

$EP_i(j)$ = planta transpiración de segmento j en el día i , pulgadas

$EPL_i(j)$ = Límite de transpiración de las plantas de segmento j en el día i , pulgadas

$WP(j)$ = punto de segmento j marchitamiento, pulgadas

$FC(j)$ = capacidad de campo del segmento j , pulgadas

La evapotranspiración real del segmento j en el día i , $ET(j)$, es la suma de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas.

$$ET_i(j) = ES_i(j) + EP_i(j) \quad (23)$$

El perfil de la extracción de agua concuerda muy bien con los perfiles para pastos permanentes medido por Saxton et al. (1971).

La evapotranspiración total del subsuelo en i día, ETS_i , es la suma de la evapotranspiración de los siete segmentos, de la zona de evaporación.

(24)

$$ETS_i = \sum_{j=1}^7 ET(j)$$

La evapotranspiración total del i días, ET_i , es la suma de la evapotranspiración de la subsuperficie y la evaporación superficial.

(25)

$$ET_i = ETS_i + ESS_i$$

Por lo tanto, la evapotranspiración anual total es 0.40672 metros.

Cambios en el almacenamiento del agua

-Para el parámetro de “change in water storage” no se ha encontrado la forma de calcularlo, ya que en la descripción del programa no se especifica.

Percolación

-Por último, para calcular la percolación (producción de lixiviados) se utiliza el método de balance hídrico. Un esquema gráfico sería:

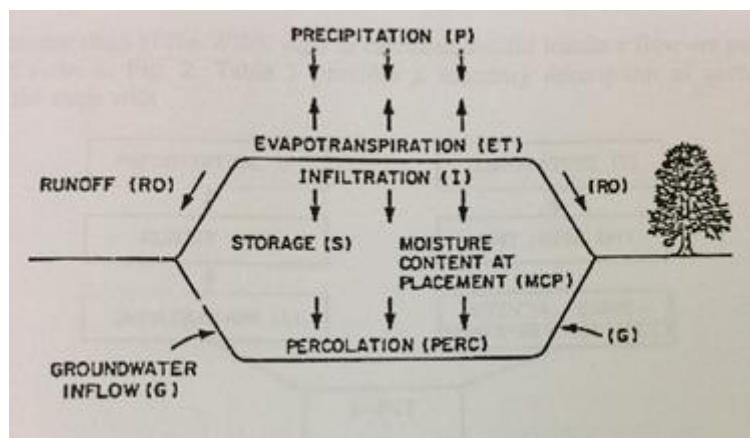


Figura 40. Esquema del balance hídrico para la percolación.

Fuente: *WHI UnSat Suite Tutorial*. [21]

Percolación = Precipitación – Escorrentía – Evapotranspiración – Cambios en el almacenamiento del agua.

$$1.3384 \text{ m}^3 = 3.2980\text{E}+03 \text{ m}^3 - 3.2517\text{E}+01 \text{ m}^3 - 4.0672\text{E}+03 \text{ m}^3 - (-8.0303\text{E}+02) \text{ m}^3$$

A continuación, se muestran las tablas resultado del programa en m y m^3 .

Annual Totals volume (m3)	
	Total (m3)
Precipitation (m3)	3.2980E+03
Runoff (m3)	3.2517E+01
Evapotranspiration (m3)	4.0672E+03
Change in water storage (m3)	-8.0303E+02
Water budget balance (m3)	-4.9531E-05
Soil water (m3)	3.0684E+04
Snow water (m3)	0.0000E+00
Percolation or leakance through Layer 4 (m3)	1.3384E+00

Tabla 20. Volumen total anual (m3)

Fuente: Elaboración propia.

Annual Totals rate (m)	
	Total (m)
Precipitation (m)	3.2980E-01
Runoff (m)	3.2517E-03
Evapotranspiration (m)	4.0672E-01
Change in water storage (m)	-8.0303E-02
Water budget balance (m)	-4.9531E-09
Soil water (m)	3.0684E+00
Snow water (m)	0.0000E+00
Percolation or leakance through Layer 4 (m)	1.3384E-04
Average head on top of Layer 3 (m)	1.5765E-02

Tabla 21. Ritmo total anual (m).

Fuente: Elaboración propia.

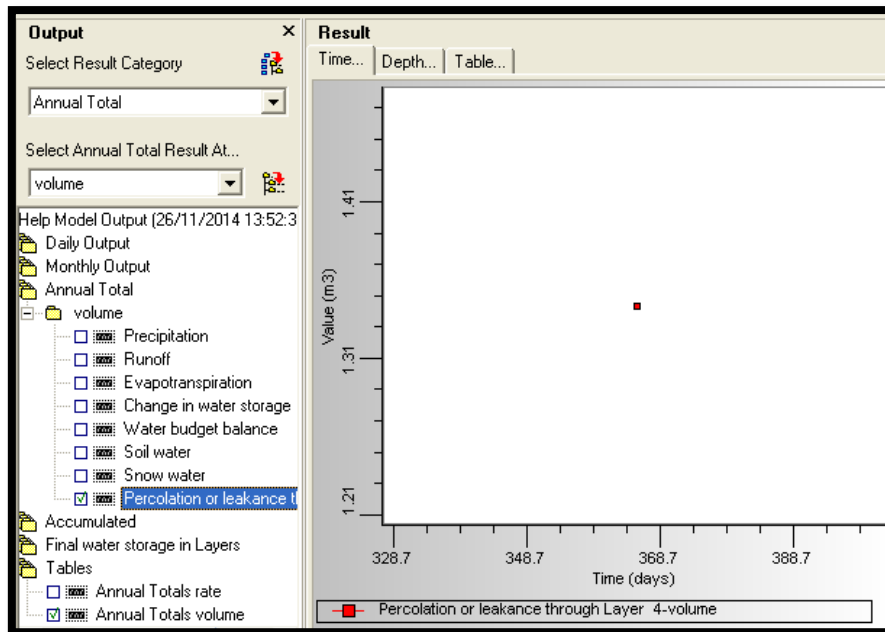


Figura 41. Gráfica del volumen de producción de lixiviados para un año.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 COMPARACIÓN

Por último, se ha realizado una tabla para comparar los tres resultados. Los datos del volumen son respecto al área de la zona del vertedero de Dos Aguas. El área es 35.370,02 m^2 .

VERTEDERO	Volumen en un año (m^3)
Vertedero sintético Balance Hídrico	25.311
Vertedero sintético VHELP	47.313
Vertedero real (Dos Aguas)	11.972

Tabla 22. Comparación de los tres volumen solución.

Fuente: Elaboración propia.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización de este TFM. Tanto el método de la ecuación de balance hídrico como el modelo VHELP, tienen varias ventajas y desventajas.

Entre las ventajas de la ecuación de balance hídrico está la introducción del biogás, la facilidad de cambiar parámetros y la facilidad de cálculo. En definitiva se trata de una ecuación que se puede modificar a conveniencia dependiendo del proyecto que estemos calculando, con buenos resultados.

Las desventajas del método de la ecuación de balance hídrico se refieren al error de la toma de datos del balance. También hay veces que no se puede plantear el balance para toda el área que deseamos, sino que debemos que limitarnos al área con datos disponibles.

El modelo VHELP, bajo mi punto de vista, presenta más desventajas que ventajas. Cabe decir sin embargo que es una herramienta sencilla que permite realizar un cálculo a partir de un simple perfil vertical de forma muy rápida.

Las desventajas que he encontrado son, entre otras, las siguientes:

- Considera intensidad homogénea de las lluvias.
- No admite escorrentía procedente de áreas adyacentes al vertedero.
- No pueden presentarse vías de flujo preferentes.
- No se considera la pérdida de contaminantes por volatilización.
- No considera el biogás.
- El peso específico de los residuos es fijo (312 kg/m^3).
- No da una estimación precisa de los volúmenes de escorrentía de las tormentas individuales en la base de datos de precipitación diaria.
- No considera la longitud y la pendiente de la superficie sobre la que se produce el flujo superficial.
- El programa asume que humedad relativa de 100% en días que se produce precipitación, la radiación solar y los datos de temperatura son generados estocásticamente.
- La profundidad de la zona de evaporación se supone que es constante.
- El crecimiento se asume que ocurre durante el primer 75% de la temporada de crecimiento.
- El drenaje vertical se asume para ser accionado por gravedad solamente y sólo está limitada por la conductividad hidráulica saturada y de almacenamiento disponible de segmentos inferiores.
- El drenaje insaturado y velocidad del frente de humectación pueden ser subestimadas.
- La rutina de drenaje vertical no permite el ascenso capilar de agua desde debajo de la profundidad de la zona de evaporación.

- La evapotranspiración no se modela como el ascenso capilar, sino más bien como una extracción distribuida que emula ascenso capilar.
- Los revestimientos se supone que son homogéneos y temporalmente uniformes.
- El flujo subsuperficial se supone que se produce a una velocidad constante.
- Y por último, la condición del vertedero, propiedades del suelo, espesores, densidad de los agujeros de la geomembrana, el nivel máximo de la vegetación, etc., se suponen que son constantes durante todo el período de simulación.

Además, hay muchos límites de aplicación:

- El modelo tiene límites en el orden en que las capas pueden estar dispuestas en el perfil del vertedero.
- La porosidad, capacidad de campo y punto de marchitamiento teóricamente pueden variar de 0 a 1 en unidades de volumen por volumen, pero la porosidad debe ser mayor que la capacidad de campo, y la capacidad de campo debe ser mayor que el punto de marchitamiento.
- El contenido inicial de humedad del suelo no puede ser mayor que la porosidad o menor que el punto de marchitez.
- Los valores para el índice de área foliar máxima pueden variar desde 0 para suelo desnudo a 5,0 que es un excelente soporte de la hierba
- Para la estabilidad numérica, la profundidad mínima de la zona de evaporación debe ser al menos 3 pulgadas.
- El modelo impone límites superior e inferiores de 5,50 y 3,30 para el coeficiente de evaporación a fin de no exceder el rango de datos de experimentación.
- El programa realiza análisis de balance de agua durante un periodo mínimo de un año. Todas las simulaciones comienzan el 1 de enero y terminan el 31 de diciembre.
- El programa no puede simular la operación de llenado real de un relleno activo. Los vertederos activos se modelan una vez al año.

Por lo tanto, según lo comentado anteriormente, y como conclusión de este TFM dejamos constancia de que el modelo de la ecuación de balance hídrico parece un mejor método, más sencillo de comprender y que permite obtener mejores resultados en general, sin necesidad de utilizar un programa como en este caso es VHELP, que presenta muchas limitaciones.

Al hacer la comparación (Véase apartado 5) de los dos modelos con el vertedero real de Dos Aguas, ha quedado de manifiesto que los resultados

obtenidos por el método de la ecuación del balance hídrico se aproximan mucho más a los datos reales observados.

7. LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN

A la vista del trabajo realizado y expuesto en este TFM, se derivan varias líneas de investigación futura entre las que se encuentran:

- Respecto de la consideración de la producción de biogás:

Los modelos de evaluación de la producción de lixiviados no incorporan adecuadamente el consumo de agua originado por la producción de biogás. Estos dos procesos ocurren de forma simultánea de forma que se trata de procesos acoplados que deben considerarse conjuntamente. Hasta donde hemos consultado en la bibliografía, no se han identificado modelos matemáticos que realicen tal evaluación acoplada.

- Respecto de la calibración de parámetros:

Se trata éste de una fase importante de la modelación y que habitualmente se realiza fundamentándose en valores obtenidos a partir de un análisis bibliográfico. Los valores asignados a los parámetros deben reflejar la verdadera naturaleza y comportamiento del residuo depositado en el vertedero. Por ello, se plantea la necesidad de desarrollar ensayos de caracterización específicos del residuo con el objetivo de determinar su comportamiento a medio y largo plazo respecto de la producción potencial de lixiviados y biogás.

- Respecto de la utilización de modelos distribuidos:

Debe profundizarse en la modelación del comportamiento del vertedero mediante la aplicación de modelos que permitan considerar distribución heterogénea de parámetros (MODFLOW, FEFLOW, MODPATH, etc.) o el tratamiento del vertedero como un medio poroso no saturado (SUTRA).

REFERENCIAS

- [1] Carlos Alberto Romero Batallán “Aprovechamiento integral de lixiviados”. 2010.
- [2] Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (COICCP) “Aspectos técnicos de los proyectos de sellado de vertederos no peligrosos”. 2013
- [3] Dass, P., Tamke, G.R., Stoffel, C.M. (1977). Leachate Production at Sanitary Landfill Sites. J. of the Env. Eng., ASCE, 103, N° EE6, pp. 981-988.
- [4] Departamento de Medio Ambiente del País Vasco “Guía técnica para la aplicación de modelos informáticos para el transporte y el flujo de contaminantes en el agua subterránea”. 2008.
- [5] Estación agroclimática de Turís perteneciente a la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013).
- [6] Godofredo Canino Rolón et Jeffrey Harris. “Simulación de la generación de lixiviados en un relleno sanitario propuesto utilizando el modelo de computadoras HELP”. 1998.
- [7] Greenpeace www.greenpeace.org/es. Artículo 2008
- [8] Grupotec “Proyecto modificado de la planta de eliminación de residuos de Dos Aguas (Valencia)”. 2012
- [9] Ingeniería civil y Medio Ambiente. www.miliarium.com. Visitado en septiembre 2014.
- [10] Julio Villamayor Medina “Determinación de la cantidad de lixiviado generado en rellenos sanitarios”. 2008.
- [11] Ley 10/2010 residuos
- [12] Liliana Borzacconi, Iván López, Carlos Anido “Metodología para la estimación de la producción y concentración de lixiviado de un relleno sanitario”.
- [13] Memoria anual del vertedero de Dos Aguas (2012).
- [14] Mohammad Nader Lutfi Al-Mefleh “Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración. Madrid 2003.

[15] Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (Unops). "Primer informe sobre los avances del estudio de Balance Hídrico Integral que se desarrolla en el río Vilcanota". (2012).

[16] Peyton, R.L., Schroeder, P.R. (1988). Field Verification of HELP Model for Landfills. J. of the Env. Eng., ASCE, 114, N° 2, pp. 247-269.

[17] Real Decreto 1481/2001

[18] Rocío Alcalá Sanz "Proyecto de construcción, explotación, clausura y restauración ambiental de un vertedero de residuos sólidos urbanos en el término municipal de Dos Aguas (Valencia)" 2012.

[19] Schroeder, P. R., Dozier, T.S., Zappi, P. A., McEnroe, B. M., Sjostrom, J.W., and Peyton, R. L. (1994). "The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3," EPA/600/R-94/168b, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

[20] Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, Samuel A. "Gestión Integral de Residuos Sólidos". Editorial Mc Graw Hill. Madrid, España. 1994.

[21] WHI UnSat Suite Tutorial (VHELP)