

DOCUMENTO GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS EN VERTEDEROS

2015



EUSKO JAURLARITZA

INGURUMEN ETA LURRALDE
POLITIKA SAILA



GOBIERNO VASCO

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE
Y POLÍTICA TERRITORIAL

DOCUMENTO GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE BALANCES HÍDRICOS EN VERTEDEROS

2015

Fecha	Mayo 2015
Dirección técnica	IHOBE
Asistencia técnica	Alfonso García de Cortázar. Consultor Medioambiental Jon Del Rivero. Geólogo-Hidrogeólogo Amaya Lobo y Ana Lorena Esteban. Doctoras Ingenieras de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Propietario	Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial

http://www.euskadi.eus/web01-s2ing/es/contenidos/manual/balances_hidricos_vertederos/es_def/balances_hidricos_vertederos.html



Tabla de contenido

1.- INTRODUCCIÓN	3
1.1.- OBJETIVOS DE LA GUÍA.....	4
1.2.- REFERENCIAS TÉCNICAS.....	4
1.3.- REFERENCIAS LEGALES.....	5
1.4.- ALCANCE Y UTILIZACIÓN DE LA GUÍA	6
2.- BALANCE HÍDRICO EN VERTEDEROS.....	8
2.1.- DEFINICIÓN	8
2.2.- ÁMBITO GEOGRÁFICO DE APLICACIÓN	9
2.3.- PERÍODO DE TIEMPO	9
2.4.- TÉRMINOS QUE INTERVIENEN	10
2.4.1.- Entradas	11
2.4.2.- Salidas	14
2.4.3.- Variación interior.....	16
2.5.- FLUJO DE AGUA EN EL INTERIOR DE UN VERTEDERO	17
2.6.- BALANCE HÍDRICO.....	20
3.- MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO	22
3.1.- DATOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO.....	22
3.1.1.- Características del vertedero	23
3.1.2.- Características de los residuos.....	24
3.1.3.- Características del terreno.....	24
3.1.4.- Gestión (estrategias de operación).....	24
3.1.5.- Elementos y sistemas de control	25
3.2.- ELABORACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....	26
3.3.- INTERVENCIÓN DE LOS TÉRMINOS EN EL BALANCE	29
3.3.1.- Entradas	30
3.3.2.- Salidas	34
3.3.3.- Variación interior.....	36
3.3.4.- Criterios adicionales	36
3.4.- MODELO CONCEPTUAL	38
3.5.- CAMBIOS EN EL MODELO CONCEPTUAL.....	41
4.- CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO	43
4.1.- ENTRADAS.....	45
4.1.1.- Precipitación (PR)	46
4.1.2.- Escorrentía superficial (ESP)	51
4.1.3.- Escorrentía subterránea (ESB).....	67
4.1.4.- Recarga artificial (RA).....	74
4.1.5.- Humedad del residuo y de otros materiales depositados (HR).....	80
4.2.- SALIDAS.....	84
4.2.1.- Evapotranspiración (ETR)	85

4.2.2.-	<i>Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)</i>	110
4.2.3.-	<i>Lixiviados controlados (LXC)</i>	113
4.2.4.-	<i>Lixiviados incontrolados (LXI)</i>	116
4.2.5.-	<i>Vapor de agua con el biogás (VBG)</i>	125
4.3.-	VARIACIÓN INTERIOR	131
4.3.1.-	<i>Variación en el agua libre almacenada (VS)</i>	132
4.3.2.-	<i>Variación en la humedad del residuo y otros materiales (VHR)</i>	139
4.3.3.-	<i>Variación por reacciones químicas y biológicas (VQB)</i>	143
5.-	EXPRESIÓN DEL BALANCE HÍDRICO	145
6.-	ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO	152
6.1.-	INCERTIDUMBRE	152
6.1.1.-	<i>Origen</i>	153
6.1.2.-	<i>Revisión de coeficientes y parámetros</i>	156
6.1.3.-	<i>Filtraciones a través de una impermeabilización</i>	162
6.1.4.-	<i>Calidad de los datos de partida</i>	164
6.2.-	INTERPRETACIÓN	167
6.2.1.-	<i>General</i>	167
6.2.2.-	<i>Específica</i>	169
6.2.3.-	<i>Eventos temporales relevantes</i>	169
6.3.-	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	174
7.-	INFORME DEL BALANCE HÍDRICO	176
7.1.-	CONTENIDO	176
7.2.-	PRESENTACIÓN	180
8.-	EVOLUCIÓN HIDROQUÍMICA DE LIXIVIADOS	182
9.-	PROGRAMAS INFORMÁTICOS	186
10.-	BUENAS PRÁCTICAS	188
10.1.-	DISEÑO Y EXPLOTACIÓN	191
10.2.-	ELEMENTOS DE CONTROL	193
10.3.-	SEGUIMIENTO Y REGISTRO	194
11.-	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL	197

1.- INTRODUCCIÓN

La gestión de un vertedero de cualquier tipo requiere, técnica y legalmente, el conocimiento preciso de los flujos de aguas que acceden a él y de los lixiviados que en él se producen. Este conocimiento resulta imprescindible para controlar y evidenciar el control y adecuada gestión de los lixiviados como líquidos susceptibles de causar la contaminación del suelo, las aguas superficiales y las aguas subterráneas.

Esta necesidad se extiende a todos los vertederos, sean del tipo que sean, y estén en la fase de operación en la que estén. De esta forma, no debe limitarse sólo a vertederos de un determinado tipo de residuos ni a vertederos en actividad. Debe aplicarse a instalaciones con cualquier tipo de residuo (inerte, no peligroso, peligroso) y a cualquier momento de su vida, tanto la fase de actividad o depósito de residuos como la fase postclausura.

El conocimiento de los flujos de aguas y lixiviados se obtiene a través de la realización de balances hídricos del vertedero en cuestión a lo largo de toda su vida (actividad y postclausura). Previamente, en la fase de diseño o proyecto, la realización de este tipo de balances permite estimar el caudal de lixiviados que se generará a lo largo de la vida del vertedero así como otros aspectos de importancia tales como escorrentías previsible, posible acumulación de lixiviados en el interior del vaso de vertido, etc. Estos aspectos son esenciales tanto para un buen diseño de los correspondientes sistemas de drenaje, control y gestión (regulación, almacenamiento) como, derivado de ello, para garantizar que la estabilidad geotécnica no va a verse comprometida por la acción del agua.

Al igual que los balances hídricos en cualquier otro sistema natural o artificial, se trata de definir y cuantificar las entradas, flujos interiores y salidas de agua, incluyendo dentro de este último término (salidas) a los lixiviados que se generan. De esta forma, y por comparación entre estas cantidades, se podrá conocer:

- Si el vertedero funciona tal como se preveía (entradas controladas = salidas controladas +/- variaciones internas controladas).
- Si existe alguna anomalía no conocida que pudiera estar causando flujos de lixiviados no deseados hacia el entorno y/o una acumulación indeseada de los mismos en el propio vaso de vertido (entradas controladas > salidas controladas +/- variaciones internas controladas).
- Si existe alguna entrada de agua oculta (entradas controladas < salidas controladas +/- variaciones internas controladas).

Las entradas, flujos interiores y salidas de agua en un vertedero varían con el tiempo, tanto a escala global (diferencias entre la fase de depósito y la fase postclausura) como, dentro de estas fases, en función de las condiciones del vertedero (superficie de residuos expuesta, etc.) y de las condiciones meteorológicas (épocas de lluvias frente a momentos sin precipitación). El balance hídrico de un vertedero, por tanto, no se refiere a un cálculo a realizar sólo una vez

en su vida sino que deben realizarse balances hídricos de forma sistemática a lo largo de toda ella.

1.1.- OBJETIVOS DE LA GUÍA

No existe hasta la fecha ningún procedimiento de elaboración de balances hídricos en vertederos que sea universal o comúnmente aceptado. Esta carencia se produce no sólo respecto a diferentes países y/o entes administrativos sino que, en un mismo ámbito de este tipo, es frecuente que los balances hídricos que se realizan y presentan sean notoriamente dispares en sus metodologías. Por ello, existe un notable grado de incertidumbre en los agentes relacionados (gestores, administración) respecto a la bondad de los cálculos, resultando estos en algunos casos manifiestamente deficientes.

Los balances hídricos de vertederos que se realizan y presentan no son a menudo metodológicamente comparables y algunos son claramente deficientes sin que se obtenga con ellos, por consiguiente, el conocimiento y control pretendido respecto de las aguas y los lixiviados. La ausencia de una metodología conocida y compartida por todos deriva en esta gran dispersión de métodos y resultados, haciendo en ocasiones inútil cualquier intento de extraer conclusiones reales y prácticas de los documentos que se elaboran y presentan.

Los objetivos del presente documento guía para la realización de balances hídricos en vertederos de cualquier tipo son:

- Dotar al sector de una metodología única que pueda ser utilizada por los diversos agentes y permita obtener resultados fiables, coherentes y comparables.
- Facilitar la elaboración de los balances hídricos por parte de técnicos en la materia minimizando la aparición de potenciales errores o carencias.
- Ayudar a la administración competente a la hora de valorar la corrección y bondad del balance hídrico realizado.
- Promover de forma sistemática la aplicación del balance hídrico en vertederos como una de las Mejores Tecnologías Disponibles (MTD) para el control de lixiviados y de su potencial afección a suelos, aguas subterráneas y/o aguas superficiales.

1.2.- REFERENCIAS TÉCNICAS

Un vertedero es un sistema hidrogeológico en el que se producen, como en los sistemas naturales, entradas, flujos interiores y salidas de agua. Bajo esta perspectiva, el planteamiento y cálculo del balance hídrico en los vertederos se fundamenta en conceptos hidrogeológicos cuya descripción y desarrollo conforma, desde hace muchos años, una abundante bibliografía técnica. En el ámbito específico de los vertederos y sus balances hídricos, las referencias bibliográficas son más recientes, concentrándose principalmente en las últimas tres décadas.

Al final de esta guía se incluyen las referencias bibliográficas que se citan en los siguientes capítulos así como bibliografía adicional relacionada con aspectos concretos de balances hídricos en vertederos que ha sido consultada durante la redacción de este documento.

1.3.- REFERENCIAS LEGALES

En la Comunidad Autónoma del País Vasco, la exigencia de elaborar balances hídricos de los vertederos deriva de los diferentes textos legales de aplicación así como de las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAIs) que se otorgan. Así, y con un texto muy similar:

- La Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, señala en su Anexo III sobre procedimientos de control y vigilancia que *“si los Estados Miembros deciden que el balance hidrológico constituye un instrumento eficaz para evaluar si se acumula lixiviado en el vaso de vertido o si el emplazamiento presenta filtraciones, se recomienda recoger los siguientes datos....”*.
- El Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por la que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, trasposición de la anterior Directiva, señala igualmente en su Anexo III sobre procedimientos de control y vigilancia que *“si la autoridad competente decide que el balance hidrológico constituye un instrumento eficaz para evaluar si se acumula lixiviado en el vaso de vertido o si el emplazamiento presenta filtraciones, se recomienda recoger los siguientes datos...”*.
- El Decreto 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos, asimismo señala en su Anexo IV sobre procedimientos de control y vigilancia que *“si la Administración decide que el balance hidrológico constituye un instrumento eficaz para evaluar si se acumula lixiviado en el vaso de vertido o si el emplazamiento presenta filtraciones, habrá que recoger los siguientes datos...”*.

Estos tres textos legales de referencia señalan a la autoridad competente como la que debe decidir respecto a la realización de balances hídricos en vertederos. En el caso de la CAPV, el Órgano Ambiental requiere típicamente la realización de balances hídricos a través de las Resoluciones de otorgamiento de las AAIs, en las que, con variaciones en la redacción, se indica habitualmente que:

Anualmente se deberá realizar, por entidad externa, un balance hídrico del vertedero para el cual se emplearán datos de caudal de lixiviados registrados y datos meteorológicos registrados y los planos topográficos de cambios que se produzcan en la superficie del vertedero (zonas selladas, zonas de vertido, etc.).

El primer balance del periodo post-clausura incluirá un análisis del comportamiento hidrodinámico del vertedero a partir de los datos de caudal y conductividad eléctrica registrados y una comparación del balance hídrico antes y después de la clausura.

La exigencia de elaborar balances hídricos de vertederos tiene por objeto genérico, como se señala en los textos legales de referencia respecto al conjunto de los procedimientos de

control y vigilancia, “comprobar que ... 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”.

Esta obligación legal de realización de balances hídricos en vertederos no es singular de la CAPV. En otras Comunidades Autónomas se requiere regularmente a través de las AAls y en Galicia su obligación también se señala explícitamente en el propio texto legal de referencia (Orden de 20 de julio de 2009 por la que se regula la construcción y la gestión de los vertederos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia). Así, en el Anexo III de esta Orden, sobre el plan de vigilancia y control ambiental, se indica que:

La empresa debe contar con una red de recogida de datos meteorológicos según las siguientes normas:

1. La finalidad de la obtención de estos datos es la realización de un balance hídrico de las aguas recibidas en el vertedero, como elemento eficaz para determinar extremos como la existencia de acumulación o no de lixiviados en el vaso de vertido o la perforación de la lámina.

Respecto a la Orden de 20 de julio de 2009 de Galicia, es de destacar, además, que en ella se discrimina la frecuencia con la que deben realizarse los balances hídricos en función del tipo de vertedero y de la fase en que se encuentra (tabla 1).

Tabla 1.- Frecuencias exigidas en la Orden de 20 de julio de 2009 (Galicia) para la realización de balances hídricos

Tipo de vertedero	Fase explotación	Fase postclausura
Residuos inertes	Trimestral	Semestral
Rechazos de RCD	Mensual	Semestral
Residuos no peligrosos	Mensual	Trimestral
Residuos peligrosos	Mensual	Trimestral

1.4.- ALCANCE Y UTILIZACIÓN DE LA GUÍA

La presente guía se ha redactado con el objetivo de que sea completa en sí misma, es decir, que de su lectura y aplicación pueda elaborarse el balance hídrico de cualquier vertedero para cualquier período de tiempo sin necesidad de acudir a fuentes bibliográficas o metodológicas ajenas sin perjuicio de que el balance así obtenido pueda completarse con detalles y especificaciones adicionales.

Dado que cada vertedero presenta características diferentes en cuanto a situación hidrológica-hidrogeológica, sistemas constructivos (con o sin impermeabilización de fondo, con o sin sellado de cubierta, etc.), la guía abarca y define todas las posibilidades en este sentido de tal forma que en cada caso se deberá inicialmente discernir qué parte es aplicable y cuál no en función de dicha situación y sistemas constructivos.

De acuerdo con lo anterior, la elaboración del balance hídrico de un vertedero en un período de tiempo determinado incluye las siguientes fases sucesivas:

- I.- Modelización conceptual y descripción de la localización y tipos de entradas, flujos y salidas de aguas y lixiviados presentes.
- II.- Cuantificación de cada uno de estos tipos o términos del balance.
- III.- Cuantificación global de entradas, flujos y salidas como sumas o restas de los resultados de los cálculos individuales de cada término (balance hídrico).
- IV.- Análisis e interpretación de los resultados del balance hídrico incluyendo conclusiones y recomendaciones.

En los siguientes capítulos del presente documento guía se desarrollan estos aspectos de acuerdo con el índice general y criterios expuestos. Se incluyen también consideraciones sobre el contenido que deben presentar los informes de los balances hídricos con el objetivo de dotar de la deseada uniformidad no sólo a los cálculos sino también a la expresión y presentación de los mismos. Finalmente, y de forma complementaria, se desarrollan aspectos relacionados con la evolución hidroquímica de los lixiviados generados en un vertedero y se enuncian una serie de buenas prácticas a tener en cuenta a la hora de explotar un vertedero.



Figura 1.- Procedimiento general para la elaboración del balance hídrico de un vertedero

2.- BALANCE HÍDRICO EN VERTEDEROS

2.1.- DEFINICIÓN

Por balance hídrico de un vertedero se entiende la descripción y cuantificación de las entradas y salidas de agua que se producen a lo largo de un período de tiempo determinado. Dado que el proceso de entrada-salida no es instantáneo sino que la masa de residuos del vertedero confiere una cierta inercia al sistema, en el período de análisis se produce (o puede producirse) no sólo la entrada y salida de agua sino una variación en el contenido de agua en el interior del propio vertedero. De esta forma, la simplista ecuación de balance hídrico de $\text{entradas} = \text{salidas}$ se completa con la intervención de esta variación interior:

$$\text{ENTRADAS} = \text{SALIDAS} \pm \text{VARIACIÓN INTERIOR}$$

Esta ecuación básica del balance hídrico señala que, en un período de tiempo determinado, el volumen total del agua que entra a un vertedero, sea cual sea la forma en la que entra, es igual al volumen total de agua que sale, sea cual sea la forma en la que sale, más/menos la variación del volumen total de agua contenido en el interior del vertedero. De forma simplificada, con todas las entradas y salidas controladas:

- Si las salidas son iguales que las entradas significará que no ha habido cambio en el contenido de agua en el interior del vertedero. Inversamente, si el contenido interior es el mismo significará que habrá salido la misma cantidad de agua que ha entrado.
- Si las salidas son mayores que las entradas significará que ha habido una disminución en el contenido de agua en el interior del vertedero. Inversamente, si el contenido interior disminuye significará que habrá salido más agua que la que ha entrado.
- Si las salidas son menores que las entradas significará que ha habido un aumento en el contenido de agua en el interior del vertedero. Inversamente, si el contenido interior aumenta significará que habrá entrado más agua que la que ha salido.

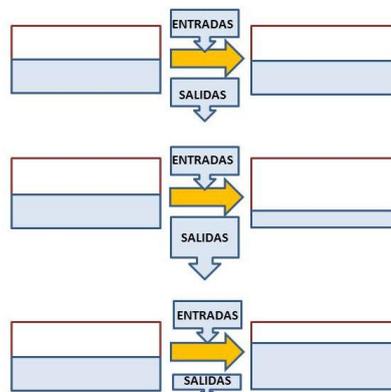


Figura 2.- Posibles resultados globales de un balance hídrico en relación con entradas, salidas y variación del contenido de agua en el interior del vertedero

2.2.- ÁMBITO GEOGRÁFICO DE APLICACIÓN

Sin perjuicio de que el concepto y procedimientos de cálculo sean utilizables en el análisis de cualquier tipo de sistema y área, el balance hídrico de un vertedero se refiere al balance aplicado al vaso de vertido. Según la configuración de la instalación puede existir:

- Un solo vaso de vertido, con una única red de recogida y evacuación de lixiviados, constituyendo una unidad o sistema hidrológico único. Esta es la situación más frecuente y no requiere consideraciones previas para la aplicación de la metodología que se expone en la guía.
- Dos o más vasos de vertido, diferenciados por edad, tipo de residuo o cualquier otro motivo, dispuestos en zonas separadas dentro de las instalaciones, de tal forma que cada uno de ellos constituye un sistema hidrológico diferenciado. La elaboración del balance hídrico se realizará, entonces, vaso por vaso.
- Dos o más vasos de vertido dispuestos uno encima de otro (recrecimiento o celda diferenciada sobre una masa de residuos preexistente). En este caso se deberá, también, efectuar balances individualizados diferenciando la celda moderna del resto del vaso siempre que la celda nueva esté hidráulicamente separada mediante una impermeabilización de base y disponga de una red separativa de lixiviados.

Los balances hídricos se realizan respecto al vaso de vertido pero, para ello, deberá tenerse en cuenta que a dicho vaso entran o pueden entrar aguas procedentes del entorno (por ejemplo escorrentía superficial de áreas adyacentes) por lo que para el cálculo del balance deberá tenerse en cuenta no sólo el propio vaso sino todas las zonas que pudieran representar el origen de entradas de agua al mismo.

2.3.- PERÍODO DE TIEMPO

Conceptualmente es posible efectuar balances hídricos de vertederos considerando cualquier período de tiempo y cualquier situación hidrológica. De forma general, las mayores incertidumbres en los cálculos se suelen relacionar con la cantidad de agua almacenada en un momento dado en el interior del vertedero ya que es un término respecto al que no suelen existir mediciones o registros directos que aporten datos específicos y concretos o, caso de existir, su representatividad es muchas veces dudosa debido a la heterogeneidad de los materiales depositados. Por ello, se favorece la minimización de incertidumbres:

- Si el período de tiempo abarcado coincide con los convencionales ciclos hidrológicos, entre estiaje y estiaje, de tal forma que el almacenamiento de lixiviados en el interior del vertedero sea mínimo. De esta forma, idealmente, resultará más evidente el concepto de “entradas” y “salidas”. Si, por el contrario, el período coincide en sus extremos con algún momento de aguas altas (lluvias), la incertidumbre se incrementa ya que sucederá que “no sale todo el agua que entra” o, en sentido inverso, “sale más agua de la que entra”. Se presentarán, entonces, dudas sobre si tales circunstancias responden a un desfase en el tiempo provocado por la inercia del sistema o si realmente existe alguna entrada o salida no controlada.

- Cuanto más largo sea el período de tiempo considerado en el sentido de que cubra al menos varios meses. De esta forma, se facilita que se produzcan los flujos de agua y lixiviados en el sentido que sea (infiltración, salidas o entradas superficiales o subterráneas, etc.).

Sea cual sea el período de tiempo considerado para la elaboración del balance hídrico, deben tenerse en cuenta las modificaciones que durante ese tiempo haya podido sufrir el vertedero en relación con la entrada de residuos y otros materiales, sellados, cubiertas intermedias, sistemas de drenaje, etc. Algunas de estas modificaciones influyen decisivamente en las cantidades de agua involucradas en el balance hídrico. No será lo mismo, por ejemplo, el balance de un vaso de vertido abierto y expuesto en su totalidad que el balance del mismo vaso si se ha sellado superficialmente un área y se deriva lateralmente el agua que precipita y se infiltra en la cubierta.

Por ello, el balance hídrico de un vertedero se refiere a:

- Un período de tiempo concreto.
- Una situación concreta del vertedero en ese período de tiempo.

Si el vertedero sufre modificaciones en el período de tiempo considerado por el motivo que sea (por ejemplo porque se ha ampliado el vaso, se ha cubierto o sellado superficialmente algún área, etc.), el balance hídrico deberá desglosarse en tantos balances parciales cuantas situaciones diversas se hayan producido o, al menos, se deberán ponderar en un único balance la diversidad de situaciones.

Es necesario, por tanto, conocer el desarrollo del vertedero a lo largo del período de balance sin que este conocimiento pueda sustituirse por la foto fija que representa su situación sólo en el momento final de dicho período. Tampoco debe presumirse que los cambios son conocidos con sólo saber la situación en los momentos de inicio y final del balance. Es posible que en el transcurso de las operaciones dentro del vertedero se hayan modificado varias veces algunos aspectos del mismo (por ejemplo colocación y retirada varias veces de cubiertas provisionales).

2.4.- TÉRMINOS QUE INTERVIENEN

Los términos que pueden intervenir en la ecuación del balance hídrico son los correspondientes a todas aquellas formas de entrada, de salida y de presencia/variación de agua en el interior del vertedero. En función de las características concretas del vertedero en el momento o período de tiempo considerado, las formas en las que el agua entra, sale y está presente son diferentes.

El balance deberá definir todos los términos, flujos y movimientos de agua que se producen en el ámbito del vertedero, no sólo los relacionados directamente con la generación de lixiviados. En algunos casos, la existencia de sellados o cubiertas intermedias puede derivar el agua que entra en forma de precipitación fuera del vaso de vertido sin que se generen

lixiviados con ella. Esta y otras situaciones que pudieran darse en este sentido deberán quedar descritas y reflejadas.

En cada vertedero y período, por tanto, debe establecerse con carácter inicial qué términos, flujos y movimientos de agua intervienen o no mediante el planteamiento de un modelo conceptual. Es posible que los resultados cuantitativos finales del balance hídrico sean incongruentes con el modelo conceptual previamente elaborado, debiendo entonces reajustarse y volver a realizar el balance contando con términos quizás no considerados inicialmente.

Los posibles términos que intervienen en el balance hídrico se agrupan en entradas, salidas y variación interior según se describe en los siguientes apartados. Estas categorías y las diversas formas agrupadas en ellas se han definido para dotar de mayor claridad a la exposición.

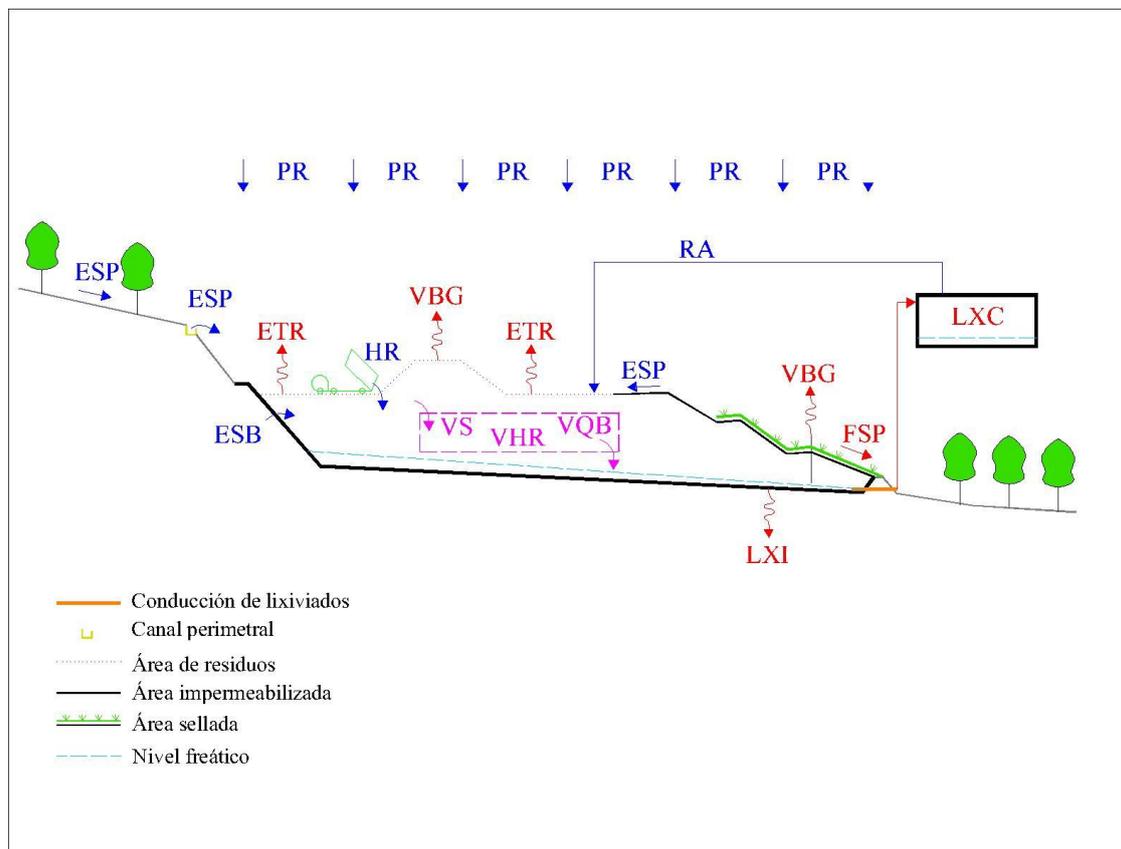


Figura 3.- Esquema general de entradas y salidas de agua en un vertedero (ver explicación en el texto)

2.4.1.- Entradas

Las entradas de agua al vertedero pueden adquirir múltiples formas dependiendo de la situación y características del mismo. De forma general, la precipitación es el término que

mayor incidencia tiene en el capítulo de entradas aunque en situaciones concretas otras posibles entradas pueden adquirir también una significativa importancia.

Las posibles entradas de agua a un vertedero son:

- Precipitación (PR).
- Escorrentía superficial (ESP).
- Escorrentía subterránea (ESB).
- Recarga artificial (RA).
- Humedad del residuo y de otros materiales depositados (HR).

En el desarrollo de cualquier balance hídrico de un vertedero deberán repasarse y considerarse, de inicio, todas estas posibilidades y, en su caso, justificarse por qué alguna de ellas no interviene.

2.4.1.1.- Precipitación (PR)

La precipitación directa sobre la superficie del vertedero constituye en general el principal mecanismo de entrada de agua al mismo. Con independencia de la forma en la que se produzca (cantidad, intensidad, frecuencia, duración), la precipitación en el período considerado para el balance hídrico constituye una entrada de agua al sistema y, como tal, debe contabilizarse. Las citadas peculiaridades en cuanto a intensidad, frecuencia y duración provocarán efectos diferentes en el flujo subsiguiente de agua en la superficie o en el interior del vertedero, determinando, por ejemplo, diferencias en la cantidad de lixiviados que se generen, pero no representan en sí mismas una modificación en la cantidad de agua precipitada que entra en el sistema.

2.4.1.2.- Escorrentía superficial (ESP)

Los vertederos deben disponer de sistemas de drenaje perimetral que impidan la entrada de aguas de escorrentía superficial. No obstante, en algunos vertederos se produce de hecho la entrada lateral de aguas de escorrentía superficial de forma más o menos continua, discontinua o esporádica. Existen diversas situaciones potenciales que deben ser analizadas de forma individualizada, asegurándose en cada caso si se producen o pueden producirse en determinadas condiciones (por ejemplo aguas muy altas, precipitaciones intensas, etc.):

- Entrada de un curso superficial, arroyo o reguero claramente definido.
- Entrada de aguas de escorrentía superficial generada en laderas adyacentes.
- Entrada de aguas de escorrentía superficial de la urbanización contigua (calles, explanadas)
- Entrada de aguas por desbordamientos de los canales perimetrales.

- Entrada de aguas de escorrentía superficial generada sobre áreas selladas definitivamente o cubiertas intermedias del vertedero que, por cualquier motivo y durante el tiempo que sea, no son evacuadas correctamente hacia el exterior.

2.4.1.3.- Escorrentía subterránea (ESB)

En algunos vertederos, en particular en los que no disponen de impermeabilización de fondo, puede producirse la entrada de aguas subterráneas a través de las paredes del vaso. Estas entradas subterráneas pueden ser:

- Puntuales, si se trata de una surgencia ocluída en un punto concreto del vertedero.
- Difusas, si se trata de un flujo generalizado que atraviesa la superficie de contacto entre el macizo rocoso o terreno donde se enclava el vertedero y el vaso donde se depositan los residuos.

2.4.1.4.- Recarga artificial (RA)

Por motivos diversos pueden producirse entradas artificiales de agua a los vertederos derivados del riego o adición de agua y/o lixiviados. Se trata de:

- Riegos con agua de red o aguas limpias para prevención o lucha contra incendios u otras causas (mantenimiento de viales internos por ejemplo), tanto mediante instalaciones fijas (bocas de riego o incendios) como móviles (camiones cisterna).
- Riegos con recirculación de lixiviados para favorecer su evaporación y la degradación de los residuos y formación de biogás.
- Vertidos de aguas provenientes de sistemas e instalaciones conexas (servicios, lavarruedas, etc.) de carácter fijo o móvil.
- Vertidos más o menos puntuales de lixiviados propios o ajenos.
- Vertidos del condensado del biogás.
- Fugas de depósitos y/o conducciones que, por su localización, puedan acceder al vaso de vertido.

2.4.1.5.- Humedad del residuo y otros materiales depositados (HR)

La última posible entrada de agua considerada es la propia humedad que tienen en origen los materiales que entran y se depositan en el vertedero en el momento en que se produce dicho depósito:

- Residuos.
- Otros materiales como los utilizados para cubriciones intermedias (tierras), drenajes (gravas), viales internos, etc.

2.4.2.- Salidas

Las posibles salidas de agua de un vertedero pueden adquirir, como en el caso de las entradas, múltiples formas. De ellas, y de forma general, las más relevantes son los lixiviados y la evapotranspiración.

Las posibles salidas de agua de un vertedero son:

- Evapotranspiración (ETR).
- Flujo superficial derivado de la precipitación sobre cubiertas intermedias o áreas selladas que es derivada lateralmente (FSP).
- Lixiviados controlados (LXC).
- Lixiviados incontrolados (LXI).
- Vapor de agua con el biogás (VBG).

En el desarrollo de cualquier balance hídrico de un vertedero deberán repasarse y considerarse, de inicio, estas posibilidades y, en su caso, justificarse por qué alguna de ellas no interviene.

2.4.2.1.- Evapotranspiración (ETR)

El agua de precipitación que alcanza la superficie de un vertedero no se reparte toda ella entre infiltración y escorrentía superficial. Existe una fracción que por procesos naturales de evaporación y transpiración derivada de las plantas es devuelta a la atmósfera constituyendo una forma de salida.

La evapotranspiración es la liberación de agua a la atmósfera a través de dos procesos: evaporación y transpiración:

- La *evaporación* se define como el proceso físico por el cual un líquido pasa al estado gaseoso. En este caso el líquido es agua y el gas es vapor de agua. En un vertedero, la evaporación del agua a la atmósfera se produce desde superficies de agua libre (charcos, regueros, etc.), desde la superficie mojada o húmeda y desde la parte más superficial del interior del acúmulo de residuos o de las capas de tierras y/o suelos.
- La *transpiración* es el proceso por el que el agua líquida existente en el interior de una planta es transformada por el metabolismo de la planta en vapor de agua que es expulsado al aire que la rodea. El agua existente en la planta es absorbida del sustrato por las raíces.

Dependiendo del tipo de superficie expuesta (residuos, zonas selladas y revegetadas, etc.), el proceso que se produce será diferente en el detalle en el sentido de que la transpiración se produce sólo si hay crecimiento vegetativo. En cualquier caso, como se desarrollará más

adelante, el cálculo de la evapotranspiración se efectúa considerando simultáneamente ambos procesos.

2.4.2.2.- Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)

Bajo este epígrafe se engloban las salidas laterales de agua mediante escorrentía superficial producida antes de que el agua de precipitación contacte con los residuos y se generen lixiviados. Es el caso típico de la escorrentía que se produce sobre zonas selladas definitivamente o con coberturas intermedias que no se infiltra en la masa de residuos sino que es derivada lateralmente y exportada fuera del contorno del vertedero. En este sentido, cabe distinguir dos tipos de cubiertas o sellados: aquellos que incluyen una capa de impermeabilización artificial (geomembrana), que impide la infiltración, y aquellos otros que no contienen dicha impermeabilización sino que están constituidos por tierras u otros materiales que propician que se produzca una cierta infiltración además de la escorrentía superficial.

2.4.2.3.- Lixiviados controlados (LXC)

Con esta denominación se incluyen los lixiviados que se generan en el vertedero y que son extraídos del mismo mediante uno de los dos principales sistemas de gestión en este sentido:

- Colector, galería, etc. que evacúa los lixiviados por gravedad.
- Bombeo de lixiviados desde el interior del vertedero.

El término “controlados” alude a que su caudal debe ser específicamente controlado y registrado mediante aparatos de medición (caudalímetros o contadores).

2.4.2.4.- Lixiviados incontrolados (LXI)

Bajo este epígrafe se incluyen los lixiviados que, a diferencia de los anteriores, no se evacúan (al menos inicialmente) a través de colectores, galerías o bombes sino que surgen y circulan de formas diferentes tales como:

- Surgencias o salidas en la superficie o perímetro del vertedero, evacuadas separadamente del sistema de gestión convencional, bien de forma directa (recogida, achique, bombeo, etc.), bien porque discurren de forma “natural” hacia el exterior del vaso añadiéndose a los canales y cunetas o, en general, a la red superficial del entorno.
- Filtraciones subterráneas de lixiviados del vertedero hacia el macizo rocoso o terreno que lo confina.
- Fugas en conducciones y/o depósitos producidas en una posición intermedia entre el vaso del vertedero y los puntos de control y registro de los lixiviados (caudalímetros), de tal forma que la cantidad controlada y registrada en estos puntos no representa la salida real de lixiviados.

2.4.2.5.- Vapor de agua con el biogás (VBG)

Los gases que son emitidos desde un vertedero incluyen una cierta proporción de agua en forma de vapor. Adicionalmente, la propia generación del biogás determina un consumo o variación del contenido de agua en el interior del vertedero. Este proceso, por tanto, induce tanto una salida de agua como una variación interna no reflejada “físicamente” en una salida como tal. En general se trata de cantidades comparativamente pequeñas en relación con el resto de entradas y salidas pero en algunos casos específicos de vertederos clausurados puede incidir realmente en la cantidad de lixiviados que se generan.

La consideración de este término debe efectuarse con independencia de que exista o no un sistema específico de captación y gestión del biogás. En muchos vertederos no existe tal sistema y/o no alcanza a la totalidad de las áreas del mismo y se producen emisiones de carácter difuso que deben ser tenidas en cuenta.

2.4.3.- Variación interior

Según se ha indicado anteriormente, la masa de residuos de un vertedero determina que entradas y salidas no sean instantáneas y simultáneas, sino que en un determinado período de tiempo existen variaciones en el contenido de agua en el interior del mismo que deben ser consideradas a la hora de establecer y cuantificar el balance hídrico. Tres son las posibles formas de que se produzcan variaciones en este contenido:

- Variación en el agua libre almacenada (VS).
- Variación en la humedad del residuo y otros materiales (VHR).
- Variación en el agua por reacciones químicas y biológicas (VQB).

En el desarrollo de cualquier balance hídrico de un vertedero deberán repasarse y considerarse, de inicio, todas estas posibilidades y, en su caso, justificarse por qué alguna de ellas no interviene.

2.4.3.1.- Variación en el agua libre almacenada (VS)

Los residuos y otros materiales depositados en un vertedero conforman un acúmulo equiparable a un sistema hidrogeológico en el que el agua se localiza principalmente:

- En forma de humedad de los residuos y otros materiales, es decir, adherida a las partículas sólidas o en poros que no están interconectados y que, por ello, no permiten el movimiento del agua.
- En forma libre, es decir, en los poros interconectados existentes entre las partículas sólidas de tal forma que es susceptible de movilizarse y circular en el interior del vertedero. Respecto a este tipo de agua (libre), pueden distinguirse típicamente dos zonas dentro de la masa de residuos:
 - Una zona inferior con los poros llenos de agua-lixiviado (zona saturada)

- Una zona superior con parte de los poros con agua-lixiviado pero parte sin ella (zona no saturada), cuyo límite con la anterior está señalado por el nivel freático.

En condiciones óptimas de diseño y funcionamiento del sistema de drenaje y evacuación de lixiviados la zona saturada debe ser mínima o inexistente a efectos prácticos. Los lixiviados deben ser constantemente evacuados sin que se acumulen en el fondo del vaso. En ocasiones, debido a la heterogeneidad del acúmulo de residuos y materiales depositados en el vertedero (cubiertas intermedias principalmente) pueden generarse niveles freáticos colgados con lugares saturados desconectados de la zona saturada de la base del vertedero (“bolsas” de agua dentro del vertedero).

Dependiendo de la situación hidrológica y de las características intrínsecas de la masa, la cantidad de agua libre almacenada puede variar. Estas variaciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de establecer el balance hídrico pues, por ejemplo, puede resultar que la ausencia de salida de aguas que han entrado en el vertedero se deba a que ha aumentado el agua almacenada en el mismo y no a pérdidas o fugas desconocidas.

2.4.3.2.- Variación en humedad del residuo y otros materiales (VHR)

En un vertedero no sólo se producen variaciones en el agua almacenada según se ha definido. La propia humedad de los residuos y otros materiales depositados, adherida a las partículas sólidas de los mismos y sin el carácter libre del almacenamiento, puede variar dependiendo de las circunstancias hidrológicas y del tipo de residuo o material.

2.4.3.3.- Variación por reacciones químicas y biológicas (VQB)

Los residuos en un vertedero sufren procesos y transformaciones físicas, químicas y biológicas que, en algunos casos, determinan que se produzcan variaciones en el contenido de agua de los mismos bien por liberación de agua como producto de determinadas reacciones, bien por fijación de la misma (fraguado), bien por consumo durante las propias reacciones químicas o por parte de microorganismos. Algunas de estas reacciones no sólo consumen o fijan agua sino que generan biogás, cuya intervención en el balance se integra como salida para destacar que se produce una emisión o salida física de agua (vapor de agua con el biogás). En otros casos, la variación queda físicamente adscrita a variaciones interiores del contenido de agua sin que se produzca salida física alguna.

2.5.- FLUJO DE AGUA EN EL INTERIOR DE UN VERTEDERO

Las entradas, salidas y variaciones interiores del agua en un vertedero dibujan un sistema dinámico en el que el agua no está inmóvil sino en constante movimiento dentro del mismo. La elaboración del balance hídrico de un vertedero debe considerar esta visión dinámica y no referir entradas, salidas y variaciones interiores a cuestiones fijas e invariables sino pensar en flujos que entran, circulan por su interior y salen finalmente.

En el caso típico y simplificado de un vertedero abierto, con la superficie de residuos expuesta, el agua que entra sufre una serie de procesos antes de su salida en forma de lixiviados:

- Parte del agua es devuelta a la atmósfera a través de los procesos de evapotranspiración que se producen en las partes más superficiales del acúmulo.
- Salvo que existan cubiertas o sellados y flujos superficiales sobre ellos, la parte de agua no evapotranspirada se infiltra y comienza su descenso en el interior de la masa de residuos a través de los poros existentes entre las partículas sólidas.
- Durante este descenso, el agua puede quedar retenida por las propias partículas contra la acción de la gravedad a través de procesos de absorción y capilaridad que determinan un aumento en la humedad de los materiales y un detrimento en la cantidad del agua que circula libremente. Estos procesos tienen un límite a partir del cual los materiales no pueden retener más agua y entonces toda el agua que se infiltra circula libremente. Este límite se conoce como *capacidad de campo*.
- Teórica e idealmente, la capacidad de campo señalaría la cantidad de agua que es capaz de retener un material antes de que se produzca un flujo de agua libre a través de él. Sin embargo, las condiciones reales en un vertedero (o en un suelo natural) determinan que en la práctica se produzcan flujos de agua sin haberse alcanzado esta capacidad de campo. Este hecho tiene relación con la heterogeneidad del medio, es decir, con la existencia de variaciones y discontinuidades en la distribución y características de partículas sólidas y poros.
- Conforme el agua no retenida va descendiendo en el interior de la masa de residuos puede encontrarse con alguna barrera a tal flujo determinada por alguna cubierta o capa de baja permeabilidad situada en una posición intermedia. Se genera entonces, por encima de esta barrera, una zona saturada, con todos los poros llenos de agua, cuyo límite superior definiría un nivel freático colgado.
- Si no existen tales barreras intermedias, el agua desciende en el interior de la masa de residuos hasta alcanzar y acumularse en la base del vaso de vertido conformando la zona saturada y el nivel freático de base. La posición de este nivel está determinada por la posición y operatividad del sistema de drenaje y evacuación de lixiviados. Si el sistema de lixiviados, como debe suceder, se sitúa justo en la base del vaso de vertido y evacúa constantemente toda el agua que le llega, la zona saturada será mínima o inexistente a efectos prácticos.
- En su flujo en el interior del vertedero, el agua no sólo puede quedar parcialmente retenida incrementando la humedad de los residuos y materiales depositados hasta su capacidad de campo sino que interviene también en procesos químicos y biológicos que pueden determinar tanto su fijación o consumo como la liberación de “nueva” agua en general en pequeñas cantidades en comparación con el volumen total del agua contenida en un momento dado.

El flujo del agua en el interior de un vertedero está condicionado por la permeabilidad del sistema y esta, a su vez, está relacionada con las características de los materiales depositados, su disposición, compactación, etc. y características de los poros que quedan entre las partículas sólidas. Dada la heterogeneidad que, en el detalle, presentan los vertederos en este sentido, la permeabilidad en su interior no es una propiedad uniforme sino que varía de unos puntos a otros, coexistiendo típicamente una circulación más o menos lenta y difusa a través de pequeños poros con un flujo, más rápido y concentrado, a través de macroporos o conductos preferenciales.



Fotografías 1a a 1d.- Diferentes tipos de residuos determinan diferentes comportamientos hidrogeológicos en el interior del vertedero dependiendo de la permeabilidad general y de detalle

El tipo de flujo de agua en el interior de un vertedero no sólo varía en el espacio, de un punto a otro, sino también en el tiempo conforme avanza la vida de la instalación. Esta variación tiene su origen en:

- La disposición sucesiva de diferentes capas de residuos y otros materiales que, con comportamientos asimismo diferentes, provocan variaciones en los patrones de circulación existentes hasta el momento de su depósito.
- La evolución general de la masa de residuos a lo largo del tiempo, con fenómenos derivados del aumento progresivo de la compactación de las capas inferiores conforme avanza el crecimiento en vertical del acúmulo, de una progresiva descomposición-reacción de los residuos, etc.

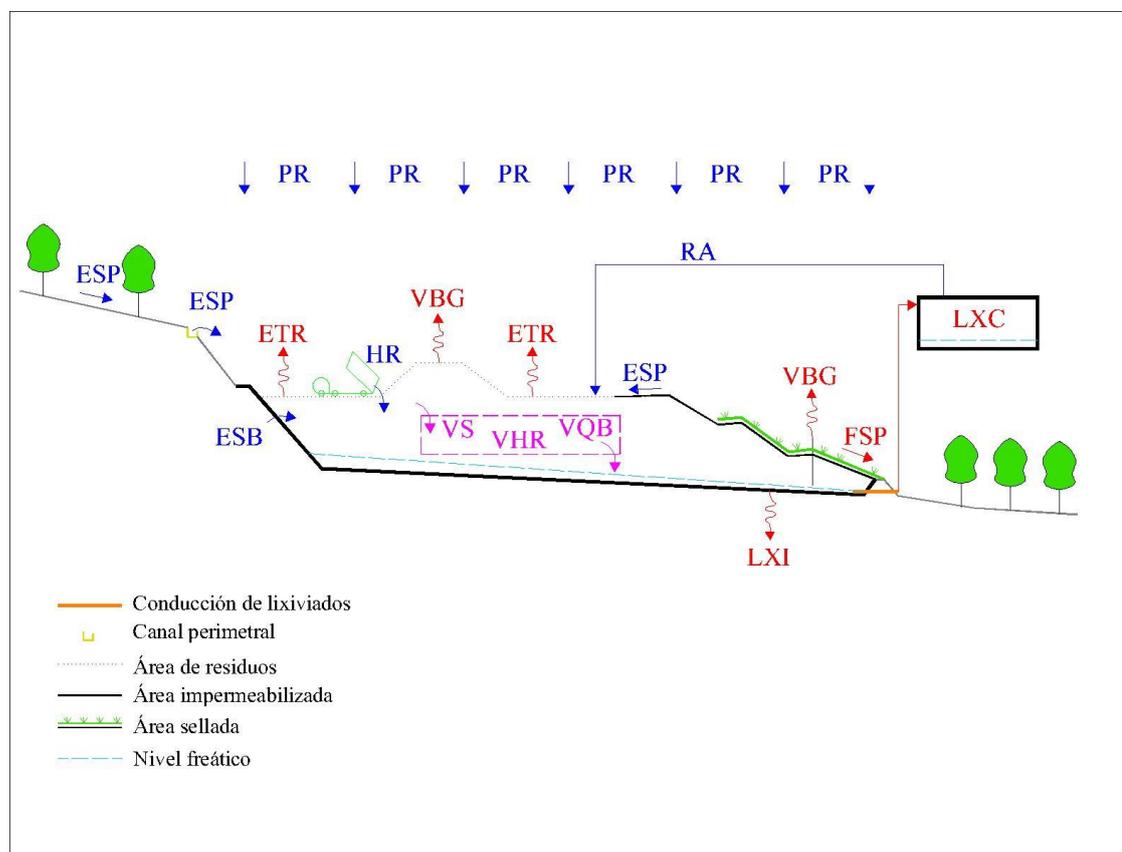
Considerando esta evolución en el tiempo, muchos vertederos jóvenes presentan una mayor proporción de flujos a través de conductos preferenciales que los que se producen en vertederos más maduros. El progresivo asentamiento y descomposición de los residuos genera poco a poco una mayor compacidad de la masa y, con ello, el cierre de dichos conductos preferenciales incrementándose la proporción de flujo que circula a través de una porosidad intergranular más fina. En cualquier caso, la coexistencia en el vertedero de materiales diferentes (residuos de diversos tipos, materiales de cubrición, etc.) y el propio ritmo y sistema de explotación, determina que esta típica evolución vertedero joven – vertedero maduro no se verifique siempre y sistemáticamente.

2.6.- BALANCE HÍDRICO

De acuerdo con la definición de balance hídrico, para un período determinado:

$$\text{ENTRADAS} = \text{SALIDAS} \pm \text{VARIACIÓN INTERIOR}$$

Por tanto, el balance hídrico a elaborar resultará de la cuantificación de los diferentes términos relacionados con las entradas, salidas y variación en el contenido de agua dentro del vertedero.



ENTRADAS



SALIDAS



VARIACIÓN INTERIOR

Precipitación (PR)	Evapotranspiración (ETR)	Agua libre almacenada (VS)
Escorrentía superficial (ESP)	Flujo superficial (FSP)	Humedad residuo y otros (HR)
Escorrentía subterránea (ESB)	Lixiviados controlados (LXC)	Reacciones (VQB)
Recarga artificial (RA)	Lixiviados incontrolados (LXI)	
Humedad residuo y otros (HR)	Vapor agua con biogás (VBG)	

Figura 4.- Esquema general y términos del balance hídrico en un vertedero

3.- MODELO CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO

El primer y obligatorio aspecto a establecer a la hora de desarrollar y calcular un balance hídrico es el modelo conceptual del vertedero mediante el que se definan y comprendan las posibles entradas y salidas de agua y su movimiento. El término modelo se refiere aquí a modelo conceptual, no a modelo matemático o informático (software). Sin esta comprensión y definición certera, los posibles cálculos que se efectúen después, con o sin la ayuda de programas informáticos, estarán condenados al fracaso o, cuando menos, a una notable incertidumbre respecto a la veracidad de los mismos.

El modelo conceptual debe:

- Separar las distintas unidades de aplicación del balance (distintos vasos por ejemplo). El balance deberá establecerse para cada una de ellas.
- Considerar-repasar inicialmente todas y cada una de las posibilidades o términos que potencialmente podrían intervenir según la descripción previa de entradas, salidas y variaciones interiores, definiendo cuáles de ellas intervienen realmente. Sólo con este repaso de todas las posibilidades, una a una, podrá asegurarse la fiabilidad de los cálculos que se efectúen posteriormente.
- Considerar todos los flujos y variaciones relacionadas con el agua en el vertedero en general y en el vaso de vertido en particular y no sólo aquellos que incidan en la generación de lixiviados. Se deberá, por ello, específicamente, determinar también los flujos que se producen sobre áreas selladas definitivamente o zonas con cubiertas intermedias.

3.1.- Datos para la elaboración del modelo

Para establecer el modelo conceptual del vertedero deben conocerse previamente los siguientes aspectos:

- Características del vertedero.
- Características de los residuos.
- Características del terreno.
- Gestión (estrategias de operación, gestión de lixiviados y gases).
- Elementos y sistemas de control.

Estos aspectos deben definirse mediante:

- Recopilación y análisis de información previa.
- Inspecciones in situ del vertedero que permitan conocer el funcionamiento y mantenimiento real de los diferentes sistemas y elementos inherentes a él (limpieza u

obtención de canales perimetrales por ejemplo). Al menos una de las inspecciones deberá efectuarse en situación hidrológica de aguas altas.

La información así obtenida se recogerá y plasmará tanto de forma descriptiva como en esquemas, planos y mapas que permitan visualizar lo que se define tanto en la horizontal como en la vertical (perfiles) así como ilustrarlo con fotografías tomadas durante la/s inspección/es in situ.

3.1.1.- Características del vertedero

El balance hídrico de un vertedero se refiere a un sistema o volumen geométrico concreto, con unas infraestructuras asociadas que tienen incidencia en el reparto y movimiento del agua. Es imprescindible, por tanto, conocer las características y disposición geométrica del conjunto y del detalle de cada una de dichas infraestructuras. Este conocimiento requerirá la realización de un estudio ordenado a través del cual se definan de forma inequívoca:

- Geometría del vaso: morfología, área que ocupa, profundidad.
- Características de las paredes del vaso: con o sin impermeabilización de fondo, y, en su caso, distribución de zonas ya preparadas y zonas aún no impermeabilizadas; secuencia de materiales utilizada para dicha impermeabilización en base y taludes; en el caso de que no exista impermeabilización, identificación de los materiales que conforman el vaso.
- Características de la superficie del vaso y/o de cada zona que pueda distinguirse en ella: zona con los residuos expuestos o abierta, viales internos, cubrición provisional, sellado definitivo, etc y, de cada una de ellas, tipología, distribución, área, pendiente.
- Tipología, características y geometría de su perímetro y elementos del entorno diferenciando, si las hay, diversas zonas: vial perimetral, explanada, berma o ladera en terreno natural o excavado, urbanización, etc.
- Infraestructura y elementos relacionados con el agua: posición, características y funcionalidad de canales perimetrales, cunetas, sumideros, sistemas de drenaje, conducciones, depósitos, bocas de riego o incendios, etc. tanto en el entorno del vaso como, si los hay, en el interior del mismo (por ejemplo catas o depresiones utilizadas para favorecer la infiltración del agua, drenaje y evacuación de zonas con cubiertas provisionales, etc.).
- Infraestructura y elementos relacionados con los lixiviados: posición, características y funcionalidad de los sistemas de evacuación y gestión por bombeo o por gravedad: colectores, pozos de bombeo, arquetas, conducciones, depósitos, etc. Surgencias de lixiviados en el perímetro o a favor de taludes unitarios en el interior del vertedero.
- Infraestructura y elementos relacionados con el gas: características y funcionalidad de los pozos y sistemas de extracción, conducción y gestión de gas, distribución y alcance respecto al conjunto del vertedero, área/s con emisiones difusas a la atmósfera.

3.1.2.- Características de los residuos

Las características internas del acúmulo de residuos y otros materiales depositados en el vertedero presentan incidencia en el flujo y en las variaciones que se producen en el contenido de agua en su interior. Debe definirse, por tanto:

- Tipos de residuos y otros materiales depositados incluyendo cantidades, humedad con la que entran, potencial reacción química y/o biodegradación.
- Formas de depósito: con o sin compactación.
- Aportes y cubiertas intermedias con tierras u otros materiales.
- Diferenciación por áreas dentro del vertedero, si las hubiera, en función del tipo de residuo depositado u otros aspectos.

3.1.3.- Características del terreno

El balance hídrico de un vertedero permite cuantificar el intercambio hídrico que se produce respecto al entorno. En este sentido, es necesario conocer las características del terreno donde se ubica incluyendo específicamente aquellas de mayor incidencia hidrológico-hidrogeológica:

- Cuencas y laderas superficiales vertientes hacia el perímetro del vertedero, arroyos y regueros (estado, pendientes, vegetación).
- Surgencias o puntos de agua históricos en la ubicación del vertedero (si se conocen) y/o en sus inmediaciones (caudales, volúmenes).
- Tipo de terreno donde se emplaza el vertedero y permeabilidad.
- Esquema del funcionamiento hidrogeológico en régimen natural e inducido por el vertedero.

3.1.4.- Gestión (estrategias de operación)

De cara al establecimiento del modelo conceptual deben conocerse los procedimientos habituales utilizados en la gestión del vertedero que puedan tener relación con algunos de los términos del balance hídrico así como las incidencias (y su resolución) que hayan podido influir en un momento determinado. Así, hay que considerar los siguientes aspectos, algunos de los cuales han sido ya apuntados anteriormente:

- Tipo de gestión de los lixiviados: evacuación por gravedad o por bombeo, ritmo general de extracción de lixiviados del vaso de vertido (desagüe constante, acumulación temporal y bombeo o evacuación discontinua).

- Tipo de gestión de la escorrentía de agua que pueda producirse o entrar en la superficie del vertedero diferenciando, si las hay, zonas con tipologías diversas: infiltración directa, separación-acumulación inicial y mezcla posterior con el sistema general de lixiviados, acumulación temporal en balsas de recogida superficiales y evacuación diferenciada, desagüe y evacuación lateral directa sin balsas, utilización de caballones internos para separar hidráulicamente diferentes zonas, etc.
- Tipo de gestión del biogás: ninguna, pozos pasivos, extracción activa, condensados y lugar de gestión de los mismos, etc.
- Recirculación de lixiviados mediante riego superficial generalizado o infiltración provocada en lugares concretos (balsas de infiltración).
- Vertidos de lixiviados propios o ajenos.
- Realización de riegos con agua externa, sea cual sea el objeto, sobre la superficie del vertedero o sobre alguna zona concreta dentro del mismo (viales internos por ejemplo), bien a través de bocas fijas, bien a través de cisternas móviles.
- Vertidos de aguas provenientes de servicios, lavarruedas, etc.
- Incidencias que, de una forma u otra, tanto en el propio suceso como en su resolución, estén relacionadas con el agua, los lixiviados o alguno de los aspectos que condicionan el balance hídrico: incendios y utilización de agua para su control y extinción, aportes extraordinarios de agua con la entrada de determinados tipos de residuos, fugas en depósitos y conducciones, etc.

3.1.5.- Elementos y sistemas de control

El modelo conceptual, en el sentido de entradas, salidas y movimiento del agua, se establecerá partiendo del estudio y definición de los aspectos anteriores: características del vertedero, características de los residuos, características del terreno y gestión. Los elementos de control que dispone el vertedero no inciden, como tales, en la forma de reparto del agua pero sus datos sí pueden, en algunos casos, modificar el modelo preliminar considerado y, en cualquier caso, representan la base para la cuantificación del balance.

En este sentido, y como información previa para completar el modelo conceptual del balance hídrico, deben conocerse en esta fase sus características generales y el tipo de control que efectúan con independencia de que durante el desarrollo del balance se detalle su funcionamiento, mediciones, etc. En este sentido, se confirmará la existencia, posición y datos de cualquier elemento de control incluyendo específicamente:

- Observatorio meteorológico y parámetros que controla y registra.
- Caudalímetros y/o contadores asociados al sistema de evacuación y gestión de lixiviados.

- Caudalímetros y/o contadores asociados a aguas superficiales en cursos naturales (arroyos, regueros) o en canales y otras conducciones.
- Caudalímetros y/o contadores asociados a sistemas de agua utilizada en el vertedero para riegos u otros usos.
- Caudalímetros y/o contadores asociados a usos del agua que puedan incidir en el balance hídrico (por ejemplo agua de servicios o lavarruedas que se evacúa hacia el vaso de vertido).
- Pozos de control en el interior del vertedero y pozos de extracción de gas que pudieran ser empleados como pozos de control para la medición de la posición del nivel freático.
- Piezómetros (sensores de presión) instalados en el interior del vertedero, sistemas de localización de filtraciones (como drenaje secundario o mallas de detección eléctrica).
- Pozos de control en el exterior del vertedero.
- En general, cualquier elemento o sistema de control que disponga el vertedero relacionado directa o indirectamente con el agua y con los lixiviados.

El repaso de los elementos de control más o menos fijos y/o de funcionamiento continuo se completará con la consideración y descripción genérica de los procedimientos de control discontinuo que pudieran existir respecto a determinados parámetros o flujos de agua:

- Control de riegos y vertidos efectuados con cisternas, tanto si se trata de lixiviados (recirculación, vertidos puntuales) como de agua (riegos en general, limpieza, etc.).
- Controles periódicos o controles puntuales que se efectúan en aguas superficiales, canales perimetrales, etc.
- Controles periódicos o controles puntuales que se efectúan en aguas subterráneas del entorno además de los que se realizan en los pozos de control.
- En general, cualquier tipo de control o información de seguimiento que se refiera al agua y a los lixiviados.

3.2.- Elaboración del modelo conceptual

Una vez estudiadas y definidas las características anteriores a través de la recopilación de información e inspecciones al vertedero (al menos una en aguas altas), el modelo conceptual resultará del repaso de todos y cada uno de los posibles términos del balance antes mencionados y su encaje o posible intervención en la situación definida. Con independencia de las características de cada vertedero se deberá:

- Repasar uno a uno todos los posibles términos sin presumir de antemano que alguno de ellos no interviene. La no intervención de cualquier término requerirá la prueba en contra y no al revés, es decir, el hecho de que no se conozca o deduzca inicialmente que un

término interviene no motivará que se deseché anticipadamente. El modelo conceptual deberá justificar en todos y cada uno de los casos por qué un término interviene y por qué otro se tiene la seguridad de que no. Se identificarán inicialmente, asimismo, los términos sobre los que se duda a la hora de plantear el modelo.

- Identificar los lugares concretos o áreas donde interviene o puede intervenir cada término. Para ello es imprescindible que el estudio previo (características del vertedero, de los residuos, del terreno, gestión, elementos de control) haya recogido todos los datos necesarios y estos estén disponibles en forma no sólo descriptiva sino en forma de esquemas, mapas, perfiles, fotografías, etc.

<i>Tabla 2.- Términos a considerar y a justificar su intervención o no en el balance hídrico</i>		
TÉRMINO	SÍ/NO/?	Lugar
ENTRADAS		
Precipitación (P)		
Precipitación	Sí	Todo
Escorrentía superficial (ESP)		
Entrada de arroyo o reguero	A determinar si puede intervenir	
Escorrentía de laderas adyacentes	A determinar si puede intervenir	
Escorrentía de calles o explanadas adyacentes	A determinar si puede intervenir	
Escorrentía por desbordamiento de canales	A determinar si puede intervenir	
Escorrentía generada en áreas selladas o cubiertas intermedias que acaba infiltrándose por el motivo que sea	A determinar si puede intervenir	
Escorrentía subterránea (ESB)		
Puntual (surgencia ocluida)	A determinar si puede intervenir	
Difusa en el contacto terreno-vaso del vertedero	A determinar si puede intervenir	

<i>Tabla 2.- Términos a considerar y a justificar su intervención o no en el balance hídrico</i>		
TÉRMINO	SÍ/NO/?	Lugar
Recarga artificial (RA)		
Riegos con agua (bocas fijas o cisternas) habitual o esporádico	A determinar si puede intervenir	
Riegos con lixiviados (recirculación)	A determinar si puede intervenir	
Vertidos provenientes de servicios, lavarruedas, etc.	A determinar si puede intervenir	
Vertidos puntuales de lixiviados propios o ajenos	A determinar si puede intervenir	
Vertidos del condensado de biogás	A determinar si puede intervenir	
Fugas en conducciones o depósitos que accedan al vaso	A determinar si puede intervenir	
Humedad del residuo y de otros materiales (HR)		
Humedad con la que entra el residuo y otros materiales	Si explotación	Vaso
SALIDAS		
Evapotranspiración (ETR)		
Evapotranspiración	Sí	Todo
Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)		
Esorrentía de zonas selladas o cubiertas derivada lateralmente	A determinar si puede intervenir	
Lixiviados controlados (LXC)		
Por gravedad: colector, galería	Sí	Punto control
Por bombeo		
Lixiviados incontrolados (LXI)		

<i>Tabla 2.- Términos a considerar y a justificar su intervención o no en el balance hídrico</i>		
TÉRMINO	SÍ/NO/?	Lugar
Surgencias de lixiviados en superficie evacuadas lateralmente	A determinar si puede intervenir	
Filtraciones subterráneas hacia el terreno adyacente	A determinar si puede intervenir	
Fugas en conducciones y depósitos antes del control	A determinar si puede intervenir	
Vapor de agua con el biogás (VBG)		
Vapor de agua emitido con el biogás	A determinar si puede intervenir	
VARIACIÓN INTERIOR		
Variación en el agua libre almacenada (VS)		
Variación del agua almacenada en zona/s saturada/s o en tránsito	Posiblemente	Vaso
Variación en la humedad del residuo y otros materiales (VHR)		
Variación de la humedad en zona/s no saturada/s	Posiblemente	Vaso
Variación del agua por reacciones químicas y biológicas (VQB)		
Variación por reacciones químicas y biológicas	A determinar si puede intervenir	

3.3.- INTERVENCIÓN DE LOS TÉRMINOS EN EL BALANCE

Tal como se ha indicado, es posible que en un caso concreto se presenten dudas sobre la intervención o no de algunos de los términos del balance. Estas dudas pueden ser inicialmente irresolubles en el sentido de que no hay datos concretos sobre ello (¿habrá variado la humedad del residuo?) o responder a una falta temporal de información que deberá ser resuelta (¿se habrá regado puntualmente alguna zona?). En cualquier caso, el modelo conceptual deberá describir y justificar la aplicabilidad potencial o real de cada término, señalando en cada caso las incertidumbres que puedan existir al respecto.

El objetivo general de este repaso es no desechar de antemano aquello respecto a lo que existen dudas o falta inicial de información. En ocasiones, algunos balances se simplifican erróneamente ya desde su planteamiento inicial considerando sólo lo evidente o aquello respecto a lo que existe un control específico conocido de antemano. Se cuentan, así, precipitaciones, evapotranspiración y caudal de lixiviados y los desajustes de las cantidades así contabilizadas se adscriben genéricamente a una “variación interior imposible de cuantificar” y/o a “incertidumbres en el cálculo de la evapotranspiración”. Los cálculos presentan, efectivamente, incertidumbres pero estas serán lógicamente mayores si no se evalúa hasta donde sea posible la intervención de todos los posibles términos y si no se recoge previamente toda la información necesaria.

Adicionalmente, y sin un criterio cuantitativo en el sentido de ajuste numérico, la realización de un balance debe ayudar a destacar aquellas situaciones mejorables en cuanto a gestión del vertedero. Por ello, la evaluación de la posible intervención de cada uno de los términos puede facilitar la evaluación de las condiciones reales en las que se encuentra el vertedero y sus infraestructuras al establecerse un procedimiento de análisis de la situación más detallado. De esta forma, por ejemplo, el sólo hecho de que un vertedero tenga canales perimetrales no determinará que se señale con carácter definitivo que no hay entradas de aguas superficiales del entorno. Se deberá verificar este extremo a través de la información recogida expresamente durante los estudios e inspecciones que se realicen con carácter previo pues bien pudiera suceder que tales canales estén o hayan estado obstruidos y se hayan desbordado en algún momento.

El ejemplo anterior ilustra el procedimiento a seguir. No se trata de un repaso genérico basado en cómo es teóricamente el vertedero (tiene canales, tiene conducciones, tiene cubiertas intermedias que derivan el agua, no se riega, etc.) sino en cómo es realmente o ha sido con ocasión de alguna situación o incidencia (los canales se obstruyeron o no fueron capaces de conducir una avenida, se produjo una fuga en una conducción, el bombeo del agua derivada de una cubierta intermedia falló, durante varios días se regó aunque no se hace de forma sistemática, etc.). Ello implicará que la recogida de información, el estudio y las inspecciones previas deben ser exhaustivas para poder concluir y justificar en cada caso por qué un determinado término no interviene.

3.3.1.- Entradas

La justificación de la no intervención de un determinado tipo de entrada en el balance debe basarse en los siguientes criterios.

3.3.1.1.- Precipitación (P)

Siempre interviene.

3.3.1.2.- Escorrentía superficial (ESP)

Para despreciar la entrada por escorrentía superficial se deberá:

- **Entrada de curso superficial**
 - Definir la red del drenaje natural que discurre hacia el perímetro del vertedero aunque existan elementos de interceptación y derivación de los arroyos o regueros.
 - Definir, si existen, la geometría, capacidad hidráulica y características de los sistemas artificiales de captación, interceptación y drenaje (azudes, canales, cunetas, arquetas, etc.).
 - Verificar mediante al menos dos inspecciones (en aguas altas y en estiaje) el correcto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento de dichos sistemas. Se observará especialmente la presencia de grietas, sedimentos, tierras, vegetación, residuos, etc. que disminuyan la sección hidráulica así como de indicios de que hayan existido desbordes puntuales más o menos esporádicos.
- **Entrada por escorrentía de ladera**
 - Definir las superficies de ladera que vierten hacia el perímetro del vertedero aunque existan elementos de interceptación y derivación de su escorrentía.
 - Definir, si existen, la geometría, capacidad hidráulica y características de los sistemas artificiales de captación, interceptación y drenaje (canales, cunetas, arquetas, etc.).
 - Verificar mediante, al menos dos inspecciones en momentos de precipitación y aguas altas, el correcto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento de dichos sistemas. Se observará especialmente la presencia de grietas, sedimentos, tierras, vegetación, residuos, etc. que disminuyan la sección hidráulica así como de indicios de que hayan existido desbordes puntuales más o menos esporádicos.
- **Entrada por escorrentía de urbanización adyacente**
 - Definir las superficies de la urbanización adyacente que vierten hacia el perímetro del vertedero aunque existan elementos de interceptación y derivación de su escorrentía.
 - Definir, si existen, la geometría, capacidad hidráulica y características de los sistemas artificiales de captación, interceptación y drenaje (canales, cunetas, arquetas, etc.).
 - Verificar, mediante al menos dos inspecciones en momentos de precipitación, el correcto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento de dichos sistemas. Se observará especialmente la presencia de grietas, sedimentos, tierras, vegetación, residuos, etc. que disminuyan la sección hidráulica así como de indicios de que hayan existido desbordes puntuales más o menos esporádicos.
- **Entrada por desbordamiento de canales, cunetas, etc.**
 - Definir la red de canales, cunetas, arquetas, etc. existente en el vertedero, sea cual sea su finalidad, origen y destino.

- Definir su geometría, capacidad hidráulica y características.
- Verificar mediante al menos dos inspecciones (en aguas altas y en estiaje) el correcto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento de dicha red. Se observará especialmente la presencia de grietas, sedimentos, tierras, vegetación, residuos, etc. que disminuyan la sección hidráulica así como de indicios de que hayan existido desbordes puntuales más o menos esporádicos.
- **Entrada por escorrentía sobre áreas selladas o cubiertas intermedias no derivada lateralmente**
 - Definir las superficies selladas o con cubiertas intermedias así como sus características (geomembrana, tierras, geometría, pendientes, etc.).
 - Definir el sistema de evacuación lateral de la escorrentía generada sobre dichas superficies (por gravedad hacia el perímetro, por bombeo desde el interior, etc.) así como su geometría, capacidad hidráulica y características (origen, punto de desagüe, etc.).
 - Si se bombean aguas de forma continua, discontinua o esporádica, recabar datos de dichos bombeos y determinar si se ha bombeado sistemáticamente toda la escorrentía.
 - Verificar, mediante al menos dos inspecciones en momentos de precipitación, el correcto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento de dichos sistemas de evacuación lateral. Se observará especialmente el flujo real que se produce, la presencia de roturas o discontinuidades (en la geomembrana, en la capa de tierras, etc.) así como la existencia de defectos u obstrucciones en los sistemas.

3.3.1.3.- Escorrentía subterránea (ESB)

Para desprestigiar la entrada por escorrentía subterránea se deberá:

- **Entrada puntual (surgencia ocluida) y entrada difusa**
 - Verificar la existencia de una impermeabilización de fondo.
 - Determinar si existe una red de drenaje subsuperficial por debajo de la misma y/o algún elemento puntual o lineal de captación y derivación de surgencias ocluidas.
 - Verificar la ausencia de incidencias o anomalías relacionadas directa o indirectamente con el agua subterránea y la impermeabilización de fondo (fenómenos de subpresión en la impermeabilización, afección a pozos de control externos, etc.).

En ausencia de incidencias o anomalías se admitirá inicialmente que los vertederos que disponen de impermeabilización de fondo carecen de entrada de agua subterránea. Con el mismo criterio, se admitirá inicialmente que los vertederos que no disponen de

impermeabilización de fondo presentan o entradas de agua subterránea o salidas de lixiviados o unas y otras dependiendo del momento.

3.3.1.4.- Recarga artificial (RA)

Para despreciar la entrada por recarga artificial se deberá:

- **Riegos con agua (incendios, aporte a los residuos, compactación de viales interiores, etc.) a través de bocas fijas o cisternas.**
 - Confirmar si existe una red fija y verificar el control y registro asociado a la misma (caudalímetro o contador).
 - Confirmar que no se han empleado cisternas por ningún motivo.
- **Riegos con lixiviados.**
 - Confirmar si existe una red fija y verificar el control y registro asociado a la misma (caudalímetro o contador).
 - Confirmar que no se han empleado cisternas por ningún motivo.
- **Vertidos procedentes de servicios, lavarruedas, etc.**
 - Verificar los sistemas y redes de drenaje y evacuación de los elementos e instalaciones fijas en los que se utiliza agua para cualquier objetivo.
 - Confirmar la posición, tomas de agua y forma de drenaje de los lugares donde se realizan de forma discontinua labores de limpieza y/o mantenimiento de maquinaria o equipos.
 - Confirmar que no se han empleado cisternas por ningún motivo en el perímetro del vaso (por ejemplo para limpiar viales de acceso).
- **Vertidos puntuales de lixiviados propios o ajenos.**
 - Confirmar que no se realizan de forma habitual ni se han realizado de forma puntual por cualquier incidencia o anomalía.
- **Vertidos del condensado del biogás.**
 - Verificar si existe un sistema de captación de biogás y la posición y características del mismo incluyendo específicamente el lugar donde se evacúan los condensados.
- **Fugas en conducciones o depósitos que por su posición acaben determinando una entrada de agua o lixiviados al vaso.**

- Verificar la posición de redes y depósitos de aguas y lixiviados en relación con el vaso y determinar la posibilidad (“teórica”) de que una fuga pudiera determinar una entrada al mismo.
- Revisar el programa y registros del mantenimiento.
- Observar el estado de las partes visibles de las redes y depósitos (grietas, roturas, corrosiones, alteraciones, etc.).

3.3.1.5.- Humedad del residuo y de otros materiales (HR)

Siempre interviene en vertederos en los que haya habido entrada de residuos u otros materiales.

3.3.2.- Salidas

La justificación de la no intervención de un determinado tipo de salida en el balance debe basarse en los siguientes criterios.

3.3.2.1.- Evapotranspiración (ETR)

Siempre interviene.

3.3.2.2.- Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)

Para despreciar la salida de flujo superficial derivado de la precipitación sobre áreas selladas o cubiertas intermedias se deberá:

- Definir las superficies selladas o con cubiertas intermedias así como sus características (geomembrana, tierras, geometría, pendientes, etc.). De igual forma, definir la geometría del resto de superficies (incluso residuos).
- Confirmar la “imposibilidad” teórica de que se produzca flujo superficial derivado de la precipitación que se dirija hacia el perímetro del vaso.
- Recabar datos sobre bombeos discontinuos o esporádicos de agua del interior del vaso.
- Verificar, mediante al menos dos inspecciones en momentos de precipitación, el funcionamiento hidrológico. Se observará especialmente la escorrentía real que se produce sobre cada tipo de superficie (sellados, cubiertas intermedias, residuos, etc.), su origen, destino y lugar de infiltración en cada caso.

3.3.2.3.- Lixiviados controlados (LXC)

Siempre interviene.

3.3.2.4.- *Lixiviados incontrolados (LXI)*

Para despreciar la salida de lixiviados incontrolados se deberá:

- **Surgencias de lixiviados en superficie que drenan lateralmente**
 - Recabar información al respecto.
 - Verificar, mediante al menos dos inspecciones en momentos de precipitación y aguas altas, el funcionamiento hidrológico. Se observará la posible generación de surgencias en la masa de residuos en su perímetro así como en el pie de los taludes internos u otros lugares (origen y destino de los lixiviados). En ausencia de surgencias se prestará especial atención a la posible existencia de indicios de una circulación pretérita de lixiviados en el perímetro y/o cunetas y canales de la zona (decoloraciones, manchas, huellas de regueros, etc.).
 - Verificar la calidad de las aguas que se evacúan lateralmente como flujo superficial derivado de la precipitación sobre áreas selladas y cubiertas intermedias para descartar su afección por lixiviados.
- **Filtraciones subterráneas hacia el terreno**
 - Verificar la existencia de una impermeabilización de fondo.
 - Determinar si existe una red de drenaje subsuperficial por debajo de la misma.
 - Verificar la ausencia de incidencias o anomalías relacionadas directa o indirectamente con la impermeabilización de fondo y con la red de drenaje subsuperficial (por ejemplo afección por lixiviados a las aguas recogidas en esta red).
 - Verificar la ausencia de afección en los pozos de control del exterior del vaso.
 - Verificar la ausencia de indicios de una afección pretérita de lixiviados aguas abajo del vertedero.

En ausencia de incidencias o anomalías se admitirá inicialmente que los vertederos que disponen de impermeabilización de fondo carecen de salidas o filtraciones de lixiviados hacia el terreno. Con el mismo criterio, se admitirá inicialmente que los vertederos que no disponen de impermeabilización de fondo presentan o entradas de agua subterránea o salidas de lixiviados o unas y otras dependiendo del momento.

- **Fugas en conducciones o depósitos que por su posición no sean controlados.**
 - Verificar las características y posición de la red y depósitos de lixiviados y de los elementos de control y registro de los mismos.
 - Revisar el programa y registros del mantenimiento.

- Observar el estado de las partes visibles de la red y depósitos (grietas, roturas, corrosiones, alteraciones, taponamientos, etc.).
- Verificar, mediante al menos dos inspecciones en aguas altas y estiaje, el correcto funcionamiento del sistema de evacuación de lixiviados. Se observará la posible existencia de afloramientos de lixiviados en el entorno de las conducciones y depósitos así como la posible existencia de indicios de una presencia pretérita de lixiviados en dicho entorno (decoloraciones, manchas, huellas de regueros, etc.).

3.3.2.5.- Vapor de agua con el biogás (VBG)

Para despreciar la salida de agua con el biogás se deberá determinar que no se genera biogás por el tipo de residuo depositado (inorgánico y no biodegradable) con independencia de que exista o no una red de captación o elementos de desgasificación.

3.3.3.- Variación interior

La justificación de la no intervención de un determinado tipo de variación interior en el balance debe basarse en los siguientes criterios.

3.3.3.1.- Variación en el agua libre almacenada (VS)

En el modelo conceptual se considerará siempre su posible intervención y por ello, con independencia del resultado final que se obtenga, deberá ser determinada de acuerdo con el método de cálculo que se describe posteriormente.

3.3.3.2.- Variación en la humedad del residuo y otros (VHR)

En el modelo conceptual se considerará siempre su posible intervención y por ello, con independencia del resultado final que se obtenga, deberá ser determinada de acuerdo con el método de cálculo que se describe posteriormente.

3.3.3.3.- Variación por reacciones químicas y biológicas (VGB)

Para despreciar la variación interior por reacciones químicas y biológicas se deberá:

- Determinar que no se genera biogás por el tipo de residuo depositado (inorgánico y no biodegradable) con independencia de que exista o no una red de captación o elementos de desgasificación.
- Evaluar que no se producen reacciones y procesos de hidrólisis, fraguado, etc. en los residuos y materiales depositados o que, de existir, son despreciables.

3.3.4.- Criterios adicionales

A la hora de establecer el modelo conceptual resulta de gran ayuda analizar los valores de precipitación y caudales de lixiviados y su relación en el período considerado utilizando para ello tanto los valores cuantitativos como su representación gráfica (hidrograma de lixiviados

junto a precipitaciones). Esta relación se desarrollará más extensamente en el apartado de análisis del balance hídrico pero, ya en este momento, puede ofrecer información valiosa si se procede a:

- Evaluar si a lo largo del período existe una relación “inicialmente razonable” entre volumen de precipitación y volumen de lixiviados o si se detecta que ambas cantidades son notoriamente incompatibles.
- Evaluar si a lo largo del período dicha relación general se mantiene o si, por el contrario, a partir de un momento (o en varios intervalos de tiempo) se producen aparentes y relevantes variaciones en dicha relación que sugieren que se han producido modificaciones en alguno de los términos del balance por cambios de algún tipo (por ejemplo apertura de nuevas zonas de explotación, disposición de cubiertas intermedias o sellados definitivos, etc.).
- Evaluar específicamente el hidrograma de lixiviados por si se detectan detalles o cambios no relacionables con precipitaciones en ese momento o en días anteriores.

De forma general, es previsible que si no se producen cambios en la situación del vertedero ni incidencias, el gráfico precipitación-caudal de lixiviados refleje una estrecha relación entre ambos parámetros sin discontinuidades ni variaciones anómalas en el mismo. Si, en sentido contrario, se detectan dichas anomalías en el hidrograma de lixiviados, puede ser indicio de algún cambio en la situación o de alguna incidencia. Con ello, puede en algunos casos evidenciarse que a partir de un determinado momento se produjo algún cambio y buscar e incluir en el modelo conceptual su causa. En otros casos puede tratarse de un fenómeno o situación puntual que, igualmente, debe considerarse en el modelo conceptual.

Esta primera evaluación de la relación precipitación-caudal de lixiviados para ayudar al planteamiento del modelo conceptual requerirá lógicamente de la serie de datos de precipitación y de caudal de lixiviados del período de balance a paso de tiempo suficiente como para que puedan evidenciarse las posibles anomalías (datos diarios).

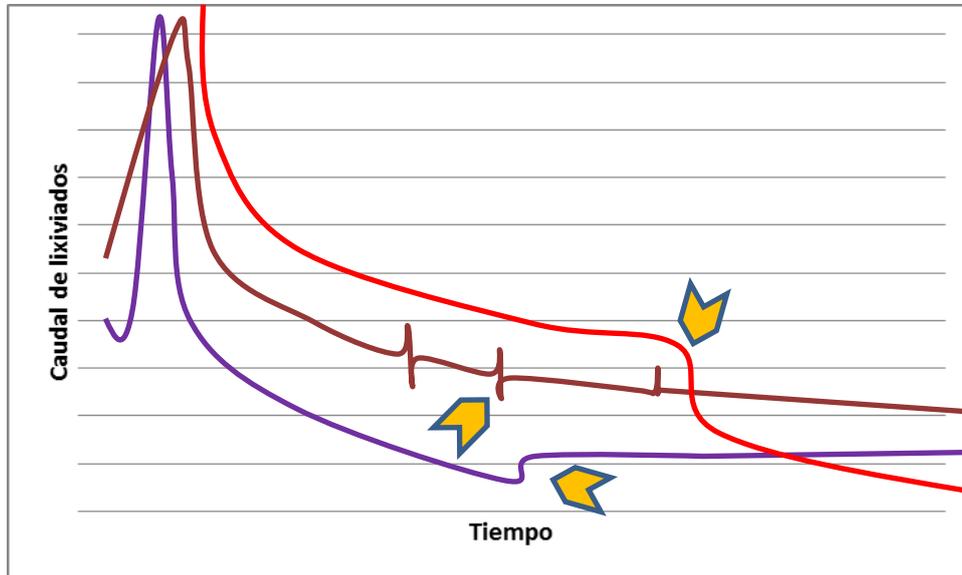


Figura 5.- Algunas posibles anomalías en el registro o hidrograma de caudales de lixiviados que evidencian algún cambio o incidencia a investigar y tener en cuenta de cara al establecimiento del modelo conceptual.

3.4.- Modelo conceptual

El modelo conceptual de entradas/salidas/variación interior derivado del repaso de los diversos términos que pueden intervenir y su adscripción a lugares concretos dentro del vertedero (o, como la precipitación, a la generalidad del mismo). Se deberá prestar especial atención a la identificación y diferenciación del tipo de superficie expuesta que pueden presentar las diversas zonas dentro de un vertedero, distinguiéndose, si existen, entre:

- Superficie con residuos expuestos.
- Cubierta intermedia mineral (tierras) o viales con tierras sobre residuos.
- Cubierta intermedia con geomembrana sobre residuos.
- Sellado definitivo únicamente mineral (tierras).
- Sellado definitivo con geomembrana.
- Impermeabilización de fondo de un área aún sin explotar.
- Terreno natural en un área aún sin preparar y sin impermeabilización de fondo.
- Presencia vegetativa en alguna zona.
- Etc.

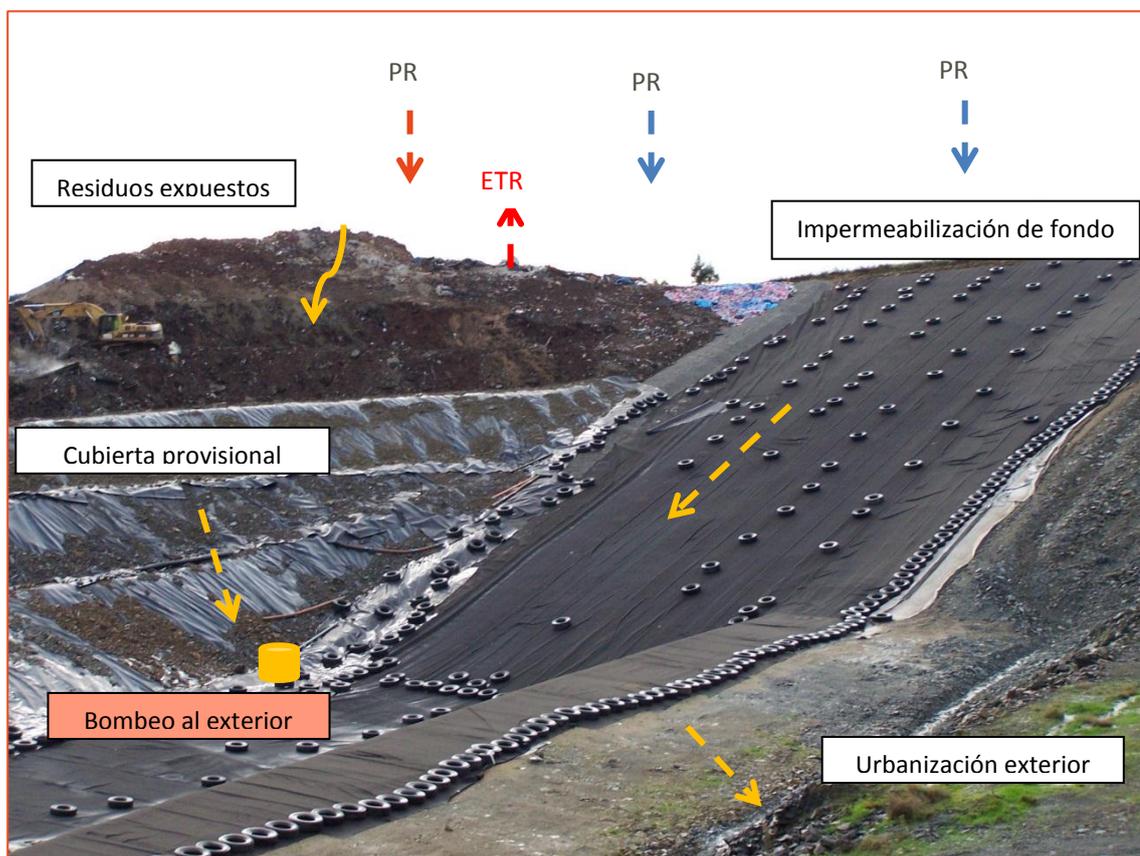
Dado que los flujos que se producen, y los correspondientes cálculos para el balance, difieren según el tipo de superficie, es importante que esta identificación y descripción de los tipos de superficies y los flujos asociados sea lo más precisa posible. Dichos cálculos requerirán en cada caso la medición del área (m^2) que ocupa cada tipo de superficie sin que esto pueda sustituirse por evaluaciones genéricas (“aproximadamente la mitad es de un tipo y la mitad de otro”).

El modelo conceptual se plasmará en planos con una escala suficientemente detallada como para permitir su visualización, utilización e interpretación:

- Mapa del vertedero y entorno y esquema del mismo con indicación de las diferentes zonas y elementos considerados: zonas con los residuos expuestos, zonas con cubiertas provisionales, zonas selladas, laderas vertientes, urbanización perimetral, canales, conducción de lixiviados, pozos de control, etc. Específicamente, y con carácter indicativo, no exhaustivo:
 - Sobre plano topográfico se delimitarán las superficies de las diferentes celdas o vasos que tenga el vertedero, indicando la secuencia de capas de cada una de ellas, su superficie (en m^2), el trazado de la red de drenaje de lixiviados y sus características principales (materiales, dimensiones, pendientes) y la localización y características principales del punto de medida de caudales de lixiviados. Se incluirán fotografías panorámicas ilustrativas y/o fotografías aéreas u ortofotos indicando fecha (año y mes). Este plano incluirá o se acompañará de la descripción del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas indicando fechas).
 - Sobre plano topográfico se delimitará la superficie del vertedero ocupada por cada tipo de sellado final o temporal, o superficie con los residuos expuestos, indicando la secuencia de capas de cada una de ellas, y la superficie ocupada (m^2). Se incluirán fotografías panorámicas ilustrativas y/o fotografías aéreas u ortofotos indicando fecha (año y mes). Este plano incluirá o se acompañará de la descripción de las actividades que se realizan en su superficie, incidiendo en aquellas que puedan aportar agua (por ejemplo riegos) o dañar la secuencia de sellado así como del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas indicando fechas).
 - Sobre plano topográfico se delimitará el trazado de los canales perimetrales y sus principales características (materiales, dimensiones, pendientes), indicando el caudal que son capaces de desaguar sin desbordar y, en la medida de lo posible, la precipitación generadora de dichos caudales máximos. Este plano incluirá o se acompañará de la descripción del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas, indicando fechas, como presencia de piedras, ramas u hojas represando las aguas, grietas en los canales, etc.).
 - En los planos anteriores se indicarán el año en que se instala cada una de las infraestructuras citadas. Si es posible se precisará el mes y año de inicio y finalización de cada obra (este aspecto será relevante si dichas fechas se encuentran dentro del periodo para el cual se va realizar el balance hídrico).

- Perfiles donde se representen los diferentes flujos de agua de entrada y salida y su relación con los elementos hidrológicos dispuestos (recogida de lixiviados, entradas de escorrentías superficiales, etc.).

En mapas, perfiles y esquemas deben incluirse todos y cada uno de los términos del balance que se ha considerado como que intervienen así como aquellos términos respecto a los que se ha manifestado una duda inicial. La descripción que acompañe al modelo deberá incluir también todos los términos que se considera que no intervienen con una justificación suficiente de esta no intervención basada, como se ha indicado, en el conocimiento de la realidad, no sólo del diseño teórico del vertedero.



Fotografía 2.- Fotografía ilustrativa de modelo conceptual. Cada superficie y entrada o salida de agua debe estar identificada y representada en mapas, perfiles y esquemas.

El modelo conceptual así representado permitirá desarrollar posteriormente los cálculos correspondientes a cada término minimizándose los errores que, de entrada, pueden producirse si se consideran inadecuadamente lugares, superficies involucradas y procesos. Deben comprenderse los flujos de agua que se definen para evitar contabilizar dos veces el mismo concepto o pasar por alto uno de ellos. Así por ejemplo, y de forma general, la precipitación constituye una entrada de agua al vertedero pero, tras la evapotranspiración de una fracción de la misma, su entrada física como tal se produce sólo en las zonas no

impermeabilizadas. Si en el vertedero existe una zona impermeabilizada que vierte finalmente dentro de él, por la razón y en el momento que sea, se debe considerar este extremo y no plantear la entrada “mecánicamente” como precipitación en todo el vertedero + escorrentía superficial derivada de esa zona ya que esto implicaría contabilizar dos veces parte del agua. Este ejemplo-concepto debe extenderse al conjunto de flujos que se plantean para no repetir ni olvidar ninguno.



Fotografía 3.- Rain-flap dispuesto en la impermeabilización de fondo para separar hidráulicamente sectores dentro del vertedero.

3.5.- Cambios en el modelo conceptual

El modelo conceptual del balance hídrico en cualquier vertedero va variando conforme este se construye y explota e incluso puede hacerlo en el propio período postclausura. Cada balance hídrico y, por tanto, cada modelo conceptual, corresponde a un determinado período de tiempo con unas determinadas instalaciones, elementos y circunstancias sin que sea directamente extrapolable a toda la vida del vertedero. Las superficies expuestas o selladas cambian, pueden realizarse obras de urbanización que incidan, quizás determinados elementos de gestión se aplican en unos momentos y en otros no (riegos por ejemplo), etc.

En consecuencia, es imprescindible que cada balance hídrico se base en un modelo específico generado a partir de las características inspeccionadas del vertedero en cuestión y, por lo tanto, el modelo deberá ser revisado y actualizado a lo largo del tiempo sin retener únicamente el modelo inicial. Según se ha indicado anteriormente, el balance hídrico de un vertedero se refiere a:

- Un período de tiempo concreto.
- Una situación concreta del vertedero en ese período de tiempo.

Si el vertedero sufre modificaciones en el período de tiempo considerado por el motivo que sea (por ejemplo porque se ha ampliado el vaso, se ha cubierto o sellado superficialmente algún área, etc.), el modelo conceptual y subsiguiente cálculo deberá desglosarse en tantos modelos y balances parciales cuantas situaciones diversas se hayan producido o, al menos, se deberán ponderar en un único modelo y balance la diversidad de situaciones.

4.- CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO

A partir del modelo conceptual se desarrollarán los cálculos correspondientes a cada uno de los términos que intervienen en el balance hídrico del vertedero en el período de tiempo considerado. Los cálculos tienen por objeto en todos los casos determinar el volumen de agua-lixiviado que entra, sale o varía en el interior del vertedero a lo largo del período en cuestión.

Para efectuar estos cálculos son necesarios datos cuantitativos de partida. Para algunos términos, estos datos numéricos de partida deben ser medidos directamente (precipitación, lixiviados controlados, recargas artificiales, etc.). Respecto a otros términos, no existirán probablemente instrumentos de medición directa por lo que será necesario acudir a cálculos estimativos basados en datos de los parámetros que intervienen en ellos (por ejemplo entrada de agua subterránea a través de un fondo no impermeabilizado no contabilizada directamente sino determinada a partir del valor de la permeabilidad). Finalmente, respecto a algunos otros términos, es posible que no existan ni siquiera datos de los parámetros que intervienen por lo que su cálculo estimativo se basará en datos bibliográficos o experiencias previas en el mismo vertedero o en otros vertederos comparables.

En el caso de los datos y mediciones directas (precipitación, lixiviados controlados, recargas artificiales, etc.), en ocasiones, y por circunstancias diversas, las series de partida no están completas sino que existen intervalos vacíos en las mismas. Cuando así suceda, en lugar de asumir como irresoluble este hecho, se deberá:

- En el caso de la precipitación, completarse la serie de datos mediante correlación con observatorios próximos representativos.
- En el caso del caudal de lixiviados:
 - Si es posible, estimar el caudal-volumen del período de ausencia de datos teniendo en cuenta principalmente la precipitación y situación del vertedero y la evolución general que presenta dicho caudal durante el resto del período que cuenta con registro de datos.
 - En función de la representatividad-fiabilidad que pueda otorgarse a la estimación anterior, evaluar el balance del intervalo de tiempo más largo (dentro del período general de balance) que cuente con datos reales, considerando incluso, si es preciso, datos del período general anterior. Esta evaluación tiene por objeto específico tanto la cuantificación numérica de los términos del balance como, especialmente, la conclusión que a partir de ello puede establecerse respecto a salidas, entradas y situaciones no controladas o conocidas.

Lo indicado genéricamente respecto a la exactitud y fiabilidad de algunos de los datos de partida se extiende a la exactitud y fiabilidad de los procedimientos de cálculo que se desarrollan posteriormente con ellos. Los procesos reales en un vertedero son tan complejos

en el detalle que cualquier metodología de cálculo, incluso la más avanzada y completa, pasa necesariamente por una simplificación de dicha realidad.

Por lo anterior, frente a la opción de utilizar procedimientos complejos que requieren la intervención de muchas variables, se han escogido los métodos de cálculo que se señalan más adelante para cada uno de los términos del balance de tal forma que sean utilizables en la generalidad de las situaciones. Se trata de métodos de cálculo basados a veces en estimaciones de diferentes parámetros y en simplificaciones de los procesos y, por ello, los resultados son cuantitativamente aproximados.

En cualquier caso, sea con datos medidos directamente, sea con estimaciones de cualquier tipo, el cálculo debe estar claramente desarrollado y justificado, explicándose cada uno de los supuestos y datos que se utilicen y expresando sucesivamente para cada término:

- Datos de partida.
- Cálculos.
- Resultados.

Los cálculos a efectuar respecto a muchos de los términos que intervienen en el balance hídrico se refieren a áreas que tienen superficies (m^2) concretas y determinadas (volumen precipitado sobre la superficie expuesta de residuos, escorrentía superficial generada por la precipitación caída sobre una determinada cubierta intermedia o provisional, etc.). Por consiguiente, en los cálculos deberán considerarse e individualizarse, en lo que proceda, dichas áreas y superficies de acuerdo con el modelo conceptual cuidando de no extender las posibles entradas o salidas superficiales al conjunto del vertedero ni contabilizar dos veces el mismo agua (por ejemplo precipitación sobre una cubierta intermedia + escorrentía superficial generada en dicha cubierta).

Los balances hídricos se refieren a un período de tiempo concreto (un año, meses, etc.). Ello no significa que los datos de partida de cada término a obtener y utilizar en los cálculos sean los totales correspondientes a tal período sino que:

- Al menos para los principales parámetros (precipitación, evapotranspiración, lixiviados controlados) se deberán considerar y calcular **datos diarios**.
- El mismo criterio de datos diarios es aplicable en el caso de otros parámetros que pueden y deben ser registrados de forma directa (por ejemplo riegos, vertidos de aguas de servicios, lavarruedas, etc.).

Los balances hídricos se refieren siempre a volúmenes de agua que entran, salen o varían en el interior de un vertedero. Todos los cálculos, por ello, deberán conducir a la obtención de volúmenes en unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) (antiguo Sistema Métrico Decimal). La unidad en el SI es el m^3 . Durante el desarrollo de los cálculos deberá prestarse atención a la utilización y conversión de otro tipo de unidades relativas a otros parámetros de tal forma que las operaciones sean en unidades coherentes.

4.1.- Entradas

Las entradas se calcularán, tal como se desarrolla para cada término en los siguientes apartados, según los procedimientos indicados sintéticamente en la siguiente tabla

<i>Tabla 3.- Metodología del cálculo de las entradas.</i>	
Datos de partida	Cálculos
Precipitación (PR)	
Datos meteorológicos del observatorio.	Sin cálculo. Datos directos
Escorrentía superficial (ESP) Entrada de curso superficial – Entrada de escorrentía de ladera – Entrada de escorrentía de urbanización Entrada por desbordamiento canales - Entrada de escorrentía de cubiertas intermedias o áreas selladas -	
Caudalímetros-contadores. Datos meteorológicos del observatorio. Datos u observaciones puntuales – directas Superficies, pendientes, cobertera, etc. de las áreas generadoras de escorrentía. Hidrogeología.	Sin cálculo en el caso de datos directos de caudalímetros-contadores. Cálculo de lluvia útil sobre las correspondientes cuencas y superficies vertientes y estimación subsiguiente de infiltración y de la escorrentía superficial teniendo en cuenta las características de cada zona. Estimaciones basadas en observaciones puntuales y régimen meteorológico-hidrológico.
Escorrentía subterránea (ESB) Surgencias ocluidas – Entrada difusa por el fondo del vaso	
Datos históricos de surgencias. Permeabilidad del terreno y del acúmulo. Funcionamiento hidrogeológico. Niveles freáticos exterior e interior	Sin cálculo en el caso de datos históricos directos. Cálculo mediante ley de Darcy.

<i>Tabla 3.- Metodología del cálculo de las entradas.</i>	
Datos de partida	Cálculos
Recarga artificial (RA) Riegos desde bocas fijas o cisternas – Riegos y recirculación con lixiviados – Vertidos de agua de instalaciones conexas (servicios, lavarruedas, etc.) – Vertidos de lixiviados propios o ajenos - Vertidos de condensados de gas - Fugas provenientes de depósitos o conducciones que entran en el vertedero	
Caudalímetros-contadores. Cisternas utilizadas, volumen de cada una de ellas, origen y destino.	Sin cálculo. Datos directos.
Humedad del residuo y otros materiales depositados (HR)	
Determinaciones en laboratorio si las hay. Cantidad de residuos y de otro tipo de materiales depositados.	Cálculo directo (cantidad de material entrado y humedad del mismo). Estimaciones basadas en información previa del mismo vertedero y tipo de residuo y/o de vertederos y residuos comparables.

4.1.1.- Precipitación (PR)

La precipitación constituye en general la principal fuente de entrada de agua en los vertederos y, por ello, requiere ser conocida de la forma más exacta posible. Este conocimiento se consigue necesariamente a través de los datos aportados por observatorios meteorológicos que la miden.

4.1.1.1.- Datos de partida

La precipitación que cae sobre un vertedero debe medirse en un observatorio situado en el propio lugar. A diferencia de otros fenómenos meteorológicos, la precipitación es un fenómeno discreto, no continuo, que puede presentar notables variaciones entre puntos geográficamente próximos. Estas variaciones pueden implicar, caso de no disponer de un observatorio en el vertedero, que se contabilicen erróneamente volúmenes muy importantes de agua al tomar como referencia la precipitación medida en observatorios de la región.

Los datos de partida para la determinación de la precipitación, por tanto, deben provenir de un observatorio situado en el vertedero que, al menos, registre, en relación con este parámetro, la precipitación diaria y, preferiblemente, la precipitación horaria. Este observatorio debe estar correctamente mantenido y en funcionamiento de tal forma que se disponga de datos completos del período de balance. Su ubicación dentro del vertedero será tal que las mediciones no se vean afectadas por elementos o situaciones externas tales como edificios próximos, arbolado, etc.



Fotografía 4.- Observatorio con pluviómetro en un vertedero

Sin perjuicio de la necesidad de que cada vertedero disponga de su propio observatorio meteorológico, en la actualidad algunos vertederos aún no disponen de él por lo que, para el cálculo del balance hídrico, se debe acudir a datos de observatorios externos que sean representativos de lo que sucede en el emplazamiento del vertedero. Los datos serán tanto más representativos cuanto provengan de observatorios más próximos y situados en parecidas condiciones microclimáticas. Estas condiciones están regidas por un sinfín de aspectos (altitud, orografía de la zona, exposición a vientos, etc.) por lo que debe evaluarse y justificarse en todo caso la representatividad de los datos obtenidos en observatorios externos teniendo en cuenta que:

- En el caso de observatorios situados en el propio vertedero, se podrán dar como válidos los datos meteorológicos cuando dichos observatorios presenten capacidad de realizar registros automáticos independientemente de la presencia de personal de servicio en las instalaciones. El gestor 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.
- En el caso de tener que acudir a observatorios externos:
 - Se podrá emplear los datos de un único observatorio cuando, siendo este el más próximo, se justifique convenientemente que el vertedero se encuentra dentro del ámbito representado por él, bajo condiciones geográficas semejantes (respecto a altitud y latitud), no existan accidentes relevantes del terreno que puedan dar lugar a comportamientos climáticos diferenciados y el observatorio disponga de un registro de datos de duración (en años) suficientemente representativo de acuerdo a los criterios habituales del Instituto Nacional de Meteorología, Euskalmet u organismos oficiales de esta índole.

- En los demás casos se ponderarán los datos convenientemente a partir de los obtenidos de los tres observatorios más próximos que representen un comportamiento climático semejante al de la situación del vertedero y formen un triángulo en el que quede inscrito el mismo.

Considerando estas posibilidades (observatorio en vertedero, observatorios externos), los datos de partida a retener son las precipitaciones diarias en el período considerado y, para potenciales análisis e interpretaciones posteriores, los datos de las precipitaciones de días anteriores (para el caso de un balance anual, al menos los datos del mes anterior). Estos datos se recogerán:

- Observatorio del vertedero: directamente de él de acuerdo con el programa de control y registro establecido.
- Observatorios externos: de observatorios y redes fiables que permitan el acceso a sus datos en tiempo y forma. En la CAPV, salvo que se cuente expresamente con algún observatorio externo más representativo gestionado por alguna otra entidad (Diputaciones Forales por ejemplo), los datos se recogerán de la Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet). Los datos de las diferentes estaciones de la red están accesibles a través de su página web <http://www.euskalmet.euskadi.eus>, accediendo al apartado:

“Profesional” --- “Datos de estaciones” --- “Climatología mensual”

Climatología mensual

Mapa sensible de la red de estaciones meteorológicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco

● Plataformas ● De aforo ● Meteorológicas ● De calidad ● Ver todo

Datos estaciones meteorológicas

Fecha: 22 / 2 / 2015 Hora: Última hora

Estación: C071 - Jaizkibel

Seleccionar mes: Mes: Febrero 2015

Dia	Temperatura		Hum.		Precipitación l/m ²			Viento			Nivel cm.			Dat.			
	Med.	Máxima	Med.	Total	Máxima hora	Máxima 10 min.	Medio	Racha máxima	Med.	Máximo	Med.	Máximo	%				
	°C	°C	%	24h	hora	hora	Km/h	Dir.	hora	Dir.	cm.	cm.	hora	%			
01/02/15	2,1	3,9	02:10	0,5	12:50	99	5,8	1,3	16:30	0,7	16:00	40,2	313	04:40	99,5	320	10
02/02/15	3,2	6,7	13:50	0,9	03:40	99	1,1	0,6	23:50	0,3	01:00	23,6	206	01:00	49,0	260	10
03/02/15	0,4	3,3	00:00	-1,7	23:40	99	9,3	3,4	00:50	1,0	03:00	24,4	74	03:20	82,5	345	10
04/02/15	-1,5	0,3	18:30	-3,7	07:50	99	0,1	0,1	15:00	0,1	15:00	29,8	40	19:50	69,5	13	10
05/02/15	-0,9	1,0	18:50	-2,9	07:30	99	0,7	0,7	12:10	0,5	12:00	32,5	28	18:20	67,8	355	10
06/02/15	-3,3	-1,7	00:00	-4,5	08:20	99	1,1	0,8	09:00	0,4	08:30	21,3	46	00:00	42,0	52	10
07/02/15	-1,3	1,0	13:10	-3,7	00:00	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	13,9	43	01:10	28,6	31	10
08/02/15	-0,1	2,3	21:30	-1,8	08:30	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	17,2	354	21:30	53,6	44	10
09/02/15	0,9	4,6	15:30	-2,6	06:30	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	20,0	77	03:30	52,6	56	10
10/02/15	6,7	11,3	15:30	2,3	01:20	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	16,1	141	23:20	43,4	163	10
11/02/15	6,6	8,6	11:40	5,2	07:30	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	27,7	159	20:30	53,3	148	10
12/02/15	7,9	12,2	14:50	5,7	06:20	99	0,0	0,0	00:00	0,0	00:00	22,9	167	21:50	49,4	165	10

* Datos sin validar totalmente. La Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología no se responsabiliza del uso que se pueda hacer de estos datos.

Figura 6.- Reproducción de datos de precipitación diaria obtenibles en la página web de Euskalmet

Según se ha señalado anteriormente, si en cualquier caso (observatorio del vertedero u observatorio/s externo/s) la serie de datos fuera incompleta, se completará dicha serie mediante los métodos estadísticos de correlación que procedan.

4.1.1.2.- Cálculos

En el caso de los datos de precipitaciones diarias recogidas en el observatorio del vertedero o en un observatorio externo que se considera representativo, no es necesario efectuar ningún cálculo específico para determinar la precipitación ya que esta ha sido medida directamente.

En el caso de que se desee o deba contar con la ponderación de los datos de tres observatorios externos próximos (E1, E2, E3), el cálculo-evaluación de la precipitación en el vertedero se efectuará considerando la distancia entre el vertedero y cada uno de dichos observatorios como factor de influencia o “peso” (I en %) (a mayor cercanía mayor influencia). La precipitación (P en mm) en el vertedero será entonces:

$$P_{\text{vertedero}} = P_{E1} \cdot I_{E1} + P_{E2} \cdot I_{E2} + P_{E3} \cdot I_{E3}$$

Para calcular el factor de influencia de tres observatorios externos puede acudir a dibujar a escala la posición de los tres observatorios y del vertedero conformando un diagrama triangular con el vertedero inscrito en él tal como se refleja en la siguiente figura.

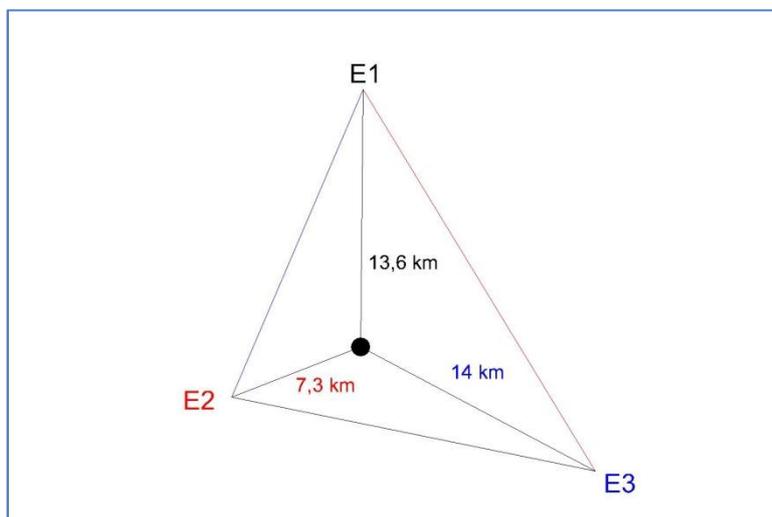


Figura 7.- Inicio del cálculo de la precipitación en un vertedero (punto central) contando con datos de tres observatorios próximos (E1, E2, E3)

Se gradúan entonces los tres lados del triángulo representando el factor de influencia de cada una de las estaciones, de 0 % a 100 %, y se trazan paralelas al lado opuesto al vértice de cada estación que pasen por el punto que representa el vertedero. La intersección de estas líneas con cada uno de los lados indicará el factor de influencia de cada estación:

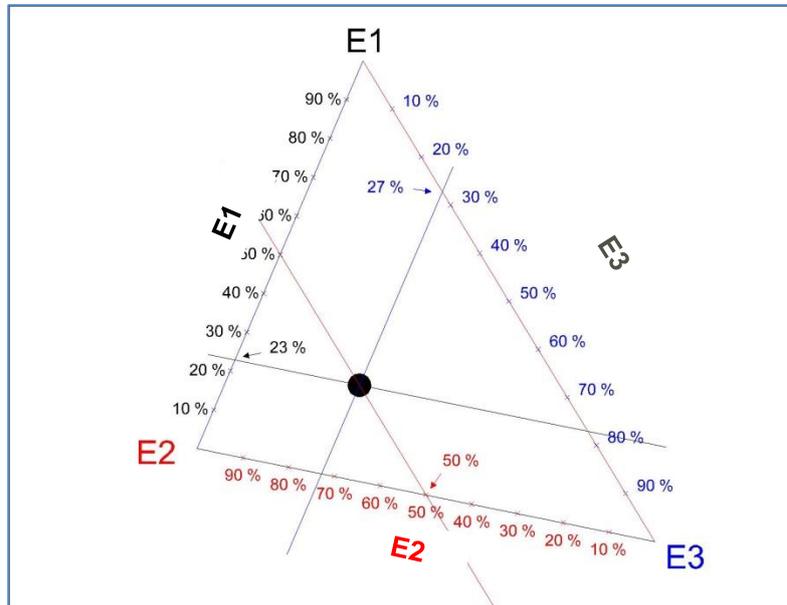


Figura 8.- Método para ponderar la influencia o peso de cada observatorio mediante un diagrama triangular

La precipitación ponderada en el vertedero será:

$$P_{\text{vertedero}} = P_{E1} \cdot I_{E1} + P_{E2} \cdot I_{E2} + P_{E3} \cdot I_{E3}$$

Dado que se requiere la serie de datos diarios, una vez obtenidos los factores de influencia o peso de cada uno de los observatorios, se aplicarán dichos factores a cada una de las precipitaciones diarias medidas en dichos observatorios para determinar la precipitación diaria en el vertedero.

4.1.1.3.- Resultados

La precipitación se presentará en forma de tabla de precipitaciones diarias, mensuales y totales en mm diferenciando:

- Aquellos datos que provengan de medición directa de aquellos que hayan sido completados por correlación debido a la ausencia de algunos de ellos.
- Aquellas precipitaciones en forma de nieve.

Se evaluará explícitamente la representatividad de los observatorios externos que puedan utilizarse así como, en el caso de que el observatorio se sitúe en el vertedero, se evaluará la fiabilidad de sus datos teniendo en cuenta sus características, sistemas de medición y registro, procedimientos de gestión, etc. incluyendo en esta evaluación, si procede, su comparación con series de la red oficial.

Los datos originales de precipitación se expresan en mm (o l/m^2) pero dado que el balance hídrico se refiere a volúmenes habrá que considerar posteriormente los volúmenes (en m^3) que implica esta precipitación.

4.1.2.- Escorrentía superficial (ESP)

Los vertederos deben estar diseñados, construidos y mantenidos de forma que no se produzcan entradas de aguas superficiales externas al vaso de vertido y que las aguas de escorrentía que se generan sobre zonas cubiertas o selladas sea evacuada lateralmente sin que contacte con los residuos e incremente la cantidad de lixiviados. En los vertederos que van siendo ampliados o en los que la explotación se efectúa por fases/lugares, esto implicará la disposición de canales perimetrales definitivos (típicamente en la zona del borde superior del vaso) así como canales o sistemas provisionales que desvíen el agua generada en las zonas dentro del vaso en las que aún no ha comenzado la explotación. En ocasiones, sin embargo, esto no sucede así, bien por defectos de diseño o construcción, bien por defectos en el mantenimiento (obturación de canales perimetrales por ejemplo).

Las posibles formas de escorrentía superficial que pueden representar entradas son:

- Entrada de un curso superficial, arroyo o reguero.
- Entrada de la escorrentía que se produce sobre una ladera que vierte al vaso.
- Entrada de la escorrentía generada en la urbanización perimetral al vaso (calles, explanadas).
- Entrada por desbordamiento de canales perimetrales, cunetas, etc.
- Entrada de la escorrentía que se genera sobre cubiertas intermedias y/o sellados y que no es evacuada lateralmente fuera del vaso en el momento y por la circunstancia que sea.

De acuerdo con el modelo conceptual que se haya establecido previamente, se deberán calcular aquellas entradas que se considere que han intervenido en el período de tiempo considerado. Con el criterio señalado a este respecto, del resto de las posibles entradas se deberá justificar su no intervención especificando qué sistemas o diseños están presentes para evitarlo y, específicamente, su mantenimiento y adecuación a episodios de aguas altas (obturación de cunetas y canales por ejemplo). Esta justificación no se basará, por tanto, en las características y situación “teórica” del vertedero sino que deberá estudiarse expresamente la posibilidad de entrada de aguas tras la recogida de información y la realización de inspecciones que verifiquen el funcionamiento de los sistemas.

A la hora de evaluar estas entradas y su intervención en el balance hídrico deberán considerarse los flujos que realmente se producen sobre cada tipo de superficie y las entradas y salidas reales o netas para no contar dos veces la misma agua (por ejemplo precipitación sobre un área que vierte hacia el interior + escorrentía superficial derivada de esa precipitación).

4.1.2.1.- Curso superficial

La entrada de un curso superficial, arroyo o reguero en un vertedero constituiría muy probablemente un aporte importante de agua al sistema que debe impedirse mediante la adecuación de los sistemas de desvío y conducción que procedan.

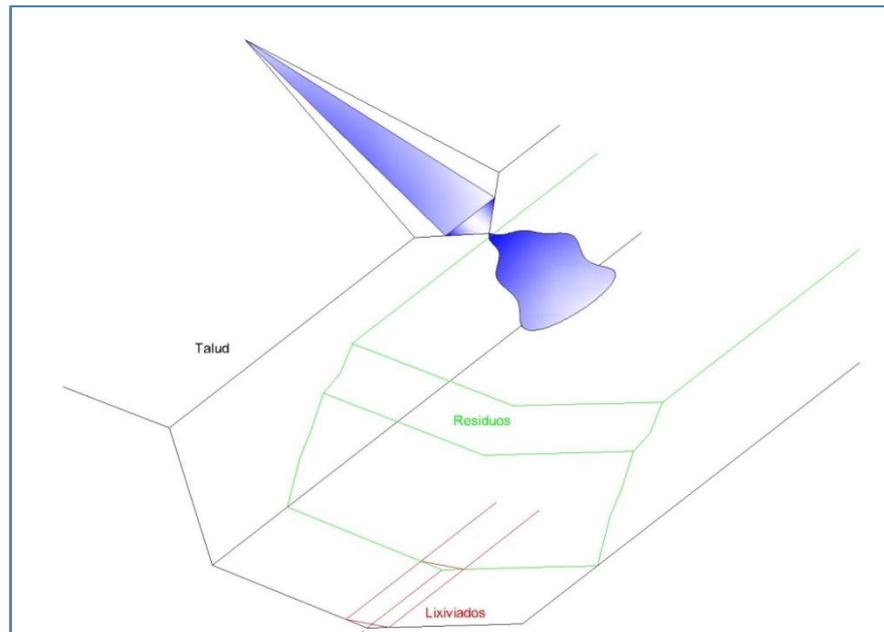


Figura 9.- Esquema ilustrativo de la entrada de un curso superficial en un vertedero

Por ello, en el hipotético caso de que sucediera de forma más o menos continua, su determinación debe ser lo más precisa posible necesitándose entonces de un control y registro en el punto de entrada (caudalímetro). En ausencia del mismo, la entrada puede evaluarse estimando el caudal que se genera en la cuenca vertiente en el punto de entrada al vertedero. Puede suceder también que la entrada se produzca o haya producido sólo de forma discontinua o esporádica debido, por ejemplo, a problemas de mantenimiento o diseño en el punto de desvío de la corriente de agua hacia los canales perimetrales. En este caso, a falta de caudalímetro y de imprecisa aplicación del método basado en la estimación del caudal generado en la cuenca vertiente (apto en su caso para períodos más largos), el cálculo se basaría en estimaciones efectuadas a partir de observaciones directas (idealmente con aforos) y su extrapolación considerando el régimen meteorológico-hidrológico.

4.1.2.1.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios son:

- Si existe control específico, datos y registro directo de la entrada de agua provenientes de un caudalímetro o sistema de medición.

- Si no existe control específico:
 - Datos meteorológicos.
 - Datos de la cuenca correspondiente al curso superficial que entra en el vertedero incluyendo información hidrogeológica de la misma que permita evaluar si en la cuenca vertiente se producen flujos de agua subterránea que se dirigen a otras cuencas superficiales o que no afloran finalmente en ella en el período de tiempo considerado para el balance.
 - Observaciones directas y aforos o estimaciones del caudal. Dado que este tipo de entradas, de producirse, se relacionan típicamente con momentos de aguas altas y/o obstrucciones y funcionamiento defectuoso de los sistemas de interceptación y desvío lateral, resulta necesario efectuar la inspección y comprobación en dichos momentos.

4.1.2.1.2.- Cálculos

En el caso de que la entrada se produzca de forma premeditadamente continua se requeriría un caudalímetro y los cálculos derivarían de la transformación directa del registro del caudal a volumen de entrada en el período de tiempo que se trate.

En el supuesto de que la entrada del curso superficial se haya producido, por cualquier motivo, de forma íntegra (todo el caudal del curso superficial) y continua a lo largo de un período dilatado de tiempo y no se dispusiera de caudalímetro, la estimación del volumen de entrada se efectuaría, a falta de otros datos, de la siguiente forma:

- Se calcula la lluvia útil (LLU) caída sobre la cuenca vertiente del curso superficial hasta su entrada al vertedero. La lluvia útil representa la cantidad de precipitación que no ha sido evapotranspirada y que, por tanto, puede discurrir superficialmente, infiltrarse o ambas cosas a la vez. Para calcular la lluvia útil se deberá, por tanto:
 - Determinar la precipitación de acuerdo con lo indicado en el apartado de Entradas-Precipitación (PR).
 - Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).
 - Restar ambas cantidades: $LLU = PR - ETR$.
 - Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (LLU) aplicada a toda la superficie de la cuenca vertiente hacia el curso superficial tomando como extremo el punto de entrada al vertedero.
- La lluvia útil así calculada representaría el límite máximo del aporte de entrada del curso superficial al suponerse que la fracción infiltrada en el terreno vuelve a resurgir en breve tiempo en la cuenca y pasa a escorrentía superficial. Dependiendo de la configuración hidrogeológica es posible que se haya producido una cierta infiltración que derive

finalmente el agua subterránea hacia otras cuencas y/o que el proceso de circulación subterránea en la propia cuenca sea lento y no vuelva a resurgir dentro del período considerado.

Para ponderar este aspecto se deberá disponer de información hidrogeológica que permita evaluar si en la cuenca vertiente se producen flujos de agua subterránea que no afloran en ella. Si esta información no es concluyente, a la hora de evaluar la entrada de agua que representa el acceso continuo de un curso superficial al vertedero se tomará el valor del volumen de lluvia útil (LLU) considerándolo, para posteriores análisis, ajustes e interpretaciones, como el volumen máximo de entrada.



Fotografía 5.-- Captación-desvío de un arroyo entrante en un vertedero hacia los canales perimetrales

Finalmente, en el caso de que se haya detectado la entrada parcial y esporádica de agua proveniente de un curso superficial (por problemas puntuales en el punto de desvío por ejemplo), la estimación del volumen aportado al sistema se basará en aforos y/o observaciones directas, que permitan evaluar el caudal de entrada en esos momentos. El caudal así determinado se extrapolará teniendo en cuenta el régimen meteorológico-hidrológico habido en el intervalo de tiempo en el que se ha detectado que se producen dichas entradas puntuales. En este sentido, se reitera la necesidad de efectuar inspecciones directas al vertedero en momentos singulares de aguas altas y/o cuando se haya detectado alguna anomalía u obstrucción en el funcionamiento de los sistemas de canalización de las aguas.

4.1.2.1.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de la entrada de agua a favor de un curso superficial se presentarán:

- Si existe control mediante caudalímetro, mediante tabla de datos diarios de caudales de entrada.
- Si no existe control mediante caudalímetro:
 - Como volumen de entrada en el caso de que los cálculos hayan derivado de la consideración de la lluvia útil sobre la cuenca a lo largo de un período determinado.
 - Como caudal/es y volumen/es de entrada en el caso de que los cálculos hayan derivado de inspecciones directas y extrapolaciones teniendo en cuenta la evolución meteorológica e hidrológica.

En todos los casos, y para la cuantificación general del balance, esta entrada se indicará en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos sobre los que se ha partido para ello. Se detallarán expresamente tanto el lugar como la duración estimada de los episodios de entrada de agua al vertedero así como las causas de los mismos y, en su caso, la resolución de la situación que ha dado lugar al acceso del curso superficial.

4.1.2.2.- Escorrentía de ladera

Bajo este término se engloban dos posibles situaciones:

- Laderas sobre las que se ha dispuesto ya la impermeabilización de fondo del vertedero y que no han sido aún cubiertas por los residuos. En este caso puede admitirse que no existe infiltración de agua en el terreno natural subyacente.
- Laderas que no disponen de impermeabilización y se encuentran en estado natural o con sólo alguna preparación previa (excavación, conformado). En este caso debe admitirse que existe una cierta infiltración de agua en el terreno cuya importancia dependerá de la capacidad de infiltración de la superficie expuesta y de la permeabilidad del terreno.

Como en general en el resto de los términos de entrada y de salida, deberán tenerse en cuenta los flujos reales que se producen (origen y destino de las aguas) y no añadir sistemáticamente los resultados parciales que se van obteniendo a la ecuación general del balance hídrico. Pueden existir flujos que no lleguen a entrar en la masa de residuos ni, por tanto, a generar lixiviados (desvíos, bombeos de aguas limpias antes de que contacten con los residuos, etc.). Estos flujos deben ser representados y cuantificados de forma individual considerando finalmente, en la ecuación del balance hídrico, su intervención efectiva.

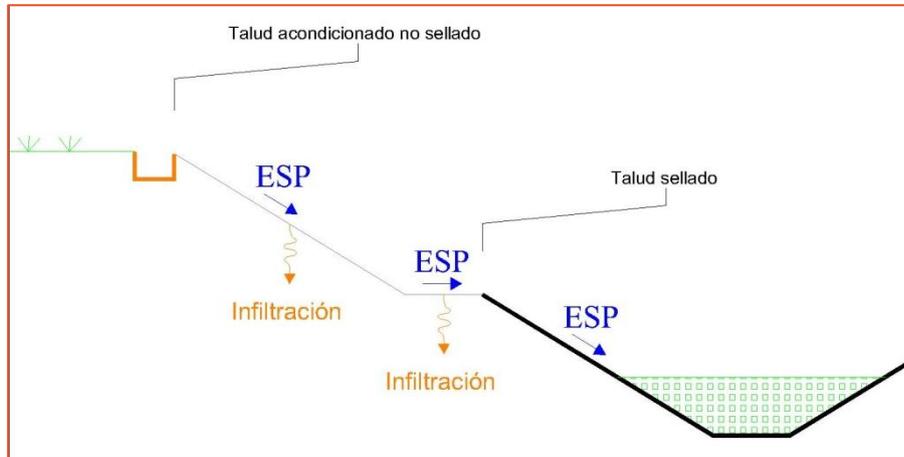


Figura 10.- Esquema ilustrativo de la entrada de agua superficial por escorrentía de ladera. Se deberá modelizar los flujos teniendo en cuenta el destino final de las aguas escurridas (si entran en contacto con los residuos y generan lixiviados o son evacuadas parcialmente de alguna forma)

4.1.2.2.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios para el cálculo de la escorrentía proveniente de laderas vertientes son:

- Datos meteorológicos.
- Datos de las superficies que generan escorrentía.
- Coeficiente de infiltración de dichas superficies.

Los datos meteorológicos permitirán calcular precipitación y evapotranspiración y, mediante resta simple, la cantidad de agua no evapotranspirada (lluvia útil) que está disponible para escurrir superficialmente o infiltrarse. El coeficiente de infiltración permitirá aproximar la cantidad de agua que se infiltra y, con ello, derivar la cantidad de agua que escurre superficialmente.

4.1.2.2.2.- Cálculos

Dos son los métodos simplificados que pueden elegirse a la hora de evaluar la escorrentía superficial de un área en general y de una ladera vertiente hacia el vertedero en particular:

- Por un lado, utilizar coeficientes de escorrentía (C) que relacionan la escorrentía superficial (ESP) con la precipitación (PR) en la forma: $ESP = C.PR$. Este método es el aplicado habitualmente en los procedimientos de cálculo de caudales de avenida para dimensionar elementos de drenaje de carreteras y otras infraestructuras (método racional). El coeficiente de escorrentía (C) viene derivado y tabulado empíricamente, alcanzando valores variables dependiendo del tipo de terreno, su relieve, la vegetación que soporta, etc.

- Por otro, partir del valor de lluvia útil (LLU) y aplicar sobre él un coeficiente de infiltración (CI) de dicha lluvia útil para diferenciar las partes que se infiltran en el terreno y aquellas que derivan superficialmente. Este coeficiente también se relaciona con diferentes variables del terreno (tipo, pendiente, etc.). La diferencia principal respecto al método anterior es que el coeficiente se aplica sobre la lluvia útil y no sobre la precipitación, teniendo en cuenta previamente, por tanto, la evapotranspiración.

En la realidad, tanto el coeficiente de escorrentía de la precipitación como el coeficiente de infiltración de la lluvia útil dependen de muchos factores: pendiente, tipo de terreno (capacidad de infiltración y permeabilidad), tipo de vegetación (densidad, estructura, altura), tipo de precipitación (cantidad, intensidad, frecuencia), humedad previa del suelo, etc. y varían en función del instante o período de tiempo considerado en relación con las precipitaciones. De esta forma, al inicio de una precipitación, el coeficiente de escorrentía puede ser 0 (el agua precipitada inicialmente no discurre superficialmente sino que es retenida por la vegetación y/o por el suelo incrementando su humedad) para alcanzar su máximo dentro de un episodio de lluvia al finalizar el mismo. Dependiendo de la duración e intensidad de este episodio el coeficiente adquiere estrictamente valores diferentes. Esta complejidad y variación real del coeficiente de escorrentía según el tipo de precipitación y la humedad previa en el suelo es lógicamente también extrapolable al coeficiente de infiltración.

Junto a estos métodos simplificados de cálculo-estimación de la escorrentía o infiltración a partir de coeficientes empíricos, existen otros más complejos que tienen en cuenta al menos parte de las variables señaladas (humedad inicial del suelo, tipo de precipitación) pero que sólo pueden ser aplicados si se conocen todas estas variables para cada episodio de precipitación. Esta necesidad impide su aplicación práctica cuando los datos de partida no son lo suficientemente precisos en este sentido y, caso de que se dispusiera de estos datos, obliga a desarrollar unos cálculos laboriosos episodio por episodio de precipitación.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, el método de cálculo que se propone para calcular la escorrentía generada sobre una ladera vertiente hacia el vaso de vertido se basa en la aplicación de un coeficiente sobre la lluvia útil, no sobre la precipitación. De esta forma, el procedimiento considera la evapotranspiración como el primer factor o término a detracer de la precipitación a la hora de contabilizar el agua que entra o sale.



Fotografía 6.- Huellas de la escorrentía superficial producida en un talud no impermeabilizado por encima del acúmulo de residuos

El desarrollo del cálculo consistirá en:

- Se calcula la lluvia útil (LLU), cantidad de precipitación que no ha sido evapotranspirada y que, por tanto, puede discurrir superficialmente, infiltrarse o ambas cosas a la vez. Para calcular la lluvia útil se deberá, por tanto:
 - Determinar la precipitación de acuerdo con lo indicado en el apartado de Entradas-Precipitación (PR).
 - Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).
 - Restar ambas cantidades: $LLU = PR - ETR$.
 - Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (LLU) aplicada a toda la superficie de la ladera cuya escorrentía superficial quiere determinarse.
- La lluvia útil así calculada representaría el límite máximo de la escorrentía superficial suponiendo que no existe infiltración en la superficie considerada o que, caso de existir, se trata de una infiltración somera que resurge a poca distancia en la propia ladera o su pie y/o entra finalmente en el vaso de vertido.
- En función de las características generales de la superficie que genera la escorrentía se distinguirá entre:
 - Superficies y laderas impermeabilizadas (típicamente impermeabilización de fondo del vertedero).

- Superficies y laderas en estado natural o excavadas o, en general, aquellas en las que no haya dispuesto la impermeabilización de fondo del vertedero.
- Para las superficies y laderas impermeabilizadas se admitirá que no hay infiltración y que la escorrentía superficial es igual a la lluvia útil calculada.
- Para las superficies y laderas en estado natural o, en general, sin impermeabilización, se evaluará desde el punto de vista hidrogeológico, la forma y destino de la escorrentía que se produce en relación con su entrada potencial al vertedero. Dado que la escorrentía que se quiere calcular tiene su origen en la precipitación, deberá determinarse y considerarse en primer lugar:
 - Si la infiltración que se produzca en la ladera resurge en parte en algún punto al pie de la misma y entra finalmente al vertedero.
 - Si la infiltración que se produzca en la ladera no entra en el vertedero sino que entra a formar parte de las aguas subterráneas del entorno.
- Considerando estas posibilidades, se aplicarán entonces los siguientes coeficientes de infiltración sobre la lluvia útil. Estos coeficientes se han derivado de forma global para aproximar la infiltración que se produce en las formaciones rocosas considerando sus superficies generales de afloramiento (no para laderas o puntos concretos) pero se tomarán aquí como referencia. Las categorías de permeabilidad corresponden a las asignadas en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco a las diferentes formaciones. En el caso de que en las laderas existan terrenos no considerados específicamente en este Mapa (principalmente suelos y/o tierras utilizadas para la preparación del vertedero), y no se disponga de datos de su permeabilidad, se les asignará por comparación una de estas categorías atendiendo a sus características intrínsecas (composición, compacidad, estructura, etc.).

Tabla 4.- Coeficiente de infiltración respecto a la lluvia útil a considerar en función de la permeabilidad del terreno. Las categorías de permeabilidad corresponden a las asignadas en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco a las diferentes formaciones.

Permeabilidad del terreno		Coeficiente infiltración % de la lluvia útil	Escorrentía % de la lluvia útil
Categoría	K (m/s)		
Muy baja	$< 10^{-7}$	0 – 5	95 – 100
Baja	$10^{-5} - 10^{-7}$	5 – 20	80 – 95
Media	$10^{-4} - 10^{-5}$	20 – 60	40 – 80
Alta	$10^{-3} - 10^{-4}$	60 – 80	20 – 40
Muy alta	$> 10^{-3}$	80 - 100	0 - 20

- A la hora de otorgar una cantidad concreta para la escorrentía superficial entre los valores extremos de los intervalos señalados (0-5, 5-20, 20-60, etc.), se atenderá al relieve pendiente de la ladera que vierte hacia el vertedero, distinguiéndose cuatro clases: muy accidentado (pendientes superiores al 30 %), accidentado (pendientes entre el 10% y el 30%), ondulado (pendientes entre el 5% y el 10 %) y llano (pendientes inferiores al 5%). De esta forma, dentro de cada clase de permeabilidad anterior se podrán distinguir cuatro subclases correspondientes a estas pendientes:

Tabla 5.- Escorrentía respecto a la lluvia útil a considerar en función de la permeabilidad del terreno y de la pendiente del terreno.

Permeabilidad del terreno		Escorrentía (% lluvia útil) según pendiente (P)			
Categoría	K (m/s)	P > 30%	10%<P<30%	5%<P<10%	P < 5 %
Muy baja	$< 10^{-7}$	98-100	97-98	96-97	95-96
Baja	$10^{-5} - 10^{-7}$	91-95	87-91	84-87	80-84
Media	$10^{-4} - 10^{-5}$	70-80	60-70	50-60	40-50
Alta	$10^{-3} - 10^{-4}$	35-40	30-35	25-30	20-25
Muy alta	$> 10^{-3}$	15-20	10-15	5-10	0-5

- La asignación final de un coeficiente de escorrentía dentro de estas subclases se efectuará considerando si existe algún elemento fisiográfico (irregularidades superficiales en la ladera) que pudiera favorecer la infiltración frente a la escorrentía. En cada caso se considerará que cuanto más lisa sea una superficie más escorrentía derivará, siempre dentro de cada una de las categorías determinadas teniendo en cuenta la permeabilidad y pendiente.
- La asignación del coeficiente de escorrentía efectuada, según el procedimiento anterior, para laderas no impermeabilizadas se completará finalmente con la consideración inicial indicada respecto a:
 - Si la infiltración que se produce en la ladera resurge en parte en algún punto al pie de la misma y entra finalmente al vertedero. En este caso habrá que añadir, a la escorrentía directa calculada, una estimación de la escorrentía subsuperficial que resurge y entra también en el vertedero.
 - Si la infiltración que se produce en la ladera no entra en el vertedero sino que entra a formar parte de las aguas subterráneas del entorno. En este caso la escorrentía a considerar será directamente la calculada según el procedimiento anterior.

4.1.2.2.3.- Resultados

Los resultados se presentarán en forma de volumen de agua de entrada en el sistema por escorrentía lateral de ladera. Se explicitará el modelo conceptual (qué superficie es, cómo se efectúa esta entrada, etc.) y se explicarán los supuestos y procedimientos que han conducido a la obtención del valor numérico de la escorrentía.

4.1.2.3.- Escorrentía de urbanización

En la zona contigua al vaso de vertido de algunos vertederos existen calles, viales, explanadas, etc. cuya escorrentía superficial acaba entrando en el vaso. El modelo conceptual previo debe determinar si existe y los lugares y superficies que finalmente vierten hacia el vaso. En esta determinación se prestará atención a todo el perímetro del vaso y, especialmente, a la zona de los viales de entrada al mismo, ya que es a favor de este lugar donde en muchas ocasiones se produce la entrada de aguas externas.

El cálculo de este término se efectuará de forma idéntica a lo indicado en el anterior apartado respecto a la escorrentía de ladera, es decir, se partirá de la lluvia útil aplicando posteriormente coeficientes en función de la permeabilidad de la superficie de la urbanización y de su relieve.

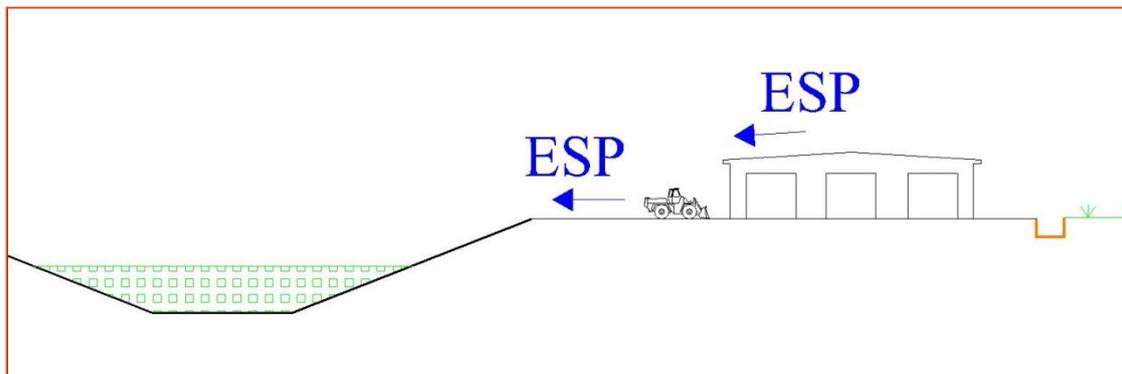


Figura 11.- Esquema ilustrativo de escorrentía superficial proveniente de la urbanización adyacente

4.1.2.3.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios para el cálculo de la escorrentía proveniente de la urbanización contigua al vaso de vertido son:

- Datos meteorológicos.
- Datos de las superficies que generan escorrentía.
- Coeficiente de infiltración de dichas superficies.

Los datos meteorológicos permitirán calcular precipitación y evapotranspiración y, mediante resta simple, la cantidad de agua no evapotranspirada (lluvia útil) que está disponible para

escurrir superficialmente o infiltrarse. El coeficiente de infiltración en el terreno permitirá aproximar la cantidad de agua que se infiltra y, con ello, derivar la cantidad de agua que escurre superficialmente.

4.1.2.3.2.- Cálculos

Los cálculos se efectuarán según se ha indicado en el apartado anterior de Entradas-Escorrentía Superficial (ESP)-Escorrentía de ladera, es decir:

- Se calcula la lluvia útil (LLU), cantidad de precipitación que no ha sido evapotranspirada y que, por tanto, puede discurrir superficialmente, infiltrarse o ambas cosas a la vez. Para calcular la lluvia útil se deberá, por tanto:
 - Determinar la precipitación de acuerdo con lo indicado en el apartado de Entradas-Precipitación (PR).
 - Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).
 - Restar ambas cantidades: $LLU = PR - ETR$.
 - Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (LLU) aplicada a toda la superficie de la urbanización cuya escorrentía superficial quiere determinarse.
- La lluvia útil así calculada representaría el límite máximo de la escorrentía superficial suponiendo que no existe infiltración en la superficie considerada.
- En función de las características generales de la superficie que genera la escorrentía se distinguirá entre:
 - Superficies impermeabilizadas (hormigonadas por ejemplo). Se admitirá que la infiltración es nula y que, por tanto, la escorrentía superficial es igual a la lluvia útil.
 - Superficies en estado natural, excavadas o con una capa de material granular. Se admitirá que existe una cierta infiltración y que, por tanto, la escorrentía superficial es menor que la lluvia útil. Se aplicará, entonces, el procedimiento detallado en el apartado de escorrentía de ladera utilizando coeficientes en función de la permeabilidad del terreno, pendiente y factores de detalle.

4.1.2.3.3.- Resultados

Los resultados se presentarán en forma de volumen de agua de entrada en el sistema por escorrentía lateral proveniente de la urbanización contigua al vaso de vertido. Se explicará el modelo conceptual (qué superficie es, cómo se efectúa esta entrada, etc.) y se explicarán los supuestos y procedimientos que han conducido a la obtención del valor de escorrentía.



Fotografía 7.- Posible lugar de entrada de escorrentía de urbanización externa debido a la falta de cunetas o sistemas que independicen hidráulicamente el vaso de vertido. La zona de entrada de los viales de acceso al vaso de vertido constituye habitualmente un punto susceptible en este sentido.

4.1.2.4.- Desbordamiento de canales o cunetas

La entrada esporádica de agua en el vertedero por el desbordamiento de canales o cunetas suele tener su origen en un deficiente mantenimiento de los mismos (obturación) y/o en sucesos hidrológicos puntuales (avenidas). Según sea el origen del desbordamiento, el cálculo deberá basarse en inspecciones y datos directos (obturación) o podrá basarse en la consideración de los caudales de avenida y capacidad de evacuación del canal o cuneta (avenida).

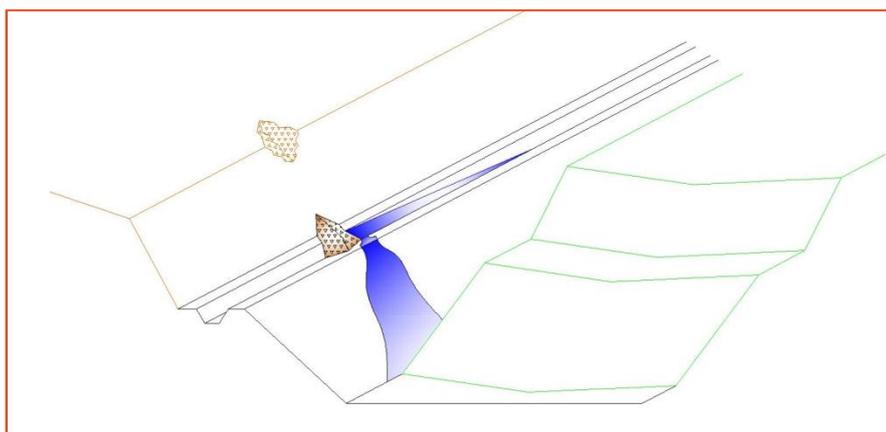


Figura 12.- Esquema ilustrativo de la entrada de agua en un vertedero por obturación del canal o cuneta perimetral

4.1.2.4.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios son:

- Datos meteorológicos.
- Observaciones directas y aforos.
- Capacidad del canal (caudal máximo).

4.1.2.4.2.- Cálculos

En el caso de que se haya detectado la entrada parcial y esporádica de agua proveniente de un canal o cuneta por obturación, la estimación del volumen aportado al sistema se basará en aforos y/o observaciones directas, que permitan evaluar el caudal de entrada en esos momentos. El caudal así determinado se extrapolará teniendo en cuenta el régimen meteorológico-hidrológico habido en el intervalo de tiempo en el que se ha detectado que se producen dichas entradas puntuales.

En el caso de que el desbordamiento se haya producido por una avenida que el elemento de drenaje, estando en buenas condiciones, ha sido incapaz de desaguar, se evaluará dicho caudal de avenida frente a la capacidad de desagüe del canal, obteniéndose por diferencia el caudal que ha desbordado.

4.1.2.4.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de la entrada de agua por desbordamiento esporádico de canales y cunetas se presentarán en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos sobre los que se ha partido para ello.



Fotografía 8.- Canal perimetral roto y obturado favoreciendo la entrada de agua al interior del vertedero. Es imprescindible un buen mantenimiento de los mismos

4.1.2.5.- *Cubiertas intermedias o áreas selladas*

En este apartado se consideran dos tipos de cubiertas intermedias o áreas selladas que pueden generar escorrentía que acabe entrando en el vaso de vertido

- Aquellas que disponen de impermeabilización artificial (geomembrana) que impiden la infiltración del agua hacia los residuos subyacentes. En este caso se admite que todo el agua discurre superficial o subsuperficialmente (en la capa por encima de la impermeabilización) hasta que se evacúa en el perímetro de la cubierta intermedia o sellado. Si esta evacuación no se efectúa hacia el exterior sino que, por cualquier causa, el agua así recogida se infiltra constituirá una entrada más de agua al sistema.
- Aquellas constituidas por tierras u otros materiales que, además de la escorrentía que se genera sobre ellas, permiten una cierta infiltración del agua. En este caso se plantean dos posibles situaciones:
 - El sistema funciona correctamente y la escorrentía superficial generada es evacuada al exterior manteniéndose, no obstante, una cierta infiltración en la propia capa que puede acabar alcanzando los residuos.
 - El sistema, por la causa que sea, no funciona correctamente y la escorrentía superficial generada acaba también infiltrándose en algún lugar de su perímetro.

Aunque las situaciones de deficiente evacuación de la escorrentía hacia el exterior no se den de forma continua durante el período considerado para el balance hídrico en su conjunto, es posible que se produzcan temporalmente coincidiendo, por ejemplo, con la ejecución de la propia cubrición-sellado antes de que se haya dispuesto la evacuación lateral definitiva de las aguas.

Según se ha indicado anteriormente al tratar sobre el modelo conceptual y sus cambios con el tiempo y desarrollo de la instalación, será necesario considerar que la evacuación lateral del agua de escorrentía generada en un área cubierta o sellada sólo se produce cuando el sistema de evacuación está dispuesto y funciona correctamente. Hasta entonces el agua de escorrentía finaliza en el vaso y, como tal, constituye una entrada a cuantificar. Por ello, en el caso de cubiertas y sellados, es imprescindible conocer si han sido eficientes durante todo el período abarcado por el balance o se trata de actuaciones que se han desarrollado durante dicho período. En este último caso deberá, entonces, desglosarse el modelo y subsiguiente balance considerando los dos intervalos de tiempo (antes y después de la evacuación lateral).

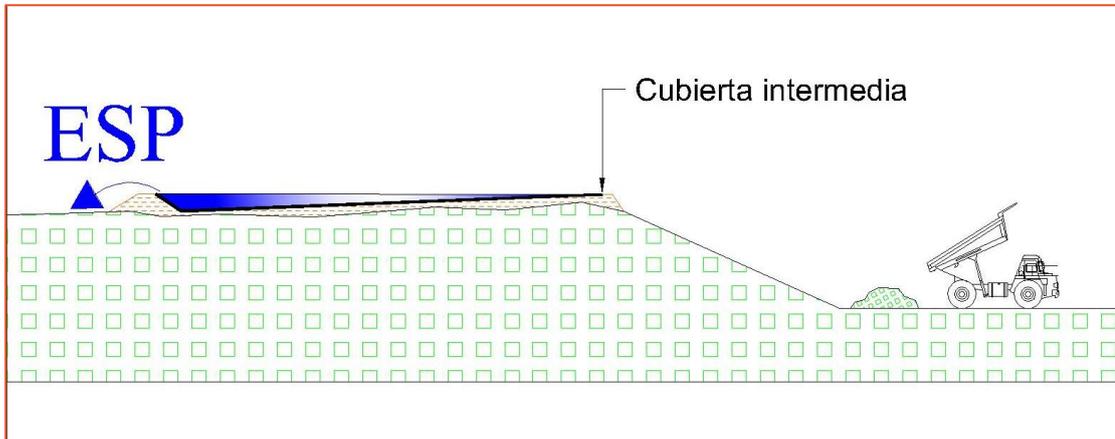


Figura 13.- Esquema ilustrativo de la entrada de agua en el acúmulo de residuos proveniente de un área impermeabilizada que carece de evacuación lateral hacia el exterior

La entrada de escorrentía generada en áreas cubiertas o selladas se calculará diferenciando en primer lugar los dos tipos de cubiertas o sellados indicados anteriormente:

- Aquellos que disponen de impermeabilización que impiden la infiltración del agua hacia los residuos subyacentes.
- Aquellos constituidos por tierras u otros materiales que, además de la escorrentía que se genera sobre ellos, permiten una cierta infiltración del agua que puede alcanzar los residuos.

4.1.2.5.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios son:

- Datos meteorológicos.
- Superficie y tipo de las áreas cubiertas o selladas.
- Coeficientes de infiltración de dichas superficies.

4.1.2.5.2.- Cálculos

El cálculo es similar al desarrollado en los apartados anteriores de escorrentía de ladera y escorrentía de urbanización. Se calculará en primer lugar la lluvia útil (LLU), cantidad de precipitación que no ha sido evapotranspirada y que, por tanto, puede discurrir superficialmente, infiltrarse o ambas cosas a la vez. Para calcular la lluvia útil se deberá:

- Determinar la precipitación de acuerdo con lo indicado en el apartado de Entradas-Precipitación (PR).
- Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).

- Restar ambas cantidades: $LLU = PR - ETR$.
- Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (LLU) aplicada a la superficie de la/s área/s cubierta/s o sellada/s.

En el caso de que la cubierta o sellado disponga de impermeabilización que impida su infiltración y el agua no sea evacuada lateralmente, todo el agua circulará superficial o subsuperficialmente en dicha capa hasta alcanzar el lugar de entrada. La cantidad de agua que entra en ese lugar corresponderá al total de la lluvia útil.

En el caso de que la cubierta o sellado no disponga de impermeabilización, se presumirá que existe una cierta infiltración además de la escorrentía superficial que se genere sobre ella y:

- Si la escorrentía superficial generada finaliza también infiltrándose, como entrada, la situación será similar al caso anterior (la entrada corresponderá a la lluvia útil) aunque el lugar exacto de entrada sea doble (infiltración a través de la propia capa y entrada en algún lugar de la escorrentía superficial generada sobre ella).
- Si la escorrentía superficial generada es correctamente evacuada fuera del vaso, la entrada real correspondería entonces únicamente a la fracción que se ha infiltrado en la propia capa.

Para calcular en este último caso la proporción que representa la infiltración respecto al total de la lluvia útil, se utilizará el método señalado en el apartado de Entradas-Escorrentía Superficial (ESP)-Escorrentía de laderas. Este método, tal como está allí desarrollado, permitirá calcular la escorrentía superficial. La infiltración se calculará entonces restando de la lluvia útil dicha escorrentía superficial.

4.1.2.5.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de la entrada de agua proveniente de la escorrentía generada sobre áreas cubiertas o selladas se presentarán en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos temporales sobre los que se ha partido para ello en el caso de que dichas áreas y/o su funcionalidad hayan sufrido modificación durante el período que abarca el balance.

4.1.3.- Escorrentía subterránea (ESB)

Los vertederos deben estar diseñados y construidos de forma que no se produzcan entradas de aguas subterráneas al vaso de vertido. Esto se logra mediante la adecuación de los sistemas de impermeabilización de fondo que procedan. En la actualidad existen, sin embargo, algunos vertederos que carecen de dicha impermeabilización ya que comenzaron su desarrollo y actividad, hace tiempo, en un momento en el que ni los requisitos legales lo exigían ni existía siquiera una conciencia técnica extendida de esta necesidad. Fruto de ello es que a través de las paredes del vaso de vertido puede darse un intercambio de fluidos con el terreno que, dependiendo de la configuración hidrogeológica, podrá determinar:

- La entrada de agua subterránea en el vertedero.
- La salida de lixiviados hacia el entorno.
- Alternativamente una de las dos situaciones dependiendo del momento hidrológico natural y de la situación del agua libre en el interior del vertedero.
- En el detalle, simultáneamente las dos situaciones en puntos diferentes de las paredes del vaso.

En este apartado se tratará la entrada de aguas subterráneas en el vertedero, dejando para un posterior apartado la descripción y cálculo de la posible salida de lixiviados hacia el entorno. Las posibles formas de entrada de escorrentía subterránea en un vertedero son:

- Entrada de agua a favor de antiguas surgencias que afloraban en la zona ahora ocupada por el vertedero y que fueron directamente conectadas a la red de drenaje de lixiviados del fondo del vaso o no fueron convenientemente captadas y derivadas hacia fuera del vaso y entran en contacto directo con los residuos antes de sumarse a la red de lixiviados (surgencias ocluidas).
- Entrada más o menos difusa a través de la superficie de contacto vaso-terreno.

La posible existencia de una u otra forma de entrada deberá ser determinada, en el modelo conceptual previo, a partir de información hidrogeológica histórica y actual tanto del terreno como del propio vertedero.

A falta de información concreta al respecto, inicialmente se admitirá que los vertederos que disponen de impermeabilización de fondo carecen de entradas de aguas subterráneas o de salidas de lixiviados. Con el mismo criterio metodológico, inicialmente se admitirá que los vertederos que no disponen de impermeabilización de fondo presentan o entradas o salidas o unas y otras dependiendo del momento. El posterior análisis de los resultados del balance podrá evidenciar si estas suposiciones preliminares han sido acertadas o deben ser reconsideradas.

4.1.3.1.- Surgencia ocluida

Este tipo de surgencias determinan aportes de agua en lugares concretos dentro del vertedero que pueden presentar caudales de entidad y persistencia en el tiempo. El lugar habitual de salida, cuando existen, es en el fondo de las vaguadas, al pie de los taludes excavados durante la preparación del vaso de vertido o allí donde estos taludes cortan conductos naturales por los que circula el agua subterránea. Pueden disponer de sistemas de drenaje que las conecten al sistema de drenaje de lixiviados o a un sistema de evacuación aparte o pueden entrar directamente en contacto con la masa de residuos.

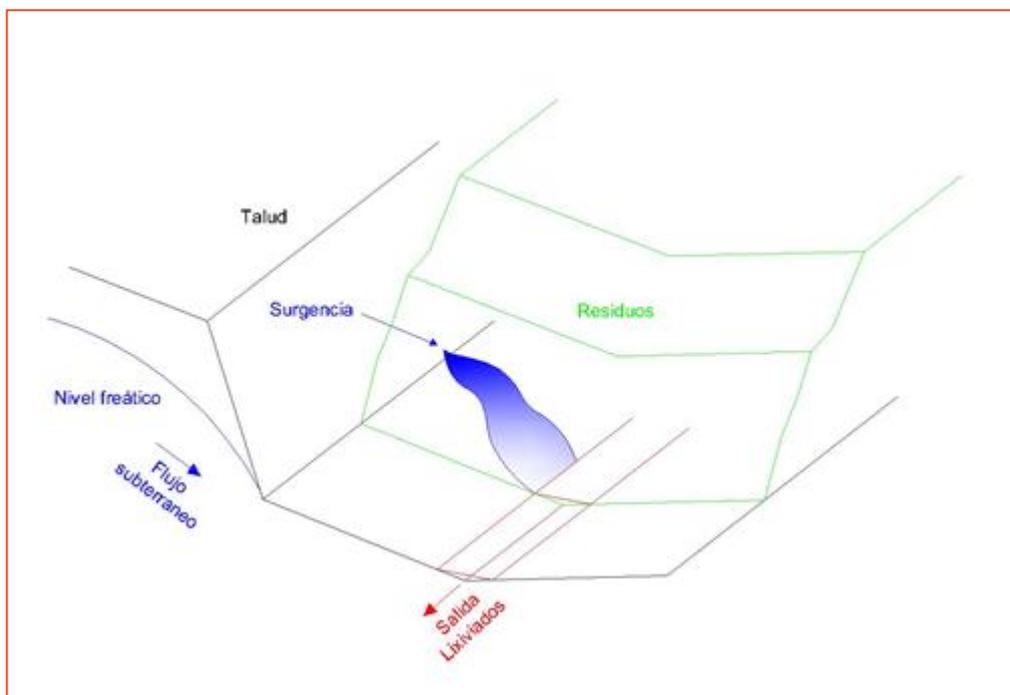


Figura 14.- Esquema ilustrativo de una surgencia ocluida que aporta agua al interior del vaso.

4.1.3.1.1.- Datos necesarios

Los datos necesarios para calcular su aporte al balance hídrico se pueden obtener de:

- Caso de existir, caudal determinado mediante aforos directos durante la realización del estudio hidrogeológico previo a la implantación del vertedero.
- Datos y controles históricos de la surgencia antes de la implantación del vertedero.
- Registros del inventario de puntos de agua de la cuenca.
- Estimación en función de la hidrogeología del emplazamiento.

4.1.3.1.2.- Cálculos

Ya que los datos de partida son directos (caudales históricos de la surgencia reales o estimados), los cálculos a realizar consistirán en deducir el caudal medio durante el período de balance a partir de los citados datos históricos o estimaciones basadas en la hidrogeología del medio y transformar caudales en volúmenes.

4.1.3.1.3.- Resultados

Los resultados se presentarán como volumen de agua de entrada, informándose, de acuerdo con el modelo conceptual correspondiente, si el agua es derivada externamente, si entra en la

red de drenaje de lixiviados o si después de entrar en el vaso circula a través del acúmulo de residuos.

4.1.3.2.- Entrada difusa

A diferencia de las posibles surgencias puntuales ocluidas, se trata en este caso de emanaciones de aguas subterráneas que afloran en toda la superficie de contacto vaso-terreno o en áreas extensas de la misma. Con el vaso de vertido en preparación, antes de comenzar el depósito de residuos, se presentan típicamente como manchas de humedad y rezumes en las paredes de los taludes, bermas y fondo, generando pequeños escurrimientos que de forma unitaria presentan un escaso caudal pero que en conjunto pueden suponer un caudal de entidad.

Según lo indicado, a falta de información concreta al respecto, inicialmente se admitirá que:

- Los vertederos que disponen de impermeabilización de fondo carecen de entradas de aguas subterráneas o de filtraciones de lixiviados hacia el terreno.
- Los vertederos que no disponen de impermeabilización de fondo presentan o entradas o salidas subterráneas o unas y otras dependiendo del momento y del lugar.

El primer aspecto a determinar, por tanto, es si en un vertedero que carece de impermeabilización de fondo se producen entradas de aguas subterráneas o filtraciones de lixiviados hacia el terreno. Para ello deberá considerarse:

- Funcionamiento hidrogeológico del área donde se ubica el vertedero incluyendo permeabilidad del terreno.
- Permeabilidad de los materiales depositados.
- Permeabilidad de los sistemas dispuestos en las paredes del vaso entre la masa de residuos y el terreno (drenaje de lixiviados, capas de tierras compactadas, etc).
- Posición de los niveles freáticos en el interior y en el exterior del vertedero.
- Posible incidencia de lixiviados sobre la calidad de las aguas de los pozos de control externos.

Una vez evaluados estos aspectos y determinada-evaluada la forma de intercambio que se produce a través de las paredes del vaso (entradas de aguas subterráneas o salidas de lixiviados), se desarrollará el cálculo que corresponda como entrada (a continuación) o como salida (en un posterior apartado).

Las innumerables configuraciones hidrogeológicas locales posibles y, dentro de ellas, las diferentes situaciones posibles de un vertedero respecto a ellas hace que sea inabordable, en una guía como la presente, el estudio y la propuesta de métodos de cálculo para la determinación de los caudales de agua subterránea que pueden acceder a un vertedero sin impermeabilización de fondo en todas y cada una de las configuraciones y situaciones. Este

cálculo se deberá basar en fundamentos y cálculos hidrogeológicos específicos para cada caso.

Sin perjuicio de lo anterior, se incluye a continuación un método simplificado de cálculo que permite obtener un orden de magnitud del caudal en una situación en la que el vertedero se comportara como una zanja drenante totalmente penetrativa en un terreno permeable cuya base impermeable coincidiera con la base del vertedero (figura 15).

4.1.3.2.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios para estimar la entrada de aguas subterráneas en el caso supuesto son los siguientes:

- Coeficientes de permeabilidad del terreno, de la capa o sistemas dispuestos sobre la pared del vaso (por ejemplo tierras compactadas, capas de gravas para el drenaje de lixiviados) y de la masa de residuos:
 - Determinados mediante ensayos.
 - Conocidos a través de otro tipo de estudios.
 - Estimados a partir de referencias bibliográficas.
- Nivel freático exterior (en el terreno):
 - Determinado mediante medición en pozos de control. Habrá que tener en cuenta la configuración geométrica del vertedero y el funcionamiento hidrogeológico natural del área y evaluar si las medidas efectuadas en los pozos de control son representativas de todo el entorno del vertedero o si sólo lo son de algunos sectores (por ejemplo cabecera y pie).
 - Dedución estimativa a partir de otro tipo de información relacionada con el medio externo (niveles o cotas de surgencias, funcionamiento hidrogeológico, etc.).
 - Caso de no disponer de datos de niveles externos ni de otra información que permita deducirlo siquiera estimativamente, se admitirá que el nivel freático en el terreno se sitúa en el borde superior del vertedero, determinándose así un máximo del posible caudal de entrada.
- Nivel freático interior (en el vertedero):
 - Determinado mediante medición en pozos de control o pozos de extracción de gas.
 - Caso de no disponer de datos de niveles internos, se admitirá que el nivel freático en el vertedero se sitúa en el fondo o base del mismo, coincidiendo con la posición del sistema de drenaje de lixiviados.
- Configuración hidrogeológica del área y dirección de flujo subterráneo en el entorno.

- Geometría (dimensiones) del vertedero.



Fotografía 9.- Pozo de control en el exterior de un vertedero para permitir la medición del nivel freático en el terreno y la toma de muestras de agua subterránea

4.1.3.2.2.- Cálculos

Para estimar la entrada difusa de aguas subterráneas en el vertedero en el supuesto concreto indicado (ver figura 15) (únicamente en este supuesto) se utilizará la siguiente expresión (CEPIS, 2002):

$$q = K \times \frac{(H^2 - Hd^2)}{R}$$

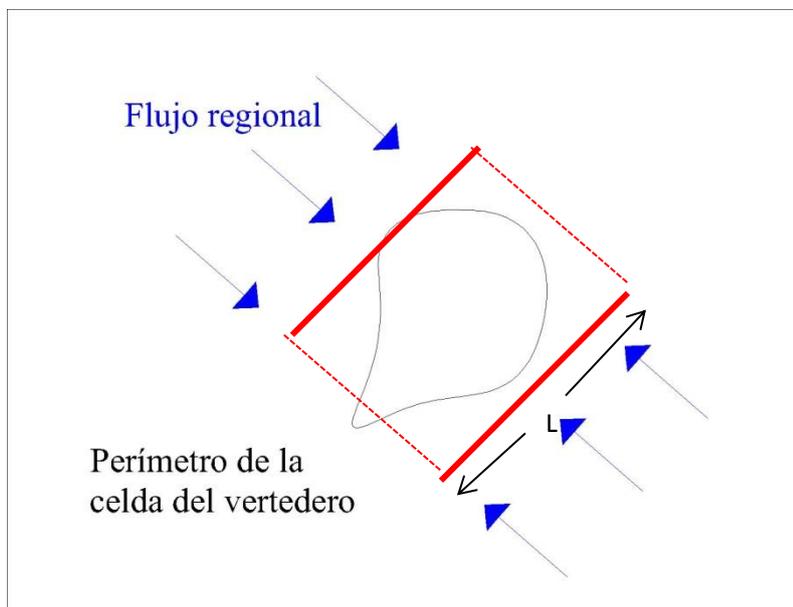
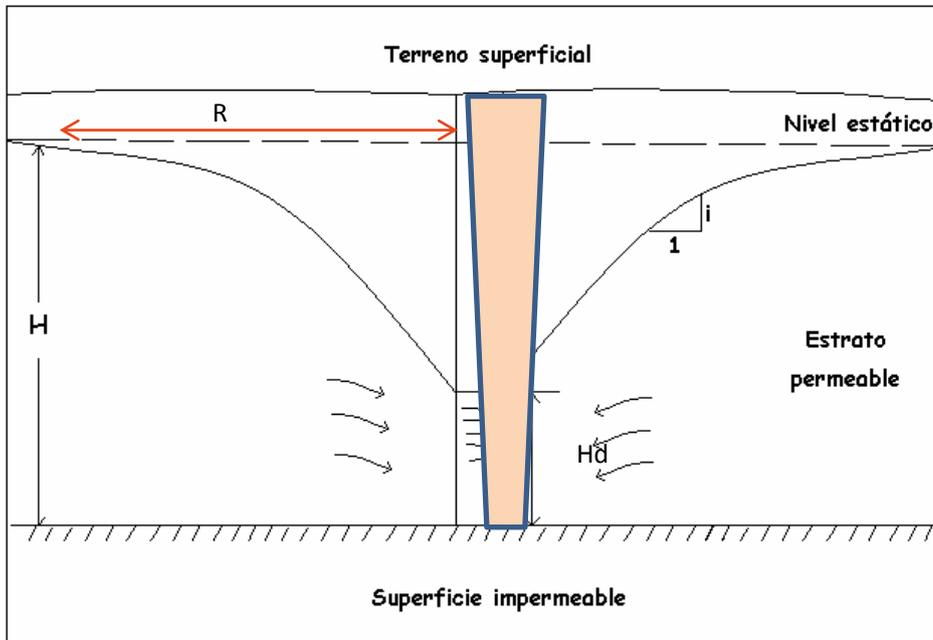


Figura 15.- Esquema ilustrativo de zanja drenante totalmente penetrativa de un terreno permeable y asociación a un tipo concreto de situación de un vertedero

siendo:

q : caudal unitario de entrada por metro lineal de zanja drenante. En un vertedero con perímetro irregular, el caudal total de entrada (Q) resultará de multiplicar este valor (q) por la longitud proyectada (L), sin considerar las irregularidades en el contorno.

K: coeficiente de permeabilidad más bajo a seleccionar entre el del terreno y el de la capa dispuesta en las paredes del vaso si es que la hubiera (por ejemplo tierras compactadas).

H: distancia entre la base y el nivel estático de la zona sin influencia del drenaje producido por la zanja (vertedero).

Hd: distancia entre la base y el nivel en el interior de la zanja (vertedero).

R: radio de influencia del drenaje provocado (distancia entre el eje del vertedero y el punto donde el descenso provocado en el nivel freático por el drenaje es nulo).

En el caso de que el nivel en el interior del vertedero se sitúe en la base del mismo, el caudal de entrada en la situación considerada será el máximo posible:

$$q = K \times \frac{(H^2)}{R}$$

$$Q = q \times L = K \times \frac{(H^2)}{R} \times L = K \times (H \cdot L) \times \frac{H}{R}$$

Ecuación esta última comparable de formas directa con la original de la ley de Darcy:

$$Q = K \times A \times I$$

siendo:

A = H.L : sección considerada (altura x longitud)

I = H/R : gradiente hidráulico

El método de cálculo expuesto es aplicable únicamente a la situación expuesta y parte de unas simplificaciones en relación con el tipo de flujo que se produce. Ofrece, por ello, una estimación del caudal, no un cálculo preciso. En el caso de que no se dispusiera de los datos precisos de H, Hd y R para la aplicación del método, deberán estos ser estimados teniendo en cuenta la configuración hidrogeológica del área y datos indirectos que puedan existir al respecto.

El cálculo de la entrada de agua subterránea en otras situaciones y configuraciones debe ser acometido a través de métodos y fundamentos hidrogeológicos cuya descripción no tiene cabida en la presente guía, pudiendo, en algunos casos, utilizar el método descrito como aproximación a la magnitud de dicha entrada.

4.1.3.2.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de la entrada difusa de agua subterránea se presentarán en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos sobre los que se ha partido para ello (situación y configuración, niveles freáticos, permeabilidad, etc.).

4.1.4.- Recarga artificial (RA)

Las entradas artificiales de agua a los vertederos pueden consistir en:

- Riegos con agua de red o aguas limpias para prevención o lucha contra incendios u otras causas (mantenimiento de viales internos, rebajamiento de la temperatura de la masa de residuos, facilitar la disposición o compactación de determinado tipo de residuos, etc.). Esta adición de agua puede efectuarse tanto mediante instalaciones fijas (bocas de riego o incendios) como móviles (camiones cisterna).
- Riegos con recirculación de lixiviados para favorecer su evaporación y la degradación de los residuos y formación de biogás. Esta adición de lixiviados puede efectuarse tanto mediante conducciones fijas como móviles (camiones cisterna).
- Vertidos de aguas provenientes de sistemas e instalaciones conexas (servicios, lavarruedas o limpieza de maquinaria, etc.) de carácter fijo o móvil.
- Vertidos de lixiviados propios o ajenos.
- Vertidos del condensado del biogás.
- Fugas en depósitos y conducciones que alcancen finalmente el vaso de vertido. Las fugas pueden afectar a:
 - Instalaciones fijas.
 - Instalaciones temporales y/o móviles como, por ejemplo, las de bombeo de agua derivada de cubiertas intermedias.

En todos los casos el cálculo de estas entradas debe basarse en datos concretos obtenidos con aparatos y sistemas de medición. Se deberá tener en cuenta el lugar de toma y el lugar de aplicación del agua o de los lixiviados de cara a la elaboración del modelo conceptual, determinando si se trata de agua de origen totalmente externo al sistema o de agua que ya ha sido considerada de alguna forma en otras partes del balance. De esta forma, y de cara al modelo conceptual:

- El riego con agua externa representa una entrada directa más (como si se tratara de precipitación).

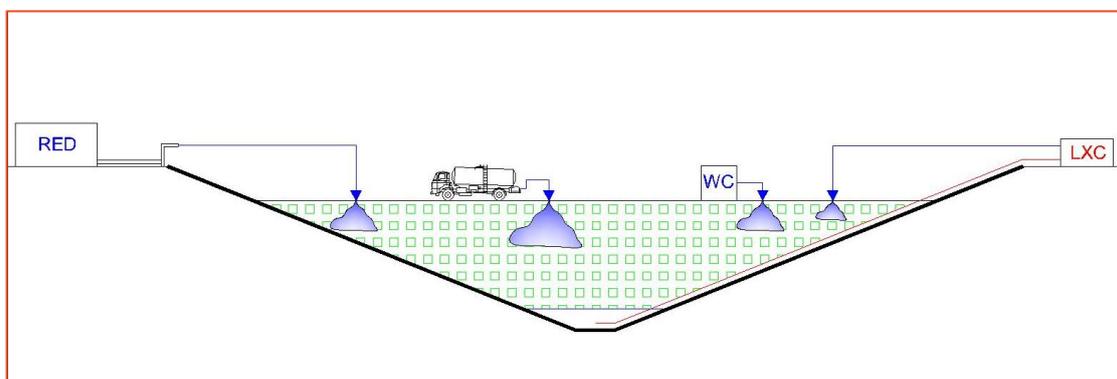


Figura 16.- Esquema ilustrativo de posibles entradas de agua por recarga artificial

- La recirculación de lixiviados se modelizará teniendo en cuenta el lugar de toma de los lixiviados y su relación con el punto de control de la evacuación general final de los mismos, debiendo disponerse de caudalímetros, contadores o registros de volúmenes tanto respecto a los lixiviados que se recirculan como a los lixiviados que se evacúan externamente:
 - Si el lugar de toma de los lixiviados para la recirculación se ubica antes del caudalímetro o control de la evacuación general final y la entrada por recirculación se cuantifica como entrada absoluta, se estarán contabilizando como entrada los mismos lixiviados varias veces sin que “aparentemente” esta entrada salga del vertedero ya que no pasan por el punto de control final.
 - Si el lugar de toma de los lixiviados para la recirculación se ubica después del control de la evacuación general final, quedaría de manifiesto tanto la entrada de los lixiviados reciclados (control propio en la red de recirculación) como su salida (control de la salida final).
- Los vertidos de aguas provenientes de sistemas e instalaciones conexas (servicios, lavarruedas o limpieza de maquinaria, etc.), de carácter fijo o móvil, representarán en la generalidad de los casos entradas absolutas de agua (como si fuera de una escorrentía externa) salvo que el origen del agua fuera escorrentía generada en la superficie del propio vertedero.
- Los vertidos de lixiviados provenientes de instalaciones propias o ajenas representarán entradas absolutas de agua siempre que, en el caso de lixiviados propios, hayan sido ya contabilizados como salida en los puntos de control.
- Los vertidos de los condensados del biogás representarán entradas de un tipo de agua que se contabiliza como salida (vapor de agua en el biogás) por lo que, caso de existir, así deberá considerarse en la modelización conceptual.
- Las fugas de instalaciones fijas o móviles se contabilizarán dependiendo del tipo de red y lugar en el que se produzcan:
 - Si se produce en una red externa (de agua por ejemplo), se tratará de una entrada directa más.
 - Si se produce en la red de lixiviados, se tendrá en cuenta la posición del punto de fuga respecto al punto de control de los caudales de lixiviados en el sentido indicado para la recirculación.
 - Si se produce en un sistema de evacuación de aguas del vaso, constituirá una entrada más, debiendo modelizarse bien esta situación para evitar contar dos veces el mismo agua.

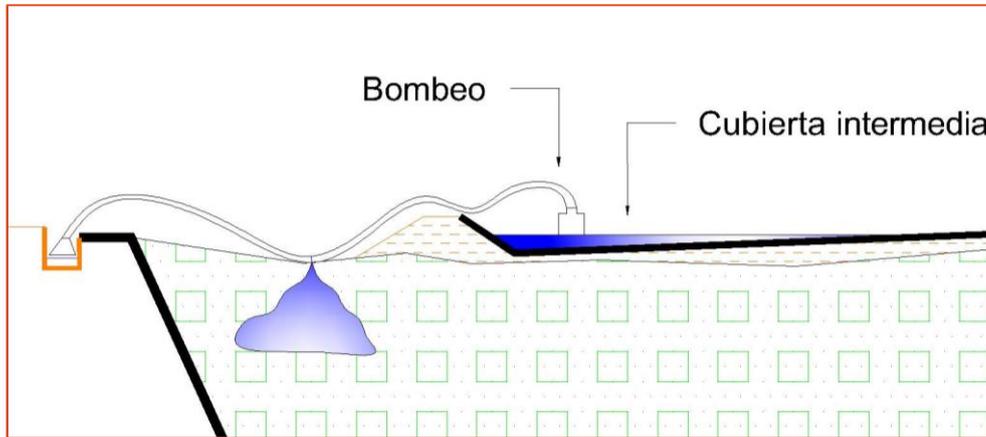


Figura 17.- Esquema ilustrativo de la entrada de agua por una fuga en el sistema de evacuación del agua de escorrentía generada sobre una cubierta intermedia

4.1.4.1.- Datos de partida

Los datos de partida para el cálculo de la recarga artificial serán datos reales obtenidos mediante:

- Caudalímetros o contadores insertados en las conducciones de agua externa para el riego, servicios, lavarruedas, etc.
- Caudalímetros o contadores para el control de la recirculación de lixiviados.
- Contabilidad del volumen aportado mediante cisternas (tipo, origen, destino, viajes realizados y volúmenes unitarios).
- En el caso de fugas: tipo, duración de la misma y caudal implicado.

Adicionalmente, y en el caso de riegos, se deberá contar con:

- Datos meteorológicos.
- Superficies de aplicación de los riegos.



Limpieza de maquinaria y vehículos



Riego de residuos



Operaciones de limpieza



Servicios, lavaderos, etc.



Condensados de biogás



Lavarruedas



Fuga en conducciones

Fotografías 10a a 10g.- Algunas de las posibles formas de entrada de agua por recarga artificial

4.1.4.2.- Cálculos

Se distinguirán dos tipos de entrada:

- Riego sobre superficies más o menos extensas asimilables a una precipitación, efectuados con instalaciones fijas o semimóviles (aspersores), móviles (cisternas) o de cualquier tipo. En este caso, el volumen total contabilizado en caudalímetros, contadores y sistemas de medición y registro de las redes de riego deberá ser minorado descontando la evapotranspiración correspondiente. Se calculará, entonces, por comparación con la lluvia útil derivada de una precipitación (LLU), el “riego útil” (RIU) que corresponde a través de los siguientes pasos:
 - Determinar el volumen de agua o lixiviado utilizado en el riego y la superficie de aplicación.
 - Calcular el equivalente en mm del riego en la superficie considerada (como si fuera una precipitación)(RI).
 - Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).
 - Restar ambas cantidades: $RIU = RI - ETR$.
 - Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (RIU) aplicada a la superficie regada.
- Vertidos o inyecciones en lugares concretos asimilables a la entrada de escorrentía superficial en un punto (no a través de una amplia superficie como los riegos). Se admitirá que no existe evapotranspiración y se tomará como entrada el volumen total contabilizado en caudalímetros, contadores y sistemas de medición.

4.1.4.3.- Resultados

Los resultados se presentarán en unidades de volumen para el período considerado teniendo en cuenta lo indicado anteriormente respecto a la modelización conceptual de este término. Se detallará en cada caso el tipo de recarga (continua, semicontinua, esporádica, etc.) así como el origen del agua o de los lixiviados aplicados.

4.1.5.- Humedad del residuo y de otros materiales depositados (HR)

Los residuos y otros materiales depositados en el vertedero (por ejemplo tierras para viales internos, cubriciones, etc.) presentan en el momento de su entrada una cierta humedad constituyendo, así, una fuente de entrada de agua al vertedero. Dado que en los vertederos está prohibido el depósito de residuos líquidos, este término se refiere siempre a la humedad, es decir, al agua adherida a las partículas sólidas que no está libre ni circula libremente. La legislación señala, además, el límite máximo de humedad que puede contener un residuo para ser admitido en un vertedero (65 %), por lo que esta cifra representa teóricamente el límite máximo de la cantidad de agua que puede entrar con los residuos y otros materiales.

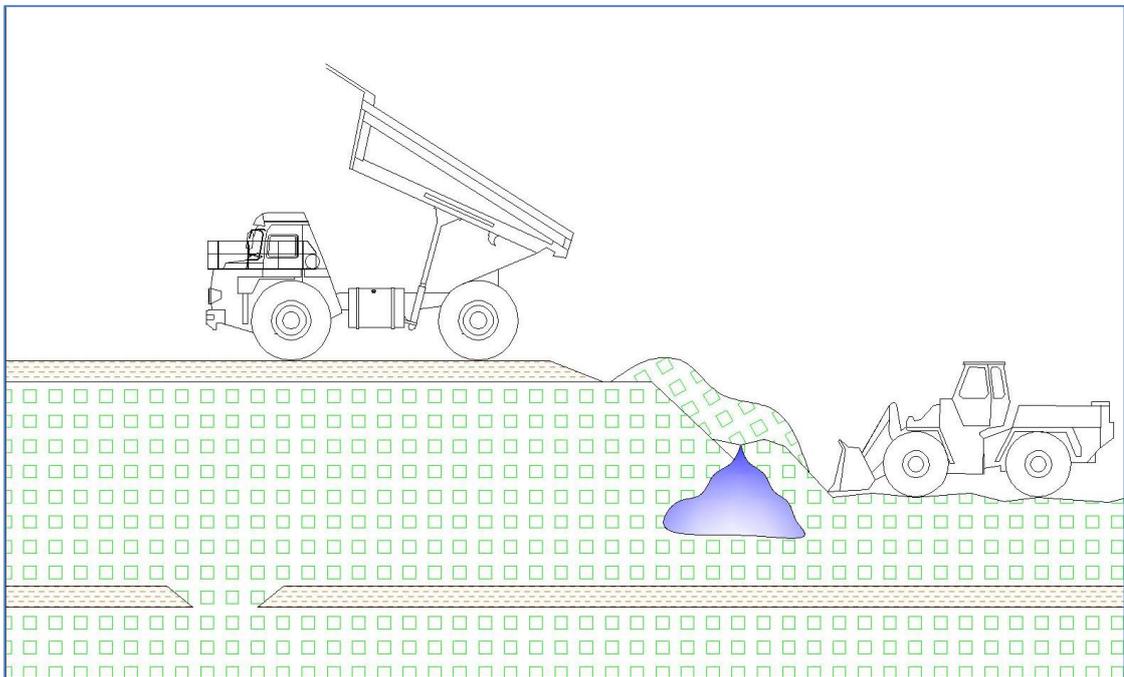


Figura 18.- Esquema ilustrativo de la entrada de agua en forma de humedad de los residuos y otros materiales depositados. En realidad la humedad del residuo no circula libremente generando un flujo descendente como el de la figura pero ha querido destacarse el concepto de entrada que representa

4.1.5.1.- Datos de partida

Los datos de partida para el cálculo de la entrada de agua en el vertedero como humedad del residuo son:

- Resultados de ensayos de laboratorio sobre los residuos y otros materiales que entran en el vertedero.
- Estimaciones basadas en información previa del mismo vertedero y tipo de residuo o material.
- Estimaciones basadas en información bibliográfica de residuos y materiales comparables.
- Cantidades de residuos y otros materiales que han entrado en el período considerado.

En la bibliografía existen diferentes estimaciones genéricas de la humedad de residuos y otros materiales a aplicar en ausencia de datos de ensayos de laboratorio o datos previos del mismo vertedero y tipo de residuos. En esta circunstancia se tomarán los valores que se indican en las tablas siguientes y que corresponden a:

- Residuos urbanos.
- Residuos de la industria papelera.
- Materiales minerales de cubrición u otros usos.

Caso de que el tipo de residuo o material depositado no se encuentre en las tablas que siguen, se tomará por comparación el valor de aquel que pueda resultar representativo.

<i>Tabla 6.- Valores típicos de humedad de residuos urbanos (peso agua/peso total)(extraído de TCHOBANOGLIOUS y KREITH, 2002)</i>		
Tipo de residuo	Rango de humedad (%)	Valor típico de humedad (%)
Residuos urbanos	15-40	20
Restos de alimentos	50-80	70
Papel y cartón	4-10	6
Plásticos	1-4	2
Textiles	6-15	10
Caucho, goma...etc.	1-4	2
Cuero	8-12	10
Restos de jardinería	30-80	60
Madera	15-40	20

Tabla 6.- Valores típicos de humedad de residuos urbanos (peso agua/peso total)(extraído de TCHOBANOGLIOUS y KREITH, 2002)

Tipo de residuo	Rango de humedad (%)	Valor típico de humedad (%)
Vidrio	1-4	2
Envases de hojalata	2-4	3
Metales ferrosos y no ferrosos	2-6	3
Cenizas, ladrillos, hormigón, asfalto, etc	6-12	8

Respecto a los residuos papeleros, los valores típicos de humedad son los siguientes.

Tabla 7.- Valores típicos de humedad de los principales residuos papeleros (peso agua/peso total)(ASPAPPEL, 2007)

Tipo de residuo	Valor típico de humedad (%)
Residuos de corteza y madera	35
Lodos de lejías verdes procedentes de la recuperación de lejías de cocción	50
Lodos de destintado procedentes del reciclado de papel	40
Desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón	58
Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado	28
Residuos de lodos calizos.	30
Desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado, obtenidos por separación mecánica	50
Media sectorial	51

Las tierras empleadas como material de cubrición habitualmente presentan valores:

Tabla 8.- Valores típicos de humedad de los materiales de cubrición (volumen agua/volumen

<i>total)(a partir de FAO, 2006)</i>		
Tipo	Rango de humedad (%)	Valor típico de humedad (%)
Arenas	2-17	9
Limos	12-36	24
Arcillas	20-40	30

A la hora de calcular el volumen de agua que entra como humedad del residuo y de otros materiales, y utilizar posteriormente este valor para evaluar la variación de la humedad en el interior del vertedero a lo largo del período deben tenerse en cuenta las unidades en que está expresada la humedad, en cada caso, dependiendo del origen de los datos de partida. En ocasiones la humedad se expresa como relación de volúmenes (volumen agua/volumen total) mientras que en otros casos se emplea como relación de pesos, sea respecto al peso húmedo (peso agua/peso total), sea respecto al peso de las partículas sólidas secas (peso agua/peso partículas sólidas secas). Dependiendo del tipo de unidades será necesario, por tanto, efectuar las transformaciones a volumen que correspondan teniendo en cuenta la densidad o el peso específico.

Respecto a la humedad del residuo y los posteriores procesos de variación de la misma en el interior del vertedero, cabe señalar que existe una parte que no es movilizable en condiciones naturales (humedad residual) y que, por tanto, quedará en principio fijada de forma indefinida al residuo y otros materiales. Esta parte está definida por el denominado *punto de marchitez permanente*. La determinación de la humedad en laboratorio en general se efectúa utilizando un horno (condiciones no naturales) hasta dejar la muestra seca por completo, más allá del citado punto de marchitez.

4.1.5.2.- Cálculos

Los cálculos consistirán en la determinación del volumen de entrada de agua multiplicando las cantidades de residuos y otros materiales que han sido depositados por sus porcentajes de humedad. En el caso de que hayan entrado diferentes tipos de residuos y/o materiales se calculará la cantidad de agua correspondiente a cada uno de ellos.

A la hora de desarrollar los cálculos se deberá tener en cuenta que la humedad con la que entra el residuo en el vertedero puede variar respecto a la humedad ensayada en laboratorio y/o con la que sale del productor si se ha almacenado en un lugar donde se ha permitido su hidratación o secado o si durante el transporte se ha humedecido por ir en un vehículo descubierto durante una lluvia más o menos intensa.

4.1.5.3.- Resultados

Los resultados se expresarán como volúmenes de entrada de agua en el período considerado, diferenciando tanto cantidades como volúmenes de agua para los diferentes tipos de residuos y materiales. Se detallará el origen de los valores de humedad aplicados (tablas anteriores, ensayos, etc.) y se especificará cualquier aspecto relevante que haya tenido lugar en el momento del depósito (residuos especialmente húmedos más allá de los valores generales estimados, etc.).

4.2.- Salidas

Las salidas se calcularán de acuerdo con los procedimientos que sintéticamente se indican en la siguiente tabla y se desarrollan en los siguientes apartados.

<i>Tabla 9.- Metodología del cálculo de las salidas</i>	
Datos de partida	Cálculos
Evapotranspiración (ETR)	
Lisímetro	Datos directos del lisímetro.
Tanque evaporimétrico	Método de la FAO Penman-Monteith
Datos meteorológicos del observatorio	
Características del terreno	
Flujo superficial derivado de la precipitación sobre cubiertas y sellados (FSP)	
Caudalímetros-contadores.	Sin cálculo. Datos directos de caudalímetros-contadores
Datos meteorológicos del observatorio.	
Datos u observaciones puntuales – directas	Cálculo de lluvia útil sobre las correspondientes superficies vertientes y estimación subsiguiente de la escorrentía superficial
Superficies.	Estimaciones basadas en observaciones puntuales y régimen meteorológico-hidrológico
Lixiviados controlados (LXC)	
Caudalímetros-contadores	Sin cálculo. Datos directos

<i>Tabla 9.- Metodología del cálculo de las salidas</i>	
Datos de partida	Cálculos
Lixiviados incontrolados (LXI) Surgencias de lixiviados en superficie – Filtraciones subterráneas de lixiviados hacia el terreno – Fugas en conducciones o depósitos	
Datos u observaciones puntuales-directas Caudalímetros-contadores. Permeabilidad del terreno y de la masa de residuos Niveles freáticos Información sobre fugas.	Estimaciones basadas en observaciones puntuales y régimen meteorológico-hidrológico. Datos directos. Mediante ley de Darcy.
Vapor de agua con el biogás (VBG)	
Volumen de gas emitido Ensayos-análisis del gas emitido si los hay	Datos directos basados en los volúmenes de gas emitidos y en su contenido en agua determinado mediante ensayos o estimado de acuerdo con referencias previas. Estimaciones basadas en la cantidad de residuos y el agua interviniente en los procesos de generación y emisión

4.2.1.- Evapotranspiración (ETR)

De forma general, la evapotranspiración constituye, junto con los lixiviados, una de las principales salidas de agua del sistema. Su determinación precisa presenta no pocas dificultades ya que está influenciada por un sinnúmero de factores meteorológicos (temperatura, humedad, viento, tipo de precipitación, etc.) y características de la superficie desde la que se evapotranspira el agua (densidad y tipo de vegetación, tipo de suelo incluyendo su estado de humedad, etc.).

Evapotranspiración designa la liberación de agua a la atmósfera a través de dos procesos: evaporación y transpiración de las plantas. En un vertedero pueden existir típicamente cuatro tipos de superficie (cada una con sus propiedades) y, por tanto, cuatro tipos generales de evapotranspiración:

- Superficie expuesta de residuos, sin vegetación, en la que el proceso que se produce es únicamente la evaporación desde superficies de agua libres (charcos y regueros), desde la propia superficie mojada o húmeda y desde la parte más superficial del interior del acúmulo (primeros centímetros-decímetros).

- Superficie expuesta de materiales minerales para cubiertas y viales (tierras), sin vegetación, en la que el proceso que se produce es también la evaporación desde superficies de agua libres (charcos y regueros), desde la propia superficie mojada o húmeda y desde la parte más superficial del interior de la capa (primeros centímetros-decímetros).
- Superficie expuesta de algún tipo de impermeabilización (geomembrana por ejemplo) en la que se produce la evaporación desde dicha superficie.
- Superficie con vegetación, bien sea sobre los propios residuos bien sobre cualquier otro tipo de material, en la que se dan ambos procesos (evaporación y transpiración).

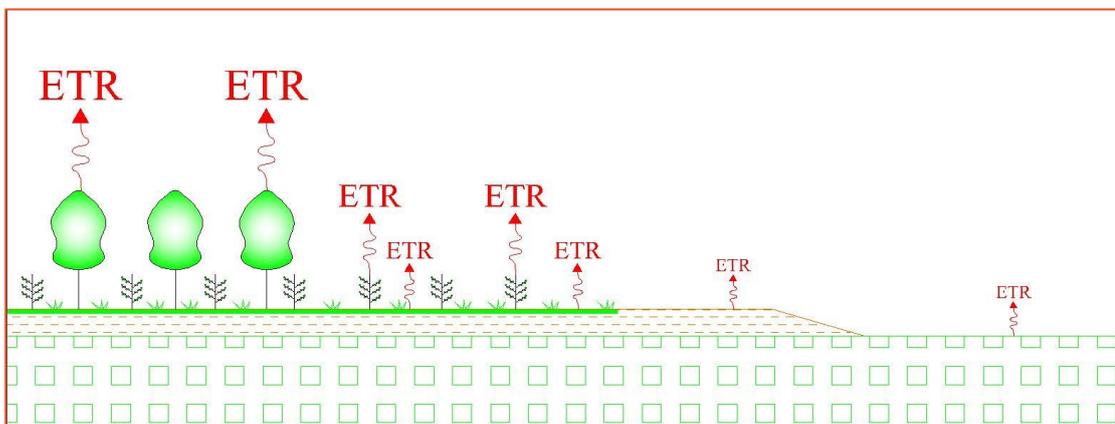


Figura 19.- La evaporotranspiración se produce en todo tipo de superficies, con vegetación (evaporación y transpiración) o sin ella (evaporación)

En relación con la evaporotranspiración se emplean una serie de términos y conceptos, derivados en su mayor parte de la forma en que se calcula este parámetro, que conviene definir previamente:

- **Evapotranspiración:** es el fenómeno mediante el que se libera agua a la atmósfera a través de dos procesos: evaporación y transpiración por las plantas. Se expresa habitualmente en mm (como la precipitación).
- **Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0):** es la máxima evaporotranspiración que se produciría si un determinado tipo de superficie estándar o de referencia no tuviera restricciones de agua. La superficie de referencia es un pasto de características específicas.
- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c):** es la máxima evaporotranspiración que se produciría si una superficie con un cultivo o vegetación diferente de la de referencia no tuviera restricciones de agua.
- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) o evaporotranspiración real del cultivo (ETR):** es la evaporotranspiración que realmente se

produce teniendo en cuenta las disponibilidades reales de agua (precipitación y riegos si los hay y las propias condiciones de humedad del material superficial).

- **Necesidad de agua de los cultivos:** es el volumen de agua del que deben disponer los cultivos (o vegetación en general) para crecer en buenas condiciones. No es lo mismo que la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ya que cuenta sólo el efecto de la transpiración vegetativa. Una superficie desnuda, sin vegetación, presenta evapotranspiración (evaporación en este caso) pero no tiene necesidad de agua de cultivo.
- **Balance del suelo:** es el método de cálculo de la evapotranspiración real (ETR) a partir de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y de la precipitación realmente caída que tiene en cuenta, además, que parte de la evapotranspiración consume agua de la humedad de la capa más superficial del terreno.

El cálculo de la evapotranspiración puede efectuarse de tres formas:

- Utilizando un dispositivo, denominado **lisímetro**, que reproduce las condiciones reales del lugar conformando un campo experimental. Se trata, grosso modo, de un cajón colocado en una cata excavada en el suelo en el que se disponen los mismos materiales que componen el terreno original, incluyendo superficialmente su vegetación característica si existe. Mediante aparatos de medición se controla la precipitación, las variaciones de humedad en el suelo (si existen) y el agua recogida en el fondo del cajón determinándose la evapotranspiración como la diferencia entre estas magnitudes.
- Utilizando un **tanque de evaporación**, recipiente abierto que recoge y acumula la precipitación (a intervalos determinados, normalmente diarios) y en el que se mide el descenso en dicha agua acumulada debido a la evaporación. Aplicando un coeficiente sobre este dato se calcula entonces la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) para posteriormente, con la intervención de otros coeficientes, determinar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de la superficie objeto de estudio. Finalmente se efectúa el balance del suelo para determinar la evapotranspiración real (ETR).
- A partir de **datos meteorológicos**, determinándose la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) para posteriormente, con la intervención de otros coeficientes, determinar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de la superficie objeto de estudio. Finalmente se efectúa el balance del suelo para determinar la evapotranspiración real (ETR).

Idealmente, la potencial exactitud del cálculo de la evapotranspiración sigue el orden de métodos indicado: lisímetro – tanque de evaporación – datos meteorológicos. No obstante, todos los métodos tienen sus limitaciones derivadas de la representatividad del dispositivo, de los datos meteorológicos y de los coeficientes que se utilizan.

Sea cual sea el sistema elegido, **se calculará la evapotranspiración diaria (mm)** con independencia de que los resultados globales se presenten como evapotranspiración total a lo largo del período.

4.2.1.1.- Cálculo con lisímetro (campo experimental)

Un lisímetro es un gran recipiente que encierra una determinada y representativa porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo dentro de la superficie cuya evapotranspiración se desea conocer (recipiente enterrado).



Fotografías 11a a 11c.- Esquema general y disposición de un lisímetro (campo experimental)

Los lisímetros se agrupan en general en dos categorías:

- De pesada. El recipiente dispone de un sistema para pesarlo (sistema hidráulico o balanza de precisión) de tal forma que la realización de pesadas, junto con los datos de precipitación de un observatorio contiguo, permiten determinar qué cantidad de agua se ha evapotranspirado y devuelto a la atmósfera sin incrementar el peso del recipiente.
- De drenaje. El recipiente dispone de un sistema de drenaje con salida en el fondo y posibilidad de aforo del volumen infiltrado, de tal forma que la evapotranspiración se evalúa de forma indirecta restando el volumen recogido de la precipitación caída, debiendo tenerse en cuenta, entonces, las variaciones en el contenido de humedad del suelo. Dentro de los de drenaje se pueden encontrar lisímetros con o sin succión. La diferencia entre estos es que los de drenaje sin succión recolectan el agua que se filtra naturalmente hacia abajo por los suelos, es decir, el agua que se mueve por efecto de la gravedad, y en los lisímetros de drenaje con succión se aplica una succión para extraer el agua del suelo a través de un material poroso.

Los mayores problemas de representatividad de los lisímetros se relacionan con:

- La dificultad de reproducir en ellos el perfil del sustrato que queremos representar. Esta dificultad se acrecienta en el caso de tratar de representar los residuos de un vertedero que, en sí mismos, no presentan condiciones iguales en todo él.
- La incidencia de factores relacionados con las dimensiones, características de sus paredes y ubicación exacta del lisímetro, de tal forma que las paredes mismas pueden incidir en la circulación del agua en la zona.
- La toma en consideración de la escorrentía superficial generada, debiendo disponer de sistemas que permitan su recogida sin que se evacúe a otras zonas.
- La necesidad de un mantenimiento adecuado que evite obstrucciones y fallos en sus sistemas de medición.

4.2.1.1.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios incluyen:

- Datos de precipitación provenientes de un observatorio situado en el lugar.
- Datos de los lisímetros, diferentes según su tipología (pesos determinados con las pesadas, volúmenes de agua recogidos), teniendo en cuenta específicamente en los lisímetros de drenaje las variaciones que puede haber en la humedad del suelo.
- Datos de las superficies (m^2) consideradas en el modelo conceptual del vertedero.

4.2.1.1.2.- Cálculos

Los cálculos para determinar la evapotranspiración serán los que correspondan a cada tipo de lisímetro y consistirán inicialmente en restar pesos o volúmenes respecto de las cantidades precipitadas. Estos resultados se transformarán en volumen por unidad de superficie del lisímetro y/o mm y se extrapolarán a las superficies consideradas en el modelo conceptual del vertedero. Cada lisímetro está orientado a determinar la evapotranspiración de un determinado tipo de superficie (de residuos, de suelos, etc.) por lo que la extrapolación directa únicamente se podrá efectuar en relación con la superficie representada.

Los datos de evapotranspiración serán en cualquier caso diarios aunque para el balance global se totalicen volúmenes de todo el período.

4.2.1.1.3.- Resultados

Los resultados se presentarán como volúmenes evapotranspirados a lo largo del período de referencia del balance hídrico.

4.2.1.2.- Cálculo con tanque de evaporación

Un tanque de evaporación consiste en un recipiente abierto que recoge y acumula la precipitación (a intervalos determinados, normalmente diarios) y en el que se mide el descenso en dicha agua acumulada debido a la evaporación.

La medición obtenida no representa en ningún caso la evapotranspiración real que se produce en la zona.



Fotografía 12.- Tanque de evaporación

Los tanques de evaporación están estandarizados existiendo dos tipos principales: tanques Clase A y tanques Tipo Colorado, cada uno de ellos con sus dimensiones y características normalizadas. La posición de los tanques está también normalizada en cuanto a relieve y vegetación circundante, altura respecto a la superficie, etc.

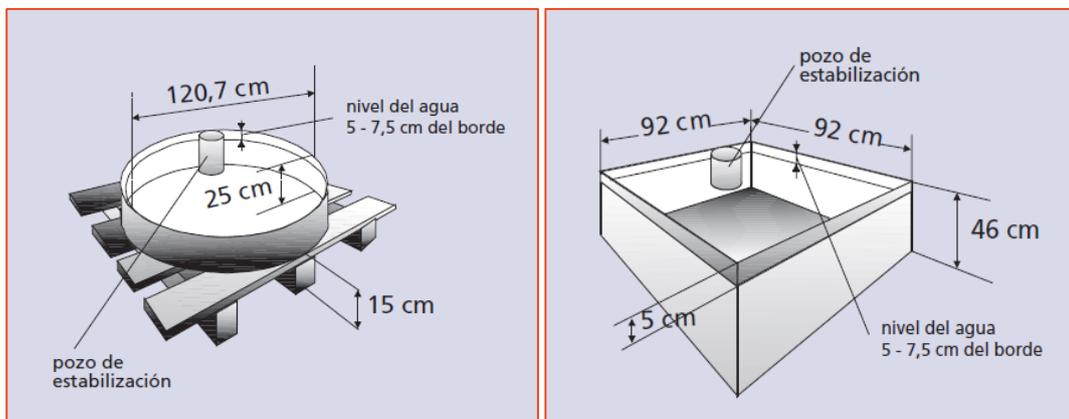


Figura 20.- Tanques de evaporación Clase A (izquierda) y Tipo Colorado (derecha)

4.2.1.2.1.- Datos de partida

Los datos de partida para el cálculo de la evapotranspiración a partir de tanques de evaporación son:

- Datos diarios de la evaporación en el tanque.
- Coeficientes específicos de cada tipo de tanque y de su posición (para hallar ET_0).
- Coeficientes para obtener la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de la superficie considerada a partir de ET_0 .
- Datos meteorológicos.
- Datos relativos a la humedad y capacidad de campo de los materiales que conforman la superficie analizada (para balance del suelo).



Fotografía 13.- Tanque de evaporación en el observatorio meteorológico de un vertedero. Su posición es inadecuada (relieve circundante, árbol, altura respecto a la superficie)

4.2.1.2.2.- Cálculos

El cálculo de la evapotranspiración real a partir de los datos de un tanque de evaporación se efectúa sucesivamente:

- Aplicando sobre la cantidad de agua evaporada una serie de coeficientes para obtener el valor la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0).
- Aplicando una serie de coeficientes sobre ET_0 para obtener el valor de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de la superficie, distinta de la de referencia, cuya evapotranspiración queremos conocer.

- Efectuando un balance del suelo a partir de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), la precipitación real que se ha producido y las características de humedad y retención de la capa más superficial.

El procedimiento de cálculo a partir únicamente de datos meteorológicos que se detalla más adelante coincide básicamente con este ya que comienza con el cálculo de ET_0 para, posteriormente, desarrollar el resto de pasos de forma idéntica. La única diferencia es que mientras que con el tanque de evaporación dicha ET_0 se calcula a partir de los datos reales de evaporación medidos en el tanque, en el otro caso se calcula a partir sólo de los datos meteorológicos.

Con el objeto de no repetir innecesariamente las partes comunes de ambos métodos, se definirá aquí cómo calcular la ET_0 a partir de los datos del tanque remitiendo para el resto del cálculo a lo que se indica en el apartado de cálculo con datos meteorológicos.

El cálculo de la ET_0 (mm) se efectuará aplicando directamente un coeficiente (K_p) sobre la cantidad evaporada en el tanque (E_{vp} mm):

$$ET_0 = K_p \cdot E_{vp}$$

Los coeficientes a aplicar varían dependiendo del tipo de tanque y de su posición, existiendo en este último sentido dos posibles casos (A y B) según se indica en la siguiente figura.

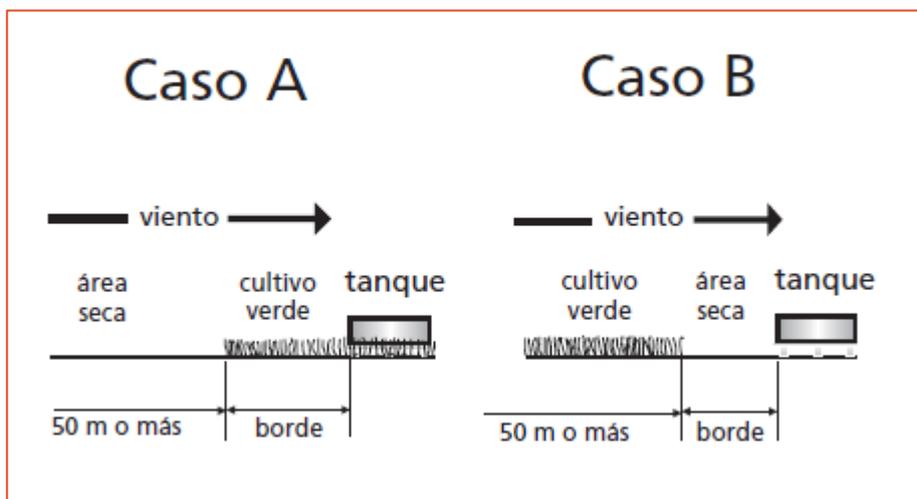


Figura 21.- Casos considerados para la asignación del coeficiente de tanque

Teniendo en cuenta esta disposición, el coeficiente K_p a aplicar dependerá de la humedad relativa (HR) y de la velocidad del viento. Los valores a aplicar para el tanque Clase A, que es el de más frecuente utilización, se indican en la tabla siguiente.

Tabla 10.- Coeficientes K_p del tanque Clase A en función de la humedad relativa, distancia del cultivo a barlovento (D Bar) y velocidad media del viento.

Velocidad media del viento (m/s)	Caso A (tanque sobre vegetación)				Caso B (tanque sobre suelo desnudo)			
	D Bar (m)	Humedad relativa (%)			D Bar (m)	Humedad relativa (%)		
		< 40	40-70	> 70		< 40	40-70	> 70
< 2	1	0,55	0,65	0,75	1	0,7	0,8	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,6	0,7	0,8
	100	0,7	0,8	0,85	100	0,55	0,65	0,75
2 – 5	1	0,5	0,6	0,65	1	0,65	0,75	0,8
	10	0,6	0,7	0,75	10	0,55	0,65	0,7
	100	0,65	0,75	0,8	100	0,5	0,6	0,65
5 – 8	1	0,45	0,5	0,6	1	0,6	0,65	0,7
	10	0,55	0,6	0,65	10	0,5	0,55	0,65
	100	0,65	0,7	0,75	100	0,45	0,5	0,6
> 8	1	0,4	0,45	0,5	1	0,5	0,6	0,65
	10	0,45	0,55	0,6	10	0,45	0,5	0,55
	100	0,5	0,6	0,65	100	0,4	0,45	0,5

Una vez calculada ET_0 se procedería según se indica en el apartado del cálculo de la evapotranspiración con datos meteorológicos.

4.2.1.2.3.- Resultados

Los resultados de la evapotranspiración real (ETR) calculada se indicarán en mm/día y se totalizarán como volumen para todo el período de balance.

4.2.1.3.- Cálculo con datos meteorológicos

Existen numerosos métodos empíricos de cálculo de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos. Los valores que se obtienen con ellos presentan a veces notables diferencias que hacen dudar de la idoneidad de los procedimientos utilizados y variables consideradas.

Muchos de ellos fueron desarrollados con el objeto de estudiar las necesidades de riego de los cultivos mostrando, cuando han sido contrastados con datos reales de experimentos en parcelas, una notable dispersión en sus resultados respecto a las mediciones directas efectuadas en estos campos de prueba. Para tratar de unificar criterios y dotar al sector agrícola de un procedimiento estándar, la FAO reunió a un panel de expertos con el objeto de establecer un método “definitivo” para el cálculo de la evapotranspiración. El método establecido, FAO Penman-Monteith, será el que se utilice para calcular este término en el balance hídrico de un vertedero.

El método consiste en:

- Determinar, a partir de datos meteorológicos, la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) que, como se ha indicado, representa la evapotranspiración potencial de una superficie de referencia o estándar hipotética constituida por un pasto con unas determinadas características de altura, albedo, etc.
- Determinar, a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de la superficie que estamos considerando realmente (no de la superficie de pasto de referencia). Esta determinación se efectúa aplicando directamente unos coeficientes sobre ET_0 teniendo en cuenta el tipo de superficie real (tipo de vegetación, densidad, etc.).
- Efectuar el balance del suelo con los datos de precipitación (PR), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y del contenido de humedad del suelo dado que la evapotranspiración afecta a su capa más superficial.

4.2.1.3.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios incluyen:

- Datos meteorológicos (valores diarios y/o máximos/mínimos y/o promedios):
 - Temperatura.
 - Humedad.
 - Viento.
 - Presión atmosférica.
 - Radiación (equivale al término radiación solar R_s del método de cálculo).
- Datos de las superficies consideradas:
 - Tipo
 - Área

- Humedad, punto de marchitez y capacidad de campo.

Los datos meteorológicos provendrán idealmente en su totalidad del observatorio del vertedero. Dado que la medida de la radiación requiere quizás de sensores específicos y procedimientos de manejo y control más intensivos, respecto a este parámetro podrían utilizarse datos de un observatorio externo representativo.

En la CAPV, a falta de datos del observatorio del vertedero, puede acudir a observatorios representativos de la red de Euskalmet o de otra red oficial (Diputaciones Forales por ejemplo). En el caso de Euskalmet puede accederse a datos diarios a través de <http://www.euskalmet.euskadi.eus> en el apartado: "Datos de estaciones >> Datos estadísticos de cada día".

Datos estaciones

Estadísticos diarios

Mapa sensible de la red de estaciones meteorológicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco

● Plataformas
● Meteorológicas
● De aforo
● De calidad
● Ver todo

Datos estaciones meteorológicas

Fecha: 9 / 2 / 2015 Hora: Última hora

Estación: C040 - Gasteiz

C040 - Gasteiz Lunes, 09 de febrero de 2015

11	Velocidad media del viento			11 m.
✗	Media *	9,5	km/h	
✗	Máxima diezminutaria *	16,9	km/h	
12	Dirección media del viento			11 m.
✗	Media vectorial *	15	°	
✗	Persistencia en 16 sectores *	00:50	hh:mm	
14	Velocidad máxima del viento			11 m.
✗	Media *	23,2	km/h	
✗	Máxima diezminutaria *	31,4	km/h	00:50 h.
16	Sigma de la velocidad del viento			11 m.
✗	Media *	4,2	km/h	
✗	Máxima diezminutaria *	6,2	km/h	00:50 h.
✗	Mínima diezminutaria *	3,0	km/h	00:40 h.
17	Sigma de la dirección del viento			11 m.
✗	Media *	41	°	
✗	Máxima diezminutaria *	88	°	01:00 h.
✗	Mínima diezminutaria *	14	°	00:00 h.
21	Temperatura del aire			6,2 m.
✗	Media *	3,2	°C	
✗	Máxima diezminutaria *	3,4	°C	01:00 h.
✗	Mínima diezminutaria *	3,0	°C	00:10 h.
31	Humedad relativa del aire			6,2 m.
✗	Media *	76	%	
✗	Máxima diezminutaria *	77	%	00:10 h.
✗	Mínima diezminutaria *	75	%	00:20 h.
50	Presión atmosférica			1,5 m.
✗	Media *	962,2	mb	
✗	Máxima diezminutaria *	962,4	mb	00:00 h.
✗	Mínima diezminutaria *	962,1	mb	00:40 h.
70	Irradiación solar			2 m.
✗	Máxima diezminutaria *	1	w/m ²	00:30 h.
✗	Total *	7	w/m ²	
✗	Máxima en una hora *	6	w/m ²	00:40 h.

Figura 22.- Página web de Euskalmet con datos meteorológicos diarios

Las unidades en las que se presentan los datos coinciden con las necesarias para el cálculo de la evapotranspiración que se expone posteriormente salvo en el caso de la irradiación solar. En este caso los valores en $[W/m^2]$ deben convertirse en MJ/m^2 para la coherencia del cálculo posterior a partir de la equivalencia:

$$I (MJ/m^2) = 0,0006 \cdot I (W/m^2)$$

Otra fuente documental de Euskalmet complementaria de la de los datos diarios son los informes de climatología anual que emite y que están accesibles en su web en el apartado "*Climatología de Euskadi>>Climatología año a año*".

EGUNEKO BATEZ BESTEKO IRRADIAZIOA (MJ/m2)															
KOD.	ESTAZIOA	kota (m)	URT	OTS	MAR	API	MAI	EKA	UZT	ABU	IRA	URR	AZA	ABE	B/B
C005	Alube	618	5,1	5,4	10,9	14,4	14,4	18,7	24,0	18,8	15,1	8,8	3,3	5,0	12,0
C001	Arkaute	517	5,4	6,5	10,7	14,7	14,8	19,6	25,0	19,4	15,3	9,3	4,0	5,0	12,5
C034	Espejo	504	5,8	6,4	10,4	14,1	18,2	22,2	24,3		14,4	9,0			
C0AA	Etura	549	5,1	6,4	10,8	14,8	14,1	19,3	24,8	19,2	14,8	8,7	4,0	4,8	12,2
C040	Gastiaz	546	5,4	6,2	10,9	14,9	14,9	19,1	25,0	19,2	15,2	9,6	4,1	5,2	12,5
C024	Iturneta	987	4,7	5,6	9,9	13,5	12,6	19,2	24,8	19,5	14,5	8,6	3,4	5,1	11,8
C031	Moredia	490													4,9
C041	Navarrita	689	5,2	6,2	10,9	14,5	14,5	19,6	24,9	20,0	15,1	8,6	4,1	5,0	12,4
C060	Párganos	577	5,9	6,9	11,6	15,6	16,3	21,5	25,0	22,1					
C030	Salvatierra	589	5,2		11,2	14,2			24,7			9,0	4,1	5,3	
C051	Sarriena	230	4,9	5,6	10,9	13,9	14,0	17,7	23,1	17,6	13,6	8,5	3,3		
C020	Trebiño	578	5,4	6,3	10,6	14,0	14,4	19,5	25,4	20,1	15,7	9,4	4,3	5,4	12,5
C050	Zambrana	470	5,0	5,3									4,6	4,5	
C061	Ardoieta	329	4,6	5,5	9,9	14,7	12,3	16,0	20,3	16,0	12,2	8,2	2,9	4,9	10,6
C002	Artea	19	3,4	5,2	9,8	15,5	12,2	17,1	21,2	17,3	11,8	8,1	3,0	4,2	10,7
C069	Bermeo	106	4,3	6,1	10,9	16,1	14,9	18,5	21,7	17,9	13,6	9,1	3,2	4,8	11,8
C065	Cerrija	677												5,0	
C003	Derio	30	4,5	5,9	10,1	14,8	13,9	16,4	20,8		12,8	8,2	3,3	5,0	11,0
C039	Deusto	3	4,5	5,9	10,6	14,4	13,8	17,1	21,7	16,8	13,0	8,3	3,2	5,2	11,2
C033	Igorra	150	4,3	5,1	10,0	14,0	12,1	16,9	20,8	16,5	12,5	8,0	2,8	4,9	10,7
C036	Iurreta	180	4,4	5,5	10,5	14,4	12,9	16,9	20,9	16,5	12,8	8,3	3,3	4,9	10,9
C019	Maitetasko	433	3,9	5,3	10,2	15,0	12,7	16,0	19,7	15,9	12,1	8,6	2,6	4,7	10,6
C057	Mungia	22	3,8	5,6	10,2	15,2	13,4	16,9	20,5	17,4	13,1	8,5	3,1	4,8	11,0
G059	Ordunte	300	4,8	5,8	10,8	14,7	12,6	18,5	23,2	18,3	13,6	8,7	3,3	5,3	11,6
C054	Otxandio	556	4,7	5,5	11,2	13,9	13,1	17,6	22,9	17,3	13,2	8,7	3,3	4,8	11,4
C042	Punta Galea	61	4,5	6,4	11,1	16,5	16,3	19,1	21,4	18,5	13,8	8,7	3,4	5,1	12,1
C022	Urkioia	709	4,6	5,0	10,0	12,9	11,6	15,8	21,8	15,7	12,3	8,2	2,8	5,0	10,5
C023	Araasate	318	5,0	5,5	11,2	14,1	12,8	17,0	22,1	16,8	13,2	8,6	3,4	5,0	11,2
C068	Baldina	562	4,7	5,6	10,8	13,7	12,4	16,1	22,4	16,2	13,0	8,7	3,2	5,1	11,0
C018	Higer	43	4,1	6,5	11,6	16,7	14,9	19,2	23,1	17,7	13,7	9,2	3,6	4,9	12,0
C0DC	Ibai Ester	90	4,3	6,0	11,7	14,1	12,3	16,7	21,8	16,2	12,9	8,8	3,2	4,1	11,0
C0EC	Lasarte	18	4,0	5,9	10,6	14,1	13,3	15,2	20,6	15,1	12,4	8,5	3,1	4,8	10,6
C017	Miramón	113	4,2	6,1	10,9	14,9	13,6	16,2	21,6	16,0	13,1	8,8	3,3	5,0	11,1
C043	Ordizia	243	4,3	5,2	10,5	13,5	12,1	16,2	22,5	15,5	13,1	8,4	3,2	4,8	10,8
C007	Santa Clara	48	4,5	6,2	11,3	15,6	14,5	16,8	20,4	17,0	13,4	9,1	3,4	5,1	11,4
C064	Zarauz	80	4,2	5,8	11,0	15,1	14,1	17,0	21,7	17,0	13,3	9,0	3,2	5,0	11,4
C029	Zuzurki	149	4,3	5,7	11,0	14,1	12,1	15,2	21,1	14,3	12,7	8,6	3,2	5,0	10,6
COD.	ESTACION	cota (m)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MED
IRRADIACIÓN MEDIA DIARIA (MJ/m2)															

Figura 23.- Informe anual de Euskalmet relativo a irradiación media

En este informe se puede acceder a datos acumulados o promedios para períodos mensuales. En el caso de la irradiación, la cifra que se publica en los informes meteorológicos anuales resulta ligeramente distinta a la derivada estrictamente de los datos diarios debido a que se modifica mediante correcciones de posibles errores y ajustes a modelos específicos de Euskalmet.

4.2.1.3.2.- Cálculos

Como se ha señalado, el cálculo de la evapotranspiración (diaria) comprende tres pasos sucesivos:

- Determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0).

- Determinar la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) a partir del valor de ET_0 .
- Efectuar el balance del suelo.

4.2.1.3.2.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

ET_0 Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]

R_n Radiación neta en la superficie [MJ/m²día]

G Flujo de calor del suelo [MJ/m²día]

T Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

u_2 Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]

e_s Presión media de vapor de saturación [kPa]

e_a Presión real de vapor [kPa]

$e_s - e_a$ Déficit de presión de vapor [kPa]

Δ Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

γ Constante psicrométrica [kPa/°C]

Dado que tanto la propia ecuación como los cálculos parciales que hay que efectuar respecto a algunos parámetros que intervienen en la misma implican numerosas operaciones matemáticas, a realizar además **día a día (datos diarios)**, se destaca la conveniencia-necesidad de ayudarse de **hojas de cálculo** que permitan la obtención sistemática de los diferentes valores con sólo introducir los datos de partida.

- **Constante psicrométrica (γ)**

Se calcula mediante la ecuación:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} \cdot P$$

γ Constante psicrométrica [kPa/°C]

P Presión atmosférica [kPa]

λ Calor latente de vaporización: 2,45 [MJ/kg]

ε Cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco: 0,622

c_p Calor específico a presión constante: $1,013 \times 10^{-3}$ [MJ/kg°C]

Si no se disponen de datos medidos para calcular la presión atmosférica, se puede emplear, en función de la cota del emplazamiento (z), la expresión:

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26}$$

- **Temperatura media del aire (T)**

La temperatura media del aire para un periodo de 24 h que considera la ecuación general es el promedio entre la temperatura máxima y la mínima del periodo de 24 h.

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Para periodos mayores de 24 h, se considera el promedio de la temperatura media calculada con la anterior expresión.

En los casos en que solamente se tenga disponibilidad de temperaturas medias diarias, el cálculo de ET_0 todavía es válido pero se podría esperar una cierta subestimación de ET_0 debido a la relación no-lineal de la presión de vapor de saturación en relación con la temperatura.

- **Presión media de vapor de saturación (e_s)**

Este parámetro se calcula en función de la temperatura del aire puesto que depende de ella. El cálculo se realiza a partir de las presiones de vapor correspondientes a las temperaturas máxima y mínima:

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}$$

La presión de vapor de saturación (e^0) para una temperatura T dada se calcula mediante:

$$e^0(T) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)$$

$e^0(T)$ Presión de saturación de vapor a temperatura T [kPa]

T Temperatura del aire [°C]

$\exp()$ 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia (...)

- **Pendiente de la curva de presión de vapor (Δ)**

Se trata de la pendiente de la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura. Se calcula mediante la expresión:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{media}}{T_{media} + 237,3}\right) \right]}{(T_{media} + 237,3)^2}$$

Δ pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura media [kPa/°C]

T_{media} Temperatura media calculada como promedio de la temperatura máxima y mínima [°C]

exp() 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia (...)

- **Presión real de vapor (e_a)**

Existen dos formas de cálculo en función de si se dispone de datos de humedad relativa máxima y mínima o si sólo se dispone del valor de la humedad relativa media.

Cuando se disponen de datos de humedad relativa máxima y mínima (HR_{max} y HR_{min}), la presión real de vapor es:

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \cdot \frac{HR_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \cdot \frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

$e^0(T)$ Presión de saturación de vapor a temperatura T [kPa]

HR Humedad relativa (máxima y mínima) [%]

Si solo se dispone de datos de HR_{media} :

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} \cdot e^0(T_{media})$$

Este último método es menos recomendable ya que muestra una menor precisión.

- **Radiación neta en la superficie (R_n)**

Este es uno de los parámetros más importantes de la ecuación pero más complejos de calcular si no se dispone de sensores específicos para su cálculo.

Los parámetros que se deben calcular son:

- Radiación extraterrestre (R_a)
- Radiación solar (R_s)
- Radiación neta solar o de onda corta (R_{ns})
- Radiación solar en un día despejado (R_{s0})
- Radiación neta de onda larga (R_{nl})
- Radiación neta (R_n)

La radiación extraterrestre (R_a) es diferente para cada día del año y latitud. Se puede estimar a partir de la constante solar, declinación solar y época del año:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)]$$

- R_a Radiación extraterrestre [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$]
- G_{sc} Constante solar 0,082 [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{min}$]
- d_r Distancia relativa inversa Tierra-Sol [adimensional]
- ω_s Angulo de radiación a la puesta de sol [rad]
- φ Latitud, positiva para hemisferio norte, negativa para el sur [rad]
- δ Declinación solar [rad]

La conversión de grados a radianes [rad] se hace mediante:

$$[\text{rad}] = \text{grados} \cdot \frac{\pi}{180}$$

La distancia relativa inversa Tierra-Sol (d_r) es:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right)$$

- J Número de día del año, de 1 a 365 (366 para años bisiestos)

La declinación solar (δ) es:

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} J - 1,39\right)$$

- J Número de día del año, de 1 a 365 (366 para años bisiestos)

El ángulo de radiación a la puesta de sol (ω_s) es:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$$

La radiación solar (R_s) es la que llega a la superficie tras atravesar la atmósfera. Se calcula a partir de la expresión:

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}\right) \cdot R_a$$

- R_s Radiación solar o de onda corta [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$]
- n Duración real de la insolación [horas]
- N Duración máxima de la insolación [horas]

n/N Duración relativa de la insolación

R_a Radiación extraterrestre [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

a_s Constante de regresión, expresa la fracción de radiación que llega a superficie en días nublados, ($n=0$)

a_s+b_s Fracción de la radiación que llega a la superficie en días despejados, ($n=N$)

Cuando no existan valores calibrados se deberá usar $a_s=0,25$ y $b_s=0,50$

Duración máxima de la insolación (N) medida en horas:

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s$$

El valor de la insolación real (n) se mide mediante un heliógrafo.

Considerando un día despejado ($n=N$), la radiación solar en un día despejado (R_{so}) es, cuando no se disponga de valores calibrados de a_s y b_s :

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a$$

z Elevación de la localidad sobre el nivel del mar [m]

Cuando no se disponga del valor de insolación real (n) se puede recurrir a la ecuación de Hargreaves, basada en la diferencia térmica entre la temperatura máxima y mínima, que es indicativo de la nubosidad:

$$R_s = k_{rs} \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \cdot R_a$$

R_s Radiación solar o de onda corta [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

R_a Radiación extraterrestre [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

T_{\max} Temperatura máxima del aire [$^{\circ}\text{C}$]

T_{\min} Temperatura mínima del aire [$^{\circ}\text{C}$]

k_{rs} Constante de ajuste, vale 0,16 para localidades costeras y 0,19 para localidades de interior

La radiación neta solar o de onda corta (R_{ns}) viene dada por la diferencia entre la radiación solar entrante y la reflejada por la superficie (albedo):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s$$

R_{ns} Radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

α Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo de referencia: 0,23

R_s Radiación solar entrante [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

La radiación neta de onda larga (R_{nl}) es la radiación devuelta a la atmosfera por la superficie:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left(\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

- R_{nl} Radiación neta de onda larga [MJ/m² día]
- σ Constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \times 10^{-9}$ [MJ/K⁴m² día]
- $T_{\max,k}$ Temperatura máxima absoluta de un periodo de 24 h [K=°C+273,16]
- $T_{\min,k}$ Temperatura mínima absoluta de un periodo de 24 h [K=°C+273,16]
- e_a Presión de vapor real [kPa]
- R_s Radiación solar calculada [MJ/m² día]
- R_{so} Radiación solar en un día despejado [MJ/m² día]

Finalmente la **radiación neta** (R_n) es la diferencia entre la radiación neta solar de onda corta y la radiación neta solar de onda larga:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

- **Flujo de calor del suelo (G)**

El valor de este parámetro es pequeño comparado con la radiación neta (R_n) salvo que exista alguna fuente de calor específica. Para periodos inferiores a 24 horas se considera despreciable aunque para periodos mensuales sí resulta apreciable. Su expresión simplificada basada en la temperatura media del aire es:

$$G_{mes,i} = 0,07 \cdot (T_{mes,i+1} - T_{mes,i-1})$$

Si no se conoce el valor de $T_{mes,i+1}$:

$$G_{mes,i} = 0,14 \cdot (T_{mes,i} - T_{mes,i-1})$$

- $G_{mes,i}$ Flujo de calor del suelo para un mes i [MJ/m² día]
- $T_{mes,i}$ Temperatura media del aire en un mes i [°C]
- $T_{mes,i-1}$ Temperatura media del aire en el mes anterior a i [°C]
- $T_{mes,i+1}$ Temperatura media del aire en el mes posterior a i [°C]

- **Velocidad del viento (U_2)**

La velocidad media diaria del viento se debe referenciar a la altura estándar de 2 m sobre la superficie. En las estaciones meteorológicas debe estar indicada la altura a la que está situado el sensor sobre la superficie. Para realizar la conversión a 2 metros se aplica la expresión:

$$u_2 = u_z \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)}$$

- u_2 Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]
- u_z Velocidad del viento a z m sobre la superficie [m/s]
- z Altura de medición sobre la superficie [m]

- **Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)**

Los parámetros sucesivamente calculados mediante los procedimientos anteriores permitirán determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) de acuerdo con la ecuación general indicada (FAO Penman-Monteith):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

- ET_0 Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]
- R_n Radiación neta en la superficie [MJ/m²día]
- G Flujo de calor del suelo [MJ/m²día]
- T Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]
- u_2 Velocidad del viento a 2 m de altura [m/s]
- e_s Presión media de vapor de saturación [kPa]
- e_a Presión real de vapor [kPa]
- $e_s - e_a$ Déficit de presión de vapor [kPa]
- Δ Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]
- γ Constante psicrométrica [kPa/°C]

En el documento de referencia para este cálculo (FAO 2006) se incluye el desarrollo y la propuesta conceptual de **hojas de cálculo** para determinar cada uno de los parámetros.

4.2.1.3.2.2 *Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)*

A partir del valor diario de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) se determinará la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). Esta determinación se efectuará aplicando un coeficiente adimensional sobre dicho valor que será diferente en función del tipo de superficie que se trate:

$$ET_c = K \cdot ET_0$$

Se distinguirá previamente entre superficies sin vegetación (de residuos, tierras expuestas e impermeabilizaciones) y superficies con vegetación sea cual sea el soporte de la misma (sustrato natural, tierras o residuos).

- **Superficies sin vegetación**

Para las superficies sin vegetación se tomará el valor $K = 1,05$, de tal forma que para este tipo de superficies:

$$ETC_{(\text{sin vegetación})} = 1,05 \cdot ET_0$$

- **Superficies con vegetación**

Para superficies con vegetación el coeficiente a aplicar es un coeficiente denominado coeficiente de jardín (K_L), que se basa en la consideración de la transpiración de las plantas, resultado de la consideración de tres factores:

$$K_L = K_v \cdot K_d \cdot K_{mc}$$

K_L	Coeficiente de jardín
K_v	Factor de especie o vegetación
K_d	Factor de densidad
K_{mc}	Factor de microclima

El **factor de especie o vegetación** (K_v) hace referencia al tipo de vegetación según su porte y a si existe diversidad de especies en relación a su capacidad de evapotranspirar agua. Su valor se derivará de la tabla siguiente.

Tabla 11.- Factor de especie o de vegetación a aplicar para el cálculo del coeficiente de jardín en función de la demanda general de agua que presentan las especies existentes (COSTELLO, 1991)

Tipo de vegetación	Factor de especie o de vegetación (K_v)		
	A	M	B
Árboles	0,9	0,5	0,2
Arbustos	0,7	0,5	0,2
Tapizantes	0,7	0,5	0,2
Vegetación mixta	0,9	0,5	0,2
Césped	0,8	0,7	0,6

A, M, B: demanda general de agua de la especie existente: alta, media, baja

El **factor de densidad** (K_d) hace referencia a la densidad superficial de la vegetación:

Tabla 12.- Factor de densidad a aplicar para el cálculo del coeficiente de jardín en función de la densidad superficial de la vegetación existente (COSTELLO, 1991)

Tipo de vegetación	Factor de densidad (K_d)		
	A	M	B
Árboles	1,3	1,0	0,5
Arbustos	1,1	1,0	0,5
Tapizantes	1,1	1,0	0,5
Vegetación mixta	1,1	1,1	0,6
Césped	1,0	1,0	0,6

A, M, B: densidad alta, media, baja

El **factor de microclima** (K_{mc}) hace referencia a las características de detalle del emplazamiento como la orientación de la exposición (hacia el sur la evapotranspiración es mayor que si la orientación es norte), zonas de sombra (menor evapotranspiración), zonas con radiación reflejada desde estructuras que pueden causar un aumento, efecto de canalización del viento (favorece la capacidad evaporante), etc.

Tabla 13.- Factor de microclima a aplicar para el cálculo del coeficiente de jardín en función de la incidencia de factores microclimáticos en la evapotranspiración (COETLLO, 1991)

Tipo de vegetación	Factor de microclima (K_{mc})		
	A	M	B
Árboles	1,4	1,0	0,5
Arbustos	1,3	1,0	0,5
Tapizantes	1,2	1,0	0,5
Vegetación mixta	1,4	1,0	0,5
Césped	1,2	1,0	0,8

A: Alto, efecto microclimático que aumenta la evapotranspiración

M: Medio, sin efecto microclimático, las condiciones son similares a las de referencia

B: Bajo, efecto microclimático que disminuye la evapotranspiración

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) de las superficies con vegetación será entonces:

$$ET_c = K_L \cdot ET_0 = K_v \cdot K_d \cdot K_{mc} \cdot ET_0$$

A la hora de estimar el coeficiente de jardín debe recordarse que representa las necesidades hídricas relacionada con la vegetación, de tal forma que en el caso de suelos parcialmente descubiertos habrá que considerar y ponderar adicionalmente la evapotranspiración que se produce en ausencia de vegetación.

4.2.1.3.2.3 Balance del suelo. Evapotranspiración real (ETR)

A partir de los datos diarios de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se desarrollará el balance del suelo a paso de tiempo igualmente diario. Para ello se considerará que:

- La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) calculada anteriormente representa el máximo de evapotranspiración que se podría producir si es que hubiera suficiente agua de precipitación (PR), riego o humedad disponible en la capa superficial. La evapotranspiración real (ETR) que se produce en un lugar es inferior ya que no siempre hay agua de precipitación, riego o humedad en la capa superficial disponible para ser evapotranspirada.
- Cuando se produce una precipitación o riego, la evapotranspiración es el primer proceso que detrae agua. De esta forma:
 - Si la precipitación/riego es mayor que la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), existirá un exceso de agua no evapotranspirada que podrá infiltrarse, escurrir superficialmente o ambas cosas a la vez (lluvia útil, LLU).
 - Si la precipitación/riego es menor que la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), todo el agua será evapotranspirada y no quedará agua que se infiltre o discorra superficialmente.
- Dado que la evapotranspiración no se produce única y exclusivamente en la estricta superficie sino que alcanza también los primeros centímetros-decímetros de la capa superior del terreno, existe en esta capa superior una cierta cantidad de agua que debe considerarse a la hora de calcular la evapotranspiración real ya que actúa como almacenamiento de agua dispuesta para ser evapotranspirada si las condiciones lo permiten.
- La cantidad de agua así almacenada en la capa superior del terreno, sujeta a evapotranspiración, puede alcanzar un máximo equivalente a la capacidad de campo (cantidad máxima de humedad que puede retener un terreno sin que se produzca la libre circulación del agua).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) diaria que se produce en un vertedero se efectuará, para cada tipo de superficie, a partir del balance del suelo considerando:

- Precipitación diaria (PR) (mm).
- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar diaria (ET_c) (mm).

- Agua disponible para la evapotranspiración en la capa superior de terreno en un momento dado (ADE) (mm), que estará comprendida entre el punto de marchitez (PM) (humedad “residual” de un suelo que no puede ser extraída por las plantas) y la capacidad de campo (CC) (que representa la máxima humedad posible), de tal manera que la ADE máxima será CC-PM. El valor a retener para los cálculos subsiguientes es este de ADE_{max} y el ADE del paso de tiempo anterior.

El procedimiento general para ello es el siguiente:

- Se forma una tabla con los valores diarios de PR, ET_c , ADE_{max} (este último constante si no cambian las condiciones de la superficie a lo largo del tiempo), dejando casillas para el cálculo de los valores de ADE, ETR y lluvia útil (LLU).
- Se parte de la cantidad de ADE existente en el momento de inicio del período (inicio del primer día o fin del día anterior al de inicio del período)(ADE_0) y se hace la siguiente consideración para el primer día (día 1):
 - Si PR_1 es mayor que ET_{c1} , entonces $ETR_1 = ET_{c1}$ y el exceso de PR_1 se dirige a ADE de tal forma que se sumaría a ADE_0 hasta, como máximo, la ADE_{max} que se produce cuando la capa superficial está a capacidad de campo. Si completando ADE_1 hasta ADE_{max} queda aún un exceso, este exceso será la lluvia útil de este día (LLU_1) que podrá discurrir superficialmente o infiltrarse hacia los materiales infrayacentes.
 - Si PR_1 es menor que ET_{c1} , entonces la evapotranspiración coge agua de ADE. Dependiendo de la cantidad de agua que haya en ADE al final del día anterior (ADE_0), puede suceder que:
 - $PR_1 + ADE_0$ sea mayor que ET_{c1} , entonces $ETR_1 = ET_{c1}$ y para determinar ADE_1 se restará de ADE_0 la cantidad retirada de este almacenamiento ($ETR_1 - PR_1$).
 - $PR_1 + ADE_0$ sea inferior que ET_{c1} , entonces $ETR_1 = PR_1 + ADE_0$ y $ADE_1 = 0$ (se habrá retirado todo el agua del almacenamiento).
- Reiterando día a día este procedimiento se completará finalmente la tabla hasta obtener valores diarios de evapotranspiración real (ETR) y lluvia útil (LLU).

Tabla 14.- Tabla tipoy ejemplo para el cálculo de la evapotranspiración real (ETR). $ADE_0 = 10$ mm

Parámetro (mm)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
PR	0	0	0	15	20
ET_c	4	3	5	3	4
ADE_{max}	20	20	20	20	20

Tabla 14.- Tabla tipoy ejemplo para el cálculo de la evapotranspiración real (ETR). $ADE_0=10\text{ mm}$

Parámetro (mm)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
ADE	6	3	0	12	20
ETR	4	3	3	3	4
LLU	0	0	0	0	8

En el supuesto de que la precipitación sea en forma de nieve y se sucedan días continuados de helada que impidan la fusión y deshielo de la misma, se deberá tener en cuenta este hecho y analizar el intervalo de tiempo que corresponda admitiendo que la cantidad precipitada y helada permanece en el lugar, pudiendo ser evapotranspirada pero no acumularse en el interior de la capa superficial del terreno ni generar lluvia útil hasta su fusión.

El balance del suelo exige disponer de datos relativos a la máxima-potencial cantidad de agua contenida en la capa superficial del terreno que sería evapotranspirable (ADE_{max}). Este parámetro varía ostensiblemente dependiendo de su espesor-profundidad y de las características de la capa en cuestión (residuos, tierras, sustrato con vegetación, diversos tipos de vegetación, etc.) que otorgan puntos de marchitez y capacidades de campo diferentes.

Respecto a la **profundidad** que puede alcanzar, a falta de información concreta del lugar, se considerará lo siguiente:

- En zonas superficialmente impermeabilizadas (geomembrana) se admitirá que no existe capa superficial susceptible de almacenar agua para una evapotranspiración posterior. Para este tipo de superficies, entonces, el cálculo anterior del balance del suelo no incluirá el concepto ADE sino que se considerará, día a día, sólo la precipitación y la evapotranspiración potencial para determinar, día a día, la evapotranspiración real y la lluvia útil.
- En zonas sin vegetación (residuos expuestos, cubiertas intermedias de tierras, etc.), se admitirá que la profundidad que alcanza la evaporación es 0,15 m de acuerdo con los criterios del documento de referencia de la FAO para el cálculo de la evapotranspiración.
- En zonas con vegetación se estimará la profundidad que alcanza la zona radicular de las plantas. A falta de datos concretos sobre ello, dicha profundidad se estimará según se indica en la siguiente tabla tomando en consideración tipo de vegetación y tipo de terreno.

Tabla 15.- Profundidad (m) típica de la zona radicular en función del tipo de vegetación y terreno (MCBEAN et al, 1994)

Vegetación	Arena fina	Arena limosa	Limo	Limo arcilloso	Arcilla
Herbáceas de raíces someras	0,50	0,50	0,65	0,40	0,25
Herbáceas y arbustos de raíces medias	0,75	1,0	1,0	0,80	0,50
Herbáceas y arbustos de raíces profundas	1,0	1,0	1,25	1,0	0,70
Arbolado y bosques	2,70	2,0	2,0	1,6	1,2

Respecto al punto de marchitez y a la capacidad de campo de los terrenos (que por diferencia permiten deducir el valor del agua máxima-potencial disponible para la evapotranspiración por unidad de volumen), a falta de datos concretos pueden estimarse según los valores señalados en la siguiente tabla.

Tabla 16.- Punto de marchitez, capacidad de campo y agua máxima-potencial disponible para la evapotranspiración según el tipo de terreno. Valores típicos en proporción de volumen del terreno considerado (m^3 de agua por cada m^3 de terreno)(extraído de SCHROEDER et al, 1994, y FAO, 2006)

Tipo de terreno	Punto de marchitez	Capacidad campo	Agua máxima disponible
Residuos urbanos	0,07	0,30	0,23
Cenizas (como arenas)	0,05	0,12	0,07
Arenoso	0,02-0,07	0,07-0,17	0,05-0,11
Arenoso franco	0,03-0,10	0,11-0,19	0,06-0,12
Franco arenoso	0,06-0,16	0,18-0,28	0,11-0,15
Franco	0,07-0,17	0,20-0,30	0,13-0,18
Franco limoso	0,09-0,21	0,22-0,36	0,13-0,19
Limoso	0,12-0,22	0,28-0,36	0,16-0,20
Franco arcillo limoso	0,17-0,24	0,30-0,37	0,13-0,18

Tabla 16.- Punto de marchitez, capacidad de campo y agua máxima-potencial disponible para la evapotranspiración según el tipo de terreno. Valores típicos en proporción de volumen del terreno considerado (m^3 de agua por cada m^3 de terreno)(extraído de SCHROEDER et al, 1994, y FAO, 2006)

Tipo de terreno	Punto de marchitez	Capacidad campo	Agua máxima disponible
Arcillo limoso	0,17-0,29	0,30-0,42	0,13-0,19
Arcilloso	0,20-0,24	0,32-0,40	0,12-0,20

Con estos valores de profundidad de la capa superior sujeta a evapotranspiración y agua disponible por unidad de volumen, se definirá en cada caso la cantidad máxima-potencial de agua evapotranspirable en esta capa (ADE_{max}) para su introducción en el cálculo del balance del suelo. Esta introducción debe efectuarse en mm, las mismas unidades que se emplean en este cálculo para precipitación, evapotranspiración y lluvia útil. Así, por ejemplo, en el caso genérico de residuos urbanos compactados expuestos, se tendría una profundidad de la capa superficial sujeta a evapotranspiración de 0,15 m y un agua disponible máxima de $0,23 m^3$ por cada m^3 de terreno. Ello implica que por cada m^2 de superficie de residuos, el agua disponible máxima sería de $0,034 m^3$ ($0,15 \times 0,23$), equivalentes a 34 mm.

4.2.1.3.3.- Resultados

Los resultados del cálculo de la evapotranspiración se presentarán en forma de tablas con datos diarios (en mm) de precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y lluvia útil con independencia de que se efectúe finalmente la totalización de estos datos a lo largo del período de balance.

Se calcularán y presentarán los resultados individualizados para cada tipo de superficie considerada.

4.2.2.- Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)

La salida de la escorrentía generada por la precipitación en cubiertas intermedias o sellados definitivos se calculará por el mismo procedimiento que el desarrollado en el apartado de entradas por escorrentía de ladera o por escorrentía sobre dicho tipo de superficies y que, para mayor claridad en la exposición, se desarrolla también aquí.



Fotografías 14a y b.- Evacuación lateral del flujo superficial producido sobre áreas impermeabilizadas (sellado definitivo a la izquierda y cubierta provisional a la derecha)

4.2.2.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios para el cálculo del flujo superficial que se genera sobre cubiertas intermedias y sellados son:

- Datos meteorológicos.
- Datos de las superficies que generan escorrentía.
- Coeficiente de infiltración de dichas superficies (tierras de cubrición, impermeabilización, etc.).

Los datos meteorológicos permitirán calcular precipitación y evapotranspiración y, mediante resta simple, la cantidad de agua no evapotranspirada (lluvia útil) que está disponible para escurrir superficialmente o infiltrarse. El coeficiente de infiltración permitirá aproximar la cantidad de agua que se infiltra y, con ello, derivar la cantidad de agua que escurre superficialmente.

4.2.2.2.- Cálculos

El desarrollo del cálculo consistirá en:

- Se calcula la lluvia útil (LLU), cantidad de precipitación que no ha sido evapotranspirada y que, por tanto, puede discurrir superficialmente, infiltrarse o ambas cosas a la vez. Para calcular la lluvia útil se deberá, por tanto:
 - Determinar la precipitación de acuerdo con lo indicado en el apartado de Entradas-Precipitación (PR).

- Determinar la evapotranspiración de acuerdo con lo indicado en el apartado de Salidas-Evapotranspiración (ETR).
- Restar ambas cantidades: $LLU = PR - ETR$.
- Determinar el equivalente volumétrico de esta cantidad (LLU) aplicada a toda la superficie cuya escorrentía superficial quiere determinarse.
- En el caso de que la cubierta o sellado disponga de impermeabilización (geomembrana), todo el agua circulará superficial o subsuperficialmente en dicha capa hasta ser evacuada. La cantidad de agua que sale corresponderá al total de la lluvia útil.
- En el caso de que la cubierta o sellado no disponga de impermeabilización (geomembrana), se presumirá que existe una cierta infiltración además de la escorrentía superficial que se genera sobre ella. La escorrentía superficial se calculará entonces aplicando los siguientes coeficientes sobre la lluvia útil, asimilando el tipo de material y superficie expuesta a una categoría atendiendo a sus características intrínsecas (composición, compacidad, estructura, etc.).

Tabla 17.- Escorrentía respecto a la lluvia útil a considerar en función de la permeabilidad del terreno y de la pendiente del terreno (basado en clases de permeabilidad diferenciadas en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco)

Permeabilidad del terreno		Escorrentía (% lluvia útil) según pendiente (P)			
Categoría	K (m/s)	P > 30%	10%<P<30%	5%<P<10%	P < 5 %
Muy baja	$< 10^{-7}$	98-100	97-98	96-97	95-96
Baja	$10^{-5} - 10^{-7}$	91-95	87-91	84-87	80-84
Media	$10^{-4} - 10^{-5}$	70-80	60-70	50-60	40-50
Alta	$10^{-3} - 10^{-4}$	35-40	30-35	25-30	20-25
Muy alta	$> 10^{-3}$	15-20	10-15	5-10	0-5

- La asignación final de un coeficiente de escorrentía dentro de estas subclases se efectuará considerando si existe algún elemento fisiográfico (irregularidades superficiales) que pudiera favorecer la infiltración frente a la escorrentía. En cada caso se considerará que cuanto más lisa sea una superficie más escorrentía derivará, siempre dentro de cada una de las categorías determinadas teniendo en cuenta la permeabilidad y pendiente.
- El resto de la cantidad de lluvia útil que no escurre superficialmente hacia el exterior del vertedero representará la cantidad infiltrada en el vaso.

4.2.2.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de la salida de agua proveniente de la escorrentía generada sobre áreas cubiertas o selladas se presentarán en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos temporales sobre los que se ha partido para ello en el caso de que dichas áreas y/o su funcionalidad hayan sufrido modificación durante el período que abarca el balance.

4.2.3.- Lixiviados controlados (LXC)

Este término corresponde a la salida de los lixiviados a través del sistema de drenaje y evacuación dispuesto en el vertedero y que típicamente se efectúa:

- Por gravedad: cuando los lixiviados abandonan el vertedero por su punto más bajo a través de una conducción en la que circulan por gravedad. Esta conducción puede finalizar en una planta de tratamiento, en un sistema comarcal de saneamiento o en un depósito de almacenamiento temporal para su evacuación externa. Sea cual sea su destino final, el término gravedad alude expresamente al tipo de salida de los lixiviados del recinto del vaso de vertido con independencia de que en la conducción subsiguiente existan estaciones de bombeo para la elevación de los lixiviados a depósitos, plantas de tratamiento u otros sistemas de saneamiento.
- Por bombeo: cuando los lixiviados se bombean desde el interior del vaso de vertido permaneciendo este sin una salida por gravedad en su punto más bajo. El bombeo puede efectuarse a través de pozos de bombeo verticales dispuestos entre la masa de residuos o a través de conducciones inclinadas adosadas al talud que parten de un lugar de acumulación de lixiviados en el fondo del vertedero (sumidero). Los lixiviados así bombeados se dirigen posteriormente al sistema de gestión definitivo que posean las instalaciones (planta de tratamiento, vertido al sistema comarcal, depósito para su evacuación externa, etc.).

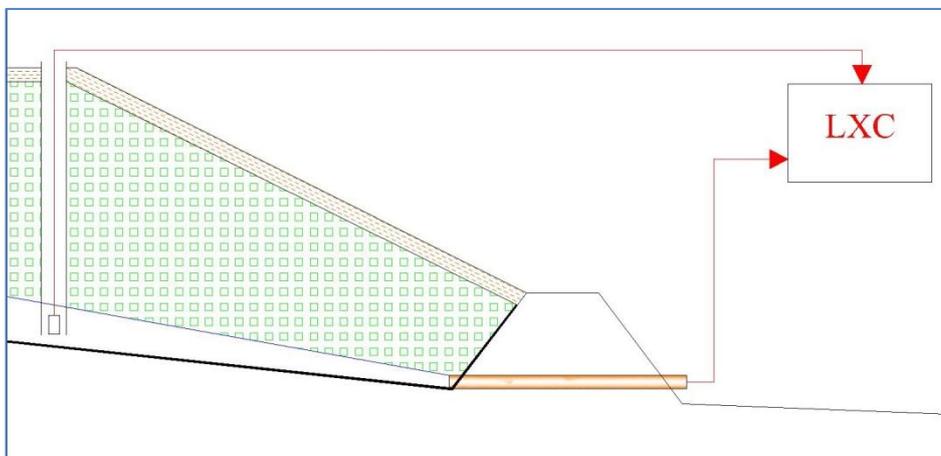


Figura 24.- Esquema ilustrativo de los sistemas de evacuación y control general de lixiviados (por bombeo y por gravedad)

Sea cual sea el sistema de evacuación de estos lixiviados, deberá estar dotado de instrumentos de medición que controlen y registren las cantidades evacuadas (caudalímetros, contadores). La evaluación de esta salida en el balance hídrico no requerirá más cálculo que la integración de los datos medidos por dichos instrumentos a lo largo del período de tiempo que abarca el balance.

El modelo conceptual deberá considerar la posición donde se ubican los instrumentos de control y registro y su relación con el lugar de origen de otras posibles entradas o salidas del sistema. De esta forma, por ejemplo, deberá modelizarse correctamente, si existe, la situación del punto de toma para la recirculación de lixiviados (antes o después del punto de control de los lixiviados) para evitar cometer errores al contabilizar los diferentes volúmenes. Igualmente en relación con puntos de fuga y, en general, con puntos donde se produzca una toma o inyección de agua o lixiviado a la conducción de evacuación.

4.2.3.1.- Datos de partida

Los datos de partida serán los registros de los instrumentos de medición dispuestos a la salida de los lixiviados del vaso de vertido.



Fotografías 15a y b.- Caudalímetro para el control de lixiviados y sistema de registro

Se dispondrá de un registro continuo de los caudales de lixiviados de tal forma que, por integración de los mismos, se obtengan tanto datos globales como datos a paso de tiempo diario.

Al utilizar los datos aportados por los caudalímetros se deberá tener en cuenta la representatividad de los mismos considerando su método de funcionamiento, registro y estado. En este sentido, debe contemplarse:

- Descripción del sistema de medida de caudales (por ejemplo aforador Parshall con sensor de nivel por ultrasonidos, cuenta-horas en una bomba, etc.), rango de medida del sensor y calibración mediante aforos directos in situ, accionamientos (válvulas, altura de las boyas que encienden/apagan la bomba), etc. Frecuencia de las mediciones (1 dato cada 10 minutos, cada hora, cada día, cada semana, etc.). Si es necesario (suele ocurrir cuando el punto de medida de caudales forma parte de un sistema de depuración de lixiviados) se incluirá un esquema o plano de detalle de la instalación que permita describir el funcionamiento del sistema y las consignas de accionamiento del mismo.
- Período de registro continuo con datos de caudales verificando que todos los datos registrados se encuentran dentro del rango de medida del sensor, incluyendo una representación gráfica frente al tiempo de los valores medidos, señalando el rango aceptable. En las estaciones de aforo de caudales de lixiviados en canal abierto, el parámetro a verificar es el nivel, no el caudal.
- Representación gráfica, utilizando la misma escala temporal, de los caudales medidos y de la precipitación. Búsqueda de comportamientos inusuales sospechosos de ser datos erróneos (y definición de los periodos con datos fiables) observando si se producen:
 - Subidas del caudal de lixiviados no asociadas a precipitaciones tras comprobar que no se han producido tormentas aisladas y esporádicas que no afectan a las estaciones meteorológicas. Si la subida de caudales se registra un día antes que la precipitación en mediciones diarias puede deberse a que el período de integración del día es diferente en cada caso (por ejemplo el caudal lo hace de 00:00 h a las 24:00 h, mientras que la precipitación lo hace de 08:00 h a 08:00 h o viceversa).
 - Ausencia de incremento de caudal cuando, en otras ocasiones, para precipitaciones similares (y con caudales de inicio similar) sí se observan crecidas.
 - Bajadas súbitas de caudal por bombeos, limpieza de instalaciones, accionamiento de un by-pass, etc.
 - Máximos locales de caudal que se mantienen constantes durante varios días, por ejemplo. por entrar a funcionar algún sistema de aliviadero, desborde o by-pass a partir de cierto caudal o en cierta situación.
- Estado de conservación (defectos observados y reparaciones efectuadas, indicando fechas, fotografías, problemas seculares no solucionados, partes de mantenimiento, calibración y conservación) así como acumulaciones de espuma o sólidos en las secciones de medida que interfieran en las mediciones y/o provoquen el registro erróneo de los caudales de lixiviados realmente aportados.

4.2.3.2.- Cálculos

Los cálculos consistirán en transformar, si procede, los caudales registrados a volúmenes de salida a lo largo del período de tiempo del balance considerando un paso de tiempo diario. Se revisará y completará, si es necesario, la serie de datos de partida.

4.2.3.3.- Resultados

Los resultados se presentarán en unidades de volumen de lixiviados evacuados, señalándose, si existen, particularidades debido a la incidencia en estos resultados de otro tipo de entradas o salidas de la red de evacuación de lixiviados de acuerdo con el modelo conceptual (fugas, tomas para recirculación, etc.). Se presentarán datos diarios y totales del período de balance.

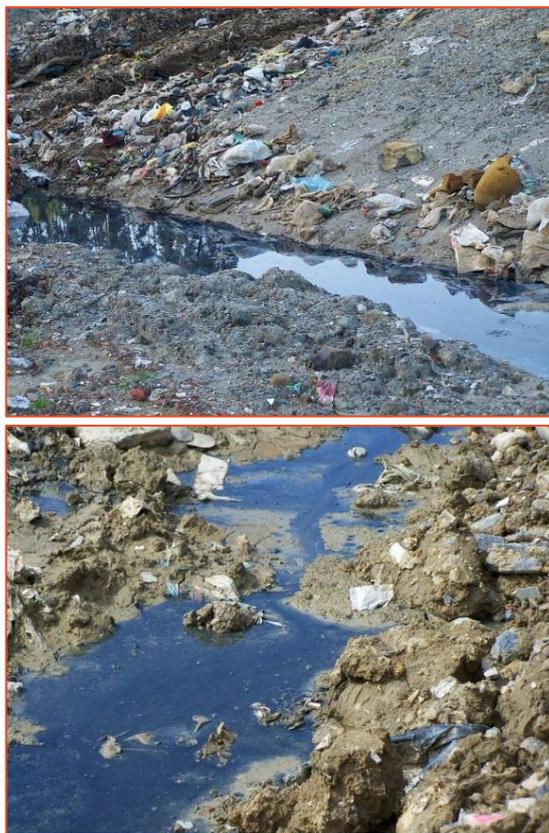
4.2.4.- Lixiviados incontrolados (LXI)

En oposición a los lixiviados controlados que se evacúan a través de la red construida para ello y se controlan a través de instrumentos de medición, en un vertedero pueden producirse salidas de lixiviados en otros lugares en forma de:

- Surgencias de lixiviados en la superficie (perímetro de la masa de residuos, pies de taludes internos, etc). Si estas surgencias son evacuadas lateralmente, sin que los lixiviados se reinfiltren en el acúmulo de residuos, constituirán salidas absolutas de agua del sistema.
- Filtraciones subterráneas hacia el terreno encajante.
- Fugas en conducciones y depósitos, cuya contabilidad para el balance dependerá del lugar en que se produzcan y del destino posterior de los lixiviados fugados.

4.2.4.1.- Surgencias de lixiviados en superficie

En algunos vertederos pueden producirse surgencias de lixiviados en superficie determinadas por la existencia de capas discontinuas de residuos u otros materiales (cubiertas intermedias) que presentan una permeabilidad comparativamente reducida y que generan niveles colgados respecto al nivel general de lixiviados de la base del vertedero. Estos niveles colgados pueden ser discontinuos en el tiempo y generarse únicamente con ocasión de precipitaciones abundantes o pueden ser más permanentes y provocar una surgencia continua aunque variable en caudal.



Fotografías 16a y b.- Surgencias de lixiviados sobre la superficie del vertedero

Cuando se producen, estas surgencias se localizan típicamente en el perímetro de la masa de residuos o en el pie de los taludes unitarios del interior del vertedero cuando este presenta una morfología escalonada.

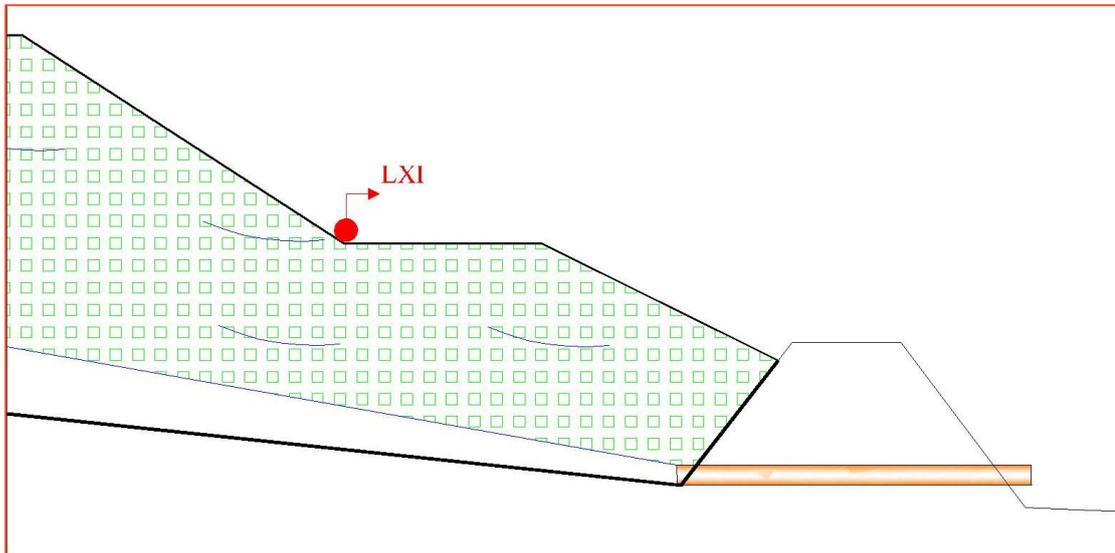


Figura 25.- Esquema ilustrativo de una surgencia de lixiviados al pie de un talud en el interior del vertedero

En muchos casos los lixiviados que afloran en superficie se reinfiltan en el vertedero en un punto más o menos cercano al lugar de surgencia pero en ocasiones, dependiendo de la morfología del lugar y de la gestión establecida, pueden salir del vaso de vertido bien porque son captados en esos puntos y evacuados, bien porque circulan en superficie libremente hacia el entorno sumándose a la escorrentía superficial de áreas urbanizadas, canales, cunetas, etc. Esta última situación, lixiviados sumándose a la escorrentía superficial, no debe lógicamente producirse.



Fotografías 17a y b.- Lixiviados sobre el vertedero evacuados mediante bombeo y lixiviados dirigiéndose a un canal perimetral

La contabilidad de este término, cuando existe, dentro del balance hídrico deberá tener en cuenta origen y destino de los lixiviados que surgen, de tal forma que si se reinfiltran inmediatamente en la masa de residuos no constituirán una salida absoluta de agua. En cualquier caso, en el modelo conceptual deberá recogerse su existencia.

4.2.4.1.1.- Datos de partida

Los datos de partida para el cálculo del volumen determinado por este tipo de salida son:

- Datos, observaciones y aforos directos, que permitan determinar los lugares de surgencia, el caudal y el destino de los lixiviados.
- Caudalímetros, contadores o medición directa del volumen en el caso de que se haya dispuesto un sistema de evacuación fijo o temporal (bombeo por ejemplo). Tal como se ha indicado anteriormente, la utilización de cualquier sistema de bombeo, conducción y evacuación de lixiviados debe contar con instrumentos o procedimientos de medida de los caudales o volúmenes evacuados, aunque esta evacuación se haya efectuado sólo de forma discontinua o puntual.

4.2.4.1.2.- Cálculos

Los cálculos a realizar dependerán del destino de los lixiviados surgentes en superficie y de los datos de partida:

- Si se reinfiltran en la masa de residuos dentro del propio vaso de vertido no contabilizarán como salida aunque sí se reflejará su existencia en el modelo conceptual. En este caso, y a falta de aparatos de medición, se estimará el volumen a partir de observaciones-aforos directos y su correspondencia con el régimen hidrometeorológico.
- Si se ha detectado que salen del perímetro del vaso y se añaden a la escorrentía superficial del entorno (finalmente a cunetas y canales de aguas), se estimará igualmente el volumen a partir de observaciones-aforos directos y su correspondencia con el régimen hidrometeorológico.
- Si son evacuados a través de un sistema dispuesto específicamente (conducciones, bombeos, etc.) el volumen se determinará de forma directa a partir de los datos de los caudalímetros, contadores o sistemas volumétricos (por ejemplo número y capacidad de las cisternas utilizadas) con los que necesariamente debe contar el sistema de evacuación aunque este sea de funcionamiento discontinuo.

4.2.4.1.3.- Resultados

Los resultados se presentarán en forma de volumen de lixiviados surgentes a lo largo del período que abarca el balance diferenciando entre las tres posibilidades señaladas (re infiltración, evacuación controlada, evacuación incontrolada).

4.2.4.2.- *Filtraciones subterráneas de lixiviados hacia el terreno*

Las posibles filtraciones de lixiviados hacia el terreno pueden adquirir, como las entradas de aguas subterráneas hacia el vaso, dos formas:

- Concentrada a favor de algún lugar donde la infiltración está particularmente favorecida por las características del terreno en ese punto (“sumidero”).
- Difusa a través de la superficie del vaso de contacto entre el acúmulo y el terreno.

Según lo indicado en el apartado de entradas de aguas subterráneas, a falta de información concreta al respecto, inicialmente se admitirá que:

- Los vertederos o zonas que disponen de impermeabilización de fondo carecen de entradas de aguas subterráneas o de filtraciones de lixiviados hacia el terreno.
- Los vertederos o zonas que no disponen de impermeabilización de fondo presentan o entradas o salidas subterráneas o unas y otras dependiendo del momento.

El primer aspecto a determinar, por tanto, es si en un vertedero que carece de impermeabilización de fondo se producen entradas de aguas subterráneas o filtraciones de lixiviados hacia el terreno. Para ello deberá considerarse:

- Funcionamiento hidrogeológico del área donde se ubica el vertedero, incluyendo, al menos de forma cualitativa, permeabilidad del terreno, de los materiales depositados y de los sistemas dispuestos entre ambos (drenaje de lixiviados).
- Posición de los niveles freáticos en el interior y en el exterior del vertedero.
- Posible incidencia de lixiviados sobre la calidad de las aguas de los pozos de control externos.

Una vez evaluados estos aspectos y determinada-evaluada la forma de intercambio que se produce a través de las paredes del vaso (entradas de aguas subterráneas o salidas de lixiviados), se desarrollará el cálculo que corresponda como filtración y salida de lixiviados (a continuación) o como entrada de aguas subterráneas (en apartado correspondiente dentro del capítulo de entradas).

4.2.4.2.1.- Datos de partida

Los datos de partida necesarios para calcular su aporte al balance hídrico son los siguientes:

- Coeficiente de permeabilidad del terreno:
 - Determinado mediante ensayos realizados en el estudio previo a la implantación del vertedero.
 - Conocido a través de otro tipo de estudios realizados en las proximidades y en la misma formación geológica.
 - Estimado a partir de referencias bibliográficas teniendo en cuenta el tipo de formación encajante.
- Nivel freático exterior (en el terreno):
 - Determinado mediante medición en pozos de control.
 - Dedución estimativa a partir de otro tipo de información relacionada con el medio externo (niveles o cotas de surgencias, funcionamiento hidrogeológico, etc.).
 - Caso de no disponer de datos de niveles externos ni de otra información que permita deducirlo siquiera estimativamente, se admitirá que el nivel freático en el terreno se sitúa por debajo del fondo del vertedero.
- Nivel freático interior (en el vertedero):
 - Determinado mediante medición en pozos de control o pozos de extracción de gas.

- Caso de no disponer de datos de niveles internos, deberá evaluarse teniendo en cuenta la configuración geométrica admitiendo en todo caso, en un vertedero típico en U que la base del vaso donde se sitúa el sistema de drenaje de lixiviados se encuentra saturado, pudiendo estar las paredes en saturación o no. Esta circunstancia sería la situación de menor filtración (zona saturada sólo en la base) frente al máximo de filtración que implicaría un nivel en superficie, con las filtraciones produciéndose no sólo en la base de la U sino en todo su contorno.
- Configuración hidrogeológica del área y dirección de flujo subterráneo en el entorno.
- Geometría (dimensiones) del vertedero.

4.2.4.2.2.- Cálculos

Para calcular las filtraciones de lixiviados hacia el exterior se aplicará la expresión de la ley de Darcy:

$$Q = K \cdot A \cdot I$$

siendo:

Q: caudal de las filtraciones (m³/s).

K: coeficiente de permeabilidad del terreno (m/s).

A: superficie de la zona del vertedero en la que se producen filtraciones (en proyección horizontal) (m²). A falta de datos se estimará su alcance. En cualquier caso se considerará, al menos, la base o fondo del vaso de vertido cuando la geometría sea en U.

I: gradiente hidráulico: se tomará como 1 admitiéndose, con ello, una máxima tasa de infiltración (zona saturada).

4.2.4.2.3.- Resultados

Los resultados de los cálculos de las filtraciones de lixiviados hacia el exterior se presentarán en unidades de volumen, especificándose el procedimiento de cálculo y los supuestos sobre los que se ha partido para ello (áreas, niveles freáticos, permeabilidad, etc.).

4.2.4.3.- Fugas en conducciones y depósitos

Según se ha descrito también en el capítulo de entradas, en un vertedero, como en cualquier otro tipo de instalación, pueden producirse fugas de lixiviados en depósitos y conducciones que, según el diseño de la instalación y la posición en la que se produzcan dichas fugas, pueden provocar la salida no controlada-cuantificada de dichos lixiviados. En este sentido, las incidencias pueden afectar a:

- Instalaciones fijas propias del sistema general de drenaje de los lixiviados.

- Instalaciones temporales y/o móviles como, por ejemplo, las de evacuación puntual de lixiviados surgidos superficialmente, lixiviados recogidos por operaciones de mantenimiento, etc..

En cualquiera de los dos casos debe considerarse, de cara al modelo conceptual y balance, dónde se produce la fuga y su posición respecto a los elementos de control y registro (caudalímetro, contador). Si, por ejemplo, la fuga se produce en la conducción de lixiviados, la contabilidad general de entradas y salidas variará según la fuga se haya detectado o producido antes o después del caudalímetro de control:

- Si se produce antes del caudalímetro o control y no se reintegra al sistema, constituirá una salida neta de lixiviados a contabilizar como tal.
- Si se produce después del caudalímetro o control se trataría de la fuga de un volumen ya contabilizado y que, por ello, no debe volver a contabilizarse como salida neta dentro del balance aunque sí debe quedar reflejado en el modelo conceptual.

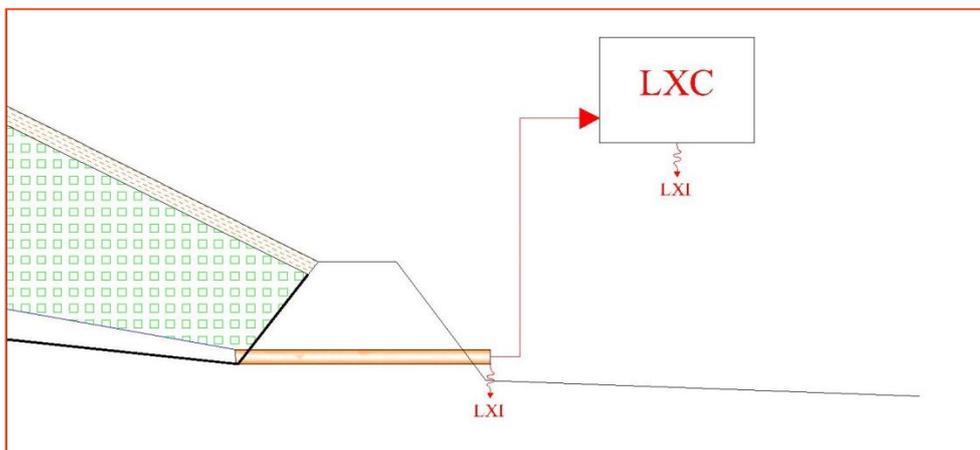


Figura 26.- Esquema ilustrativo de posibles fugas en el sistema de evacuación de lixiviados según estén situadas antes o después del punto de control (LXC)



Fotografía 18.- Punto de fuga en una conducción de lixiviados. En este caso el punto se sitúa justo antes del caudalímetro de control por lo que esta pérdida interviene en el balance hídrico

4.2.4.3.1.- Datos de partida

Los datos de partida para la estimación de la entrada derivada de fugas son:

- Datos de caudalímetros-contadores y su posición respecto al punto de fuga.
- Observaciones y aforos directos incluyendo volúmenes recogidos aparte del sistema general de drenaje de lixiviados provenientes de achiques y limpiezas.

4.2.4.3.2.- Cálculos

En la generalidad de los casos, dado que una fuga debe representar una incidencia puntual rápidamente reparada, la salida que representa se deberá estimar en base a observaciones y aforos directos contabilizando el tiempo durante el que ha estado activa. Dependiendo del tipo de red afectada y de la existencia en ella de caudalímetros y contadores, los cálculos efectuados a partir de observaciones directas podrán ser completados o ajustados con los datos de dichos elementos de control. Los datos de caudal se transformarán, en cualquier caso, en volúmenes aportados.

4.2.4.3.3.- Resultados

Los resultados se presentarán como volumen de agua de salida, determinándose, de acuerdo con el modelo conceptual correspondiente, si representan salidas netas de agua, o si se trata de fugas no contabilizables en el balance general según se ha expuesto anteriormente.

4.2.5.- Vapor de agua con el biogás (VBG)

Durante los procesos de degradación de la materia biológica y la formación de gas de vertedero (CH_4 , CO_2 , ...) pueden producirse diferentes fenómenos de liberación y consumo de agua que afectan a la cantidad de agua presente en el vertedero:

- La materia biodegradable puede descomponerse liberando agua y biogás al medio.
- La materia biodegradable puede consumir agua para la generación del biogás:

El resultado general final es que, si se produce degradación de los residuos con generación de biogás y hay agua suficiente en el medio:

- Existe un consumo físico/neto de agua para la generación del biogás cuyos valores típicos son de 0,19 a 0,24 kg de agua por cada m^3 de biogás que se genera, admitiéndose una media de $0,215 \text{ kg/m}^3$ (TCHOBANOGLIOUS y KREITH, 2002) Esta agua proviene tanto de la humedad del residuo en el interior del vertedero como del agua libre almacenada en él. Por ello, la presencia de agua acelera la degradación de los residuos y producción de biogás.
- Existe una emisión (salida) de agua que acompaña al biogás en forma de vapor. Las emisiones de biogás, directamente a la atmósfera y/o recogidas en algún sistema de gestión específico, están generalmente saturadas en vapor de agua, representando esta agua emitida una cantidad típica de unos 0,035 kg de agua por cada m^3 de biogás (TCHOBANOGLIOUS y KREITH, 2002).

En un vertedero, por tanto, la emisión de biogás representa en su conjunto una pérdida o salida de agua, tanto por el consumo de la misma como por su emisión en forma de vapor de agua. Así, por cada m^3 de biogás generado y emitido, el vertedero habrá perdido un total de 0,25 kg de agua (0,215 kg consumidos + 0,035 kg emitidos).

La parte emitida representa una salida neta de agua mientras que la parte consumida representa una variación del contenido interior de agua del vertedero. Por ello, este término volverá a mencionarse en el apartado de variaciones interiores.

4.2.5.1.- Datos de partida

Los datos generales de partida para el cálculo son la cantidad y tipo de residuos depositados en el vertedero. La existencia de un sistema de captación de gases derivará el biogás hacia determinados puntos (por ejemplo antorcha) pero puede admitirse que no interviene en la cantidad de gas generada-emitida y, por tanto, no interviene en la cantidad de vapor de agua asociada al proceso. Los posibles escenarios a considerar son los siguientes:

- Vertedero en el que la cantidad y tipo de residuos depositada permanece constante a lo largo de los años. En ausencia de datos específicos al respecto, se admitirá este escenario promediándose-estimándose la cantidad y tipo de residuos depositada anualmente.

- Vertedero en el que la cantidad y/o tipo de residuos varía a lo largo de los años. En este caso los datos de partida serán dichas cantidades y tipos año a año.

Respecto a la eficiencia del sistema de captación de gases cuando existe, y a falta de datos específicos al respecto, pueden admitirse estimativamente los siguientes porcentajes de eficacias de captación respecto al biogás generado:

- 35 % para celdas activas con sistemas activos de captación de gases.
- 65% para una celda con cubierta temporal y con sistema activo de captación de biogás.
- 85% para una celda con recubrimiento final de arcilla y sistema activo de captación gas.
- 90% para celdas con recubrimiento final de geomembrana y sistema activo de captación de gases



Fotografía 19.- Pozo de captación de gas

4.2.5.2.- Cálculos

Los cálculos del biogás generado se realizarán de acuerdo con los procedimientos descritos en la “Guía Técnica para Medición, Estimación y Cálculo de las Emisiones al Aire” (IHOBE, 2008). En dicho documento se definen los dos escenarios señalados anteriormente planteándose:

- Un procedimiento relativamente complejo, apoyado en tablas de cálculo, para el caso de un vertedero en el que se depositan cantidades y tipos de residuos variables año a año. Si se dispone de datos fiables y concretos de cantidades y tipos año a año, este será el método de cálculo a emplear. Para su aplicación se deberá consultar dicha referencia (IHOBE, 2008) y desarrollar la hoja de cálculo que incorpora (ver en www.ihobe.eus - publicaciones).

- Un procedimiento, más sencillo, para el caso general de que las cantidades y tipos de residuos depositados sean constantes año tras año. Este procedimiento, descrito en una guía anterior (IHOBE, 2005) y que se detalla a continuación, será el que se utilice de forma general cuando así suceda o cuando no existan datos suficientes al respecto y deban promediarse-estimarse las cantidades y tipos de residuos depositados anualmente en el vertedero.



Fotografías 20a y b.- Vertederos con emisión a la atmósfera. A la izquierda vertedero abierto con emisión a favor de toda la superficie. A la derecha vertedero sellado con emisión a favor de chimeneas

El cálculo del volumen de gas generado en un vertedero con cantidades y tipos de residuos depositados constante año a año (real o estimativamente a falta de datos concretos de todos los años) se realizará de acuerdo con el documento indicado (IHOBE, 2005). Tal como se recoge en este documento, la composición general del gas de vertedero cuando se alcanza las condiciones estacionarias es la siguiente:

Tabla 18.- Composición típica del gas de vertedero (IHOBE, 2005)

Componente	Proporción %
CH ₄	55
CO ₂	40
N ₂	5
NMVOC	0 - 2

Para el cálculo de emisión de CH₄ se aplica la ecuación que permite estimar la generación de gas:

$$M_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

- M_{CH₄} Generación de CH₄ en el tiempo, (Tm/año)
- L₀ Potencial de generación de metano (Tm CH₄/Tm residuo)
- R Media anual de basura biodegradable-orgánica (Tm residuo/año) (sólo fracción biodegradable, la fracción inorgánica no se computa en R)
- K Ratio generación de metano (1/año)
- C Tiempo desde la clausura del vertedero (años)
- T Tiempo desde la primera deposición de basura (años)

El factor K depende del pH, humedad, temperatura y otros factores ambientales y de operación del vertedero. La EPA sugiere en función del tipo de clima unos valores de K:

Tabla 19.- Factor K a aplicar para el cálculo de la emisión de CH₄ (valores EPA recogidos en IHOBE, 2005)

K	Tipo de clima
0,04	Precipitación anual mayor de 625 mm
0,02	Precipitación anual menor de 625 mm

Para el caso específico de vertederos de residuos de la industria de pasta y papel, cuyo mayor constituyente son lodos de depuradora de papelera, se toman los siguientes valores de K y L₀:

Tabla 20.- Factores a aplicar en vertederos de lodos papeleros (IHOBE, 2005)	
Factor	Unidad
K	0,03
L ₀	100 Tm/Tm residuo seco

Para vertederos operativos que continúan recibiendo residuos el factor C es 0, por lo que el componente de la ecuación en el que interviene resulta:

$$e^{-kc} = 1$$

El factor L₀ depende del contenido orgánico del residuo y de la humedad. Se evalúa mediante la ecuación:

$$L_0 = DOC \cdot DOC_f \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot MCF$$

- MCF Factor de corrección de un vertedero:
 - Para un vertedero moderno gestionado, MCF=1
 - Para un vertedero no gestionado poco profundo (<5 m), MCF=0,4
 - Para un vertedero no gestionado profundo (>5 m), MCF=0,8

- DOC Fracción de carbono orgánico biodegradable en el residuo

$$DOC = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,3 \cdot D$$

- A Tanto por uno en peso de la fracción de papel y textiles
 - B Tanto por uno en peso de la fracción de resto de podas de jardín y bosques
 - C Tanto por uno en peso de la fracción de restos de alimentos
 - D Tanto por uno en peso de la fracción de madera
- DOC_f Parte de la fracción de carbono orgánico degradable (DOC) que se convierte en gas de vertedero:

$$DOC_f = 0,014 \cdot T^a + 0,27$$

La temperatura (T^a) de la zona anaerobia se toma por defecto 35° C, por lo que:

$$DOC_f = 0,77$$

- F Fracción de CH₄ del gas de un vertedero gestionado, por defecto se toma 0,5

Para el cálculo de DOC en caso de no disponer de datos de los residuos depositados en el vertedero, las fracciones típicas de los RSU son:

Tabla 21.- Fracciones típicas de residuos orgánicos en vertederos de RSU respecto al total de residuos depositados: referencia general (TCHOBANOGLIOUS y KREITH, 2002) y referencia en la CAPV (GOBIERNO VASCO, 2015)

Tipo de residuos	Porcentaje en peso	
	Ref. general	Ref. CAPV
Orgánicos		
Biorresiduos (alimentos, etc...)	15	32
Papel/cartón	44	20
Textiles	2	3
Restos de jardinería	12	1
Madera	2	1

El valor finalmente obtenido de M_{CH₄} es en Tm de CH₄. Para convertirlo en m³ en condiciones de presión de 1 atm y 32,2º C se aplica la conversión:

$$1 \text{ kg de CH}_4 = 1,56510375 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 \text{ (a 1 atm, 32,2º C)}$$

Para calcular la fracción restante de los gases emitidos junto con el CH₄ se consideran las siguientes proporciones en volumen (m³):

$$V_{CO_2} = V_{CH_4} \cdot \frac{40}{55}$$

$$V_{N_2} = V_{CH_4} \cdot \frac{5}{55}$$

Siendo el total de los gases emitidos, considerando despreciable la fracción de NMVOC:

$$V_T = V_{CH_4} + V_{CO_2} + V_{N_2}$$

A partir de este valor de volumen total de gas emitido, se determinará:

- Consumo de agua en la generación de este gas (que representa una variación del contenido interior de agua e el vertedero):
 - Multiplicando el volumen de gas emitido por el valor típico señalado de 0,215 kg de agua por m³ de gas.
- Volumen de agua emitido (que representa una salida neta/física de agua desde el vertedero):
 - Multiplicando el volumen de gas emitido por el valor típico señalado de 0,035 kg de agua por m³ de gas.

4.2.5.3.- Resultados

Los resultados incluirán, para el período considerado, volumen de gas emitido, volumen de agua consumido y volumen de vapor de agua emitido junto con el gas. De cara al modelo conceptual del balance hídrico, se tendrá en cuenta que el consumo de agua es una salida independiente de la emisión de vapor de agua en el sentido que no representa una salida “física”.

4.3.- Variación interior

Las variaciones en el contenido de agua-lixiviado en el interior de la masa de residuos del vertedero se calcularán como se sintetiza en la tabla siguiente y se desarrolla en los apartados posteriores.

<i>Tabla 22.- Metodología del cálculo de la variación interior</i>	
Datos de partida	Cálculos
Variación en el agua libre almacenada (VS)	
Niveles freáticos de los lixiviados en el interior del vertedero Coeficiente de almacenamiento-porosidad eficaz de la masa de residuos Hidrograma de caudales de lixiviados Datos meteorológicos	Estimaciones basadas en la posición del nivel de lixiviados dentro del vertedero y en la porosidad o coeficiente de almacenamiento de los residuos, bien de datos directos, bien de datos bibliográficos o de otros vertederos comparables. Análisis de la curva de agotamiento de los caudales de lixiviados
Variación en la humedad del residuo y otros materiales (HR)	
Ensayos de laboratorio	Datos directos Estimaciones basadas en la humedad inicial y

	en la capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los residuos derivados de datos bibliográficos o de otros vertederos comparables
Variación en el agua por reacciones químicas y biológicas (VQB)	
Previsiblemente sin datos reales	Estimaciones basadas en la generación de biogás y en datos bibliográficos

4.3.1.- Variación en el agua libre almacenada (VS)

En un momento cualquiera, en un vertedero en el que se producen entradas de agua por precipitación u otros mecanismos, existe una cierta cantidad de agua libre almacenada en su interior. Por agua libre se entiende el agua que puede circular libremente por los poros del acúmulo por la acción de la gravedad, distinguiéndose en este sentido del agua adherida que constituye la humedad del residuo y otros materiales depositados. El agua libre puede presentarse en dos situaciones o lugares dentro del vertedero en un momento determinado:

- Acumulada en la zona saturada del vertedero llenando todos sus poros, pudiendo existir típicamente:
 - Una zona saturada base en el fondo del vertedero que determina un nivel freático interno asimismo “base”.
 - Una o más zonas saturadas colgadas respecto a la zona anterior, con sus niveles freáticos asimismo colgados, determinados por la existencia de capas de baja permeabilidad intercaladas que provocan que el agua infiltrada, en su descenso, encuentre una cierta barrera para su movimiento y se acumule por encima.
- En tránsito vertical desde los lugares de entrada, típicamente en descenso desde las superficies por donde se infiltran aguas de precipitación.

El cálculo de la variación del agua libre almacenada debe partir teóricamente del cálculo del agua almacenada al comienzo y al final del período considerado por lo que debería calcularse qué cantidad de agua se encuentra almacenada en la zona saturada y qué cantidad en tránsito vertical en cada uno de dichos momentos.

Para el cálculo del agua en la zona saturada se partiría teóricamente del conocimiento geométrico de dichas zonas (volumen total que abarcan tanto en base como colgadas) y de la porosidad eficaz o coeficiente de almacenamiento. El cálculo aproximado del agua en tránsito es excesivamente complejo o inviable salvo en circunstancias teóricas muy concretas (uniformidad en la masa de residuos, zona/s saturada/s y parámetros hidrogeológicos conocidos con detalle, infiltración y movimiento interno del agua controlados, etc.). En los

vertederos “reales”, la heterogeneidad del medio y la ausencia de datos hacen que este tipo de métodos de cálculo sean impracticables.

Consecuentemente con lo anterior, y tal como se ha indicado en uno de los capítulos iniciales de esta guía, debe tratarse de que el período de balance sea entre fin de estiaje y fin de estiaje (año hidrológico) para que el almacenamiento sea mínimo en ambos momentos y las variaciones que pueda haber en él sean menos relevantes. Si, por el contrario, se toman como inicio o final momentos coincidentes con épocas lluviosas, el agua almacenada en uno de esos momentos podrá ser significativa y al estimar la variación que se produce el valor resultante presentará una mayor incertidumbre.

En un vertedero que opera correctamente (sin fugas o filtraciones), el agua almacenada libremente es la que genera el caudal de lixiviados que se está evacuando y controlando. Por ello, el análisis del hidrograma o serie continua de los caudales de lixiviados, junto con las precipitaciones, puede ofrecer información en este sentido y, por ello, será el método que se aplique para evaluar las variaciones en el agua libre almacenada a falta de datos concretos sobre coeficientes de almacenamiento, niveles freáticos en el interior, etc.

4.3.1.1.- Datos de partida

Los datos de partida serán:

- Hidrograma del caudal de lixiviados.
- Serie de precipitaciones.

4.3.1.2.- Cálculos

Por comparación con un sistema hidrogeológico natural, en condiciones de ausencia de recarga por precipitación, y sin intervención de recargas adicionales o de circunstancias anómalas (fugas, etc.), la evolución de los caudales de lixiviados que se evacúan por gravedad o por bombeo continuo dibuja un progresivo e ininterrumpido descenso a partir de un pico determinado por las últimas lluvias o recarga general al sistema.

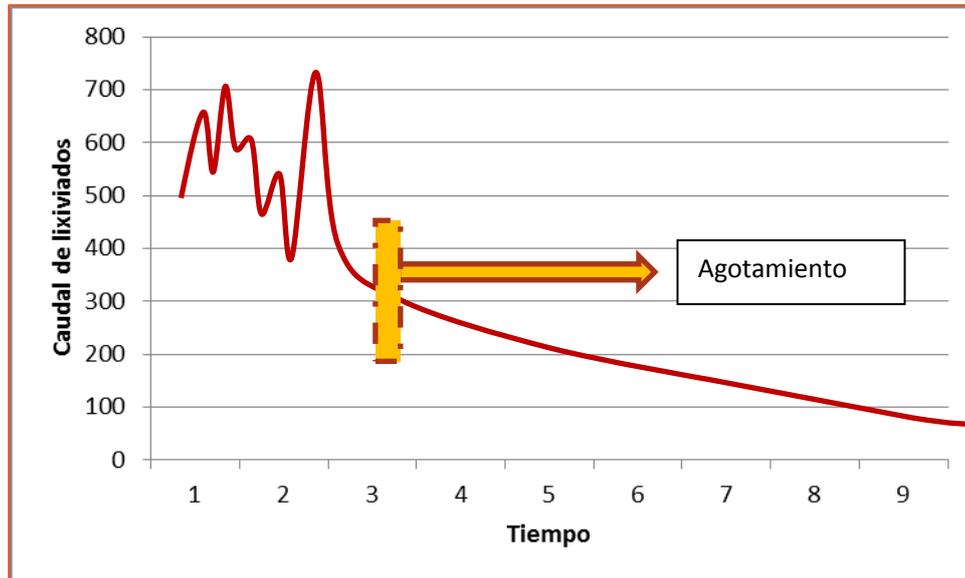


Figura 27.- Hidrograma característico del caudal de lixiviados en una época de estiaje (sin recarga).
A partir de un punto se evidencia el agotamiento del sistema pudiendo este ser estimado

En ausencia de recarga, a partir de un punto del descenso, esta curva suele responder a la siguiente ecuación que representa el agotamiento progresivo del sistema:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Q: caudal de lixiviados en un momento dado (o "futuro")

Q_0 : caudal de lixiviados en un momento anterior (o "presente")

e: 2,718..... base de logaritmo natural

α : coeficiente de agotamiento, en unidades de tiempo⁻¹ (en general días⁻¹)

t: tiempo entre Q_0 y Q (en unidades inversas de α)

El coeficiente de agotamiento (α) es característico del sistema, en este caso del vertedero, bajo unas determinadas condiciones del mismo. Tanto este coeficiente como, en general, la morfología de la curva de descensos de los caudales de lixiviados, depende de las condiciones concretas de un vertedero en un determinado intervalo de tiempo. No es, por ello, constante con el tiempo sea cual sea el estado y características internas del acúmulo de residuos. Cuantitativamente depende de la transmisividad (T) y del coeficiente de almacenamiento (S) del vertedero además de las dimensiones del medio que se está drenando.

A partir del análisis de la curva de descensos, y a la luz de la ecuación anterior que relaciona caudal en un momento dado con un caudal anterior y con el coeficiente de agotamiento, es posible determinar este coeficiente y, con ello, extraer algunas conclusiones sobre el funcionamiento del vertedero y establecer comparaciones con épocas anteriores o distintas del mismo vertedero.

Para calcular el coeficiente de agotamiento se parte de la transformación de la ecuación indicada:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

a esta en logaritmos decimales:

$$\log Q = \frac{(-\alpha t)}{2,3} \cdot \log Q_0$$

Aquí $\log Q$ es variable dependiente ("y"), $\log Q_0$ es constante, y t es variable independiente ("x"), por lo que esta ecuación es la de una recta del tipo $y = a \cdot x$ si el tiempo está en escala normal y Q en escala logarítmica. La pendiente (negativa) será entonces $-\alpha/2,3$.

Contando con los registros de los caudales de lixiviados evacuados durante un período suficientemente largo en ausencia de precipitaciones-recarga, el procedimiento a emplear es el siguiente:

- Se representan primero los caudales de lixiviados en una gráfica aritmética convencional, con los caudales en el eje Y o vertical y el tiempo en el eje X u horizontal. Esta gráfica nos permitirá visualizar mejor el período o los períodos de más prolongado descenso donde aplicar el método de cálculo del coeficiente de agotamiento.
- Se escoge ese período o períodos de descenso y se representan los mismos datos de caudales-tiempo sobre una gráfica semilogarítmica, con los caudales en el eje logarítmico Y o vertical y el tiempo en el eje aritmético X u horizontal. Los puntos así representados dibujarán, en el caso más típico, primero una curva y después una recta (aproximadamente) a partir de un determinado momento del descenso.

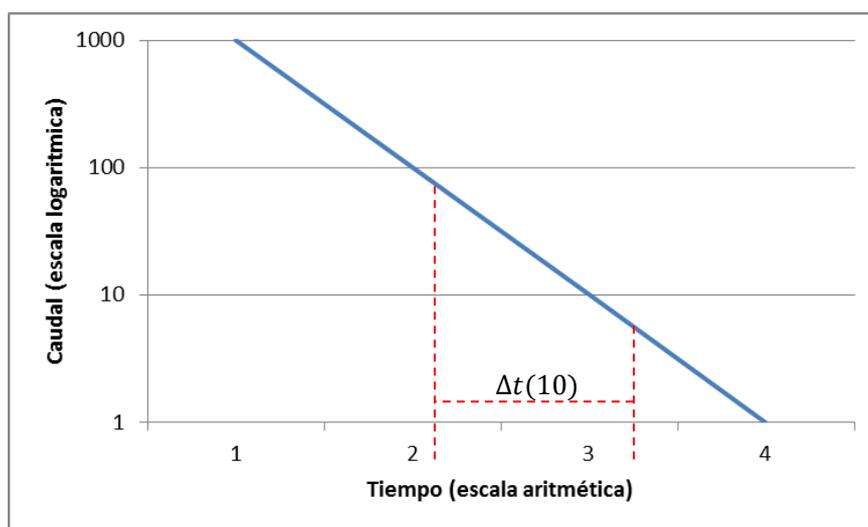


Figura 28.- Recta de agotamiento del hidrograma de caudales de lixiviados (en escala semilogarítmica) que permite calcular el coeficiente de agotamiento

- Con esta recta, y de forma gráfica, se medirá el intervalo de tiempo ($\Delta t(10)$) que corresponde a un período logarítmico de caudales (por ejemplo entre 1 y 10 o entre 10 y 100 o entre 100 y 1.000) y se calculará el coeficiente según la expresión:

$$\alpha = \frac{2,3}{\Delta t(10)}$$

Tanto la morfología del descenso como el valor del coeficiente de agotamiento se relacionan con las características concretas de un vertedero en un período concreto, no siendo extrapolables a diferentes vertederos ni, dentro del mismo, a diferentes condiciones.

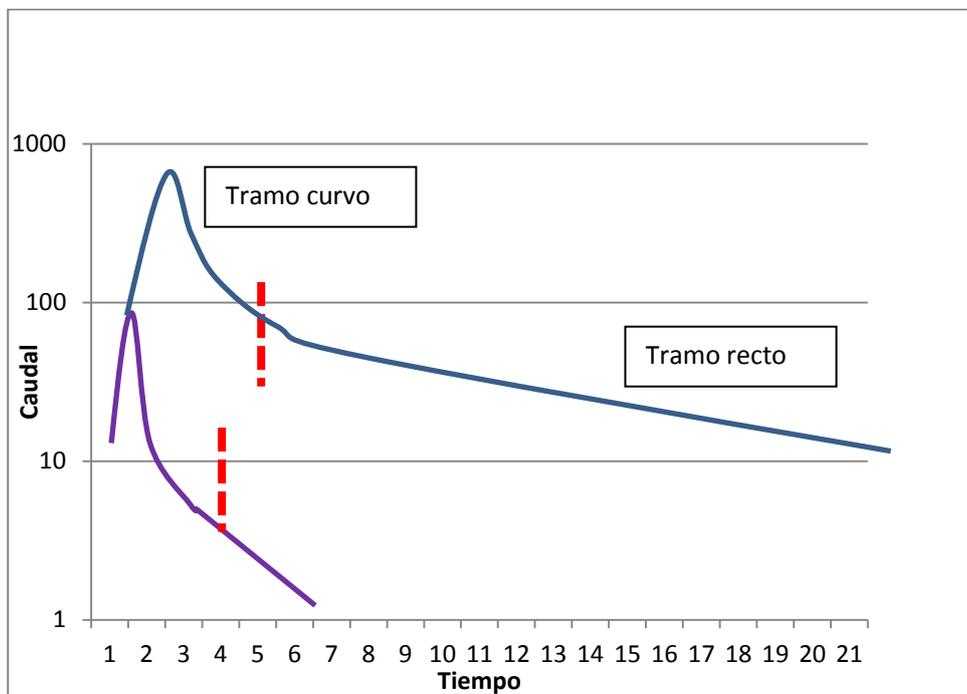


Figura 29.- Diferentes agotamientos en diferentes vertederos representados en escala semilogarítmica. Cada uno determina un coeficiente de agotamiento diferente

En ocasiones es posible dibujar o deducir aproximadamente la recta pretendida incluso cuando dentro del descenso general se producen ligeras precipitaciones que determinan aumentos de caudal pero estos pueden ser superpuestos a la recta sin variación en su pendiente.

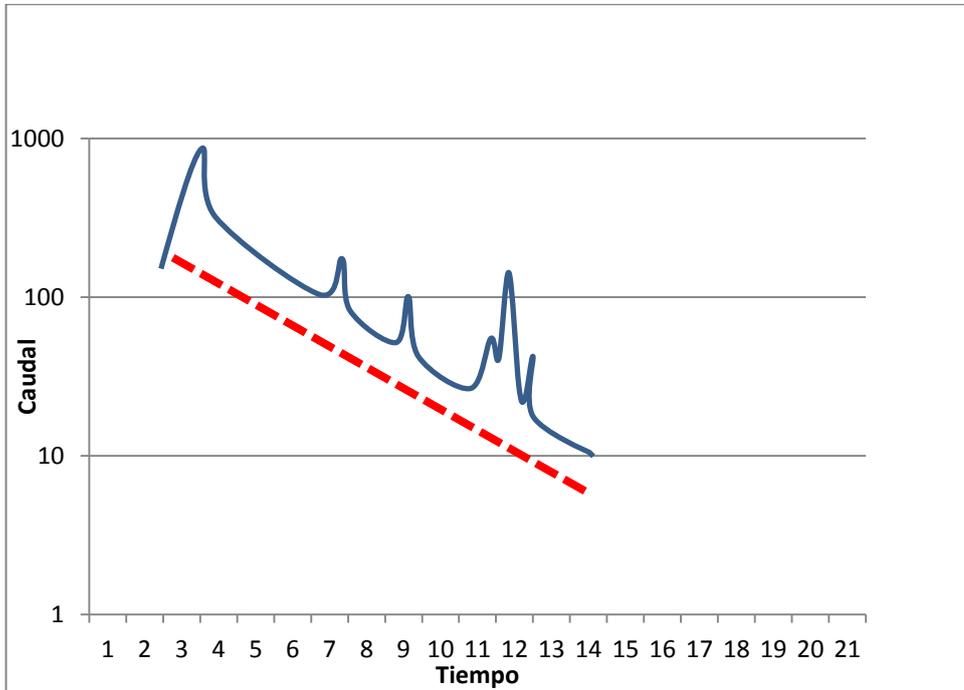


Figura 30.-- Construcción de la recta de agotamiento con pequeñas recargas que no modifican la trayectoria global de descensos y agotamiento

Para un mismo vertedero y condiciones sin cambio, el coeficiente de agotamiento así calculado es teóricamente constante de tal forma que si eso se produce, el valor del coeficiente calculado a partir de varios descensos-agotamientos que se sucedan a lo largo de un período debe ser aproximadamente el mismo. Este coeficiente será tanto mayor cuanto mayor sea la pendiente de la recta que se dibuja, es decir, cuanto más rápido se vaya vaciando el vertedero tras una recarga. Esta rapidez en el vaciado está directamente relacionada con la permeabilidad-transmisividad del acúmulo de residuos (a mayor transmisividad más rápida será la descarga) e inversamente relacionada con el coeficiente o capacidad de almacenamiento que posea (a mayor almacenamiento, supuesta una transmisividad constante, la descarga será más lenta).

A partir del valor del coeficiente de agotamiento es posible teóricamente calcular la cantidad de agua que queda por salir del vertedero en un momento dado del estiaje si no existiera una recarga de agua (*volumen dinámico*). Para ello se parte de la expresión general y de que, en un instante dado, el caudal de lixiviados que se evacúan es volumen/tiempo:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad \text{y} \quad dQ = dV/dt$$

Operando estas expresiones se obtiene finalmente que el volumen dinámico (V_d) en un momento dado del agotamiento (en ausencia de recarga) es:

$$V_d = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Este volumen representa el volumen de lixiviados que saldría, a partir del momento considerado, en un tiempo indefinido-infinito si no existiera recarga. Esta expresión es utilizable únicamente contando con la recta de agotamiento dibujada en representación semilogarítmica. No es aplicable a cualquier otro momento y caudal.

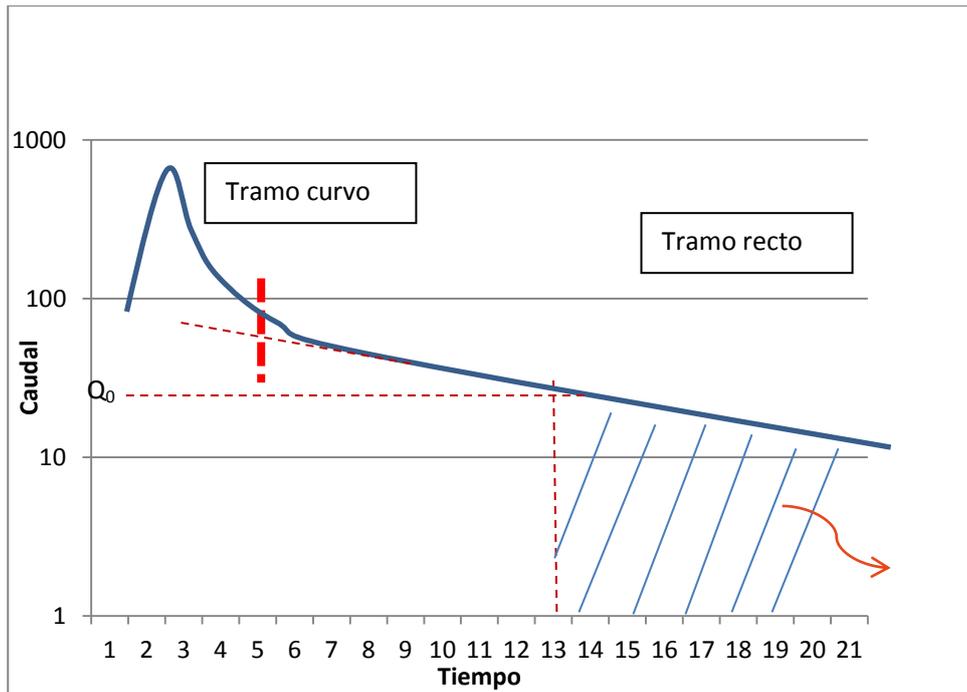


Figura 31.-- Cálculo del volumen dinámico en un momento del agotamiento (ver texto). El área rallada corresponde al volumen que saldría en un tiempo indefinido a partir del día 13

Aplicando este procedimiento de cálculo, es posible establecer comparaciones entre momentos de diferentes estiajes separados en el tiempo, con sus correspondientes volúmenes dinámicos (Vd_1 y Vd_2), y determinar con ello si ha habido variación en dicho volumen:

$$VS = Vd_2 - Vd_1$$

De esta forma, puede deducirse si han existido variaciones en el agua almacenada libremente a lo largo del período considerado para el balance hídrico o si, por el contrario, puede admitirse que la cantidad de agua almacenada al inicio y al final es la misma o muy similar. Este último caso (variación nula) se producirá si los dos momentos considerados (inicio y final del período de balance) corresponden a situaciones de decrecida con la misma pendiente y con el mismo caudal de lixiviados.

4.3.1.3.- Resultados

Los resultados se presentarán, en unidades de volumen, como variación entre los momentos inicial y final del período considerado para el balance hídrico. Se detallarán los supuestos y cálculos realizados.

4.3.2.- Variación en la humedad del residuo y otros materiales (VHR)

Además de las variaciones en el agua libre almacenada según se ha desarrollado en el anterior apartado, los residuos y otros materiales depositados en el vaso sufren cambios de humedad debido fundamentalmente a dos causas potenciales que pueden intervenir, en sentido contrario, en un vertedero:

- Incremento de la humedad debido a la adhesión y retención entre los poros de agua que contacta con las partículas sólidas.
- Detrimiento de la humedad debido a reacciones químicas y biológicas incluyendo el consumo de agua por parte de microorganismos. En la capa más superficial, a este mecanismo se añade la posible evapotranspiración.

Como en el caso de otros términos del balance, la cuantificación exacta de estas variaciones resulta inviable pudiendo, no obstante, efectuarse alguna aproximación en coherencia con descripciones anteriores del funcionamiento hídrico en el interior de un vertedero.

Tal como se ha señalado, los residuos y otros materiales que son depositados en un vertedero entran con una determinada proporción de agua (humedad) que constituye una de las entradas consideradas para el balance. Teóricamente, y sin considerar ahora las posibles reacciones químicas y biológicas, la humedad de entrada puede variar de dos formas:

- Por evapotranspiración, que afecta sólo a la superficie expuesta y a los primeros decímetros salvo que exista un flujo de calor significativo en el interior del vertedero. Este fenómeno implicará un descenso en la humedad del residuo hasta un límite mínimo por debajo del cual, en condiciones naturales-normales, no es posible extraer más agua quedando una cierta humedad residual (*punto de marchitez permanente*).
- Por adición de agua, típicamente precipitación, que implicará un aumento de la humedad del residuo hasta un límite a partir del cual los materiales depositados no pueden retener más agua y entonces toda el agua que se aplique sobre ellos circula libremente. Este límite se conoce como *capacidad de campo*. En realidad el agua libre comienza a circular antes de que todas las partículas completen su capacidad de campo debido a la heterogeneidad del medio pero, como aproximación, se considerará el fenómeno tal como se ha descrito.

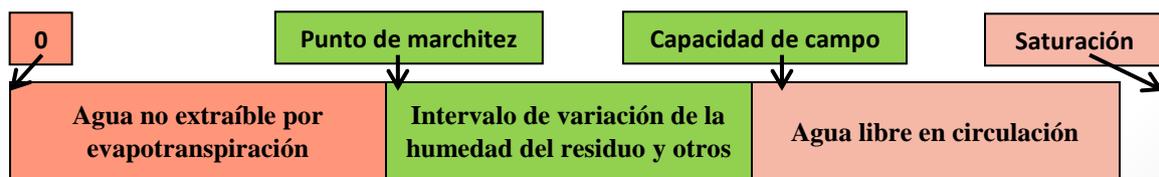


Figura 32.- Términos asociados a la humedad. En condiciones naturales el intervalo de variación de la humedad del residuo y otros materiales se sitúa entre el punto de marchitez y la capacidad de campo salvo que los residuos depositados en el vertedero hayan sido sometidos previamente a

tratamientos térmicos o similares que hayan hecho descender su humedad por debajo del punto de marchitez

Las variaciones determinadas por la evapotranspiración han sido ya consideradas al calcular este parámetro como salida y sólo afectan a la capa más superficial. Estas variaciones son continuas a lo largo del tiempo en el sentido que, supuesta una misma capa superficial, se producen sucesivamente eventos de incremento de la humedad por la entrada de precipitación y eventos de descenso de dicha humedad por la evapotranspiración. Sin embargo, el resultado final neto en cuanto a variación de humedad a lo largo del período de balance para la capa superficial afectada por la evapotranspiración, es únicamente la diferencia entre la humedad en el momento de inicio y la humedad en el momento final del balance. No es necesario, por ello, evaluar específicamente para este parámetro (variación en la humedad) todo el continuo de fenómenos acaecidos sino retener sólo los datos iniciales y finales. Estos datos de la capa superficial afectada por la evapotranspiración se derivan de los cálculos incluidos en el apartado de Salidas-Evapotranspiración, ya que en ellos, precisamente, se considera la humedad de esta capa.

El incremento de humedad determinado por la entrada de precipitación u otro tipo de recarga tiene, como se ha indicado, un límite a partir del cual los materiales no retienen más agua (capacidad de campo) circulando entonces el agua libremente. En condiciones teóricas, por tanto, antes de que se produzca el flujo y el almacenamiento de agua libre, los residuos y otros materiales están con su humedad máxima a capacidad de campo. Bajo esta perspectiva, y como aproximación a la compleja realidad, puede admitirse que, dado que existe precipitación y circulación de agua libre, por debajo de la capa superficial sujeta a evapotranspiración los residuos y otros materiales depositados se encuentran a capacidad de campo. Ello implicaría que la humedad en el momento del depósito, salvo en la capa superior sujeta a evapotranspiración, se incrementa hasta la capacidad de campo debido a la entrada de precipitación.

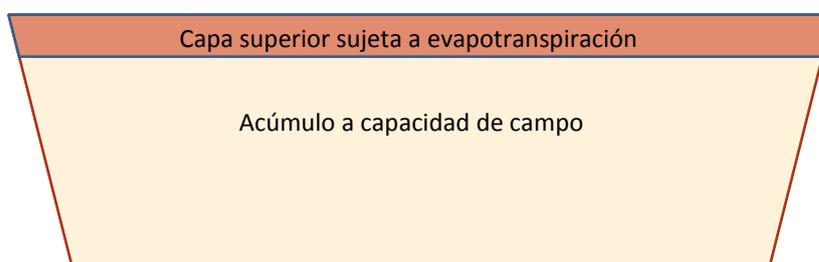


Figura 33.- Aproximación admitida para calcular las variaciones de humedad del residuo y otros materiales. La humedad en el momento del depósito, salvo en la capa superior sujeta a evapotranspiración, se incrementa hasta la capacidad de campo debido a la entrada de precipitación

En relación con las variaciones en la humedad del residuo y otros materiales determinadas por reacciones químicas y biológicas, incluyendo el consumo de agua por parte de microorganismos, podemos efectuar la siguiente consideración. Estas reacciones pueden liberar, fijar o consumir agua proveniente de la humedad del residuo y otros materiales o del agua libre en circulación

por el interior del acúmulo. Aunque estos procesos representen en el detalle variaciones temporales en dicha humedad puede admitirse simplificada que si un acúmulo está ya con una humedad a capacidad de campo no se producirán variaciones netas en dicha humedad entre el inicio y el final del período de balance si es que hay agua que circule libremente ya que esta humedecerá “de inmediato” aquellas partículas que han visto consumida o liberada el agua que tenían retenida.

4.3.2.1.- Datos de partida

De acuerdo con lo anterior, los datos de partida para el cálculo de las variaciones de humedad en los residuos y otros materiales depositados se basarán en:

- Humedad de entrada de residuos y otros materiales y capacidad de campo de los mismos.
- Cantidad de residuos y materiales depositados.
- Datos de la capa superficial sujeta a evapotranspiración.

4.3.2.2.- Cálculos

Para el cálculo de las variaciones de humedad deben considerarse inicialmente las cantidades y distribución superficial de los residuos y materiales depositados teniendo en cuenta, adicionalmente, la capa sujeta a evapotranspiración que existía en el inicio del período. En el caso más general de que la entrada de residuos haya sido de suficiente magnitud, las variaciones derivarán de:

- Sepultamiento de la capa sujeta a evapotranspiración en el inicio del período y, con ello, humedecimiento máximo hasta su capacidad de campo. La variación de humedad será el resultado de restar capacidad de campo de esa capa menos la humedad que tenía al inicio. La humedad que tenía al inicio derivará de los cálculos del balance del suelo (ver apartado de Salidas-Evapotranspiración).
- Depósito de nuevos residuos y materiales a lo largo del período de balance, con su humedad de entrada:
 - Si quedan dispuestos a una profundidad tal que no les alcanza la evapotranspiración y, por tanto, pasan de su humedad de entrada a su humedad máxima a capacidad de campo, la variación de humedad será el resultado de restar dicha capacidad de campo menos humedad de entrada.
 - Si quedan dispuestos en la capa sujeta a evapotranspiración se obtendrán los datos de humedad final del cálculo de la evapotranspiración según se ha detallado en el apartado correspondiente.

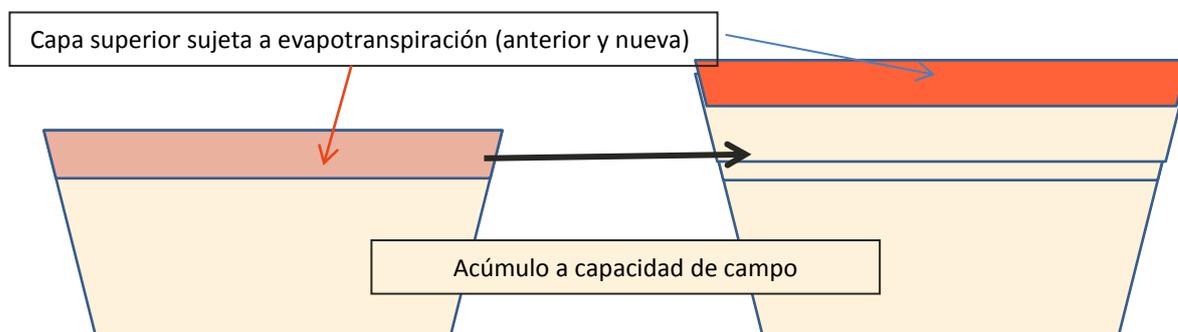


Figura 34.-- Esquema de la situación inicial y final en el periodo de balance para ilustrar el cálculo de las variaciones de humedad del residuo y otros materiales (ver explicación en el texto)

Para calcular la variación de humedad como diferencia entre la capacidad de campo y la humedad de entrada de los residuos y otros materiales, se considerarán, a falta de otros datos, los valores correspondientes que se sintetizan en la siguiente tabla y que han quedado ya parcialmente recogidos en apartados anteriores.

Tabla 23.- Valores típicos de humedad de entrada, capacidad de campo y variación de humedad o capacidad de retención a partir de la humedad de entrada (valores en volumen de agua/volumen total)(extraído de SCHROEDER et al, 1994, y FAO, 2006)

Tipo	Humedad entrada		Capacidad de campo		Variación	
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango	Típico
Residuos urbanos	0,07-0,30	0,15	---	0,30	0,0-0,23	0,15
Arenas	0,02-0,17	0,09	0,07-0,17	0,12	0,0-0,15	0,07
Limos	0,12-0,36	0,24	0,28-0,36	0,32	0,0-0,24	0,12
Arcillas	0,20-0,40	0,30	0,32-0,40	0,36	0,0-0,20	0,10

A la hora de evaluar la variación interior de este término deberán considerarse las diferentes unidades que a veces se utilizan (volumen agua/volumen total, peso agua/peso total, peso agua/peso sólido) y transformarlas, si procede, a volúmenes de agua.

4.3.2.3.- Resultados

Los resultados de la variación del contenido de humedad del residuo y otros materiales se expresarán en unidades de volumen para el periodo considerado, detallándose procedimientos y cálculos efectuados.

4.3.3.- Variación por reacciones químicas y biológicas (VQB)

En el interior de los vertederos se producen una serie de reacciones químicas y biológicas, incluyendo el consumo de agua por parte de microorganismos, que pueden determinar una variación en el contenido de agua en su interior. Las reacciones pueden implicar:

- Un consumo de agua como el que se produce en procesos de hidrólisis, fraguado o generación de biogás.
- Una liberación de agua como la que se produce en algunos de los procesos de degradación aerobia.

El desarrollo y conocimiento en detalle de todos los posibles procesos y reacciones y en particular su aplicación a un vertedero concreto resulta impracticable. En su lugar, y salvo que de algún tipo específico de vertedero (por el tipo concreto de residuos depositado) se puedan evaluar el conjunto de reacciones que pueden producirse, en este apartado se considerará únicamente el agua consumida durante la generación de biogás, manteniéndose una incertidumbre respecto al resto de posibles reacciones y su intervención en cuanto a consumo o liberación de agua.

Tal como se ha desarrollado en el apartado relativo a Salidas-Vapor de agua con el biogás, en relación con la generación de gas existe:

- Un consumo de agua en la generación: valor típico de 0,215 kg de agua por m³ de gas que se genera.
- Una emisión de agua como vapor junto con el biogás: valor típico de 0,035 kg de agua por m³ de gas.

El origen de este agua está en la humedad de los residuos y en el agua libre almacenada.

4.3.3.1.- Datos de partida

Dependiendo del sistema de gestión establecido respecto al biogás, los datos de partida para el cálculo serán diferentes. En cualquier caso se trata de disponer de datos de volúmenes de biogás emitidos y, si existen, de contenido en vapor de agua. Las posibles situaciones son las siguientes:

- En el caso de vertederos con sistemas de captación de gas, sin emisiones a la atmósfera y medición de volúmenes captados, se tomarán dichos datos de las cantidades captadas.
- En el caso de vertederos con emisión libre a la atmósfera se estimará el volumen que representan estas emisiones de acuerdo con el procedimiento que se indica más adelante.

4.3.3.2.- Cálculos

Los cálculos se desarrollarán según lo indicado en el apartado de Salidas-Vapor de agua con el biogás determinándose el volumen de gas emitido tanto en vertederos con sistema de captación y gestión específica como en vertederos con emisión directa a la atmósfera o en vertederos con sistemas específicos en sólo parte de ellos.

Una vez determinado el volumen de biogás generado, se aplicarán los valores anteriores relativos al consumo de agua en la generación (0,215 kg de agua por m³ de gas) y emisión de vapor de agua hacia el exterior junto con el biogás (0,035 kg de agua por m³ de gas).

4.3.3.3.- Resultados

Los resultados incluirán, para el período considerado, volumen de gas emitido, volumen de agua consumido y volumen de vapor de agua emitido junto con el gas. De cara al modelo conceptual del balance hídrico, se tendrá en cuenta que el consumo de agua es una salida independiente de la emisión de vapor de agua en el sentido que no representa una salida "física". La emisión de vapor de agua se ha considerado por ello con anterioridad como un apartado específico de salida de agua del vertedero.

5.- EXPRESIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Una vez realizados los cálculos anteriores, se aplicará la expresión general del balance hídrico de un vertedero para un período determinado:

$$\text{ENTRADAS} = \text{SALIDAS} \pm \text{VARIACIÓN INTERIOR}$$

Se sumarán separadamente entradas, salidas y variación interior y se expresará ordenadamente el resultado de tal forma que se tengan resumidos en un mismo lugar o tabla los resultados individuales de cada uno de los términos junto con el resultado global de la ecuación del balance hídrico.

ENTRADAS	SALIDAS	VARIACIÓN INTERIOR
Precipitación (PR) +	Evapotranspiración (ETR) +	Agua libre almacenada (VS) +/-
Escorrentía superficial (ESP) +	Flujo superficial (FSP) +	Humedad residuo y otros (HR) +/-
Escorrentía subterránea (ESB) +	Lixiviados controlados (LXC) +	Reacciones (VQB)
Recarga artificial (RA) +	Lixiviados incontrolados (LXI) +	
Humedad residuo y otros (HR) +	Vapor agua con biogás (VBG)	

El planteamiento y presentación del resultado global del balance hídrico se efectuará sobre la base del modelo conceptual. Los resultados numéricos deben tener en cuenta los flujos reales que se producen. En algunos casos, la intervención de estos flujos ha podido ser calculada o analizada bajo diferentes epígrafes por lo que debe prestarse especial atención a no contar dos veces la misma agua o, en sentido contrario, a no contarla ninguna vez. Por ello, es importante tener en cuenta en cada caso a qué flujo corresponde la cantidad de agua calculada y acompañar la expresión numérica del balance con una breve descripción o esquema del modelo conceptual utilizado que permita hacerse una mejor idea de los flujos y cantidades intervinientes.

La presentación cuantitativa del balance hídrico incluirá como epígrafes todos y cada uno de los posibles términos y tipos de entradas, salidas y variación interior aunque su valor sea 0 al no haber intervenido de acuerdo con el modelo conceptual. Quedará, así, más claro el origen de las cantidades que se indican a la vez que facilitará la tarea del posterior análisis de los datos. Se deberá incluir expresamente el sentido de las variaciones interiores (si son utilización o consumo de agua asociable a una salida o si son liberaciones de agua asociables a entradas).

El **balance global**, en los términos en los que ha sido planteado, incluye la consideración de toda la superficie del vaso, incluyendo no sólo la zona donde los residuos están expuestos sino también las cubiertas y sellados que puedan existir.

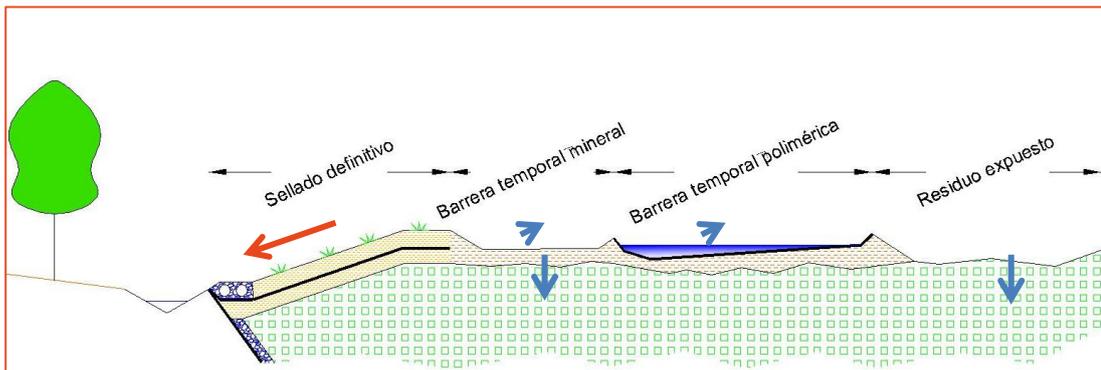


Figura 35.- El balance global incluye todas las superficies del vaso, no sólo aquellas en las que se produce infiltración directa hacia la masa de residuos

Tabla 24.- Balance hídrico global expresando cada término y tipo aunque no haya intervenido

Término	Tipo	Vol (m ³)
Entradas		
Precipitación (PR) sobre el vaso incluyendo superficies de residuos, cubiertas y sellados	Precipitación	10.000.000
Escorrentía superficial (ESP)	Curso superficial	No interviene
	Escorrentía de ladera	500.000
	Escorrentía de urbanización	600.000
	Desbordamiento canales y cunetas	No interviene
	Entrada desde cubiertas o sellados	No interviene
Escorrentía subterránea (ESB)	Surgencia ocluida	No interviene
	Entrada difusa	No interviene

<i>Tabla 24.- Balance hídrico global expresando cada término y tipo aunque no haya intervenido</i>		
Término	Tipo	Vol (m³)
Recarga artificial (RA)	Riegos con agua	10.000
	Recirculación de lixiviados	No interviene
	Vertidos agua (servicios, lavaderos, etc)	5.000
	Vertidos lixiviados propios o ajenos	No interviene
	Vertido condensados biogás	No interviene
	Fugas en depósitos o conducciones	No interviene
Humedad residuo y otros (HR)	Humedad del residuo	1.000
	Humedad de otros materiales	500
<i>Suma de entradas</i>		<i>11.116.500</i>
Salidas		
Evapotranspiración (ETR) desde todas las superficies del vaso incluyendo las de residuos, cubiertas y sellados	Evapotranspiración	6.000.000
Flujo sobre cubiertas y sellados (FSP)	Flujo sobre cubiertas y sellados derivado lateralmente	1.500.000
Lixiviados controlados (LXC)	Lixiviados controlados por gravedad	3.500.000
Lixiviados incontrolados (LXI)	Surgencias de lixiviados	No interviene
	Filtraciones hacia el entorno	No interviene
	Fugas en conducciones y depósitos	No interviene
Vapor de agua con biogás (VPG)	Vapor de agua emitido con biogás	500
<i>Suma salidas</i>		<i>11.000.500</i>
Variación interior		
En agua libre almacenada (VS)	Variación en agua libre almacenada	- 5.000
En humedad del residuo y otros (VHR)	En humedad del residuo	+ 1.000
	En humedad de otros materiales	+ 500

Tabla 24.- Balance hídrico global expresando cada término y tipo aunque no haya intervenido

Término	Tipo	Vol (m ³)				
Por reacciones (VQB)	Consumo en generación de biogás	+ 3.071				
<i>Suma variación interior</i>		- 429				
Resumen						
Entradas	=	Salidas	-	Variación interior	=	Resultado
11.116.500		11.000.500		429		11.000.071

En la variación interior, tal como está expresada la ecuación, se aplicará el signo + cuando el término implique la utilización o consumo de agua y el signo – cuando implique la liberación o producción de nueva agua que finalmente puede generar lixiviados.

El balance hídrico hasta aquí planteado o definido se refiere, para cada uno de los vasos, al conjunto de él incluyendo cubiertas, sellados, etc. y como tal debe ser modelizado y calculado en todos los casos. En ocasiones, dependiendo de las características del vertedero y de los flujos de entrada y salida, puede convenir acompañar este balance global de otro, más simplificado (**balance parcial**), asociado por ejemplo a la generación de lixiviados, es decir, considerando sólo los flujos que entran en contacto con la masa de residuos. En estos casos, y con el mismo criterio, se señalará sintéticamente el modelo conceptual de esa parte de los flujos y se deducirá la ecuación del balance sólo para ella.

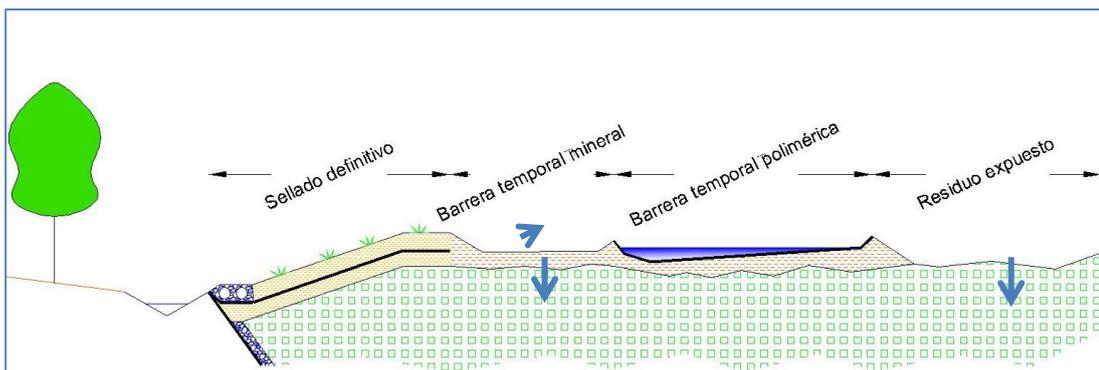


Figura 36.- El balance parcial relativo a la generación de lixiviados incluye sólo las superficies en las que se produce infiltración directa hacia la masa de residuos

<i>Tabla 25.- Balance hídrico parcial relativo a la generación de lixiviados</i>		
Término	Tipo	Vol (m³)
Entradas		
Precipitación (PR) sobre superficie cuyo drenaje, total o parcialmente, se infiltra o contacta con residuos	Precipitación	5.000.000
Escorrentía superficial (ESP) que alcanza la masa de residuos	Curso superficial	No interviene
	Escorrentía de ladera	500.000
	Escorrentía de urbanización	No interviene
	Desbordamiento canales y cunetas	No interviene
	Entrada desde cubiertas o sellados	No interviene
Escorrentía subterránea (ESB)	Surgencia ocluida	No interviene
	Entrada difusa	No interviene
Recarga artificial (RA)	Riegos con agua	10.000
	Recirculación de lixiviados	No interviene
	Vertidos agua (servicios, lavaderos, etc)	5.000
	Vertidos lixiviados propios o ajenos	No interviene
	Vertido condensados biogás	No interviene
	Fugas en depósitos o conducciones	No interviene
Humedad residuo y otros (HR)	Humedad del residuo	1.000
	Humedad de otros materiales	500
<i>Suma de entradas</i>		<i>5.516.500</i>
Salidas		
Evapotranspiración (ETR) derivada de la superficie cuyo drenaje, total o parcialmente, se infiltra o contacta con residuos	Evapotranspiración	2.000.000
Flujo sobre cubiertas y sellados (FSP)	Flujo sobre cubiertas y sellados	-----
Lixiviados controlados (LXC)	Lixiviados controlados por gravedad	3.500.000

<i>Tabla 25.- Balance hídrico parcial relativo a la generación de lixiviados</i>						
Término		Tipo			Vol (m³)	
Lixiviados incontrolados (LXI)		Surgencias de lixiviados			No interviene	
		Filtraciones hacia el entorno			No interviene	
		Fugas en conducciones y depósitos			No interviene	
Vapor de agua con biogás (VPG)		Vapor de agua emitido con biogás			500	
<i>Suma salidas</i>					6.000.000	
Variación interior						
En agua libre almacenada (VS)		Variación en agua libre almacenada			- 5.000	
En humedad del residuo y otros (VHR)		En humedad del residuo			+ 1.000	
		En humedad de otros materiales			+ 500	
Por reacciones (VQB)		Consumo en generación de biogás			+ 3.071	
<i>Suma variación interior</i>					- 429	
Resumen relativo a la generación de lixiviados						
Entradas	=	Salidas	-	Variación interior	=	Resultado
5.516.500		6.000.000		429		5.999.571

En los dos ejemplos anteriores (balance global y balance parcial relacionado con la generación de lixiviados), se ha planteado la precipitación (como entrada) y la evapotranspiración (como salida) en la forma en la que se incluyen en la ecuación general del balance hídrico. En ocasiones, puede ser conveniente modificar este tipo de presentación al objeto de individualizar mejor los flujos que se producen en realidad y asignar valores específicos de precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía superficial para cada tipo de superficie.

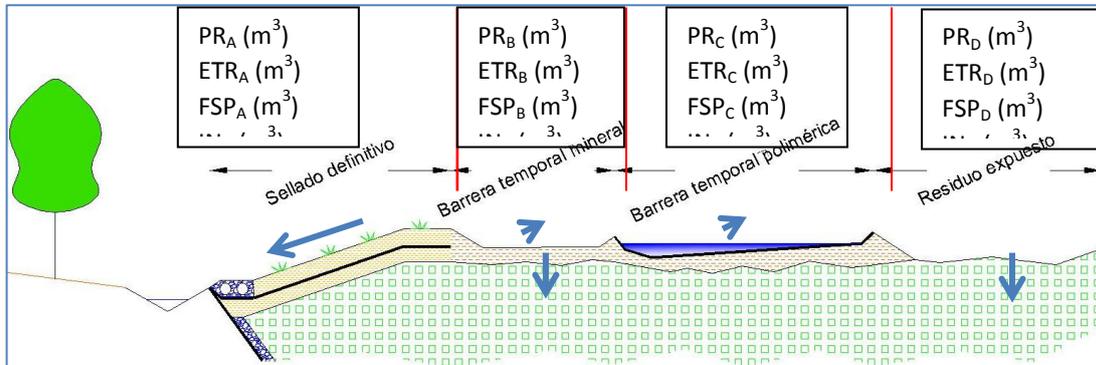


Figura 37.- Identificación más precisa de los flujos que se producen en cada tipo de superficie contando con los datos correspondientes de precipitación (PR), evapotranspiración (ETR), escorrentía superficial derivada lateralmente (FSP) e infiltración (IN)

Tanto a lo largo del proceso de cálculo como en la expresión final de la ecuación del balance hídrico se deberá tener especial cuidado en mantener la homogeneidad de las unidades que se utilicen. Los cálculos se refieren en todos los casos a volúmenes de aguas y lixiviados, por lo que deberá utilizarse la unidad del Sistema Internacional (m³). Esto obligará a transformar finalmente las unidades que procedan hasta convertirlas en volumen en el período de tiempo considerado (precipitación en mm a volumen caído sobre una superficie, caudal registrado en un caudalímetro a volumen que ha circulado en determinado tiempo, etc.), con independencia de que durante el propio desarrollo de los cálculos se utilicen por conveniencia otro tipo de unidades.

6.- ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO

Tras la realización y presentación del modelo conceptual, del cálculo de cada uno de los términos del balance hídrico y de la presentación de la ecuación de este se procederá a analizar los resultados obtenidos. Este análisis incluirá o tratará los siguientes aspectos:

- Incertidumbre.
- Interpretación.
- Conclusiones y recomendaciones.

6.1.- INCERTIDUMBRE

El primer aspecto a considerar dentro del análisis es la definición de la incertidumbre de los datos y cálculos empleados. Es difícil que los balances hídricos de los vertederos estén numéricamente ajustados debido a la ausencia o errores en los datos de partida y a los procedimientos de cálculo (simplificados) de los diferentes términos. Los cálculos incluyen estimaciones, comparaciones, coeficientes tipo, etc., que no representan exactamente la realidad y, por ello, los resultados numéricos que se obtienen no son cuantitativamente exactos en este sentido. No es de extrañar, por ello, que exista un desajuste final. Lo importante es analizar si este desajuste final se corresponde o no con un desajuste en el propio vertedero en el sentido de si implica que el vertedero no está funcionando como se ha supuesto en el modelo conceptual.

En ocasiones, los desajustes finales, incluso cuando son ya de una cierta magnitud, se achacan a errores intrínsecos en los cálculos o a la intervención de algún mecanismo o fenómeno no considerado en su verdadera magnitud sin tratar de revisar ni el modelo conceptual ni los cálculos efectuados. Surgen así, a veces, incoherencias al pretender justificar genéricamente los resultados sin tener en cuenta aspectos paralelos que condicionan lo que se intenta evidenciar. Sí, en un ejemplo extremo, se achacan desajustes a que el vertedero “ha almacenado más agua que la evaluada” habrá que comprobar que ello puede ser cierto teniendo en cuenta las épocas hidrológicas de inicio y final, la geometría del vertedero y la porosidad habitual o genérica. No vaya a ser que ello implique que el vertedero deba ser un embalse de agua por ser el volumen de agua a justificar el mismo que el volumen geométrico del vaso de vertido. Si al tratar de justificar los resultados se alude a que “ha debido existir más escorrentía superficial que la evaluada” se deberá, entonces, comprobar si el volumen que se sugiere es coherente con las precipitaciones y evapotranspiración que se indican. No vaya a ser que ello implique que ha habido una (inexistente) precipitación torrencial durante todo el año.

Este tipo de incoherencias respecto al balance global y su justificación pueden darse también, durante el proceso de cálculo, en relación con los resultados individuales de algunos de los términos que intervienen. Con independencia de la manifestada incertidumbre que implican los procedimientos de cálculo, estos deberán ser coherentes entre sí. No se puede aplicar “a

conveniencia” diferentes criterios para según qué términos. Si, como ejemplo, para el cálculo de la entrada de agua que puede suponer la infiltración de una cubierta mineral intermedia se adopta un determinado coeficiente, este mismo coeficiente (pasado a coeficiente de escorrentía) debe ser aplicado para el cálculo de la salida de agua que puede suponer la escorrentía superficial sobre dicha cubierta.

Por ello, durante el análisis de resultados del balance hídrico, en especial si este presenta desajustes, conviene repasar de forma cualitativa, para cada uno de los términos que han intervenido, cuál es el grado de incertidumbre y/o error que cabe esperar. No se trata de calcular estadística o matemáticamente ningún valor de la incertidumbre o el error que se haya podido cometer. Se trata de exponer de forma clara y ordenada cuáles son los términos cuyos resultados presentan intrínsecamente una mayor incertidumbre y cómo puede afectar esto al resultado final del balance hídrico.

6.1.1.- Origen

Con carácter indicativo, no exhaustivo, el origen de los principales errores o incertidumbres en los balances hídricos suele ser el siguiente.

- **Modelo conceptual**

- No considerar correctamente las características del vertedero y sus variaciones a lo largo del período en cuanto a superficies abiertas o de depósito activo, disposición de cubiertas intermedias o sellados definitivos, operaciones de preparación del vaso, modificaciones en drenajes perimetrales, etc.
- No considerar alguno de los posibles términos, principalmente aquellos de los que no se dispone de información inicialmente o son “ocultos”:
 - Desbordamientos (puntuales o no) de canales y cunetas.
 - Entrada de aguas subterráneas.
 - Entradas por riegos, vertidos o fugas (continuas, semicontinuas o puntuales).
 - Filtraciones de lixiviados hacia el entorno.
 - Generación de biogás (consumo y emisión de agua) en vertederos sin sistema específico de gestión del gas.
- No considerar en su justa medida los flujos que realmente se producen y de las variaciones en tales flujos que se han producido a lo largo del período:
 - Entradas de escorrentías superficiales (ladera, urbanización adyacente) en momentos de intensas precipitaciones.

- Modificaciones en los flujos sobre cubiertas intermedias por ampliación, retirada o funcionamiento defectuoso de los sistemas de evacuación final en algún momento.
- **Precipitación (PR)**
 - Mal funcionamiento y/o mantenimiento del observatorio del vertedero.
 - Escasa representatividad del observatorio externo de referencia.
 - Registro incompleto de datos.
- **Escorrentía superficial (ESP)**
 - Consideración errónea del área (m^2) de las superficies generadoras de escorrentía en cada momento.
 - Coeficientes de infiltración-escorrentía aplicados.
- **Escorrentía subterránea (ESB)**
 - Funcionamiento hidrogeológico supuesto.
 - Coeficientes de permeabilidad aplicados.
- **Recarga artificial (RA)**
 - Ausencia de medición y datos reales.
- **Humedad del residuo y de otros materiales depositados (HR)**
 - Ausencia de datos de ensayos y, por consiguiente, valores típicos aplicados.
 - Ausencia de medición y datos reales sobre las cantidades depositadas de otros materiales (tierras de cubrición, etc.).
 - Falta de consideración de entradas de residuos especialmente húmedos (fangos por ejemplo).
- **Evapotranspiración (ETR)**
 - Representatividad o ausencia de datos meteorológicos de partida.
 - Consideración errónea de los diversos tipos de superficie desde donde se produce la evapotranspiración.
 - Coeficientes aplicados durante el cálculo.

- **Flujo superficial derivado de la precipitación (FSP)**
 - Consideración errónea del área (m^2) de las superficies generadoras de escorrentía en cada momento.
 - Coeficientes de infiltración-escorrentía aplicados.
- **Lixiviados controlados (LXC)**
 - Mal funcionamiento y/o mantenimiento del caudalímetro.
 - Registro incompleto de datos.
- **Lixiviados incontrolados (LXI)**
 - Funcionamiento hidrogeológico supuesto respecto a filtraciones al terreno y, en su caso, coeficientes de permeabilidad aplicados.
 - Fugas en el drenaje y evacuación de lixiviados o eventos no correctamente registrados en el caudalímetro.
- **Vapor de agua con el biogás (VBG)**
 - Volúmenes de gas emitido (captado o no).
 - Coeficientes aplicados.
- **Variación en el agua libre almacenada (VS)**
 - Inicio y/o final del período de balance en época de lluvias y condiciones hidrológicas de no estiaje.
 - Consideración errónea del agua libre almacenada (por ejemplo por hacer extensivos datos locales a todo el vertedero).
- **Variación en la humedad del residuo y de otros materiales (VR)**
 - Ausencia de medición y datos reales sobre las cantidades depositadas de otros materiales (tierras de cubrición, etc.).
 - Valores de humedad y de capacidad de campo aplicados.
- **Variación por reacciones químicas y biológicas (VQB)**
 - Desconocimiento de los procesos reales y su incidencia en el agua.
 - Volúmenes de gas emitido (captado o no).

- Coeficientes aplicados.

En cada caso se deberá ponderar si existen circunstancias o criterios que pueden modificar los resultados previamente obtenidos y, si es así, justificarlo y presentar un nuevo y definitivo balance “más ajustado” que sea coherente en todos sus extremos. No debe buscarse necesariamente que este nuevo balance esté matemáticamente ajustado pero sí debe manifestarse, principalmente, que se han contado todos los términos que realmente intervienen y que queda un error o incertidumbre residual difícilmente achacable a un término concreto que no tiene especial relevancia en el reparto del agua.

6.1.2.- Revisión de coeficientes y parámetros

A la hora de efectuar esta ponderación de circunstancias y criterios utilizados o, en general, a la hora de desarrollar los cálculos iniciales, puede resultar de ayuda la consulta de información anterior del mismo u otros vertederos similares así como de referencias técnicas como las que han servido para la elaboración de esta guía y de otro tipo de datos y estudios no centrados directamente en vertederos. Estos estudios y referencias pueden ser utilizados para:

- Evaluar si la magnitud calculada para los diferentes términos es “razonable” (por comparación, por ejemplo, con series de datos pluviométricos de observatorios de la red oficial, estudios climáticos regionales con valores generales de la evapotranspiración, etc.).
- Obtener datos sobre los rangos de variación de determinado coeficiente o parámetro pudiendo entonces acudir justificadamente al empleo de un valor diferente al inicialmente aplicado.
- Analizar con más detalle los procesos en el interior del vertedero (necesariamente simplificados anteriormente) y deducir, con ello, posibles variaciones respecto a los cálculos iniciales (por ejemplo efecto de la compactación).

En las siguientes tablas y figuras se incluyen algunos ejemplos que ayudan a ilustrar magnitudes y rangos de variación de los coeficientes y parámetros.

Tabla 26.- Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) promedio en mm/día para las diferentes regiones (FAO, 2006).

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	10 (templada)	20 (moderada)	30 (caliente)
Trópicos y subtrópicos			
Húmedos y subhúmedos	2-3	3-5	5-7
Áridos y semiáridos	2-4	4-6	6-8

Regiones templadas			
Húmedas y subhúmedas	1-2	2-4	4-7
Áridas y semiáridas	1-3	4-7	6-9

Tabla 27.- Valores anuales medios de precipitación (PR), evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) y evapotranspiración real (ETR) en la CAPV obtenidos a partir de datos reales y modelos hidrológicos para el período 1980-2010 (URA, 2014).

Unidad hidrológica	PR (mm)	ET ₀ (mm)	ETR (mm)
Bidasoa	1895	756	668
Oiartzun	1775	799	693
Urumea	1967	631	521,5
Oria	1642	791	751,6
Urola	1486	857	728,2
Deba	1552	815	724,6
Artibai	1456	761	660,4
Lea	1726	849	870,3
Oka	1563	807	765
Butroe	1584	799	772,9
Ibaizabal	1379	811	693,3
Barbadun	1448	787	728,6
Agüera	1117	712	533,9
Karrantza	1243	964	636,1
Omecillo	798	794	526,6
Baia	1324	917	695,6
Zadorra	930	902	574,5

Tabla 27.- Valores anuales medios de precipitación (PR), evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) y evapotranspiración real (ETR) en la CAPV obtenidos a partir de datos reales y modelos hidrológicos para el período 1980-2010 (URA, 2014).

Unidad hidrológica	PR (mm)	ET_0 (mm)	ETR (mm)
Inglares	830	842	617,6
Ega	983	754	625,6
Arakil	1378	822	648,2
Ebro	716	872	525,3

Tabla 28.- Valores de humedad de entrada o inicial, capacidad de campo y capacidad de absorción de agua (diferencia entre las dos anteriores) de RSUs. Valores (redondeados) en volumen de agua/volumen total observados por diferentes autores recopilados en GÓMEZ, 1997.

Humedad inicial	Capacidad de campo	Capacidad de absorción
---	0,33	---
---	0,10 (no compactado) 0,35 (compactado)	---
0,04	0,29	0,25
0,16	0,29	0,13
0,19	0,32	0,13
0,20	0,35	0,15
0,16	0,30	0,14
0,21	0,31	0,10
0,17	0,38	0,21
0,15	0,28	0,13
0,16 – 0,17	0,32 – 0,40	0,15 – 0,28
0,8	0,37	---
0,12	0,33	0,21

Tabla 28.- Valores de humedad de entrada o inicial, capacidad de campo y capacidad de absorción de agua (diferencia entre las dos anteriores) de RSUs. Valores (redondeados) en volumen de agua/volumen total observados por diferentes autores recopilados en GÓMEZ, 1997.

Humedad inicial	Capacidad de campo	Capacidad de absorción
0,19	0,37	0,18
0,04	0,29	0,25
0,13 – 0,19	0,27 – 0,39	0,13 – 0,20

Tabla 29.- Valores de permeabilidad (K) de residuos obtenidos a través de ensayos de campo y de laboratorio (valores recopilados en GÓMEZ, 1997 y BEAVEN, 1999)

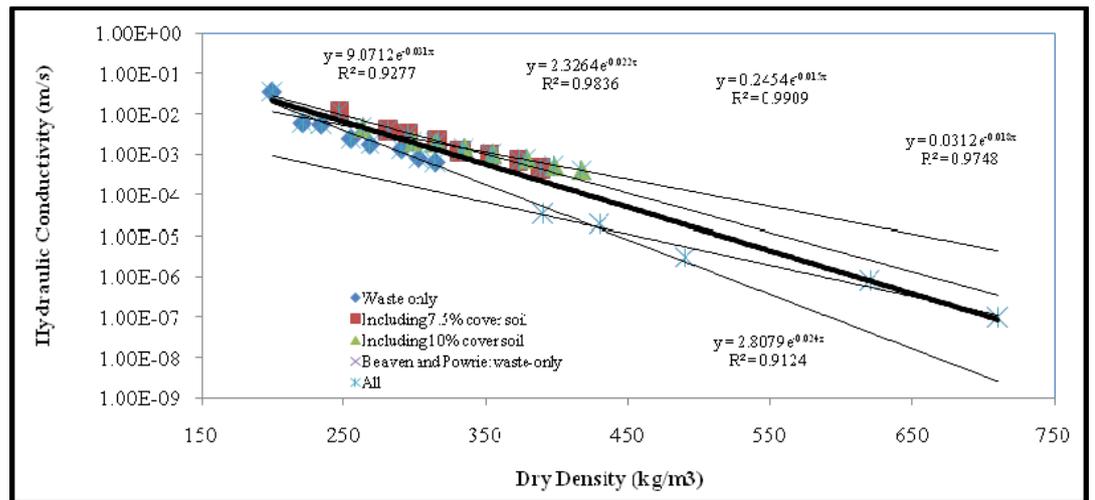
Tipo de residuo y ensayo	K (m/s)
RSU + cenizas	1×10^{-4}
RSU maduros	4 a $5,5 \times 10^{-5}$
RSU	$1,5 \times 10^{-4}$
RSU en bruto ($0,3 \text{ t/m}^3$)	1×10^{-4}
RSU triturado y compactado	1×10^{-6}
RSU de diez años (permeámetro de campo)	$1,5 \times 10^{-4}$
RSU con $0,68 \text{ t/m}^3$ (ensayo de bombeo)	1×10^{-5}
RSU $< 0,8 \text{ t/m}^3$	7×10^{-4}
RSU triturado, no muy compactado	8×10^{-5}
RSU con ceniza (de 30 años)	0,8 a $1,1 \times 10^{-4}$
RSU con cenizas débilmente compactado	2,1 a $2,5 \times 10^{-3}$
RSU con cenizas fuertemente compactado	$5,9 \times 10^{-5}$ a $2,5 \times 10^{-4}$
RSU (ensayo en campo)	1×10^{-5} a 4×10^{-4}
RSU (ensayo de infiltración en campo)	$3 \text{ a } 4 \times 10^{-8}$
RSU (ensayos de bombeo)	$3,9 \times 10^{-7}$ a 1×10^{-4}

Tabla 29.- Valores de permeabilidad (K) de residuos obtenidos a través de ensayos de campo y de laboratorio (valores recopilados en GÓMEZ, 1997 y BEAVEN, 1999)

Tipo de residuo y ensayo	K (m/s)
RSU (ensayos en laboratorio)	6×10^{-9} a $1,5 \times 10^{-4}$

Tabla 30.- Relación entre diferentes parámetros característicos de un vertedero (OLAYIWOLA, 2010) a partir de ensayos de laboratorio. Los valores numéricos son específicos para los ensayos realizados en este trabajo pero la evolución o tendencia general es representativa, así como el grado de relación (directa o exponencial) según se refleja.

Relación permeabilidad – densidad seca



Relación porosidad eficaz (coeficiente de almacenamiento) – densidad seca

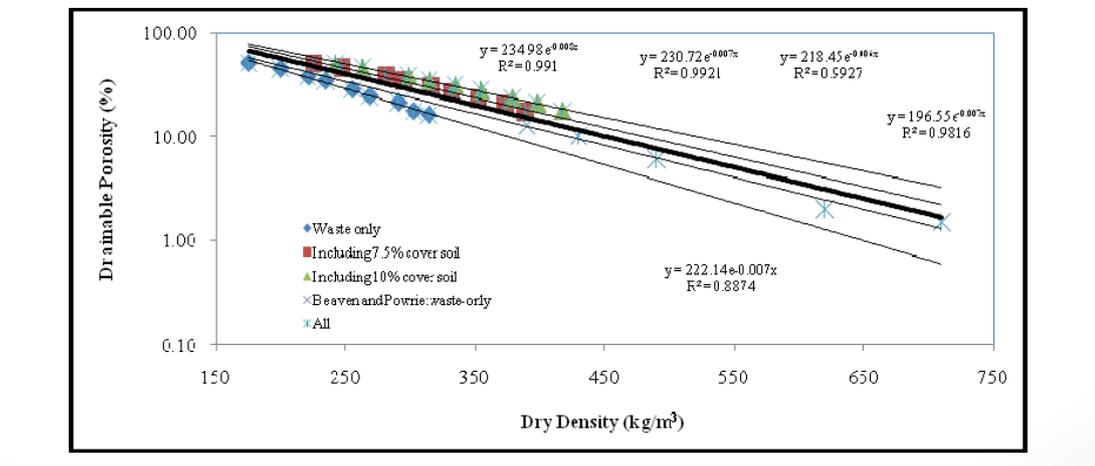
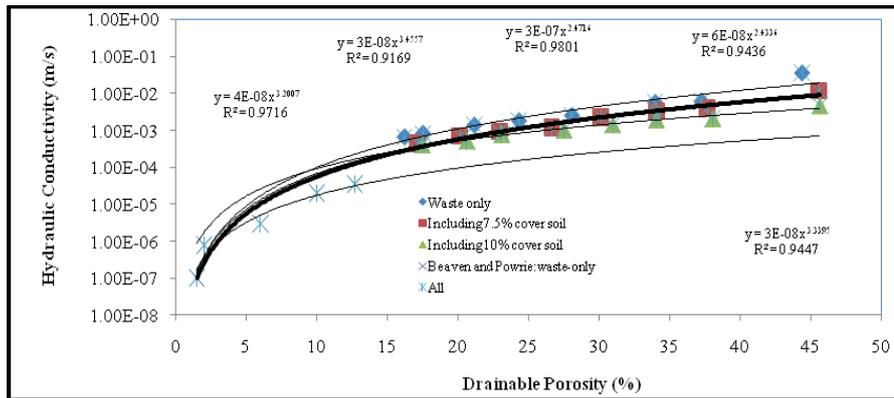


Tabla 30.- Relación entre diferentes parámetros característicos de un vertedero (OLAYIWOLA, 2010) a partir de ensayos de laboratorio. Los valores numéricos son específicos para los ensayos realizados en este trabajo pero la evolución o tendencia general es representativa, así como el grado de relación (directa o exponencial) según se refleja.

Relación permeabilidad – porosidad eficaz



Relación permeabilidad – compresión vertical

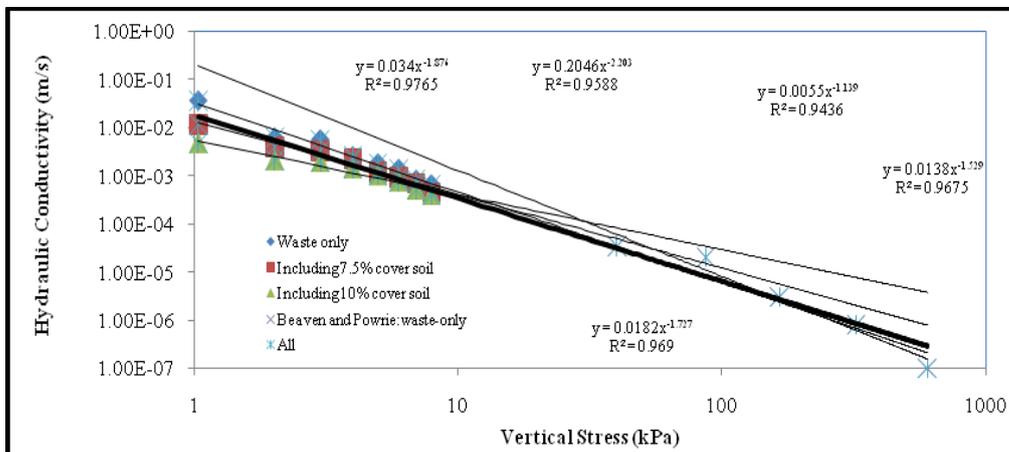


Tabla 30.- Relación entre diferentes parámetros característicos de un vertedero (OLAYIWOLA, 2010) a partir de ensayos de laboratorio. Los valores numéricos son específicos para los ensayos realizados en este trabajo pero la evolución o tendencia general es representativa, así como el grado de relación (directa o exponencial) según se refleja.

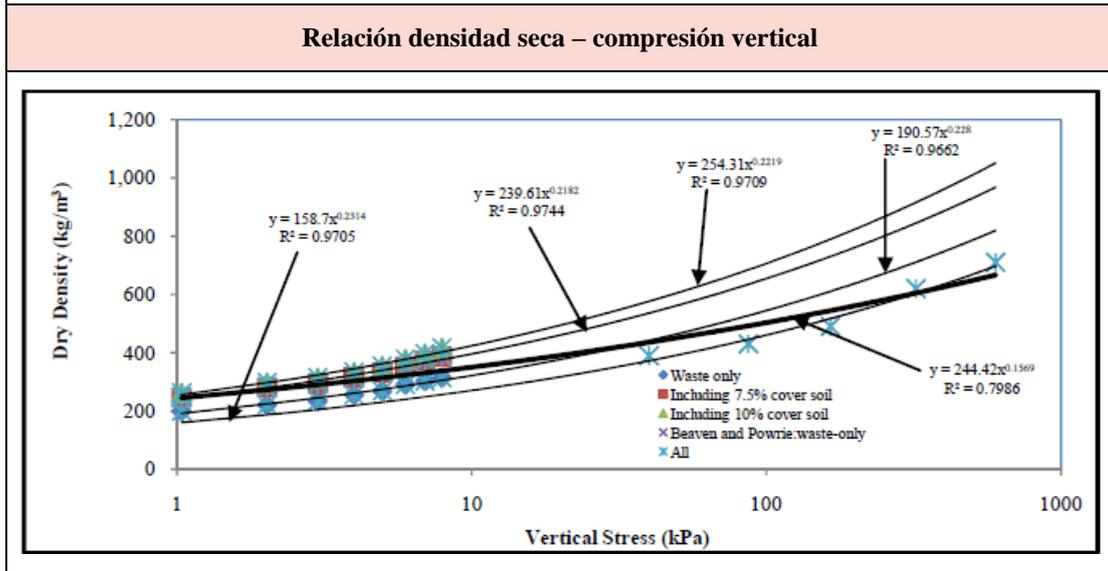


Tabla 31.- Variaciones en diferentes parámetros en función de la edad del residuo depositado en un vertedero (ensayos específicos en un vertedero descritos en OLAYIWOLA, 2000)

Edad del residuo	Densidad húmeda (kg/m ³)	Humedad muestra (vol agua/vol total)	Capacidad de campo (vol agua/vol total)
Residuo reciente	600	0,169	0,379
5 años	760	0,276	0,389
14 años	1198	0,402	0,449

6.1.3.- Filtraciones a través de una impermeabilización

En los apartados de cálculo correspondientes se ha efectuado la hipótesis inicial de que caso de existir una impermeabilización de fondo o en el sellado (en el sentido de impermeabilización artificial o geomembrana), se entendería que no existe infiltración a través de dicha impermeabilización. Sin embargo, dependiendo de sus características, estado y disposición junto a otras capas (por ejemplo arcillas compactadas, geocompuesto bentonítico, etc.), es posible que realmente sí se produzcan tales filtraciones y que estas alcancen, en el caso más desfavorable, una magnitud relevante.

El volumen de las potenciales filtraciones depende en primer lugar del tipo de secuencia de impermeabilización-sellado que se utilice, en especial de si la geomembrana se dispone como único elemento de la secuencia o esta va acompañada por arcillas compactadas o geocompuestos bentoníticos. La disposición de estas capas en íntimo contacto con la geomembrana (sin dejar espacio ni disponer otro tipo de material más permeable) disminuye fuertemente la filtración que se puede producir en relación con la que sucedería contando sólo con la geomembrana dispuesta entre materiales de permeabilidad media o elevada.

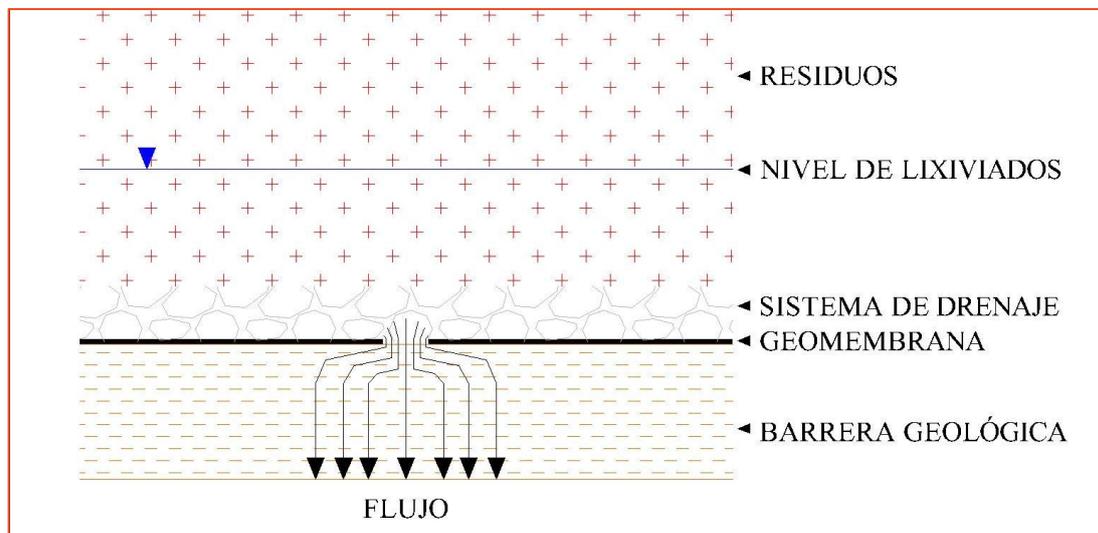


Figura 38.- Esquema de una filtración a través de un agujero en la geomembrana de la impermeabilización de fondo (en este caso con una barrera geológica, arcillas compactadas, por debajo de la geomembrana)

Las filtraciones dependen también del estado en la que se encuentre la geomembrana, en especial de si está deteriorada, rota o punzonada en algún lugar por sucesos acaecidos en el momento de su instalación o posteriormente. Se han efectuado en este sentido diferentes estudios estadísticos sobre la relación entre disponer de un control de calidad durante la instalación y la cantidad de defectos que presenta la geomembrana justo al terminar su instalación, evaluándose que incluso con controles de calidad exigentes es previsible que se produzcan hasta entre 1 y 3 defectos o agujeros por cada hectárea instalada. Con controles de calidad menos exigentes o en instalaciones sin control de calidad, la cantidad de estos defectos será lógicamente mucho mayor. A estos defectos durante la instalación se suman los defectos generados durante la disposición de otros elementos sobre la geomembrana (drenaje de lixiviados, tierras, etc.) y durante la propia explotación (principalmente durante los inicios).

Existen diferentes métodos de cálculo para evaluar las posibles filtraciones que se pueden producir en una geomembrana dependiendo de si se dispone como único elemento de impermeabilización, si coexiste con otro tipo de capas y/o si existen “vacíos” motivados por

arrugas o falta de contacto íntimo entre dichas capas (GIROUD y BONAPARTE, 1989, SCHROEDER et al, 1994, etc.). En la siguiente tabla se presentan datos ilustrativos al respecto.

Tabla 32.- Valores representativos de las filtraciones a través de agujeros circulares en la geomembrana considerando dos tipos de agujero: pequeño (3,1 mm²) y grande (1 cm²). Valores en litros por hectárea y día (KOERNER y KOERNER, 2009)

Tipo de impermeabilización	Carga hidráulica por encima de la geomembrana (p.ej. altura de la lámina de lixiviados sobre la impermeabilización de fondo)			
	0,03 m	0,3 m	3 m	30 m
Geomembrana sola				
A través de agujeros pequeños	300	1.000	3.000	10.000
A través de agujeros grandes	10.000	30.000	100.000	300.000
Geomembrana con barrera geológica sin contacto continuo				
A través de agujeros pequeños	0,8	6	50	400
A través de agujeros grandes	1	7	60	500
Geomembrana con barrera geológica en contacto continuo				
A través de agujeros pequeños	0,15	1	9	75
A través de agujeros grandes	0,2	1,5	11	85

6.1.4.- Calidad de los datos de partida

Tanto durante el proceso inicial de cálculo como, en su caso, de revisión del mismo, es esencial que los datos de partida sean lo más fiables y completos posibles. Ello implica necesariamente la disposición de:

- Sistemas y procedimientos de medición del mayor número razonable posible de términos y/o parámetros que permitan la obtención de datos (al menos) diarios, incluyendo específicamente:
 - Observatorio meteorológico en el vertedero.
 - Caudalímetro-contador de lixiviados evacuados.
 - Caudalímetros-contadores o registros (contabilidad de cisternas por ejemplo) de cualquier recarga artificial sea cual sea su tipo, el momento y el lugar donde se

aplique (riegos con agua, recirculación de lixiviados, vertidos de agua procedente de servicios, lavarruedas, etc., vertidos de lixiviados propios o ajenos, vertido del condensado del biogás, fugas en depósitos y conducciones, etc.).

- Caudalímetros-contadores o registros de otro tipo (contabilidad de cisternas por ejemplo) de cualquier tipo de evacuación o conducción artificial directa por aspiración, bombeo, etc. que se realice en el interior del vaso tanto de aguas como de lixiviados.

Todos estos sistemas y procedimientos deberán estar bien calibrados y en estado de funcionamiento adecuado, de tal forma que los datos que aporten correspondan con la realidad.

- Información precisa de todo lo sucedido en el vertedero durante el período relacionada especialmente con:
 - Cambios en la geometría en general y en la disposición de las diferentes superficies en particular.
 - Cantidades y tipos de residuos y otros materiales depositados.
 - Cambios en las infraestructuras (canales, cunetas, urbanización, etc.).
 - Comportamiento general de los sistemas relacionados con el drenaje y conducción o evacuación de aguas y lixiviados y anomalías detectadas.
 - Comportamiento durante precipitaciones intensas u otras circunstancias (desbordamientos, entradas de escorrentías, etc.).
 - Incidencias (obstrucción de elementos de drenaje, averías en los sistemas de medición, averías en los elementos de conducción, fugas, etc.).

Respecto a los **parámetros meteorológicos**, según se ha comentado anteriormente:

- Los observatorios situados en los vertederos deberán presentar capacidad de realizar registros automáticos independientemente de la presencia de personal de servicio en las instalaciones. Se deberá aportar documentación justificativa relativa a la homologación y estandarización de los equipos de toma de datos instalados. Además, se deberá disponer y cumplir obligatoriamente un plan de calibración y mantenimiento de los sensores meteorológicos durante toda su vida útil.
- En el caso de tener que acudir a observatorios externos:
 - Se podrá emplear los datos de un único observatorio cuando, siendo este el más próximo, se justifique convenientemente que el vertedero se encuentra dentro del ámbito representado por él, bajo condiciones geográficas semejantes (respecto a altitud y latitud), no existan accidentes relevantes del terreno que puedan dar lugar a comportamientos climáticos diferenciados y el observatorio disponga de un registro

de datos de duración (en años) suficientemente representativo de acuerdo a los criterios habituales del Instituto Nacional de Meteorología, Euskalmet u organismos de esta índole.

- En los demás casos se ponderarán los datos convenientemente a partir de los obtenidos de los tres observatorios más próximos que representen un comportamiento climático semejante al de la situación del vertedero y formen un triángulo en el que quede inscrito el mismo.

Respecto a los **sistemas de control de caudales** y, en particular de los lixiviados, se deberá tener en cuenta la representatividad de los mismos considerando su método de funcionamiento, registro y estado. En este sentido, debe contemplarse:

- Descripción del sistema de medida de caudales (por ejemplo aforador Parshall con sensor de nivel por ultrasonidos, cuenta-horas en una bomba, etc.), rango de medida del sensor y calibración mediante aforos directos in situ, accionamientos (válvulas, altura de las boyas que encienden/apagan la bomba), etc. Frecuencia de las mediciones (1 dato cada 10 minutos, cada hora, cada día, cada semana, etc.).
- Período de registro continuo con datos de caudales verificando que todos los datos registrados se encuentran dentro del rango de medida del sensor, incluyendo una representación gráfica frente al tiempo de los valores medidos, señalando el rango aceptable. En las estaciones de aforo de caudales de lixiviados en canal abierto, el parámetro a verificar es el nivel, no el caudal.
- Representación gráfica, utilizando la misma escala temporal, de los caudales medidos y de la precipitación. Búsqueda de comportamientos inusuales sospechosos de ser datos erróneos (y definición de los periodos con datos fiables) observando si se producen:
 - Subidas del caudal de lixiviados no asociadas a precipitaciones tras comprobar que no se han producido tormentas aisladas y esporádicas que no afectan a las estaciones meteorológicas. Si la subida de caudales se registra un día antes que la precipitación en mediciones diarias puede deberse a que el período de integración del día es diferente en cada caso (por ejemplo el caudal lo hace de 00:00 h a las 24:00 h, mientras que la precipitación lo hace de 08:00 h a 08:00 h o viceversa).
 - Ausencia de incremento de caudal cuando, en otras ocasiones, para precipitaciones similares (y con caudales de inicio similar) sí se observan crecidas.
 - Bajadas súbitas de caudal por bombeos, limpieza de instalaciones, accionamiento de un by-pass, etc.
 - Máximos locales de caudal que se mantienen constantes durante varios días, por ejemplo. por entrar a funcionar algún sistema de aliviadero, desborde o by-pass a partir de cierto caudal o en cierta situación.
- Estado de conservación (defectos y reparaciones efectuadas, problemas seculares no solucionados, partes de mantenimiento, calibración y conservación) así como

acumulaciones de espuma o sólidos en las secciones de medida que interfieran en las mediciones y/o provoquen el registro erróneo de los caudales de lixiviados realmente aportados.

Los datos de partida deben ser completos. Su ausencia o falta de consecución en un momento dado no puede (no debe) emplearse como argumento para justificar la incertidumbre del balance. Deben, en todos los casos, ser completados hasta donde sea posible. En el caso de las series de datos meteorológicos, la posible ausencia temporal de datos debe ser resuelta completando las series mediante correlación con otros observatorios de referencia representativos. En el caso de falta temporal de datos del caudalímetro de lixiviados por avería imprevista deberá, al menos, evaluarse el caudal del intervalo de tiempo afectado teniendo en cuenta la evolución general del mismo y las circunstancias hidrológicas o de otro tipo que hayan sucedido. Este criterio debe seguirse con el resto de parámetros: tratar de completar la posible ausencia temporal de datos. En lo que se refiere a la información de lo sucedido en el vertedero, de igual forma deben registrarse fielmente todos los cambios, comportamientos observados, incidencias, etc. sin pretender que es suficiente con sólo disponer de información de la situación concreta en los momentos de inicio y final del balance.

6.2.- INTERPRETACIÓN

La interpretación de los resultados del balance hídrico se efectuará a dos escalas: general, tomando como referencia la ecuación global, y específica, interpretando los resultados más relevantes de los diferentes términos así como los datos individuales que sean más significativos.

6.2.1.- General

Tal como está planteada la ecuación del balance hídrico, los resultados numéricos de entradas, salidas y variaciones internas deben teóricamente ser coherentes y ajustarse a la expresión matemática (entradas = salidas +/- variación interna). No obstante, debido a la adscripción del balance a un período de tiempo determinado y a los errores-incertidumbres en los cálculos y/o consideración de alguno de los términos, rara vez se logra el ajuste matemático de los valores. Esta falta de ajuste debe ser en cualquier caso analizada en el sentido de:

- Si puede estar relacionada con el período de tiempo elegido. Idealmente, para minimizar errores, los balances hídricos deberían ser realizados para períodos de ciclo hidrológico convencional, esto es, entre momentos de estiaje en los que el almacenamiento es mínimo e igual o muy similar entre el momento inicial y el momento final. De esta forma, la variación interna que representa el almacenamiento podría considerarse nula o muy baja.

Es frecuente, sin embargo, que el período del balance no coincida realmente con situaciones hidrológicas de estiaje. Una situación típica se produce cuando el límite final del período elegido coincide con épocas lluviosas, de tal forma que aparentemente en el vertedero

entra más agua (precipitación copiosa) que la que sale (lixiviados controlados que por el flujo relativamente lento en el interior del vertedero “tardan” en salir). En estas circunstancias es lógico que se produzcan desajustes más o menos importantes en el balance hídrico o, al menos, una mayor incertidumbre en el cálculo y consideración de algunos términos.

- Si puede responder a la no consideración de algún término que realmente interviene o a la consideración inadecuada de algún otro. Si el modelo conceptual que ha servido de base para la realización del balance hídrico está correctamente definido los términos del balance realizado deben corresponder a la realidad de entradas y salidas. No obstante, es posible que inicialmente no se haya considerado alguna posibilidad (por ejemplo entrada subterránea de agua) y que deba, ahora, ser valorada a la luz del desajuste observado en el balance.
- Si responde a errores o incertidumbres en los datos de partida. Este es el caso más frecuente pues no todos los términos están controlados y registrados y existen incertidumbres relacionadas tanto con los datos de partida como con los cálculos efectuados a partir de ellos.

Tal como se ha indicado al tratar sobre el modelo conceptual previo al balance hídrico, a la hora de efectuar la interpretación general del balance puede ser de gran ayuda analizar los valores de precipitación y caudales de lixiviados y su relación en el período considerado utilizando para ello tanto los valores cuantitativos como su representación gráfica (hidrograma de lixiviados junto a precipitaciones). Con ello, se podrá:

- Evaluar si a lo largo del período existe una relación “inicialmente razonable” entre volumen de precipitación y volumen de lixiviados sin que se detecte que ambas cantidades son notoriamente incompatibles.
- Evaluar si a lo largo del período dicha relación general se mantiene o si, por el contrario, a partir de un momento (o en varios intervalos de tiempo) se producen aparentes y relevantes variaciones en dicha relación que sugieren que se han producido modificaciones en alguno de los términos del balance por cambios de algún tipo (por ejemplo apertura de nuevas zonas de explotación, disposición de cubiertas intermedias o sellados definitivos, etc.).
- Evaluar específicamente el hidrograma de lixiviados por si se detectan detalles o cambios no relacionables con precipitaciones en ese momento o en días anteriores.

De forma general, es previsible que si no se producen cambios en la situación del vertedero ni incidencias, el gráfico precipitación-caudal de lixiviados refleje una estrecha relación entre ambos parámetros sin discontinuidades ni variaciones anómalas en el mismo. Si, en sentido contrario, se detectan dichas anomalías en el hidrograma de lixiviados, puede ser indicio de algún cambio en la situación o de alguna incidencia. Con ello, puede en algunos casos evidenciarse que a partir de un determinado momento se produjo algún cambio mientras que en otros casos puede tratarse de un fenómeno o situación puntual.

La interpretación general del balance hídrico debe ofrecer una imagen fiel de la situación analizada y justificar los resultados obtenidos en cuanto a ajuste o desajuste general de los volúmenes de agua calculados. Este análisis y justificación general deberá tener en cuenta la relación que existe entre los diversos parámetros de tal forma que los resultados que se presenten sean coherentes entre sí.

6.2.2.- Específica

El balance hídrico puede servir de base también para realizar interpretaciones específicas de algunos aspectos concretos del funcionamiento hídrico del vertedero. A través del análisis de los datos de partida y valores obtenidos pueden, así, observarse y definirse aspectos tales como:

- Relación entre el volumen de precipitación (o de lluvia útil) caído sobre el conjunto del vaso de vertido y el volumen de lixiviados controlados y gestionados.
- Relación entre el volumen de precipitación (o de lluvia útil) caído sobre el conjunto del vaso de vertido y el volumen de agua evacuado lateralmente a favor de cubiertas intermedias y/o sellados.
- Relación entre el volumen de lixiviados controlados y gestionados y la superficie (m^2) de las áreas abiertas con los residuos expuestos.
- Relación entre el volumen de lixiviados controlados y gestionados y el volumen que representan otras formas de entrada de agua diferentes de la precipitación (riegos por ejemplo).
- Retraso en la salida de lixiviados respecto a las precipitaciones.
- Diferencias de intensidad y distribución de las precipitaciones respecto a las amplitudes y morfología del hidrograma de lixiviados.
- Etc.

Estas observaciones pueden servir de base para predecir la formación de lixiviados en el futuro, establecer las bases de futuros nuevos balances, planear mejores estrategias de operación que minimicen la formación de lixiviados, etc.

6.2.3.- Eventos temporales relevantes

Con el criterio de análisis específico señalado en el anterior apartado, el análisis de eventos temporales relevantes (precipitaciones extraordinarias, estiajes prolongados) puede resultar de gran ayuda para avanzar en el conocimiento del vertedero considerado como sistema hidrogeológico y para mejorar la explotación y control del mismo. En el caso específico de los estiajes prolongados, el análisis de la curva de recesión de caudales de lixiviados, coeficiente de agotamiento, etc. puede ofrecer información valiosa sobre el tipo de flujo en el interior de

la masa de residuos y el almacenamiento potencial de la misma tal como se ha desarrollado en el apartado de variaciones interiores del agua almacenada.

El análisis de eventos temporales relevantes debe partir básicamente de:

- Datos meteorológicos (precipitación, evapotranspiración, lluvia útil).
- Registro continuo de caudales de lixiviados evacuados del vertedero. En el caso de que la evacuación se realice por bombeo, el análisis directo que se indica (sin contar con los efectos de un almacenamiento premeditado de los lixiviados) sólo podrá efectuarse si se trata de un bombeo automatizado que impide que se almacene temporalmente agua en el interior del vertedero de tal forma que el bombeo pueda relacionarse con lo que sucedería si fuera una descarga más o menos natural por gravedad.

6.2.3.1.- Precipitaciones extraordinarias

En el caso de precipitaciones extraordinarias, la intención del análisis es:

- Evidenciar el funcionamiento general del vertedero. Para ello, además de los datos de precipitación y caudales de lixiviados, se deberá contar con datos relativos a dicho funcionamiento durante tales eventos (desbordamiento de canales perimetrales, salidas de agua del interior del vaso de vertido por escorrentía generada sobre él, etc).
- Evidenciar el reflejo de las mismas en los caudales de lixiviados de forma similar a la indicada anteriormente en relación con la interpretación específica del balance hídrico, esto es, evaluar la relación precipitación-caudal de lixiviados. En este caso, la singularidad del evento permitiría evaluar la respuesta del sistema ante tales circunstancias.
- Aportar, con ello, información predictiva para una mejor gestión del vertedero incluyendo la prevención de riesgos derivados de dichas precipitaciones.

6.2.3.1.1.- Funcionamiento general del vertedero

Por lo común, los mayores riesgos relacionados con el funcionamiento de los sistemas y elementos dispuestos en un vertedero se producen con ocasión de precipitaciones intensas ya que es en esas ocasiones cuando la capacidad de dichos sistemas y elementos puede verse desbordada. Por ello, el análisis de la incidencia de tales eventos sobre el vertedero debe incluir la recogida de datos sobre la situación creada en ese momento en relación con:

- Desbordamiento de canales, cunetas y elementos de drenaje así como acceso al vaso de vertido de aguas procedentes de la urbanización externa u otros orígenes.
- Arrastres, deslizamientos y roturas en el entorno del vaso de vertido y en la infraestructura del vertedero, con o sin incidencia directa en el propio vaso.
- Fallos en los sistemas conexos (redes de agua, electricidad, saneamiento, etc.).

- Formación de charcos y escorrentías superficiales en el vaso de vertido y su destino final en ese momento (infiltración final en algún punto y/o al de un tiempo, salida al exterior, etc.).
- Suficiencia/insuficiencia de sistemas de compartimentación dentro del vaso (rain flaps, caballones, etc.) y de sistemas fijos o móviles de evacuación de agua sobre cubiertas intermedias.
- Suficiencia/insuficiencia de los sistemas de evacuación y gestión de lixiviados.
- Arrastres y deslizamientos en la masa de residuos o en las coberteras.
- Parada, rotura o fugas de los sistemas de drenaje y evacuación de aguas y lixiviados.
- Parada, rotura o mal funcionamiento de los elementos y aparatos de medición y control (observatorio meteorológico, caudalímetros, etc.).
- Etc.

El análisis de la incidencia de un evento de precipitación extraordinaria sobre el funcionamiento general del vertedero debe quedar registrado tanto si se detectan situaciones anómalas como las indicadas como, en caso contrario, si no se detectan y puede evidenciarse de esta forma el correcto diseño y explotación del vertedero en relación con tal episodio.

6.2.3.1.2.- Relación precipitación-caudal

La evaluación de la relación entre precipitación extraordinaria y caudal de lixiviados se efectuará considerando lapsos de tiempo anteriores y posteriores al evento, destacándose:

- Precipitaciones absolutas y caudales máximos de lixiviados.
- Volumen de agua precipitada sobre la superficie de entrada (abierta) del vertedero y volumen de lixiviados evacuados durante el evento.
- Simultaneidad o retraso en la salida de lixiviados respecto a las precipitaciones (idealmente contando con datos horarios de ambos parámetros).
- Morfología general de la evolución de los caudales de lixiviados (respuesta rápida, respuesta amortiguada, etc.).
- Diferencias de amplitud-intensidad de las precipitaciones respecto a los caudales de lixiviados en comparación con otros eventos o momentos.
- Etc.

Para efectuar este análisis es necesario contar, específicamente, con un registro continuo de los caudales de lixiviados de tal forma que pueda manifestarse gráficamente su evolución antes, durante y después del evento.

La respuesta de un vertedero frente a las precipitaciones varía en función de las características superficiales que posea el mismo en ese momento (superficies abiertas, áreas selladas), de las entradas adicionales que pueda haber y del tipo de funcionamiento hidrogeológico que se produzca en su interior. Respecto a este funcionamiento interno, la disposición de los poros y conductos a través de los que se produce el descenso del agua infiltrada en la masa de residuos es la que determina de forma general el tipo de respuesta:

- Si existen suficientes conductos que propician un veloz tránsito del agua en el interior del vertedero, la recarga por precipitación se transmitirá entonces rápidamente a la base del acúmulo y, de ahí, al sistema de evacuación de lixiviados. El caudal de estos reflejará de forma cuasi inmediata la intensidad de las precipitaciones.
- Si no existen tales conductos y el tránsito del agua se efectúa a favor de una porosidad intergranular más fina, será menor la velocidad de circulación de agua en el interior del vertedero y, entonces, podrá producirse un mayor retraso entre máxima precipitación y máximo caudal de lixiviados. Adicionalmente, los caudales de los lixiviados reflejarán el efecto amortiguador de la masa de residuos, dibujando registros con ascensos y descensos no tan acusados.

La respuesta frente a precipitaciones está influenciada también por las características y estado en el que se encuentre el sistema de drenaje de lixiviados. Si funciona correctamente el sistema responderá a la tipología descrita. Si se encuentra obturado, la salida de lixiviados puede estar limitada y no responder únicamente a la permeabilidad del acúmulo.

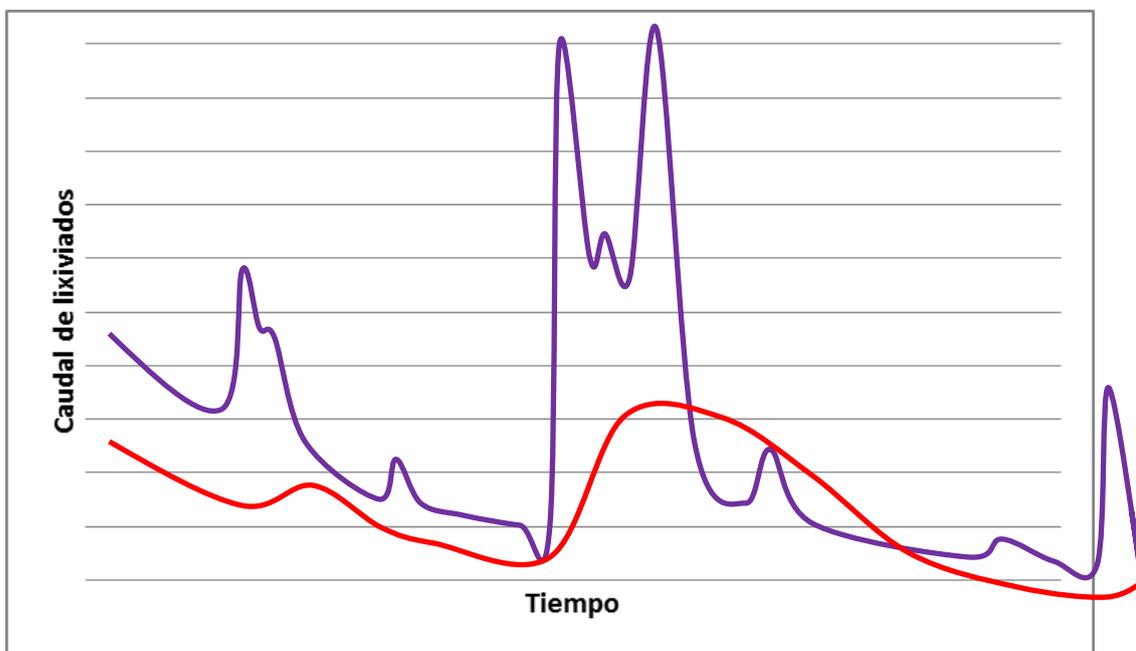


Figura 39.- Diferencias en los hidrogramas de lixiviados. En rojo, respuesta amortiguada a las precipitaciones, típica de vertederos maduros. En morado, respuesta cuasi inmediata, típica de vertederos jóvenes, con conductos preferenciales bien conectados que facilitan el tránsito de la recarga por precipitación

Típicamente, según se ha comentado previamente, esta diferenciación se asocia a menudo a la edad de los vertederos en el caso de las instalaciones que acogen residuos urbanos. En los vertederos jóvenes, en los que aún no se han producido las reacciones derivadas de la degradación y compactación progresiva de la masa, las respuestas suelen ser rápidas y los caudales de lixiviados muestran acusados ascensos y descensos relacionados de forma cuasi inmediata con las precipitaciones. En el caso de los vertederos más maduros, la respuesta está más amortiguada y puede producirse un cierto retraso en dicha respuesta precipitación-caudal de lixiviados. En realidad sobre este tipo de funcionamiento inciden muchos otros factores (espesor y tipo de residuos, tipo y distribución de coberturas intermedias o de otros materiales, etc.).

6.2.3.1.3.- Gestión del vertedero

El análisis de eventos de precipitaciones extraordinarias, como en general el análisis de la serie completa de precipitaciones durante el período del balance hídrico, puede aportar información de interés para la gestión del vertedero:

- Caudales/volúmenes punta aproximados de lixiviados esperables con eventos de este tipo e implicaciones sobre la operatividad de los sistemas de gestión final de lixiviados establecidos (depuración, almacenamiento y gestión externa, etc.). Contraste con la suficiencia real de estos sistemas en dichos eventos o necesidad de implantar nuevos sistemas permanentes o discontinuos (de emergencia) para tales situaciones.
- Gestión de la explotación en cuanto a superficies abiertas, cubiertas intermedias, áreas selladas, necesidades de desvío o bombeo de escorrentías internas, etc. con el fin de minimizar la generación de tales caudales de lixiviados.
- Gestión de las infraestructuras asociadas (canales, cunetas, urbanización, etc.) con el fin de evitar o minimizar la entrada de agua incluso en eventos más o menos extraordinarios.
- Gestión de los elementos de medición y control y/o de alerta temprana de situaciones no deseadas (llenado de depósitos de lixiviados por ejemplo).
- Preparación de equipos y sistemas de emergencia.
- Etc.

6.2.3.2.- Estiajes o ausencia de precipitaciones

En estiajes, o en general en ausencia de precipitaciones, el registro del caudal de lixiviados puede permitir evidenciar con mayor claridad algunos aspectos de la gestión del vertedero (por ejemplo incidencia de riegos o de la recirculación de lixiviados) que, durante épocas lluviosas, pueden quedar camuflados por la abundancia de la recarga.

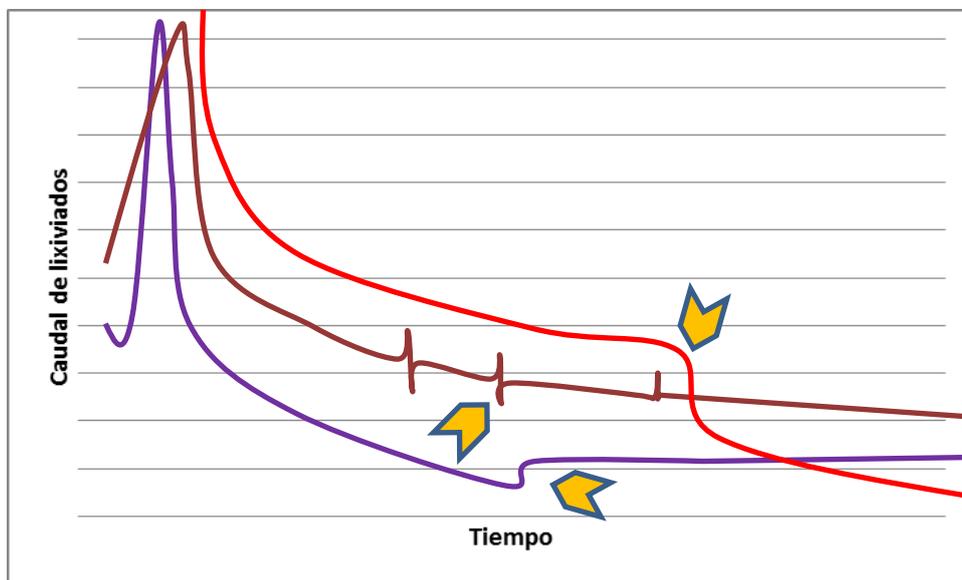


Figura 40.- Algunas posibles anomalías en el registro o hidrograma de caudales de lixiviados, más evidentes en períodos de estiaje, que evidencian algún cambio o incidencia a determinar

Asimismo, en algunos casos pueden permitir detectar alguna situación no conocida ni deseada en el funcionamiento de los sistemas de drenaje y evacuación (entrada no controlada de aguas, fugas, etc.). El registro de los caudales de lixiviados puede manifestar estas circunstancias mediante alguna anomalía en su evolución respecto a la evolución previsible en condiciones normales o típicas de ausencia de recarga. Por ello, si se detectara tal anomalía en el registro, deberán investigarse y determinarse sus causas incluyendo entre ellas el propio funcionamiento erróneo de los sistemas de medición (caudalímetros).

El análisis del hidrograma de caudales de lixiviados en estiaje ha sido desarrollado en el apartado de variación en el agua libre almacenada. Tal como allí se recoge, este análisis permite determinar el coeficiente de agotamiento y el volumen almacenado en un momento dado del estiaje.

6.3.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del balance hídrico, su interpretación y análisis, deben destacarse las conclusiones que procedan e incluir las recomendaciones que sean oportunas en relación con:

- El propio balance hídrico: datos cuantitativos relevantes, relación entre las diferentes variables (precipitación-lixiviados, etc.), flujos que se producen destacando no sólo los significativos sino, especialmente, aquellos respecto a los que no existe un control o no se habían considerado históricamente, etc.
- El diseño y estado de la propia infraestructura. Es posible que el balance hídrico y/o los trabajos desarrollados en relación con él detecten alguna circunstancia mejorable en la propia instalación (canales por ejemplo).

- Los aparatos de medición o ensayos que han servido para obtener los datos de partida (instalación de aparatos, mejora de los existentes, mantenimiento, etc.).
- Los sistemas de gestión del vertedero y las estrategias de operación.

Algunos de estos aspectos se describen en el capítulo de buenas prácticas.

7.- INFORME DEL BALANCE HÍDRICO

Con el criterio de dotar de la necesaria uniformidad a los informes de balances hídricos en vertederos, en este capítulo se señala su contenido y forma de presentación del mismo. Sin perjuicio de que sucesivos informes dispongan en parte de la misma información resulta conveniente que cada informe sea entendible por sí mismo, de tal forma que, por ejemplo, se incluya inicialmente una descripción somera de las características del vertedero que permita comprender posteriormente el desarrollo del propio balance.

7.1.- CONTENIDO

El informe del balance hídrico incluirá, al menos:

- Origen de la información:
 - Del gestor: alcance general.
 - De otras entidades: alcance general.
 - De referencias bibliográficas.
 - Inspecciones (una de ellas en aguas altas): desarrollo y resultados.
- Características del vertedero:
 - Vertedero:
 - Geometría del vaso y/o del conjunto del vertedero y diferenciación de vasos o celdas.
 - Impermeabilización de fondo: tipo, secuencia, alcance superficial (todo el vaso, áreas en preparación, etc.)
 - Tipos de superficies y sus características: residuos, cubiertas intermedias, viales, sellados, etc.
 - Tipología del perímetro y entorno: ladera vertiente, urbanización, etc.
 - Infraestructura relacionada con el agua: posición y funcionalidad de canales, cunetas, sistemas de drenaje, bocas de riego, lavarruedas, etc.
 - Infraestructura relacionada con los lixiviados: posición, características, funcionalidad.
 - Infraestructura relacionada con el biogás: características, funcionalidad, distribución superficial, áreas con captación y áreas con emisión directa a la atmósfera.

- Residuos y otros materiales depositados:
 - Tipología.
 - Formas de depósito (compactación)
 - Aportes y cubiertas intermedias con tierras u otros materiales.
 - Diferenciación de áreas según el tipo de residuo o el tipo de depósito.
- Terreno:
 - Cuencas y laderas vertientes hacia el perímetro del vertedero.
 - Tipo de terreno (geología sintética).
 - Puntos de agua actuales o históricos en la zona.
 - .Permeabilidad del terreno.
 - Esquema de funcionamiento hidrogeológico.
- Gestión:
 - De lixiviados: gravedad, bombeo continuo, acumulación temporal y bombeo discontinuo, etc. Recirculación. Vertidos puntuales de lixiviados propios o ajenos al vaso.
 - De aguas: desagüe lateral de cubiertas intermedias o sellados, caballones para separación hidráulica, bombeos móviles y temporales, etc. Riegos con bocas fijas o con cisternas. Vertidos de servicios, lavarruedas, etc.
 - Del biogás: ninguna, pasiva o activa a través de pozos, condensados, etc.
 - Incidencias relacionadas con los lixiviados, el agua y el biogás.
- Elementos y sistemas de control:
 - Observatorio meteorológico: posición, tipo y parámetros que mide.
 - Caudalímetros o contadores de lixiviados: posición y tipo, estado de calibración, incertidumbres, etc.
 - Caudalímetros o contadores de agua (de escorrentía natural, de red, de servicios, lavarruedas, etc.): posición y tipo.
 - Elementos de control del caudal o volumen del biogás: posición y tipo.

- Pozos de control en el exterior.
- Pozos de control y pozos de extracción de gas en el interior.
- Cualquier elemento o sistema relacionado con los lixiviados, el agua o el biogás.
- Antecedentes y balances hídricos previos:
 - Conclusiones de balances anteriores:
 - Términos considerados entonces y resultados.
 - Criterios, incertidumbres y dudas manifestadas.
 - Recomendaciones señaladas respecto a la instalación, elementos de control, gestión, etc.
 - Síntesis de variaciones habidas desde el anterior balance respecto a las características del vertedero y sus infraestructuras, la tipología de los residuos, la gestión relacionada con los lixiviados, el agua o el biogás y los elementos y sistemas de control.
- Modelo conceptual y términos que intervienen en el balance hídrico individualizando, si existen, cada una de las unidades (vasos o celdas):
 - Repaso sistemático de todos los posibles términos y definición y justificación de los que intervienen y de los que no intervienen:
 - Entradas: precipitación, escorrentía superficial (entrada de arroyo o reguero, escorrentía de laderas adyacentes, escorrentía proveniente de la urbanización perimetral, entrada por desbordamiento de canales y cunetas, entrada por incorrecta evacuación lateral de la escorrentía generada en cubiertas intermedias y áreas selladas), escorrentía subterránea (surgencias ocluidas, entrada difusa), recarga artificial (riegos con agua; recirculación o riego con lixiviados; vertidos provenientes de servicios, lavarruedas, etc.; vertidos puntuales de lixiviados propios o ajenos; vertidos del condensado de biogás; fugas en conducciones o depósitos).
 - Salidas: evapotranspiración, flujo superficial derivado de la precipitación sobre cubiertas intermedias o áreas selladas que es evacuado correctamente al exterior, lixiviados controlados (gravedad o bombeo), lixiviados incontrolados (surgencias en superficie, filtraciones subterráneas hacia el terreno, fugas en conducciones y depósitos).
 - Variación interior: en el agua libre almacenada, en la humedad del residuo y de otros materiales, por reacciones químicas y biológicas.
 - Identificación de los lugares concretos o áreas donde interviene cada término.

- Origen de los datos de partida para el cálculo de cada término:
 - Origen general: observatorio, caudalímetro, estimaciones, etc.
 - Características y estado de los sistemas de medición considerados (funcionamiento, mantenimiento, averías, etc.).
 - Déficits, errores o falta de datos de partida.
 - Correlaciones y/o consideraciones efectuadas para completar los datos.
- Cálculos correspondientes a cada uno de los términos:
 - Datos de partida.
 - Cálculos.
 - Resultados
- Balance hídrico general.
- Análisis e interpretación:
 - Incertidumbres, posibles variaciones, revisiones, etc.
 - Interpretación general: ajuste general del balance.
 - Interpretación específica: repaso de aspectos y/o flujos concretos tales como:
 - Relación entre el volumen de precipitación (o de lluvia útil) caído sobre el conjunto del vaso de vertido y el volumen de lixiviados controlados y gestionados.
 - Relación entre el volumen de lixiviados controlados y gestionados y la superficie (m²) de las áreas abiertas con los residuos expuestos.
 - Relación entre el volumen de lixiviados controlados y gestionados y el volumen que representan otras formas de entrada de agua diferentes de la precipitación (riegos por ejemplo).
 - Retraso en la salida de lixiviados respecto a las precipitaciones.
 - Diferencias de intensidad y distribución de las precipitaciones respecto a las amplitudes y morfología del hidrograma de lixiviados.
 - Etc.
 - Eventos temporales relevantes:

- Precipitaciones intensas o extraordinarias (aguas altas): funcionamiento general del vertedero (desbordamientos, arrastres, insuficiencia de sistemas de evacuación, etc.), relación precipitación-caudal de lixiviados, etc.
- Estiajes (aguas bajas): tipo de agotamiento del caudal de lixiviados, implicaciones sobre el agua almacenada, etc.
- Conclusiones y recomendaciones:
 - Sobre el propio balance hídrico: flujos que se producen, datos cuantitativos relevantes, relación entre las diferentes variables (precipitación-lixiviados, etc.), etc.
 - Sobre el diseño y estado de la instalación e infraestructuras (suficiencia o insuficiencia, mantenimiento, etc.).
 - Sobre los elementos y sistemas de medición o ensayos que han servido para obtener los datos de partida (instalación de nuevos elementos, mejora de los existentes, mantenimiento, etc.).
 - Sobre los sistemas de gestión del vertedero.

7.2.- PRESENTACIÓN

La presentación del informe del balance hídrico se efectuará en cada caso en los plazos y formas que se hayan determinado o requerido. En la CAPV los balances de los vertederos afectados por la ley IPPC se incluyen dentro del Programa de Vigilancia Ambiental (PVA) a presentar anualmente antes del 31 de marzo.

El informe del balance hídrico se presentará acompañado de cuantas figuras, ilustraciones, fotografías, mapas, perfiles, esquemas, etc. sean necesarios y convenientes para la mejor comprensión de:

- Las características del vertedero.
- El funcionamiento hídrico general del mismo.
- La intervención específica de cada uno de los términos que se incluyan.
- Los resultados.
- La interpretación de los resultados.

Respecto al formato del informe, se sugiere distribuirlo en:

- Memoria: donde se describan y desarrollen todos los aspectos anteriormente indicados incluyendo, respecto a los cálculos de cada término, únicamente la referencia de los datos de partida, la descripción general del procedimiento de cálculo, los criterios o coeficientes utilizados y los resultados. Para la mejor lectura y comprensión de este documento, se

recomienda no incluir en él el desarrollo completo de cada uno de los cálculos sino presentar estos desarrollos en forma de anejos.

- Anejos: donde se incluya específicamente el desarrollo de los cálculos de cada uno de los términos así como cualquier otra información complementaria.
- Planos: donde se representen gráficamente, en mapas, perfiles y esquemas, todos los aspectos relacionados (situación, modelo conceptual, flujos, etc.), incluyendo específicamente mapas del vertedero y entorno con indicación de las diferentes zonas y elementos considerados: zonas con los residuos expuestos, zonas con cubiertas provisionales, zonas selladas, laderas vertientes, urbanización perimetral, canales, conducción de lixiviados, pozos de control, etc. Con carácter indicativo, no exhaustivo, se deberán contemplar los siguientes planos:
 - Sobre mapa topográfico se delimitarán las superficies de las diferentes celdas o vasos que tenga el vertedero, indicando la secuencia de capas de cada una de ellas, su superficie (en m^2), el trazado de la red de drenaje de lixiviados y la localización del punto de medida de caudales de lixiviados. Se incluirán fotografías panorámicas ilustrativas y/o fotografías aéreas u ortofotos indicando fecha (año y mes). Este plano incluirá o se acompañará de la descripción del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas indicando fechas).
 - Sobre mapa topográfico se delimitará la superficie del vertedero ocupada por cada tipo de sellado final o temporal, o superficie con los residuos expuestos, indicando la secuencia de capas de cada una de ellas, y la superficie ocupada (m^2). Se incluirán fotografías panorámicas ilustrativas y/o fotografías aéreas u ortofotos indicando fecha (año y mes). Este plano incluirá o se acompañará de la descripción de las actividades que se realizan en su superficie, incidiendo en aquellas que puedan aportar agua (por ejemplo riegos) o dañar la secuencia de sellado así como del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas indicando fechas).
 - Sobre mapa topográfico se delimitará el trazado de los canales perimetrales indicando el caudal que son capaces de desaguar sin desbordar y, en la medida de lo posible, la precipitación generadora de dichos caudales máximos. Este plano incluirá o se acompañará de la descripción del estado de conservación actual (defectos observados y reparaciones efectuadas, indicando fechas, como presencia de piedras, ramas u hojas represando las aguas, grietas en los canales, etc.).
 - En los planos anteriores se indicarán el año en que se instala cada una de las infraestructuras citadas. Si es posible se precisará el mes y año de inicio y finalización de cada obra (este aspecto será relevante si dichas fechas se encuentran dentro del periodo para el cual se va realizar el balance hídrico).
 - Sobre mapa topográfico y perfiles que incluyan la distinción de superficies e infraestructuras se representarán los diferentes flujos considerados en el balance hídrico.

8.- EVOLUCIÓN HIDROQUÍMICA DE LIXIVIADOS

En los capítulos anteriores se ha descrito el modelo conceptual y los procedimientos de cálculo a desarrollar para la determinación y cuantificación de los diferentes términos que intervienen en el balance hídrico de un vertedero y los aspectos formales de su presentación. Con ellos pueden obtenerse las cantidades (volúmenes) de aguas y lixiviados que entran, salen y transitan por el interior del mismo. A lo largo de este tránsito, las aguas “limpias” que entran en un vertedero (típicamente por precipitación) se convierten en lixiviados caracterizados por la presencia de diversas sustancias que se han añadido al agua a través de procesos físicos, químicos y biológicos. Los lixiviados presentan unas características físico-químicas cuyo estudio resulta de interés no sólo en relación con los métodos de tratamiento a aplicar o el cumplimiento de los límites de vertido sino que puede obtenerse información valiosa de carácter predictivo que ayude en la gestión y en el propio control que debe desarrollarse.

La composición de los lixiviados está influenciada por una gran cantidad de factores:

- Tipo y cantidades de residuos y de otros materiales depositados.
- Edad o momento del depósito de cada material.
- Permeabilidad de la masa.
- Tipo y cantidad de agua que entra (precipitación, escorrentías, etc.).
- Etc.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de factores intervinientes, la composición de los lixiviados puede variar entre rangos muy amplios. En consecuencia no es posible asignar valores típicos de dicha composición que permitan establecer si un vertedero es “normal” o presenta algún tipo de “defecto”. Cada vertedero es (o puede ser) único y diferente en este sentido. En algunas de las referencias técnicas consultadas para la elaboración de esta guía se incluyen tablas indicativas de los rangos de variación en la composición de los lixiviados generados en vertederos de RSU (por ejemplo en GÓMEZ, 1997).

La caracterización hidroquímica de los lixiviados de un vertedero no es constante en el tiempo sino que va evolucionando con la edad conforme se desarrollan los procesos y reacciones en el interior del vaso. En un mismo vertedero, esta evolución depende de los factores anteriormente señalados, pudiéndose distinguir entre:

- Evolución debida a cambios en las características del vertedero: mayor o menor entrada de agua, tipo y cantidad de residuos que se depositan o han depositado en cada momento o período, cambios en la explotación, etc.
- Evolución debida a las propias reacciones y transformaciones que tienen lugar en un mismo vertedero aunque no se modifiquen sus características (“envejecimiento”). Un

caso particular de este tipo de evolución es la que se produce tras el sellado y clausura del vertedero.

En consecuencia, el estudio de la evolución hidroquímica de los lixiviados puede ayudar a:

- Evaluar la incidencia de las entradas de agua en el vertedero, tanto si se producen por precipitación como por cualquier otro proceso (escorrentías superficiales, entrada de aguas subterráneas, riegos, recirculación de lixiviados, etc).
- Evaluar si en algún momento se producen entradas de agua no controladas que determinan variaciones anómalas en la composición de los lixiviados.
- Evaluar la incidencia de cambios del tipo de superficie y proporción de áreas con residuos expuestos, cubiertas, sellados, etc.
- Evaluar la incidencia de cambios en el tipo de residuos y otros materiales depositados.
- Optimizar el propio control hidroquímico que se efectúa.

Los datos de partida para el estudio de la evolución hidroquímica de los lixiviados derivan de:

- Análisis químicos.
- Medición y registro continuo (sondas) de algunos parámetros (conductividad, temperatura, pH, etc.).
- Datos de caudales de lixiviados, precipitaciones, etc. (datos de los diferentes términos del balance hídrico).

De forma regular, los vertederos deben realizar análisis de los lixiviados de acuerdo con el plan de vigilancia y control establecido. Estos análisis suelen efectuarse con un frecuencia tal que su utilización para evaluaciones de detalle de determinados eventos (por ejemplo incidencia de precipitaciones intensas) es limitada aunque ofrezcan información sobre la evolución general. Por ello, resulta conveniente disponer de instrumentación que permita la medición en continuo de alguno de los parámetros más significativos (habitualmente, por su representatividad y bajo coste, conductividad eléctrica). De esta forma, contando simultáneamente con los datos del registro continuo de caudales, pueden establecerse correlaciones más finas y conclusiones de mayor certidumbre e interés.

Sin perjuicio de la realización de cálculos más o menos complejos sobre determinados aspectos, el estudio de la evolución hidroquímica se basará en la comparación de los datos de los diferentes parámetros (entradas, caudales de lixiviados, hidroquímica) y en la determinación e interpretación de causas-efectos. Este estudio debe realizarse sobre gráficos (no sólo sobre tablas con los valores numéricos) que permitan visualizar la evolución que se produce.

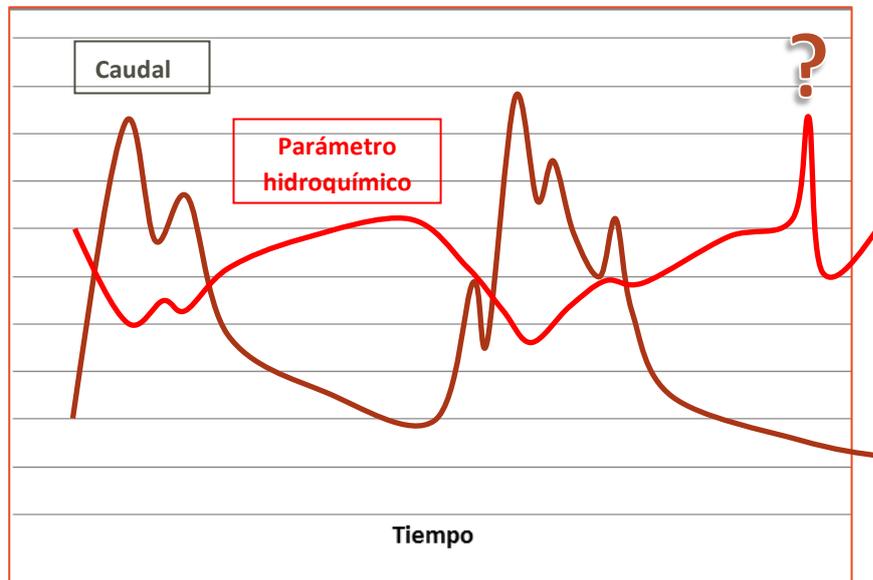


Figura 41.- Ejemplo de estudio de evolución hidroquímica. Estudio gráfico comparativo entre el caudal de lixiviados (en azul) y la evolución de un parámetro hidroquímico (conductividad, concentración de determinado parámetro, etc.). Este estudio puede permitir observar anomalías (?) que deben ser interpretadas.

A partir de este estudio sobre gráficos se podrá interpretar lo sucedido en el vertedero y relacionarlo con causas controladas (mayor precipitación, cambio en el tipo de residuos, sellado parcial, etc.) o inicialmente incontroladas, debiéndose en este último caso esclarecer el posible origen del efecto advertido.

Una de las aplicaciones concretas de este tipo de estudios se centra en la optimización de los controles postclausura. De acuerdo con el plan de vigilancia postclausura, es preciso analizar regularmente los lixiviados durante un largo período de tiempo (al menos 30 años en la generalidad de los casos). Habitualmente, este tipo de análisis incluye un paquete más o menos abultado de parámetros a determinar, presentándose con frecuencia los resultados en forma de tablas sucesivas de datos analíticos sin el acompañamiento de gráficas evolutivas.

Los análisis de lixiviados en período postclausura se efectúan específicamente para conocer:

- Si los procesos en el interior del vertedero se producen de forma prevista y controlada.
- Si los lixiviados cumplen los requisitos establecidos en relación con su posterior tratamiento o vertido.

En un vertedero que ha sido correctamente gestionado y sellado-clausurado, es previsible que durante el período postclausura la composición de los lixiviados evolucione, para cada parámetro, en un solo sentido o que a lo sumo, debido a la lentitud de algunos procesos, evolucione temporalmente en un sentido para dibujar después una trayectoria diferente pero continua. Salvo casos excepcionales no es previsible que a lo largo de todo el período

postclausura se produzcan aumentos y descensos repentinos “incontrolados” en la concentración de los parámetros que se analizan.

De acuerdo con lo anterior, si se puede evidenciar una evolución “uniforme y controlada” es posible predecir entonces la tendencia a futuro en la concentración de los diferentes parámetros y, con ello, puede justificarse una modificación en el plan de vigilancia postclausura (menos análisis y/o menos parámetros).

Este estudio y posible justificación sólo son válidos para el período postclausura ya que durante la explotación cambian las características del vertedero y no puede, salvo determinados parámetros en algunos casos, predecirse la evolución bajo todos los posibles cambios.

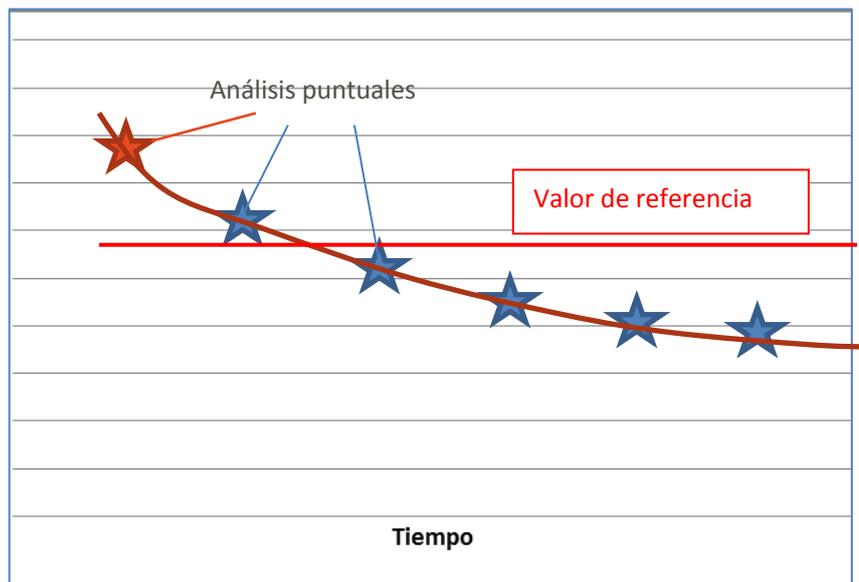


Figura 42.- Evolución de parámetros químicos durante el período postclausura. El estudio gráfico puede permitir predecir la evolución futura y justificar, con ello, cambios en el plan de vigilancia (menos análisis y/o menos parámetros). En algunos casos, sobre todo al inicio del período postclausura, pueden manifestarse aún variaciones que impidan definir claramente una tendencia.

9.- PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Los vertederos son medios porosos muy complejos, con particularidades significativas como la gran heterogeneidad, su constitución cambiante o la degradación continua, que dificultan el empleo de modelos matemáticos concebidos inicialmente para suelos o modelización de flujos en el terreno. La metodología para la realización de balances hídricos que se ha expuesto en esta guía representa un planteamiento simplificado pero adecuado para el control y la adecuada gestión de los vertederos en este ámbito. No obstante, en determinadas circunstancias puede resultar de interés complementar estos cálculos con simulaciones más avanzadas basadas en programas informáticos específicos. Esta modelización podría emplearse para confrontar las conclusiones obtenidas o para estudiar con mayor detalle alguno de los fenómenos considerados (por ejemplo evolución en la calidad de los lixiviados, generación de biogás, asentamientos, etc.).

A lo largo de los últimos 20 años se han ido desarrollando diferentes programas informáticos que pueden servir de ayuda en este sentido. Algunas de estas herramientas informáticas se centran en la evaluación de la potencial generación de biogás y emisiones mientras que otras lo hacen en el balance hídrico considerando o no la contaminación transmitida por los lixiviados.

El programa de uso más extendido es el HELP (SCHROEDER et al, 1994) (Hydrologic Evaluation of the Landfill Performance), desarrollado por la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (US-EPA). Se trata de un programa de distribución libre que fue concebido para simulación únicamente hidráulica de vertederos cerrados y, por ello, utiliza una representación fija del vertedero, cuasi-bidimensional. Discretiza el vertedero unidimensionalmente dividiendo su altura en varias capas de distintos tipos a través de las cuales va calculando el flujo de humedad, incluyendo un modelo de flujo horizontal en algunas capas, hacia los sistemas de drenaje.

En HELP se utiliza una modelización del balance superficial muy detallada, sobre todo en los fenómenos gobernados por la vegetación en la capa de cobertura. Los modelos de evapotranspiración están basados en la modificación de Ritchie a los trabajos de Penman. A partir de la lluvia útil se calcula la escorrentía superficial a partir del método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service de EE.UU.), estimando la infiltración por balance.

Desde su publicación en 1994, el programa ha tenido un uso extendido en muchas instalaciones, llegando a requerirse su empleo para justificar los cálculos en algunas administraciones, sobre todo en EE.UU. Sin embargo, al utilizar una representación fija del vertedero, es difícil realizar con HELP un seguimiento adecuado de vertederos que han sufrido cambios a lo largo del período de balance. Además, se han observado algunas limitaciones de los modelos implementados (BERGER, 2002).

Posteriormente han ido surgiendo otros modelos de simulación que tratan de mejorar la representación de los fenómenos hídricos y acoplar además otros procesos como la degradación o los asentamientos en el residuo. Entre estos modelos se encuentran los LDAT, HBM o MODUELO, desarrollados por las Universidades de Southampton en Inglaterra, de Napier en Escocia y de Cantabria respectivamente.

LDAT (Landfill Degradation and Transport Model) se centra fundamentalmente en simular la

degradación y el transporte de contaminantes en vertederos. Representa al vertedero según una malla bidimensional de diferencias finitas con elementos de volumen constante. Partiendo de un algoritmo básico que permite la simulación acoplada de fenómenos de transporte de líquido y gas en los poros del residuo (WHITE et al, 2003), ha ido incorporando modelos de simulación de degradación de residuos y generación de biogás, de asentamientos y equilibrio químico. Como resultados del programa se obtiene la evolución histórica de las propiedades de cada elemento de la discretización: contenidos sólidos, líquidos, ácidos y gases, gas emitido, poblaciones bacterianas y asentamiento.

HBM (Hydro-Bio-Mechanical) (MCDUGALL, 2007) es un modelo, basado también en un esquema bidimensional, que permite considerar efectos importantes en vertederos reales como distintas geometrías, la heterogeneidad del residuo, anisotropías, o el proceso de llenado. Incluye tres sistemas principales: hidráulico, mecánico y de biodegradación. Estos sistemas están enlazados con rutinas que permiten considerar el efecto de cada fenómeno principal en los otros, modificando el valor de algunas variables o parámetros.

La aplicación de LDAT y HBM para evaluación hídrica del vertedero es limitada pues no incluyen los cálculos de balance superficial. En el caso de HBM, por ejemplo, se parte de una tasa de infiltración que debería ser calculada de manera independiente.

MODUELO (CUARTAS, 2013) es un programa utilizado para el diseño, la construcción y el seguimiento de rellenos sanitarios. Realiza simulaciones dinámicas considerando conjuntamente los fenómenos hidrológicos, de biodegradación y de asentamiento (LOBO Y TEJERO, 2007), así como sus interacciones. Integra la simulación de todos estos procesos, con una base de datos relacional y con una representación tridimensional del relleno basada en su propio SIG integrado, que permite la edición de los modelos y la visualización de resultados. Frente a otros modelos, representa el relleno tridimensionalmente en cada momento de su vida útil en base a su historial de vertido y explotación. Esto le permite adaptarse con precisión a las particularidades de cada instalación, e ir incorporando los cambios correspondientes. MODUELO sí incluye en el balance hidrológico los cálculos de balance superficial teniendo en cuenta evaporación e infiltración estimadas mediante los modelos de Penman y Horton. A partir de datos sobre la composición de los residuos, datos climatológicos y estrategias de operación, permite estimar la evolución en la cantidad y calidad tanto de los lixiviados como del biogás.

MODUELO se ha utilizado para la evaluación y el seguimiento de diversos rellenos sanitarios. Se ha aplicado para evaluar alternativas de clausura, y períodos de vigilancia hasta la estabilización del vertedero, como herramienta de diagnóstico para detectar entradas de agua subterránea o la llegada imprevista al residuo de escorrentía procedente de áreas circundantes en la misma cuenca drenante, o para evaluar alternativas de gestión de residuos y su impacto en los lixiviados generados. El modelo se utiliza actualmente para diagnóstico de instalaciones y seguimiento y control de vertederos con ayuda de instrumentación.

Los modelos indicados se han aplicado con éxito en casos distintos, pero aún no se emplean de forma generalizada como herramientas de apoyo a la gestión de los vertederos. Las razones principales son dos: el esfuerzo necesario para la modelización, en cuanto a recopilación de datos, tratamiento de la información y calibración del modelo, y la percepción de incertidumbre en los resultados obtenidos derivada de la falta de un número suficiente de casos de aplicación de referencia que confirmen su correcto funcionamiento.

10.-BUENAS PRÁCTICAS

Dentro de los capítulos anteriores se han desarrollado diversos aspectos relacionados con el agua en los vertederos: tipos de flujo, posibles formas de entrada y de salida, parámetros, cálculo de cantidades, etc. Derivado de ello, es posible identificar una serie de buenas prácticas relacionadas con la gestión del agua cuya descripción se aborda en este capítulo. Dado que la gestión del agua está íntimamente relacionada con muchos ámbitos del proyecto y vida del vertedero (elección del emplazamiento, tipo de impermeabilización, infraestructuras, sistemas operativos, sistemas de control, etc.) no se pretende establecer un tratado o compendio general al respecto que cubra desde el diseño hasta las actividades que implica la operación diaria. Este tipo de tratados generales está ya disponible a través de diversas guías y manuales editados, algunos de ellos, por diferentes organismos o agencias internacionales. En su lugar, en este capítulo se pretenden destacar únicamente algunos de los aspectos más relevantes relacionados con el agua que deben considerarse a la hora de gestionar un vertedero.

Las buenas prácticas, en su concepto más amplio, son aquellas acciones que favorecen la consecución de un determinado objetivo. En el ámbito del agua y los vertederos se refiere a aquellas acciones que favorecen una adecuada gestión del agua. Algunas de estas prácticas están ya recogidas por la legislación vigente mientras que otras, no requeridas explícitamente, se refieren a conceptos señalados en la normativa y/o se relacionan con técnicas y procedimientos que han demostrado su efectividad a la hora de conseguir el objetivo propuesto.

Del repaso de la legislación vigente (RD 1481/2001 en el ámbito estatal y Decreto 49/2009 en la CAPV) pueden definirse ya algunas de las buenas prácticas que deben considerarse o qué objetivo deben tener las prácticas que se acometan. Dado que se trata de normativa de obligatorio cumplimiento, lo que aquí se indica no admite discusión en el sentido de que no se trata de “intentar” de desarrollar una acción “lo mejor que se pueda”. Se trata de cumplir lo que se requiere.

Se transcriben a continuación diversos puntos incluidos en el RD 1481/2001 que coinciden en su práctica totalidad, de forma literal, con lo señalado en el Decreto 49/2009. De la lectura de estos puntos se puede entresacar de forma directa diferentes requisitos y el correspondiente objetivo de las “buenas prácticas” que se acometan en la gestión del vertedero, haciendo innecesario un mayor comentario al respecto:

Artículo 9. Condiciones de la autorización.

1. Previamente a la concesión de una autorización a un nuevo vertedero, o a la ampliación o modificación de uno existente, las autoridades competentes deberán comprobar, al menos, que:

a) La gestión del vertedero estará en manos de una persona con cualificación técnica adecuada, y que están previstos el desarrollo y la formación profesional y técnica del

personal del vertedero tanto con carácter previo al inicio de las operaciones como durante la vida útil del mismo.

ANEXO I

Requisitos generales para todas las clases de vertederos

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.*

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.

4. Control de gases

- 1. Se tomarán las medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero.*
- 2. En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de vertedero, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede aprovecharse para producir energía, se deberá quemar.*

ANEXO III

Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de mantenimiento posterior

1. Introducción

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.

3. Datos de emisión: control de aguas, lixiviados y gases

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

El control de las aguas superficiales, si las hay, deberá llevarse a cabo en un mínimo de dos puntos, uno aguas arriba del vertedero y otro aguas abajo.

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

4. Protección de las aguas subterráneas

A) Toma de muestras. Las mediciones para controlar la posible afección del vertido de residuos a las aguas subterráneas se realizarán en, al menos, un punto situado aguas arriba del vertedero en la dirección del flujo de aguas subterráneas entrante y en, al menos, dos puntos situados aguas abajo del vertedero en la dirección del flujo saliente. El número de puntos de control podrá aumentarse sobre la base de un reconocimiento hidrogeológico específico y teniendo en cuenta la necesidad de, en su caso, la detección rápida de cualquier vertido accidental de lixiviados en las aguas subterráneas.

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.

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

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.

Teniendo en cuenta estos preceptos, se enuncian a continuación, de manera indicativa no exhaustiva, una serie de buenas prácticas agrupadas bajo los siguientes epígrafes:

- Diseño y explotación.
- Elementos de control.
- Seguimiento y registro.

10.1.- DISEÑO Y EXPLOTACIÓN

En relación con el diseño del vertedero y su explotación se apuntan las siguientes buenas prácticas:

- Formar al personal involucrado en la operación del vertedero (todo el personal) en la adecuada gestión general del agua y en estas buenas prácticas.
- Disponer de un servicio, procedimiento o mecanismo de gestión para el mantenimiento regular y reparación inmediata de todas y cada una de las infraestructuras del vertedero incluyendo, en lo que respecta al ámbito considerado, las infraestructuras relacionadas con el agua y los lixiviados (canales, cunetas, drenajes, conducciones, bombas, depósitos, caudalímetros, contadores, etc.).

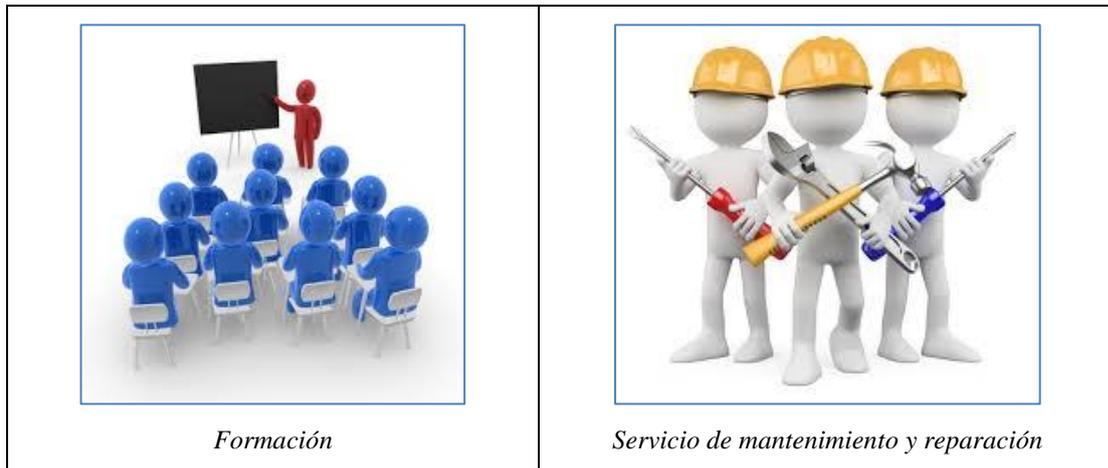


Figura 43.- Algunas buenas prácticas (I) (ver texto)

- Individualizar y delimitar de forma clara, física e hidráulicamente, las diferentes zonas que comprenden las instalaciones de un vertedero: vaso de vertido, balsa de lixiviados si la hubiera, zona de recepción de residuos, báscula, oficinas y vestuarios, depósitos, planta de tratamiento de lixiviados, viales, lavarruedas, áreas de mantenimiento, etc. Instalar sistemas de drenaje en cada una de estas zonas, con desagüe apropiado según la potencial afección de las aguas, para evitar que se genere una extensa área de escorrentía única y difusa o sin control. Respecto al perímetro del vaso de vertido, prestar especial atención a la zona o vial de entrada-salida pues habitualmente suele constituir un punto de entrada de aguas de escorrentía (disponer cunetas y rejillas).
- Desviar lateralmente potenciales entradas de aguas de escorrentía por mínima que sea en apariencia (arroyos y regueros definidos, laderas vertientes hacia el vaso, urbanización perimetral, etc.).
- No realizar vertidos de aguas (servicios, lavarruedas, etc.) ni de lixiviados u otro tipo de sustancias al interior del vaso de vertido. Minimizar los riegos que requiera la explotación.



Figura 44.- Algunas buenas prácticas (II) (ver texto)

- Minimizar la generación de lixiviados con independencia de que estos sean evacuados a un sistema de saneamiento comarcal o sean tratados en una planta de capacidad suficiente.
- Favorecer la movilidad de las aguas-lixiviados y gases en el interior de la masa de residuos hacia sus lugares de evacuación y gestión evitando la generación de “bolsas” aisladas.

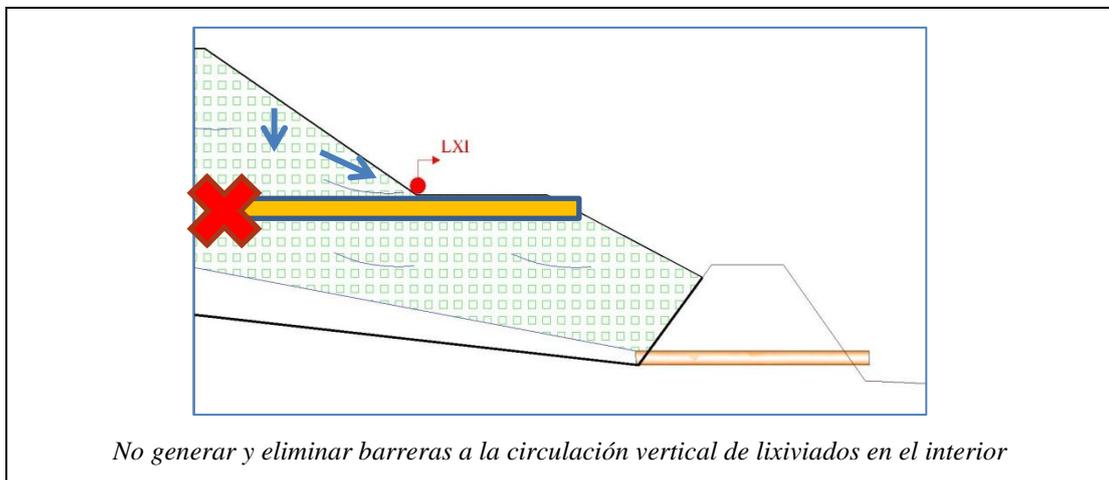


Figura 45.- Algunas buenas prácticas (III) (ver texto)

- Compartmentar en lo posible la superficie total del vaso en celdas o fases de menores dimensiones y desarrollar un plan de preparación, llenado y sellado sucesivo de cada celda-fase de tal forma que, en un momento dado, sólo esté una activa o abierta.

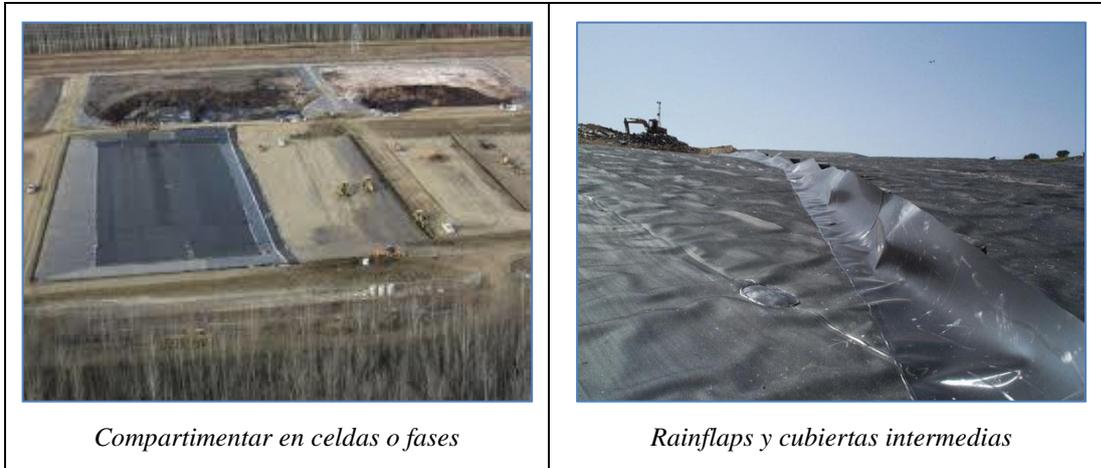


Figura 46.- Algunas buenas prácticas (IV) (ver texto)

- Sellar progresivamente de forma provisional las celdas o fases ya completadas y de forma definitiva cuando sea posible teniendo en cuenta los potenciales efectos de los asentamientos.
- Minimizar el área activa de depósito de residuos y generación de lixiviados en cada celda-fase mediante la adopción de un plan de explotación que incluya la disposición de rainflaps en la impermeabilización de fondo y cubiertas intermedias de baja permeabilidad con desagüe lateral del agua.
- Con el objeto de favorecer la mencionada movilidad de aguas-lixiviados y gases, una vez que las cubiertas intermedias (de baja permeabilidad) hayan cumplido su función, proceder a su retirada o rotura efectiva para evitar que generen una barrera al tránsito vertical de fluidos.
- Mantener el nivel de lixiviados en el interior del vertedero en el nivel más bajo posible. En el caso de que la evacuación sea por bombeo, instaurar un sistema de bombeo cuasi-continuo sin utilizar el vaso de vertido como almacenamiento o depósito de regulación de lixiviados.
- Efectuar el depósito de los residuos mediante métodos de extensión y compactación que favorezcan la trituración y mezcla de los mismos.

10.2.- ELEMENTOS DE CONTROL

En relación con los elementos de control se señala la disposición de los siguientes elementos con sus correspondientes programas de calibración y mantenimiento:

- Observatorio meteorológico para el control y registro continuo de, al menos, precipitación, temperatura, viento y humedad.
- Caudalímetro-contador para el control y registro continuo de los caudales de lixiviados.

- Conductímetro para el control y registro continuo de la conductividad eléctrica de los lixiviados (sonda).
- Caudalímetro-contador, o el sistema que proceda, para el control y registro de aguas o lixiviados que sean retirados o vertidos por cualquier causa (agua de servicios y lavarruedas, aguas sucias o lixiviados de cualquier origen que se viertan, riegos desde bocas fijas o con cisternas, bombes de agua o de lixiviados desde el interior del vaso, etc.).



Figura 47.- Algunas buenas prácticas (V) (ver texto)

10.3.- SEGUIMIENTO Y REGISTRO

En relación con los procedimientos de seguimiento y registro se señalan las siguientes buenas prácticas:

- Disponer de un sistema de registro de datos e informaciones relacionadas con el agua, los lixiviados y el gas y de procedimientos que permitan y faciliten el registro efectivo de



Figura 49.- Algunas buenas prácticas (VII) (ver texto)

- Realizar balances hídricos periódicos detallados.
- Estudiar la evolución hidroquímica de los lixiviados y su relación con las prácticas de explotación.
- Desarrollar las acciones que procedan derivadas de los hallazgos encontrados durante la elaboración de los balances y durante el estudio de la hidroquímica de los lixiviados.

11.-REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- ADEBOYE, O.B., OSUNBITAN, J.A., ADEKALU, K.O. y OKUNADE, D.A. (2009): *Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data. Application to Nigeria*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number 1291. Volume XI.
- ALBRIGHT, W.H., BENSON, C.H., GEE, G.W., ROESLER, A.C., ABICHOU, T., APIWANTRAGOON, P., LYLES, B.F. y ROCK, S.A. (2004): *Field water balance of landfill final covers*. Journal of Environmental Quality, 33. 2317-2332.
- ALFRED, J. N. (2013): *Evaluation of field capacity of municipal refuse dumpsite (a case study of university of Maiduguri dumpsite)* The Experiment, 2013 Vol. 14(3). 1008-1015.
- ARAUZO, M., DÍEZ, J.A., MARTÍNEZ-BASTIDA, J.J., VALLADOLID, M. y HERNÁIZ, P. (2007): *Comparación de un método directo y un método indirecto para la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada*. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. 77-82.
- ASPAPPEL (2007): *Diagnóstico de la generación y gestión de residuos sólidos en la industria papelera española*. Ed. Asociación Nacional de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón.
- BEAVEN, P. (2000): *The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling*. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of London (Reino Unido).
- BENGTSSON L., BENDZ, D., HOGLAND, W., ROSQVIST, H. y AKESSON, M. (1994): *Water balance for landfills of different age*. Journal of Hydrology 158. 203-217.
- BERGER, K. (2002): *Potential and limitations of Applying HELP Model for surface covers*. In Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management, July 2002. 192-203.
- BLIGHT, G.E. (2002): *Measuring evaporation from soil surfaces for environmental and geotechnical purposes*. Water SA Vol. 28 No. 4. 381-394.
- CEPIS (2002): *Manual de diseño de galerías filtrantes*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Medio Ambiente. OPS/CEPIS/02.61 UNATSABAR. Lima (Perú).
- CHANDRAPPA, R y DAS, D. B. (2012): *Solid Waste Management: Principles and Practice*. Springer-Verlag. Berlín.
- CHRISTENSEN, T.H. (2011): *Solid waste technology and management*. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido.
- COSTELLO, L.R. et al (1991): *Estimating water requirements of landscape plantings. The landscape coefficient method*. Cooperative Extension University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Leaflet 21493.

- CUARTAS, M. (2013): *Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización*. Tesis de Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Santander.
- CUI, Y. y ZORNBERG, J.G. (2008): *Water Balance and Evapotranspiration Monitoring in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Geotech Geol Eng (Springer).
- DI BELLA, G., DI TRAPANI, D., MANNINA, G. y VIVIANI, G. (2012): *Modeling of perched leachate zone formation in municipal solid waste landfills*. Waste Management 32. 456-462.
- DWYER, S.F. (2003): *Water balance measurements and computer simulations of landfill covers*. Tesis Doctoral. Universidad de Nuevo Méjico (EEUU).
- ECK, C.P. (2000): *Effects of moisture content in solid waste landfills*. Tesis Master of Science. Air Force Institute of Technology (EEUU).
- ENVIRONMENT AGENCY (UK) (2004): *Contaminant fluxes from hydraulic containment landfills*. SC0310/SR.
- ENVIRONMENT AGENCY (UK) (2009): *A technical assessment of leachate recirculation*. SC030144/R6.
- EPA (USA) (1975): *Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites*. EPA-SW-168.
- EPA (USA) (1980): *Hydrologic simulation on solid waste disposal sites*. EPA-SW- 868.
- EPA (USA) (2003): *Example moisture mass balance calculations for bioreactor landfills*. EPA-456/R-03-007.
- EPA (USA) (2014): *Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)*. Documentación diversa en la página web.
- EVE – Ente Vasco de la Energía (1.998): *Mapa Hidrogeológico del País Vasco*.
- FAO (2006): *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Estudio Riego y Drenaje nº 56.
- FELLNER, J., DOBERL, G., ALLGAIER, G y BRUNNER, P.H. (2009): *Comparing field investigations with laboratory models to predict landfill leachate emissions*. Waste Management 29. 1844-1851.
- GIROUD, J.P. y BONAPARTE, R. (1989): *Leakage through liners constructed with geomembranes-Part I. Geomembrane liners*. Geotextiles and Geomembranes nº 8. 27-67.
- GOBIERNO VASCO (2003): *Estudio de evaluación de los recursos hídricos totales en el ámbito de la CAPV*.
- GOBIERNO VASCO (2015) : *Plan de prevención y gestión de residuos de la CAPV / 2020*.

- GÓMEZ, M.A. (1997): *Estudio hidrológico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: vertederos de Gipuzkoa y Navarra el vertedero como sistema acuífero*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.
- HJELMAR, O., ANDERSEN, L. y HANSEN, J.B. (2000): *Leachate emissions from landfills*. AFR-REPORT 265. EPA Suecia.
- HUNG, C.S. (2004): *Hydrological balance of landfill in Hong Kong*. Tesis MSc. Universidad de Hong Kong.
- IHOBE (2005): *Guía técnica para la medición estimación y cálculo de las emisiones al aire. Sector residuos*.
- IHOBE (2008): *Guía técnica para la medición estimación y cálculo de las emisiones al aire. Sector residuos (versión 2008)*.
- JAIN, P., POWELL, J., TOWNSEND, T.G. y REINHART D.R. (2006): *Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test*. Journal of Environmental Engineering, Vol.B132, No.6.
- JIA, G.-W., ZHAN, L.T. y CHEN, Y-M. (2009): *Influence of rainfall pattern on the infiltration into landfill earthen final cover*. Proc. of Int. Symp. on Geoenvironmental Eng., ISGE2009 (China).
- KAZIMOGLU, Y.K. (2007): *Moisture retention and conductivity properties of waste refuse: a laboratory study*. Tesis doctoral. Universidad de Napier. Edimburgo (UK).
- KHIRE, M.V., BENSON, C.H. y BOSSCHER, P.J. (1997): *Water balance modelling of earthen final covers*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. August. 744-754.
- KOERNER, R.M. y KOERNER, J.R. (2009): *Survey of U.S. State Regulations on allowable leakage rates in liquid impoundments and wastewater ponds*. GRI White Paper nº 15. Geosynthetic Institute. USA.
- LOBO, A. (2003): *Desarrollo de Modulo 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- LOBO, A., MUÑOZ, J., SÁNCHEZ, M. y TEJERO, I. (2003): *Comparative analysis of three hydrological landfill models (modulo 1, help and modulo 2) through a practical application*. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium.
- LOBO, A. y TEJERO, I. (2007): *MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills*. Environ. Modell. Softw. 22, 59-72.
- MCBEAN E.A., ROVERS F.A., FARQUHAR, G.J. (1994): *Solid waste landfill engineering and design*. Prentice Hall, Nueva Jersey.
- MACDOUGALL, J. (2007): *A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behavior in landfilled waste*. 1st Middle European Conference on Landfill Technology. 297-320.

- MONGIL MANSO, J. (2004): *Desarrollo y aplicación de una metodología destinada al dimensionado de sistemas de recolección de agua para la restauración forestal en zonas áridas*. Tesis doctoral Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia.
- MUGUERZA, I. y ANTIGÜEDAD, I. (2010): *Problemática en el cálculo del Balance Hídrico en vertederos. Revisión bibliográfica*. Presentación en Congreso Versos'10 (Bilbao).
- NAS, S.S. y NAS, E. (2014): *Assessing the impacts of seasonal variations on predicting leachate generation in Gumushane open dump using water balance method*. Pol. J. Environ. Stud. Vol 23. No 5. 1659-1668.
- OLAYIWOLA, A. O. (2000): *An investigation into the impact of sequential filling on properties of emplaced refuse lifts and moisture stored in a municipal solid waste landfill*. PhD Thesis. University of Southampton (UK).
- OLAYIWOLA, A. G. (2010): *Formulating essential models for predicting the hydro-physical properties of municipal solid refuse fills*. American Science Report and Opinion 2010;2(6). 43-52.
- ORTA, M.T., CRUZ, R., ROJAS, N. y MONJE, I. (2003): *Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills*. Waste Management and Research 21. 127-136.
- PRAYOGO, T.B., DOTE, Y. y SEKITO, T. (2013): *Water Content Distribution in a Landfill Site in a Tropical Climate Condition*. The 1st IWWG-ARB Symposium, 18-21 March 2013, Hokkaido University, Japan.
- REDDY, K.R., HETTIARACHCHI, H., PARAKALLA, N., GANGATHULASI, J., BOGNETS, J. y LAGIER, T. (2009): *Hydraulic conductivity of MSW in landfills*. Journal of Environmental Engineering, Agosto 2009. 677-683.
- SENET, J. (2012): *Predicción de lixiviados en vertederos de residuos sólidos urbanos en ambientes semiáridos. Aplicación del modelo HELP en el vertedero de Fuente Álamo (Murcia)*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- SCHROEDER, P.R., DOZIER, T.S., ZAPPI, P.A., McENROE, B.M., SJOSTROM, J.W. y PEYTON, R.L. (US Army – EPA USA) (1994): *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*. EPA/600/R-94/168b.
- STATOM, R.A., McRAY, J.E. y THYNE, G.D. (2006): *Conceptual Model for Landfill Hydrologic Transport Developed Using Chloride Tracer Data and Dual-Domain Modeling*. Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XII, No. 1. 67-78.
- STOLTZ, G., TINET, A.J., STAUB, M.J., OXARANGO, L. y GOURC, J-P (2012): *Moisture Retention Properties of Municipal Solid Waste in Relation to Compression*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Abril 2012. 535-543.
- TCHOBANOGLIOUS, G. y KREITH, F. (2002): *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill. Nueva York.

TEXAS Commission on Environmental Quality (2012): *Guidance for Requesting a Water Balance Alternative Final Cover for a Municipal Solid Waste Landfill*. Texas Com. E.Q. RG-494.

URA – Agencia Vasca del Agua (2014): *Actualización de la evaluación de recursos hídricos de la CAPV 2010*.

VADILLO, I. y CARRASCO, F. (2005): *Estimación del volumen de lixiviado generado en el vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina mediante balance hídrico*. Geogaceta, 37. 139-142.

VAIDYA, R.D. (2002): *Solid Waste Degradation, Compaction and Water Holding Capacity*. Thesis Master of Science. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (USA).

VALÍN, M.I., CASTRO, R., PEDRAS, C. y PEREIRA, L.S. (2011): *Uso del agua en espacios verdes: cálculo y evaluación de estrategias de riego*. VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua.

VARGAS, M. (2009): *Modelo de balance hídrico para la estimación de los caudales de lixiviados generados en la operación del relleno sanitario del centro industrial del Sur - el Guacal, Heliconia – Antioquia*. Trabajo de Investigación Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

VILLAMAYOR, J. y GRAU, J. F. (2005): *Determinación de la cantidad de lixiviado generado en rellenos sanitarios*. AIDIS, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Asunción, Paraguay.

WHITE, J.K., ROBINSON, J.P. y REN, Q. (2003): *A framework to contain a spatially distributed model of the degradation of solid waste in landfills*. Waste Manage. Res. 21(4), 330-345.

YUE, W.W. (2009): *Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions*. Thesis Master of Science. California Polytechnic State University (USA).

ZORNBERG, J.G., JERNIGAN, B.L., SANGLERAT, T.R. y COOLEY, B.H. (1999): *Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Julio 1999. 583-594.