

3 LA INFILTRACIÓN DIRECTA SOBRE EL TERRENO. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS INSTALACIONES

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se define la tecnología y explica como se calcula el tamaño de las bolsas de infiltración para la depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Existen numerosos términos que se emplean para referirse a las técnicas que utilizan el terreno como sustrato depurador: infiltración rápida, infiltración directa sobre el terreno, tratamiento suelo-acuífero, geodepuración; no obstante, aunque empleados como sinónimos presentan matices que conviene aclarar.

El término más general es el de **infiltración directa sobre el terreno**, en el quedan englobadas todas aquellas técnicas en las que el elemento depurador principal es el suelo natural y la zona no saturada, al tratarse de un sistema basado en un filtro natural, incluye tanto la infiltración rápida como sistemas de baja carga, sistemas de infiltración controlada en zonas poco permeables y el riego superficial. Esta denominación es independiente de la presencia o no de vegetación en el sistema de depuración.

Son sistemas de **infiltración rápida** aquellos en los que el agua, que ha recibido algún tipo de pretratamiento, se aplica de forma intermitente en balsas de infiltración, generalmente desprovistas de vegetación. Las tasas de recarga suelen ser mayores de 6 m/año. La depuración se produce al atravesar el agua el lecho de la balsa, terminando en su mayor parte evaporándose o recargando el acuífero subyacente. El matiz más importante a la hora de diferenciar un sistema de infiltración rápida de uno de infiltración directa sobre el terreno, es que en la infiltración rápida solo es posible mantener las altas tasas de vertido sometiendo el agua a un tratamiento previo, que puede llegar a ser un tratamiento secundario, en la infiltración directa sobre el terreno se pueden aplicar aguas que únicamente han sufrido un pretratamiento y las tasas de infiltración pueden ser bastante menores a 6 m/año.

En realidad, todos los sistemas englobados dentro del término "infiltración directa sobre el terreno", son lo que la literatura anglosajona llama **tratamiento suelo-acuífero** (Soil Aquifer Treatment, SAT) pues el agua infiltrada sigue interaccionando con la matriz sólida del acuífero y puede decirse que el proceso de depuración no termina realmente hasta que es captada, aflora en un manantial o en el lecho de un río.

Por último, ya se apuntaba en el primer capítulo, se acuñó el término **Geodepuración**, queriendo incidir así en la importancia del material geológico con el que tiene contacto el agua al atravesar el subsuelo, este término, que pretende englobar todos los demás, es sin embargo algo restrictivo pues puede hacer olvidar que la mayor parte de la depuración del agua residual se produce en los primeros decímetros de suelo gracias a la acción de agentes biológicos, principalmente bacterias y hongos.



Foto 3.1 El agua subterránea puede terminar surgiendo en el lecho de cauces superficiales que pueden verse afectados por procesos de eutrofización.

¿Qué es la infiltración rápida (IR)?

Es un método de tratamiento de aguas residuales urbanas que se basa en su aplicación sobre suelos relativamente permeables (las texturas más comunes son las arenosas o arenas-limosas), en cantidades muy superiores a la tasa de evapotranspiración de los mismos, de forma que la mayoría del agua vertida se infiltra, depurándose mediante procesos físicos, químicos y biológicos a través de la zona no saturada, llegando al acuífero en condiciones de ser reutilizada. El destino último de las aguas infiltradas es su incorporación al acuífero subyacente o su salida hacia las aguas superficiales.

Se trata de un método eficaz y de bajo coste cuya principal ventaja reside en que no precisa el empleo de aditivos y puede ser implementado y mantenido en municipios pequeños por personal poco especializado.

La importancia de este tipo de tratamiento se está viendo incrementada desde que se ha empezado a dar mayor importancia a la reutilización de las aguas residuales y a la protección de las aguas subterráneas. Por esta razón, los sistemas de IR, englobados dentro de los sistemas de tratamiento suelo-acuífero, se han convertido en una parte importante de los procesos de tratamiento de agua residual para reutilización, principalmente en agricultura, aunque en ocasiones, el agua captada en pozos y sondeos, puede ser empleada en abastecimiento a poblaciones.

Aunque en muchos de estos sistemas el agua residual es aplicada al suelo mediante balsas de infiltración, también pueden ser usadas zonas con un cierto grado de pendiente, aterrazadas o con surcos. Donde la topografía es muy irregular e imposibilita la construcción de balsas de infiltración o las hace menos rentables, se puede usar el sistema de aplicación mediante aspersión, pero requiere el empleo de energía adicional para bombear el agua y es necesario disponer de algún tipo de vegetación, normalmente hidrófila, con objeto de proteger el terreno de la escorrentía superficial y su consecuente erosión, no obstante, se discutirá en apartados posteriores. La aplicación de agua residual mediante aspersión es una tecnología que debe ser evitada debido a los problemas técnicos y sanitarios que puede acarrear.

La carga hidráulica que puede ser aplicada en sistemas de IR es muy variable, entre 6 y 100 m/año dependiendo tanto de las características del suelo y de las del agua a infiltrar como de la climatología del entorno de las instalaciones. En nuestras latitudes, donde la evapotranspiración promedio suele oscilar entre 0,5 a 2,5 m/año, es posible que más del 90% del agua aplicada pueda llegar al acuífero y quede disponible para ser reutilizada posteriormente (Metcalf y Heddy, 1999).

Los sistemas de IR de aguas residuales no han surgido recientemente; existe una gran experiencia internacional sobre este tema (ver el apartado 7.1). En Estados Unidos estos sistemas llevan constituyendo una práctica habitual en el tratamiento de aguas residuales urbanas desde hace varias décadas. En 1981 ya había unos 320 sistemas de IR para depuración de ARU en Estados Unidos, unos en funcionamiento y otros todavía en construcción. De estos sistemas, el 30%, ya habían sido construidos en 1971. Mientras que los primeros sistemas de IR se instalaron con el único fin de deshacerse del agua residual, los sistemas más recientes se construyen con la intención primordial de reducir la contaminación de las aguas superficiales (ríos, lagos, océanos), para la recarga de acuíferos o para la reutilización del agua depurada.

Los sistemas de tratamiento de ARU mediante IR son capaces de eliminar esencialmente todos los compuestos orgánicos biodegradables, los sólidos en suspensión y los organismos patógenos transportados por las ARU, incluyendo bacterias, virus, protozoos, y otros parásitos. También pueden eliminar el fósforo y reducir considerablemente las concentraciones de nitrógeno y metales pesados. No es un buen sistema, para la eliminación de contaminantes procedentes de la actividad industrial y no debe ser empleado para ello.

El agua tratada mediante IR es apta para riego y otros usos que no requieren agua potable, su descontaminación suele requerir un tratamiento adicional como la filtración mediante carbón activado, la eliminación de los compuestos orgánicos que pueden estar en concentraciones traza, la desinfección y, puesto que el principal efecto sobre el agua resultante es el aumento de su salinidad, posiblemente un tratamiento de ósmosis inversa u otro tipo de desalinización. Esto dependerá mucho de la calidad del agua en origen.

La inclusión de este tratamiento natural suelo-acuífero como un primer paso en la potabilización de aguas residuales puede ayudar a la aceptación por parte de la sociedad del reciclaje completo del agua residual.

Otras ventajas que proporcionan estos sistemas, como ya se ha relatado anteriormente, son: la simplicidad de operación de las balsas que hace que no se requiera personal muy

especializado, el bajo coste de la construcción y mantenimiento de las instalaciones, el uso de un equipamiento sencillo, los bajos costes energéticos, la fiabilidad del sistema y su buena integración en el mundo rural.

¿Cuáles son los objetivos de un sistema de infiltración rápida?

Este tipo de instalaciones se diseñan generalmente persiguiendo, de forma conjunta, múltiples objetivos:

- La depuración del agua residual.
- La recarga del acuífero subyacente.
- La reutilización del agua en agricultura
- La lucha contra la intrusión marina.
- La mejora de la calidad de acuíferos altamente degradados.
- El incremento del caudal de los ríos o manantiales relacionados con el acuífero recargado.

Evidentemente casi nunca el objetivo es único y cualquier combinación de los anteriores o incluso otros diferentes es posible.

¿Qué niveles de depuración son esperables?

El comportamiento del suelo como filtro mecánico es muy bueno, aunque es necesario tener precaución con la existencia de caminos preferenciales en el terreno, generalmente grietas, que pueden hacer que el agua percole rápidamente a través de los primeros decímetros de suelo. La eliminación de materia en suspensión y microorganismos es prácticamente total. La eliminación de fósforo puede llegar a ser de más del 99% dependiendo del tipo de material que forme el lecho filtrante (la presencia de calcio facilita la precipitación de sales insolubles de fósforo). La eliminación del nitrógeno es superior al 50% aunque puede ser muy variable dependiendo principalmente del diseño de los ciclos de humectación-desechado, de la carga hidráulica impuesta, del contenido en carbono orgánico disponible e incluso de factores climáticos, que en climas fríos pueden ser determinantes.

¿Cuándo es adecuada la Infiltración Rápida como sistema de depuración de aguas residuales urbanas?

A la hora de decidir si el mejor sistema de tratamiento de los efluentes líquidos de una población es la infiltración rápida han de considerarse al menos las siguientes razones:

- a) **Razones económicas.** La infiltración rápida (Viswanathan, 1999), se encuentra entre las técnicas de depuración de aguas residuales urbanas económicamente menos gravosas de todas las disponibles en la actualidad, sobre todo porque los gastos de mantenimiento son muy bajos en comparación con otros sistemas que requieren el empleo de aditivos químicos, un gasto importante de energía o un complicado mantenimiento de elementos mecánicos. De todas formas cada caso requiere un estudio particularizado.



Foto 3.2 La existencia de caminos preferenciales para el flujo del agua modifica sustancialmente la cantidad de agua que puede infiltrarse, pero también los niveles de depuración que pueden conseguirse.

- b) **Razones ambientales:** La IR es segura desde un punto de vista ambiental siempre y cuando se cumplan las restricciones propias del método, entre las cuales se puede destacar:

La naturaleza del vertido, que debe ser totalmente biodegradable.

Los materiales del lecho filtrante: que deben poseer una capacidad de filtrado mecánico y depuración suficientes.

El espesor de la zona no saturada: que ha de ser suficiente para permitir la depuración del agua antes de su llegada al nivel freático.

La ubicación física de las instalaciones: deben ser construidas donde se minimice el impacto sobre el medio natural. Hay que considerar además, que la reintegración del agua al medio subterráneo, es en general, un hecho ambientalmente positivo.

- c) **Razones Técnicas:** Fundamentalmente referidas a la disponibilidad de personal formado en la gestión y mantenimiento de los diferentes tipos de instalaciones y en las restricciones constructivas, energéticas o de otra índole propios de cada uno de ellos.
- d) **Razones sociales:** en poblaciones pequeñas, en general de menos de 1000 habi-

tantes, las instalaciones de IR se integran de forma muy fácil en el medio rural; esto puede evitar el rechazo por parte de la población de un tipo de instalaciones que, a pesar de ser tan necesarias, con frecuencia son causa de problemas por el tipo de material que tratan y los efectos secundarios que como la producción de olores, insectos, lodos etc. pueden crear cierto rechazo social.



Foto 3.3 La integración de los sistemas de IR en el medio rural es en general muy buena.

De forma resumida puede plantearse que la IR es un sistema adecuado siempre que:

- Económicamente sea un método favorable.
- Se disponga de terreno de extensión suficiente, formado por materiales de naturaleza y permeabilidad adecuadas.
- La distancia al nivel freático sea mayor de 3 metros.
- No se puedan ver afectadas captaciones de agua para abastecimiento.
- Que el impacto ambiental no exista o sea admisible.

En cualquier caso todos estos factores, y algunos otros, han de ser valorados antes de abordar el diseño y construcción de un sistema de IR, para ello es imprescindible la realización de un conjunto de estudios previos que aportaran la información necesaria. En el siguiente apartado se aborda cuales son estos estudios previos y cual ha de ser la interpretación y consecuencia de los resultados que con ellos obtenemos.

3.2 ESTUDIOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE ARU MEDIANTE IR

En la figura 3.1 se muestra un esquema de flujo que resume las fases que debe contemplar el diseño racional de un sistema de depuración de aguas residuales urbanas mediante infiltración rápida.

Se consideran fases del diseño, desde la decisión primera acerca de la idoneidad de la técnica de IR para el caso concreto que se estudia, hasta la entrega al contratista de obra de los planos de construcción de las balsas. En esta publicación se trata desde los estudios previos, hasta el cálculo de las dimensiones de las instalaciones.

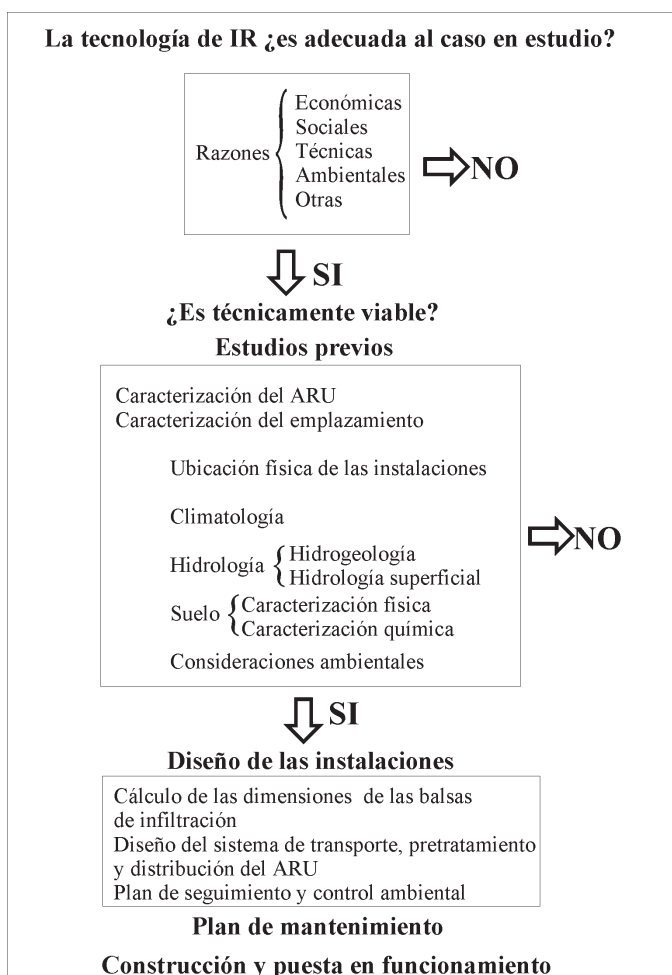


Figura 3.1 Principales fases a considerar en el diseño de un sistema de depuración de ARU mediante infiltración rápida.

En el diseño de un sistema de depuración de ARU mediante IR, es imprescindible la realización de una serie de estudios previos (de viabilidad) y estudios complementarios (que aportan datos necesarios para el diseño y cálculo de las dimensiones de las instalaciones) si se desea tener una mínima garantía de éxito.

La fase de estudios previos es básica pues permitirá evitar la realización de otros mucho más caros. En esta fase es necesario asegurar con suficiente garantía al menos tres aspectos del funcionamiento del sistema depurador:

- Su capacidad de admitir la carga contaminante vertida.
- Que puede depurarla hasta los niveles exigidos por la legislación.
- Que el impacto sobre el medio ambiente es nulo o al menos no sobrepasa los límites establecidos.

Sucede, que al tratarse de una metodología basada en el comportamiento de un medio natural, el suelo, prever su comportamiento, especialmente a largo plazo requiere la realización de estudios notablemente más sofisticados y difíciles de interpretar que otras tecnologías más previsibles, pues en ellas las variables de las que depende su funcionamiento son menos y pueden ser controladas artificialmente.

De forma resumida, los factores que determinan las características de diseño y eficacia de un sistema de depuración de ARU mediante infiltración directa en el terreno pueden concretarse en los siguientes seis:

- a) Adecuada ubicación física de las instalaciones
- b) Características de la composición química de las aguas residuales a tratar.
- c) Características climatológicas (termo-pluviometría, viento, evapotranspiración) de la zona donde se ubicarán las instalaciones.
- d) Características físico-químicas e hidráulicas del suelo que constituye el lecho filtrante
- e) Características hidráulicas del sistema suelo-zona no saturada-acuífero.
- f) Consideraciones ambientales.

Los problemas más comunes asociados a los sistemas de IR suelen ir asociados a errores en la toma o interpretación de los datos de campo, en esta fase previa al diseño. Estos problemas se podrían evitar teniendo en cuenta que es esencial que el estudio de campo definitivo se realice en el lugar y a la profundidad a la que definitivamente se va a construir el sistema de IR. Por ello se hace necesario realizar una serie de pruebas para afinar el diseño y determinar la configuración final de las balsas. No es una buena solución extrapolar los datos de otros lugares cercanos y mucho menos de la bibliografía.

En el suelo, cuyo estudio es especialmente importante pues constituye el medio responsable de la depuración del agua, algunos de estos problemas son:

- Existencia de horizontes menos permeables que no han sido detectados en la fase de investigación inicial y que impiden el movimiento del agua.
- Estudios de campo realizados en localizaciones o profundidades distintas de donde finalmente se ha construido el sistema, lo que hace que el diseño pueda estar basa-

do en datos poco realistas para la ubicación definitiva. Esto es especialmente importante en el caso del diseño de pequeñas instalaciones sobre terrenos más o menos heterogéneos donde el desplazamiento unas decenas o centenas de metros puede hacer cambiar sustancialmente las características del suelo.

- Existencia de un contenido significativo en arcilla o limo en el último estrato del área de infiltración. Estos materiales finos pueden segregarse durante el flujo, distribuirse por la superficie e impedir el futuro movimiento del agua.

En el agua subterránea los problemas suelen ser:

- Elevación estacional inesperada del nivel freático que puede interferir con el movimiento subsuperficial del agua.
- Inadecuada capacidad de movimiento del agua para ser evacuada lateral o verticalmente del sitio requerido en el tiempo estimado por el diseño.
- El flujo subsuperficial de una balsa, sobre todo si se encuentra en pendiente, puede influir en la capacidad de flujo de la balsa adyacente.

Tanto los estudios de campo como los test de laboratorio suelen ser caros. La obtención de resultados fiables, cuya relación coste-efectividad sea aceptable, sólo puede asegurarse si el programa de investigación se planifica y lleva a cabo por técnicos familiarizados con el estudio de suelos y aguas subterráneas que tengan un buen conocimiento del concepto de IR y de las expectativas de diseño.

La interpretación de los resultados en un ensayo de campo también requiere de conocimientos edafológicos, hidrogeológicos y de un profundo estudio de los procesos físicos y químicos.

El primer paso en la investigación del lugar tiene que ver con la confirmación de la viabilidad del sistema de IR para el sitio seleccionado. En esta fase de evaluación se incluyen ensayos como:

- El examen de campo de perfiles de suelo en el lugar elegido y otros cercanos.
- Observación de los indicadores del comportamiento del agua subterránea: zonas mojadas, áreas de infiltración, cambios en la vegetación, estanques y ríos así como características generales del drenaje como permanencia del agua tras una lluvia.
- Estudio de capacidad de percolación mediante test in situ.
- Realización de un estudio de la evolución estacional del nivel freático.
- Investigación de la calidad y evolución de las aguas subterráneas

Los datos obtenidos en los pasos anteriores deben permitir realizar una definición preliminar de:

- a) La hidrología general.
- b) La descripción del suelo y localización del nivel piezométrico.
- c) Propuesta de horizontes del suelo adecuados para situar las balsas.
- d) Dirección del flujo, profundidad y áreas de descarga para el agua subterránea, así como las características de recarga de la zona.
- e) Modificaciones posibles del lugar, incluyendo rellenos o excavaciones, drenajes subterráneos, o control del flujo subterráneo natural.

La evaluación de estos datos nos permitirá llegar a alguna de las siguientes tres conclusiones:

- a) **El sitio es apropiado.** En este caso se procedería a realizar otros estudios de campo más detallados, al diseño, construcción y explotación de las instalaciones de depuración de aguas residuales mediante infiltración directa en el terreno.
- b) **El lugar puede ser apropiado con modificaciones.** En este caso se necesitarían más ensayos de campo y análisis.
- c) **El lugar no es adecuado para la realización de un sistema de IR** en función de los factores estudiados en la investigación preliminar y de la selección del sitio. En este caso no es necesario realizar más ensayos o análisis, aunque en los estudios de campo pueden haberse localizado nuevos emplazamientos que sería necesario ensayar.

3.2.1 Ubicación física de las instalaciones

La ubicación física del dispositivo de infiltración es importante, de él dependen cuestiones como:

- Gasto energético en el transporte del agua residual a las balsas de infiltración.
- Pérdidas de agua por evaporación.
- Cantidad total de agua que podrá ser infiltrada.
- Nivel de depuración que se puede conseguir.
- Impacto sobre el medio ambiente.
- Impacto sobre la calidad de vida de la población.

Para caracterizar y elegir la zona que mejor se adapte a las necesidades del sistema es necesario basarse en la cartografía existente de la zona, especialmente en la topográfica, la de usos del suelo y la edafológica. Es imprescindible evaluar, entre otras, características del medio como son:

- Topografía.
- Orientación.
- Geología.
- Microclima.
- Usos actuales y futuros de la tierra.

Topografía y orientación.

El estudio de la topografía, tanto de la zona en la que será construido el sistema de infiltración como de su entorno próximo, es importante pues determinan cuestiones tales como:

- La cantidad de agua que se evapora de las balsas (que está fuertemente influenciada por su orientación y exposición a los vientos dominantes).
- El flujo de agua residual fuera del perímetro de infiltración por escorrentía superficial.
- Aporte de material de erosión del entorno de las instalaciones.
- Aporte extra de agua por escorrentía superficial del entorno de las instalaciones.

Las tres características topográficas principales que deben ser consideradas a la hora de seleccionar un emplazamiento de instalaciones de IR son: la pendiente, el relieve y el aporte de agua por escorrentía superficial.

De forma general se considera que los sistemas de IR no son operativos cuando la pendiente es superior al 20% y funcionan con tasas reducidas de infiltración en el intervalo entre el 12% y el 20%.

Pendiente

En las instalaciones de IR no es recomendable la existencia de una excesiva pendiente ya que esto aumentaría la cantidad de escorrentía superficial así como la erosión, que puede conducir a unas condiciones inestables del suelo cuando éste está saturado.

La configuración del sistema de IR, así como las tareas necesarias de acondicionamiento de las balsas de infiltración, serán factores importantes a tener en cuenta ya que pueden determinar las máximas pendientes permisibles en un lugar de ubicación potencial.

Para el tratamiento mediante IR, la característica topográfica primaria es el control del movimiento lateral del agua así como los valores de percolación de las partes bajas de las balsas, que no deben verse afectados. Existen casos en los que se han construido sistemas de balsas de infiltración en laderas aterrazadas y en los cuales no se ha producido un drenaje subterráneo suficiente, de forma que el movimiento lateral del agua de la balsa de arriba afectaba a los valores de percolación de las balsas inferiores.

Relieve

El relieve y el terreno están interrelacionados y pueden afectar económicamente a la implantación de la instalación cuando es necesario bombear el agua residual desde el lugar donde se produce hasta la instalación. Los gastos de bombeo pueden llegar a ser los principales, sobre todo cuando hay grandes diferencias de elevación entre el lugar de producción del agua residual y el de tratamiento, reutilización o punto de descarga. Este coste debe ser valorado frente al coste de construcción de un sistema en el que el agua residual vaya al lugar de tratamiento por gravedad ya que puede haber grandes distancias entre el lugar donde se produce el agua residual y un lugar ideal con unas características de relieve, edáficas o de otro tipo más favorables.

Aporte de agua por escorrentía superficial

Las áreas propensas a ser invadidas por la escorrentía superficial no son adecuadas para la ubicación de balsas de infiltración, pues pueden producirse aumentos puntuales del agua que llega a las balsas. Esta agua no puede infiltrar y llega a producir daños en los componentes físicos del sistema de tratamiento.

Geología

Los estudios previos al diseño de un sistema de IR, deben incluir un apartado en el que se identifiquen las formaciones geológicas y discontinuidades que pueden causar patrones de flujo inesperados en la aplicación del agua residual y su percolación hasta el agua subterránea.

Si el material sobre el que se va a infiltrar el agua residual está fracturado o agrietado, el vertido puede llegar al agua subterránea rápidamente y el tratamiento, debido al reducido tiempo de residencia en el suelo, no sería eficaz. Igualmente, los niveles de agua colgada por encima del nivel freático pueden ser el resultado de una capa impermeable o semipermeable de roca o materiales arcillosos, que además de reducir la depuración, hacen que el flujo de agua sea difícilmente predecible.

También deben ser evaluadas otras discontinuidades geológicas, tales como fallas e intrusiones, pues influyen igualmente en el patrón de flujo y con ello en la calidad del agua y en su movimiento.

Microclima

Aunque en un apartado posterior se tratará el tema del clima de forma más extensa conviene reseñar que en el contexto de la ubicación física de las instalaciones, especialmente cuando estas son de tamaño muy reducido, las consideraciones microclimáticas, especialmente las relacionadas con aspectos como son:

- Las tasas de insolación.
- Exposición a los vientos dominantes
- Zonas preferentes de helada.

pueden ser muy importantes, sobre todo porque influyen sobre la tasa de evaporación del agua vertida en las balsas, y sobre la congelación de su superficie, incluso directamente sobre la cantidad de agua disponible para la infiltración y sobre las tasas de depuración conseguidas.

Usos actuales y futuros del suelo.

En muy raras ocasiones la superficie necesaria para construir las balsas de infiltración y los elementos accesorios, pertenecerá toda a una misma finca propiedad del ayuntamiento, por lo que probablemente habrá que proceder al inicio de expediente de expropiación o a la compra del mismo. Por ello, en cuanto se disponga de un plano con la situación de las zonas más favorables para la ubicación de las instalaciones de depuración, se tiene que preparar un estudio sobre el uso actual y potencial del suelo, su clasificación según las normas urbanísticas y la legislación aplicable.

3.2.2 Composición de las aguas residuales a tratar

Es necesario conocer la composición de las aguas residuales generadas en la población a la cual se pretende dotar de un sistema de IR. Estos análisis deben permitir conocer con seguridad:

- La existencia de vertidos no biodegradables que harían inviable el sistema de IR.
- El volumen y distribución estacional de los vertidos.
- La composición típica de las aguas, en especial su contenido en materia orgánica, nitrógeno y fósforo.

Para ello conviene tener al menos un muestreo mensual durante un año. La finalidad de este control es doble: ayudar al diseño de las balsas de infiltración, en función de la carga contaminante que se espera reciban y de los volúmenes vertidos, y por otra parte evitar la entrada en el sistema de compuestos no biodegradables que puedan ser tóxicos para el sistema bacteriano de depuración o puedan contaminar el sistema suelo-agua.

Los análisis del agua residual deben incluir, además de los componentes presentados en la tabla 3.1 (modificado de FAO, 1992), aquellos que, en función de las características de la población en estudio y de la actividad económica dominante en su entorno (ganadera, agrícola, industrial) sean aconsejables.

Tabla 3.1 Composición típica de las aguas residuales domésticas (mg/L).

	Carga fuerte	Carga media	Carga baja
Total de sólidos	1200	700	350
Sólidos disueltos ⁽¹⁾	850	500	250
Sólidos en suspensión	350	200	100
Nitrógeno (N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Nitrato	0	0	0
Fósforo (P)	20	10	6
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50
Carbono orgánico total	290	160	80
DBO ₅	300	200	100

⁽¹⁾ Los contenidos en sólidos disueltos y en cloruros pueden aumentar por la concentración de esos constituyentes en el agua de transporte.

Otros componentes importantes que deben ser controlados incluyen diversos metales pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Ni, Zn) y elementos como el Boro, o el arsénico.

Hay que tener presente, que en el caso de la infiltración rápida, la demanda bioquímica de oxígeno, los sólidos en suspensión o el contenido en materia orgánica raramente son

factores limitantes, aunque si determinantes del tamaño de las balsas o de los ciclos de humectación/desecado. Sin embargo, las aguas a infiltrar deben carecer de todo componente industrial no biodegradable o que sea susceptible de acumularse en el sistema suelo/acuífero.

Además, es imprescindible contar con un inventario exhaustivo de todas las actividades industriales, de cualquier índole, que se sitúen en el casco urbano de la población, independientemente de que declaren estar o no conectadas a la red de alcantarillado; sobre cada una de estas industrias se investigará:

- Actividad a la que se dedica.
- Tipo y volumen de vertidos líquidos que genera.
- Composición típica de estos vertidos.
- Destino de los vertidos.
- Separación selectiva de los residuos.
- Tratamiento que se da a los vertidos.
- Presencia de contaminantes no biodegradables.

Como norma general, se recomienda que el nivel de calidad del agua que va a ser vertido en las balsas de infiltración sea tal que no comprometa o pueda comprometer el uso presente o futuro del agua, en base a un estudio razonable de perspectivas de uso. Esto se garantiza si se tiene en cuenta si el agua subterránea:

- a) **Se emplea para el abastecimiento a la población:** antes de su vertido en las balsas de infiltración ha de haber sufrido al menos un tratamiento secundario sirviendo el tratamiento suelo-acuífero como tratamiento terciario o de afino.
- b) **No se emplea para abastecimiento pero pudiera serlo en un futuro:** antes de su vertido el agua ha de sufrir al menos un tratamiento primario. El nivel de depuración que previsiblemente se alcance en la zona de extracción del agua subterránea debe ser tal que un tratamiento normal de cloración u ozonización permita que el agua cumpla con las normas de aguas de abastecimiento.
- c) **No se usa para abastecimiento ni está previsto hacerlo:** no existe ningún requerimiento especial en cuanto a la calidad mínima del agua vertida excepto que todos sus componentes han de ser biodegradables y que el contenido en algunos parámetros (muy especialmente la materia en suspensión y el contenido en sodio) no afecte negativamente al lecho filtrante disminuyendo su capacidad de transmitir agua o de depurarla.
- d) **Va a servir para el riego de cultivos:** El aporte total de sólidos disueltos y de sustancias potencialmente tóxicas para los cultivos (boro, sodio, cloro) no han de sobrepasar en ningún caso los límites soportados por los cultivos.

3.2.3 Características climatológicas (termo-pluviometría, viento, evapotranspiración)

La evolución de los factores climáticos, tales como la precipitación, la evapotranspiración, la temperatura y el viento constituyen datos necesarios en el cálculo de:

- El balance de agua.
- El número de días que el sistema no puede operar (por ejemplo debido a heladas).
- Los ciclos de humectación/desecado.
- La escorrentía superficial que puede llegar a las instalaciones.

En general es necesario disponer al menos de 10 a 20 años de datos. La fuente de información meteorológica más adecuada para este tipo de estudios es el INM (Instituto Nacional de Meteorología) que dispone de información diaria acerca de las precipitaciones y temperaturas y en menor medida de insolación y velocidad del viento.

El informe climatológico debe incluir al menos cuatro apartados:

- Precipitación:** La precipitación es un aporte más a la balsa de infiltración, por ello es necesario contar con una descripción, tanto de las precipitaciones máximas, mínimas y medias mensuales, para cada año tipo, como de su distribución diaria. También es conveniente hacer un análisis de la distribución de las tormentas, especialmente en los lugares donde sean frecuentes fenómenos tipo gota fría.
- Temperaturas:** La evaporación directa puede suponer un porcentaje no despreciable de la pérdida de agua de la balsa de infiltración, y puesto que en la evaporación influye directamente la temperatura ambiente habrá que contar con un estudio de distribución de las temperaturas.
- Viento:** Cuando sea posible habrá que evitar situar las balsas en lugares azotados por el viento, que junto con la temperatura elevada son los principales causantes de la evaporación del agua. En el caso, poco frecuente, de aplicar el agua mediante aspersores es necesario evitar que el viento pueda arrastrar partículas de agua hacia la población o zonas de cultivo de consumo directo.
- Evapotranspiración:** Necesaria para realizar el balance total de agua en las balsas, aunque se pueden emplear métodos basados en formulaciones empíricas, el más común en nuestro país es el de Thornthwaite; se recomienda la toma directa de datos instalando un evaporímetro.

Las tasas normales de evaporación en balsas de infiltración oscilan entre 0,6 m/año en regiones frías y más de 2 m/año en regiones áridas, estas tasas son generalmente un porcentaje reducido del total de agua infiltrada.

3.2.4 Características físicas, químicas e hidráulicas del suelo que constituye el lecho filtrante

En este apartado se considerará el suelo de forma amplia, incluyendo además del suelo edáfico los primeros metros de la zona no saturada en la que se producen de forma intensa los procesos responsables de la depuración de las aguas residuales, en su camino hacia el nivel saturado.

No todos los suelos tienen las características adecuadas para albergar un sistema de infiltración y tratamiento de aguas residuales (Jenssen et al, 1990). De hecho, muchas defi-

ciencias en el funcionamiento y gran número de fallos ocurridos en instalaciones de este tipo se han atribuido a una insuficiente caracterización del suelo (Hill and Frink, 1980; Plews and DeWelle, 1985).

La caracterización del suelo ha de realizarse desde tres puntos de vista:

- **Física:** influye sobre las propiedades hidráulicas pero también sobre el efecto de filtrado mecánico del lecho filtrante, el tiempo de tránsito del agua, etc.
 - Textura.
 - Estructura.
 - Profundidad.
- **Química:** influirá básicamente en la capacidad de depuración del suelo. En este apartado se incluye:
 - pH.
 - Capacidad de intercambio catiónico.
 - Niveles de nutrientes.
 - Capacidad de adsorción y filtración para iones inorgánicos.
- **Hidráulica:** Permite conocer la cantidad de agua que puede ser infiltrada por unidad de superficie y por tanto es determinante a la hora de establecer las dimensiones del sistema de depuración y la máxima población que puede ser atendida por un determinado sistema.
 - Capacidad de infiltración.
 - Permeabilidad.

Los sistemas de IR requieren suelos lo suficientemente permeables como para soportar elevadas cargas hidráulicas y a la vez proporcionar un tratamiento adecuado al agua residual. Donde la eliminación de nitrógeno es importante, es recomendable que el suelo tenga suficiente capacidad de intercambio catiónico para absorber amonio durante su fase de inundación, que puede ser nitrificado y desnitrificado durante la fase de desecado del mismo. Esto es factible normalmente cuando hay un pequeño porcentaje de arcilla en el suelo.

De todas formas antes de proceder a una caracterización exhaustiva del medio, puede suponer un importante ahorro económico y de tiempo la realización de un estudio previo mediante la excavación de catas de inspección mediante una retroexcavadora. En estas catas podrá hacerse un primer diagnóstico del tipo de materiales que constituyen la porción más superficial de la zona no saturada e investigar la presencia de fracturas, cambios litológicos inesperados o estratos poco permeables próximos a la superficie.

Este tipo de estudios preliminares deben realizarse hasta una profundidad mínima de 3 metros. En zonas pequeñas se recomienda la apertura de 2 ó 3 catas como mínimo. Estas catas deben servir además para la toma de muestras que permiten determinar la textura y estructura de los horizontes del suelo, la densidad de los materiales, la presencia de colores diagnóstico pueden servir para la realización de ensayos de infiltración a diversas pro-



Foto 3.4 La realización de una prospección previa mediante la excavación de catas, con una profundidad mínima de 3 metros, puede ahorrar mucho dinero y esfuerzo. Este trabajo permitirá descubrir la presencia de discontinuidades geológicas o hidrogeológicas, no visibles en superficie y que pueden afectar muy negativamente al funcionamiento del sistema de IR.

fundidades. Además, es recomendable tomar una muestra grande (hasta 40 kg) para realizar en laboratorio ensayos de pérdida de permeabilidad por compactación.

Perforación de sondeos de control

Cuando los resultados obtenidos en las catas excavadas, hacen prever que nos encontramos en una ubicación adecuada para la instalación de un sistema de IR, es necesario realizar ensayos a mayor profundidad en los lugares en los que realmente se van a construir las balsas. Esto se hace mediante la construcción de sondeos de control. En pequeñas instalaciones será suficiente con la realización de uno o dos sondeos, pero en instalaciones más grandes, se recomienda realizar al menos una perforación en cada uno de los tipos de suelos mayoritarios de la zona. Si ésta es edafológicamente muy uniforme, es suficiente con realizar una perforación por cada 1 ó 2 ha (instalaciones de más de 20 ha). Para sistemas menores (por debajo de 5 ha) es aconsejable realizar de 4 a 6 perforaciones en total.

Si es posible las perforaciones deben alcanzar el nivel freático y dejarse equipadas de forma que permitan la toma de agua subterránea. Estas perforaciones si están correctamente construidas y desarrolladas, pueden servir para la realización de ensayos hidráulicos del acuífero.

Los métodos de perforación más adecuados son los que permiten obtener la muestra inalterada, sin empleo de lodos de perforación. Se recomienda la toma de una muestra por

metro de perforación hasta los 6 metros y luego una muestra cada dos metros. Ante la aparición de variaciones evidentes en la litología se tomará una muestra nueva.

La descripción visual de cada muestra se hace en campo, esta se guarda en bolsas de plástico para realizar análisis químicos y mineralógicos. Si se usa una técnica de perforación seca, se puede observar la posición del nivel freático antes de cerrar el hueco. Donde los suelos son relativamente uniformes en profundidad, es posible obtener muestras alteradas e inalteradas alternativamente de la misma perforación. Cuando los perfiles cambian significativamente con la profundidad, es recomendable practicar una segunda perforación a tres metros de la primera para tomar las muestras inalteradas que aseguren su continuidad. Normalmente es suficiente tomar un conjunto de muestras inalteradas cada 10 m en la zona de las balsas de IR.

Dentro de cada unidad identificada como de suelo mayoritario en las muestras inalteradas se puede colocar un tubo Shelby de 8 cm de espesor a una profundidad mínima de 30 cm. Es recomendable colocar al menos un tubo por perforación, si el suelo es uniforme (isotrópico y continuo). En estos tubos se sella el final y son transportados al laboratorio para ser analizados. Puede que no sea posible obtener tubos de muestras de arenas gruesas, con gravas, sueltas y secas. En estos casos se hace necesario realizar la apertura de catas.

a) Características físicas

Textura

La textura es importante porque determina dos propiedades fundamentales del suelo como depurador: funcionamiento como filtro mecánico y sus propiedades hidráulicas.

Las clase textural en la que puede ser incluido un suelo se define en base al porcentaje relativo de los tres tamaños de partícula principales: arena, limo y arcilla. Generalmente se recurre al empleo de un diagrama triangular para representar la situación de un determinado material en la clasificación textural. Tanto la definición del rango de tamaños que determinan una clase textural como las clasificaciones basadas en los triángulos texturales son arbitrarias, aunque las más comúnmente empleadas son únicamente dos o tres. En la figura 3.2 se representa el triángulo de clases texturales de uso común en estudios edáficos.

Los mejores suelos para la instalación de un sistema de IR son los que se encuentran en un rango de textura entre areno-margosos, margo-arenosos y de arena fina. Tales suelos deben tener una profundidad de al menos 1 metro antes de llegar al material grueso.

Con objeto de minimizar el movimiento del material suspendido en el suelo y evitar la colmatación de los estratos más profundos del suelo, los perfiles en los que el material fino se encuentra arriba y el grueso bastante más abajo, son más aconsejables que a la inversa. Se debe evitar el empleo de suelos que presenten rocas fracturadas, arenas gruesas o gravas a poca profundidad, porque en estos casos el suelo no podría retener el agua residual lo suficiente para ejercer sobre ella su efecto depurador y ésta percolaría rápidamente debido a la presencia de una elevada macro-porosidad llegando al acuífero prácticamente sin depurar.

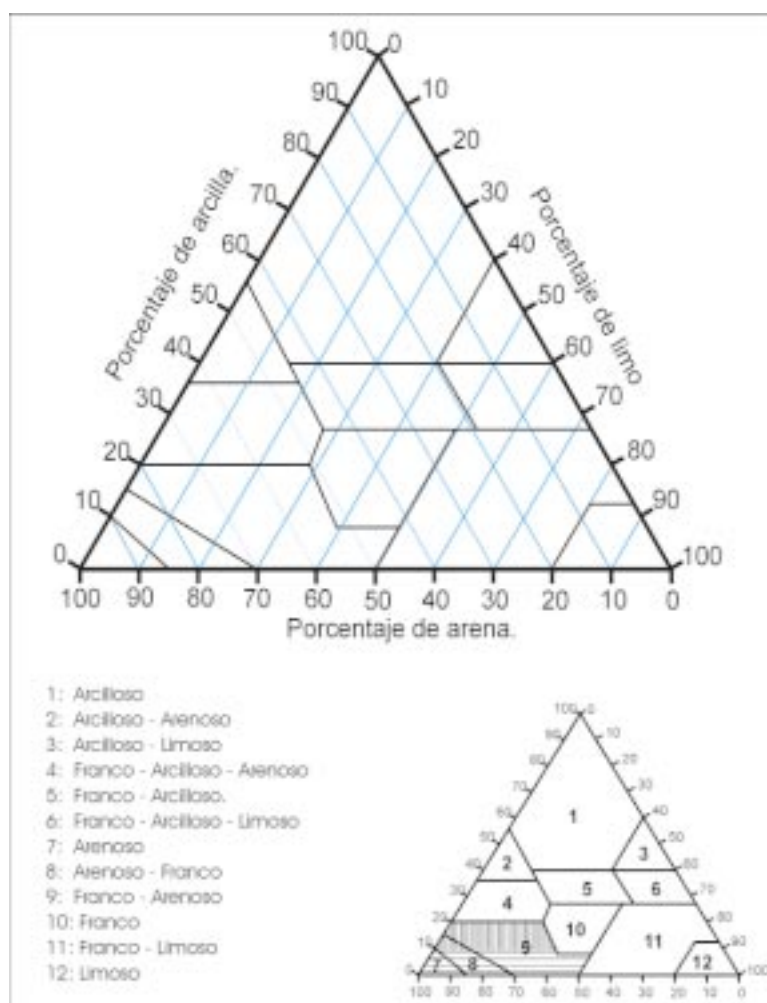


Figura 3.2 Diagrama de clases texturales. Rayado se muestran los materiales adecuados para IR

En el otro extremo se encontrarían aquellos suelos que presentan estratos con gran cantidad de materiales finos que no permiten la infiltración de las cargas hidráulicas deseadas. Del mismo modo que los anteriores, tampoco es aconsejable su uso debido a su baja permeabilidad.

Estructura

Cuando se habla de estructura de un suelo se hace referencia a la agregación de las partículas en grupos que denominamos agregados. Un suelo bien estructurado con grandes huecos entre los agregados puede transmitir el agua más rápidamente que un suelo mal estructurado con la misma textura.

Las unidades estructurales se distinguen por hallarse separadas entre sí por huecos, que pueden transmitir agua, o por superficies de debilidad mejor o peor definidas. En el análisis de la estructura de un suelo es necesario analizar: superficies de debilidad, forma y tamaño de los agregados, dureza y friabilidad de los agregados, estabilidad, mecanismos de formación y distribución y conexiones del espacio poral.

Es muy importante tener en cuenta que un agregado verdadero, tiene que ser estable en contacto con el agua, es decir la unión entre sus partículas individuales debe mantenerse después de la humectación, esto es importante porque permite que el agua siga moviéndose a través del agregado una vez humedecido el suelo.

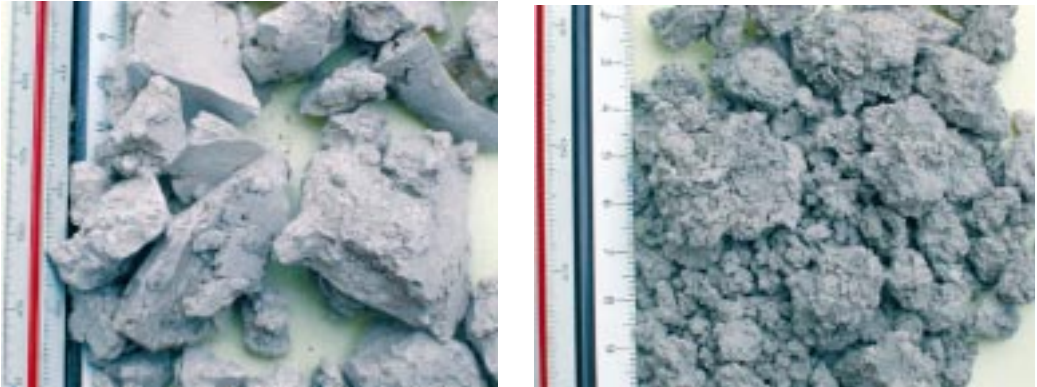


Foto 3.5 La formación de agregados es responsable de la mayor parte de la permeabilidad de los suelos bien desarrollados. En la imagen de la izquierda se observa el material filtrante antes de comenzar los vertidos, en la imagen de la derecha se aprecia claramente la formación de los primeros agregados gracias al aporte de materia orgánica.

El tamaño de los agregados puede variar en un rango muy amplio, pero está aceptado (Warkentin, 1980) que a partir de 5 mm puede hablarse de agregados, de 200 a 1000 μm de microagregados, en el rango de 50 μm de clusters o flóculos, entre 1 y 5 μm de dominios y por debajo de este tamaño de láminas de arcilla y cristales de arcilla.

Los mejores suelos para la construcción de un sistema de infiltración rápida, desde el punto de vista de su estructura, son aquellos con textura fina que están bien estructurados, es decir, con fuertes agregados.

Es importante asegurarse que la estructura no se va a perder debido a la aplicación del agua residual. Esta posibilidad puede existir ya que al participar el sodio en el complejo de cambio, puede originar la desestructuración de las arcillas, que a su vez repercutiría en una disminución de la permeabilidad del suelo.

Porosidad

El valor de la porosidad de un suelo o de una formación acuífera determina su capacidad de transmitir y almacenar agua, de ello puede deducirse la importancia que puede tener su correcta determinación. Es necesario distinguir la porosidad total del suelo de aquella que realmente contribuye al flujo del agua, porosidad eficaz.

Profundidad

La profundidad del suelo (de la zona no saturada) es muy importante ya que condiciona el tiempo de contacto entre el agua residual y las partículas responsables de la eliminación de los componentes no deseables.

La retención de los compuestos del agua residual, tales como fósforo, nitrógeno, metales pesados y micro-organismos, varían en función del tiempo de residencia del agua en el suelo y del grado de contacto entre los coloides del suelo y los componentes del agua residual (éstos aumentan con la profundidad del nivel freático y la presencia de elementos más finos).

La profundidad mínima necesaria del suelo, según la EPA (EPA, 1984) para un sistema de IR, varía de 1 a 15 m. No obstante, la profundidad del material hasta la zona saturada suficiente para la depuración dependerá de la textura que tenga el suelo; no será igual la profundidad necesaria para un suelo con textura muy gruesa, por el que el agua pasa con gran rapidez, que la profundidad necesaria para un suelo con textura más fina, en el que el tiempo de retención del agua en la zona no saturada es mayor.

Es por este motivo por lo que en las experiencias llevadas a cabo en IR no se mantiene una profundidad fija para todas. Como ejemplo pueden servir las experiencias recogidas en la tabla 3.2.



Foto 3.6 Cuando a la escasa profundidad del suelo se une un exceso de permeabilidad es muy difícil garantizar la correcta depuración del vertido, haciendo imposible su empleo en sistemas de depuración natural. En el ejemplo de la foto, el nivel freático está apenas a 90 cm de la superficie, el material son arenas y las condiciones redox reductoras.

Tabla 3.2 Profundidad del nivel piezométrico en las principales experiencias de IR.

Experiencia	Tipo de suelo	Profundidad del nivel piezométrico
¹ Saint Symphorien de Lay (Francia)	Arenoso	1,7 m
² Ben Sergao (Marruecos)	Arenoso	3 m
³ 23 rd Avenue, Phoenix (Arizona)	2/3 margo arenoso y 1/3 arena gruesa con grava	15 m
⁴ Flushing Meadows Project, Phoenix (Arizona)	Margo arenoso, arena gruesa y grava en profundidad.	75 m

¹Guilloteau et al, 1993; ²Guessab et al, 1993; ³Bouwer & Rice, 1984; ⁴Bouwer et al, 1980.

Color

El color en el perfil de un suelo es un buen indicador de las características de drenaje del mismo (Brady, 1974). Los suelos con colores rojizos, amarillos y marrones amarillentos indican la existencia de buenas condiciones de oxidación y aireación y ausencia de saturación. Por el contrario los suelos que se encuentran en zonas umbrías suelen mostrar colores grises o azulados, si están poco oxigenados, cuando se encuentran en condiciones permanentes de saturación. Los suelos mal drenados o estacionalmente saturados suelen alternar vetas o filones de elementos oxidados y reducidos. A este tipo de suelos se les denomina suelos moteados y, aunque sería necesario profundizar más en su estudio, se han tomado como el primer indicador de la elevación estacional del nivel freático.



Foto 3.7 Los suelos con periodos alternos de humectación desecado suelen presentar precipitaciones de óxidos de hierro claramente visibles a simple vista.

b) Características químicas

El balance de los constituyentes químicos en los suelos es importante en la depuración del agua residual, así como los mecanismos de retención de ciertos constituyentes. Es importante conocer las propiedades químicas del suelo antes de diseñar la instalación para poder determinar a priori los cambios que pueden ocurrir durante la operación. Algunos de los indicadores de las condiciones del suelo son:

- pH.
- Salinidad.
- Capacidad de cambio catiónico.

- Porcentaje de sodio intercambiable.
- Porcentaje de saturación en bases.
- Niveles de nutrientes y metales.

Las muestras procedentes de las perforaciones y de las catas se llevan al laboratorio donde se les somete a análisis químicos, físicos y mineralógicos. Como mínimo es necesario analizar las muestras pertenecientes a todos los horizontes que forman los suelos de aquella unidad que finalmente constituirá la superficie de las balsas de infiltración. Las muestras pueden obtenerse de la misma unidad de suelo de diferentes catas o de la misma cata a diferentes profundidades. Para cada una de las unidades de suelo analizadas se obtiene un conjunto de datos químicos y mineralógicos que luego deben ser evaluados. En grandes instalaciones, como mínimo es necesario realizar diez análisis químicos y diez mineralógicos por cada 10 ha del área que se va a usar para la construcción de las balsas de infiltración.

Los análisis químicos permitirán conocer:

- % de materia orgánica
- Fósforo
- Hierro
- Magnesio
- Potasio
- Manganeso
- Calcio y sodio (cambiable)
- Saturación en bases
- pH
- Capacidad de intercambio catiónico
- Conductividad eléctrica.

Los análisis mineralógicos, normalmente mediante difracción de rayos X, sólo serán necesarios cuando los análisis físicos indiquen la presencia, en cantidades significativas, de arcilla en la muestra de suelo.

En situaciones especiales puede que sea necesaria la realización de un análisis adicional para determinar la capacidad de adsorción de fósforo. Esto se debe a que el fósforo puede ser un parámetro importante en los sistemas de IR en los casos en los que los análisis hidrogeológicos muestren que el agua percolada pueda llegar a aguas superficiales adyacentes con fuertes limitaciones en fósforo.

Es recomendable que los resultados de laboratorio de los análisis de adsorción de fósforo se multipliquen por un factor de 5 para tener en cuenta la precipitación lenta del fósforo a lo largo del perfil del suelo. (Reed & Cries, 1984).

En las muestras de suelo inalteradas obtenidas mediante tubos Shelby se analiza el peso de la unidad seca, el contenido en humedad, y la gradación textural. Conviene determinar la densidad aparente del suelo o si ello no es posible tomar el valor 2,69 que es válido para la mayoría de los suelos, con este valor se pueden calcular mediante procedimientos estándar (Brady, 1974 y Terzaghi & Peck, 1964) la porosidad y el grado de saturación.

Representando la gradación textural en papel semilogarítmico estándar se obtienen los coeficientes de tamaño efectivo y de uniformidad (Brady, 1974 y Terzaghi & Peck, 1964). Estos cálculos pueden realizarse de igual forma con los resultados de las medidas de densidad en campo procedentes de las pruebas de perforación.

Si es necesaria la determinación de la permeabilidad en el laboratorio, se puede realizar a partir de muestras inalteradas. Los procedimientos básicos pueden encontrarse en la revista *Soil Science Society of America Journal* 46(4):866-880 y ASTM Standards.



Foto 3.8 La toma de muestras inalteradas permite la obtención de parámetros como la densidad real, la humedad o la porosidad.

c) Evaluación de los resultados

Los resultados de todos los análisis han de ser revisados y evaluados por expertos en la materia. Esto es especialmente importante en lo referente a los datos químicos y mineralógicos en aquellos lugares en los que la construcción del sistema y su operación puedan alterar las reacciones de los suelos y su estructura mineral (cambio químico y lixiviación, cementación, hinchamiento de arcillas, etc.)

Si los resultados de los análisis indican que un alto porcentaje de la arcilla es montmorillonita, la CIC puede ser relativamente alta, además se podrían originar problemas en la infiltración causados por el hinchamiento de las mismas. Algunas combinaciones entre vermiculitas y montmorillonitas pueden ser problemáticas, si el contenido total de arcillas excede del 10%. Los suelos con un porcentaje de arcillas mayor del 10% tienen una gran probabilidad de estar sujetos a cambios físicos y a lixiviación química, por lo que puede ser necesario realizar en ellos algún tipo de enmienda para su uso como superficie de infiltración en un sistema de IR. En principio, como norma general, los suelos arcillosos no serán muy recomendables para su uso en IR.

Los resultados de las observaciones de campo y de los análisis de laboratorio de las características físicas se combinan y se representan en un mapa de situación, de este mapa se pueden representar perfiles en los que podamos estudiar las características del lugar en el que se pretenden construir las balsas de infiltración y a la vista de los resultados, (conocimiento del tipo de materiales que forman los distintos estratos del suelo, movimiento del agua, etc.) se tomará la decisión final sobre la localización de las balsas.

3.2.5 Características hidráulicas del sistema suelo-zona no saturada-acuífero

Las propiedades hidráulicas del sistema suelo-zona no saturada-acuífero, determinan la cantidad de agua que puede ser infiltrada por unidad de superficie y de tiempo, la eficacia del sistema como filtro mecánico y la resistencia del sistema a sufrir procesos de colmatación mecánica o biológica. Además del valor que tomen estas variables dependerán parámetros básicos de diseño, en especial la distribución de las balsas, su tamaño y en cierta medida la periodicidad y duración de los ciclos de humectación-desechado.

Es necesario conocer, no solo las propiedades puntuales, relacionadas principalmente con la capacidad de infiltración y depuradora del lecho filtrante, sino también el esquema de flujo local y regional. Por tanto, en el estudio deben diferenciarse tres escalas de trabajo:

- Puntual
- Local
- Regional

Cada una de ellas proporcionará información útil para el diseño y mantenimiento del sistema de IR.

Entre los datos más relevantes que deben ser determinados están:

- **Capacidad de infiltración y permeabilidad superficial del material que formará el lecho filtrante:** Determinará la carga hidráulica máxima que se puede verter por unidad de tiempo y superficie.
- **Profundidad del agua subterránea y su fluctuación estacional:** Determinan la zona de aireación y del grado de renovación que se produce.
- **Características hidráulicas del acuífero:** Fundamentalmente la permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- **Direcciones preferentes de flujo:** Pues de ellas dependerá entre otras cosas el impacto sobre zonas húmedas, ríos, captaciones de abastecimiento, etc..
- **Presencia de niveles colgados y otras discontinuidades relevantes:** Dichos niveles y discontinuidades pueden limitar la capacidad de infiltración del sistema, a pesar de que la permeabilidad superficial sea adecuada.
- **Conductividad hidráulica saturada** (de la zona no saturada y saturada): Su determinación es importante pues es imprescindible para conocer los patrones de flujo del agua subterránea y estimar la capacidad de infiltración del suelo.
- **Conductividad hidráulica no saturada** (del suelo): La conductividad hidráulica es

un parámetro fuertemente dependiente del contenido en humedad del material en estudio; la presencia de aire en el medio cambia radicalmente la estructura y continuidad del espacio poral conectado hidráulicamente y la sección eficaz de flujo. Todas estas razones hacen necesario conocer las características del flujo en condiciones de no saturación.

- **Rendimiento específico:** Es necesario para la determinación de otras variables del acuífero y especialmente en los estudios de evolución de los niveles piezométricos como consecuencia de la extracción de agua o de la recarga.

Muchos de los datos necesarios para la evaluación del agua subterránea, pueden ser determinados a través del estudio de pozos existentes o del análisis de la documentación que se generó en su construcción y acondicionamiento, por ello es necesario hacer un inventario exhaustivo de todas las captaciones de agua subterránea existentes en la zona en estudio. Se pueden evaluar los datos históricos de calidad, niveles del agua y cantidades bombeadas. Tales datos incluirán la variación de nivel de las aguas subterráneas, así como las variaciones durante un periodo de varios años.

a) Medida de la capacidad de infiltración superficial

La capacidad de infiltración se puede definir como la velocidad a la que el agua es capaz de penetrar en su interior desde la superficie. Cuando el perfil de suelo está saturado la capacidad de infiltración coincide con la conductividad hidráulica. Si el perfil no está saturado la capacidad de infiltración será mayor debido a que el agua tiende a rellenar rápidamente los poros grandes y las grietas debidas a la porosidad secundaria, además las fuerzas de succión pueden hacer que el agua sea retirada de la superficie rápidamente.

La capacidad de infiltración depende básicamente de la textura y la estructura del suelo. Otros factores, como la composición del agua, la vegetación o las labores agrícolas (arado) influyen también en esta variable. En general, no puede afirmarse que la capacidad de infiltración medida con agua limpia coincida con la que se hubiese medido con agua residual, aunque las diferencias no suelen ser significativas.

La capacidad de infiltración varía con el tiempo debido al desarrollo de los procesos de colmatación aunque es muy difícil predecir cual va a ser la evolución de un suelo determinado; en general es necesario tomar los valores medidos como valores máximos.

Básicamente se usan cuatro métodos para la determinación de la capacidad de infiltración:

- Infiltrómetros de cilindro.
- Permeámetros de aire.
- Balsas de inundación.
- Infiltrómetros de simulación de lluvia.

Todos estos métodos pretenden definir esencialmente los mismos parámetros, pero su fiabilidad varía en función de las condiciones individuales de cada ensayo, siendo recomendable que el área ensayada y el volumen de agua empleados sean lo mayores posibles.

Además, debido al principio de funcionamiento, los simuladores de lluvia provocan el impacto de las gotas sobre el suelo, esto puede modificar las condiciones superficiales del área en ensayo, los resultados obtenidos pueden ser muy diferentes. Habrá que emplear aquellas técnicas que se asemejen más a la forma en la que el agua será vertida en la balsa de infiltración por ejemplo, emplear los simuladores de lluvia si se va a aplicar el agua mediante aspersores.

En el caso de que se sospeche la existencia de niveles menos permeables que la superficie del terreno, los ensayos deberán realizarse también sobre estos, con el fin de obtener datos lo mas conservativos posibles.

En la tabla 3.3 se comparan las técnicas de medida de la infiltración.

Tabla 3.3 Comparación entre las diversas técnicas de medida de la capacidad de infiltración (EPA, 1984)

Técnica de medida	Agua empleada en cada test (litros)	Equipo necesario	Comentarios
Balsa de infiltración	3.000 –10.000	Retroexcavadora	Pueden emplearse tensiómetros
Infiltrómetro de cilindro	400-700	Equipo de cilindros	Es preferible emplear cilindros del mayor tamaño posible (1 m).
Infiltrómetro de lluvia	1-000-1.200	Bomba, depósito, rociadores	Conviene partir de un suelo llevado a capacidad de campo.
Permeámetro de aire	10	Aparato específico	Permite determinar la conductividad hidráulica vertical, si se emplea para medir la conductividad de un sistema en capas se emplea como valor la media armónica.

b) Determinación de la capacidad de infiltración mediante infiltrometría de doble anillo

La medida de la capacidad de infiltración mediante la técnica del doble anillo, presenta como principales ventajas la facilidad de operación y la posibilidad de obtener datos de capacidad de infiltración a diferentes profundidades, mediante la excavación de catas adecuadas. Además la superficie de ensayo es relativamente grande (los anillos pueden tener hasta 1 metro de diámetro).

La principal fuente de error en las medidas con cilindros de infiltración es el flujo lateral del agua cuando el suelo no está totalmente saturado, debido a la succión capilar, este efecto hace que los valores de infiltración, dentro del cilindro, sean significativamente más altos que los valores obtenidos para un dispositivo de infiltración mucho más grande como puede ser la balsa de infiltración, además es necesario que la lámina de agua de ensayo en el cilindro sea lo más pequeña posible para que la existencia de un gradiente demasiado grande no desvirtúe las medidas.

Para la realización del test es necesario clavar en el suelo, de 10 a 15 cm, una pareja de cilindros metálicos concéntricos. El tamaño de los cilindros es muy variable pero como norma general cuanto mayores sean mejor serán los resultados obtenidos. Los más usados tienen unos diámetros de 70-80 cm el cilindro exterior y 35-40 cm el interior, la altura suele ser de unos 35 cm

Los cilindros se llenan de agua hasta un nivel adecuado (10-15 cm) teniendo cuidado de no alterar el material que hay en el fondo (se suele colocar una bandeja mientras se rellenan). Mediante un dispositivo de medida (un boya o regla graduada) se mide, en el cilindro interior, el descenso del agua con el tiempo. La razón de ser del cilindro exterior es evitar que la medida realizada en el cilindro interior se vea afectada por la expansión lateral del bulbo de humectación. En la figura 3.3 se puede ver un esquema de funcionamiento del dispositivo descrito.

Las medidas tomadas no son válidas hasta que no se produce una estabilización del flujo que al principio puede ser bastante más rápido que en condiciones de equilibrio; este puede tardar en alcanzarse desde algunos minutos (en suelos arenosos permeables) hasta más de 12 horas en suelos arcillosos con grietas de retracción, incluso, en casos excepcionales, varios días.

Si las medidas se toman con suficiente cuidado, se obtiene un valor para el componente vertical del flujo.

La instalación del cilindro es una fase crítica, deben emplearse dispositivos con la pared fina (2-3 mm como máximo) y biselada en el extremo con el fin de que penetren bien en el material del suelo. Hay que evitar a toda costa los movimientos laterales del dispositivo que pueden provocar la comunicación entre el cilindro interior y exterior, anulándose de esta forma el efecto de doble cilindro.

Se ha demostrado que aunque el infiltrómetro de doble anillo se sigue usando y es recomendable, no elimina totalmente el efecto de la divergencia en la infiltración.

Los infiltrómetros de anillo simple dan resultados razonables solo en suelos que presentan una costra o una colmatación superficial, estando los valores de infiltración controlados por la misma. En estos casos, el infiltrómetro de doble anillo, teóricamente no es necesario, excepto si la instalación del cilindro puede perturbar la costra en el suelo de



Foto 3.9 Mediante la excavación de catas es posible la medida de la capacidad de infiltración de los diferentes horizontes del suelo.

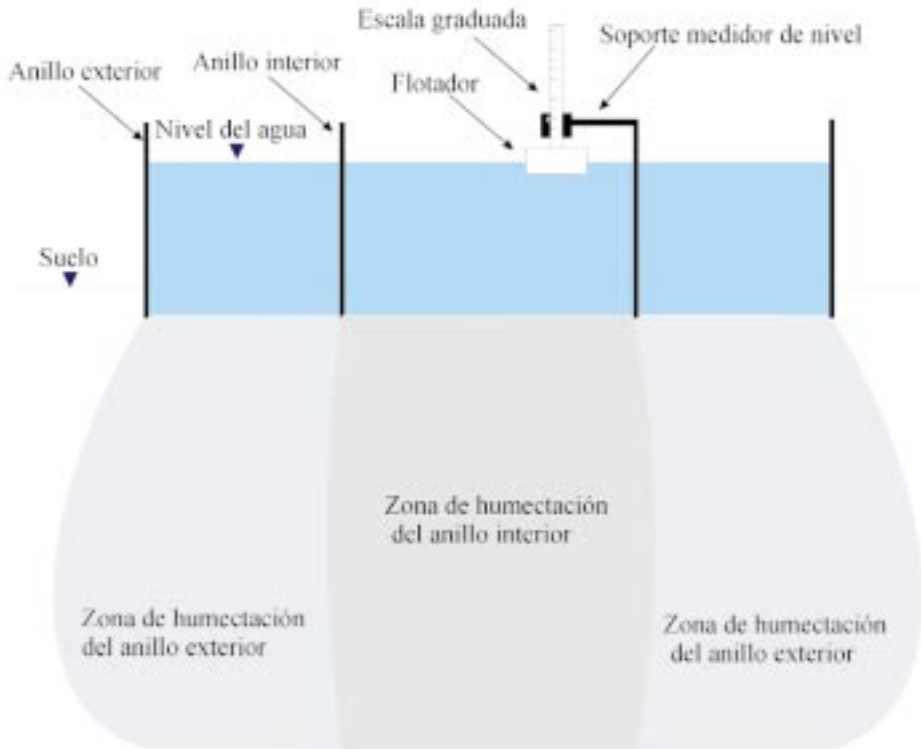


Figura 3.3 Esquema de funcionamiento de un medidor de doble anillo.

forma que un nivel constante de agua amortiguando alrededor del cilindro interno pueda mejorar la precisión en la medida.

La divergencia del flujo bajo un infiltrómetro de cilindro simple está gobernada por los valores de entrada de agua. Cuanto más finos son los suelos y más pequeños los valores, mayor es la divergencia y por tanto los datos obtenidos de los cilindros pueden sobrestimar la verdadera infiltración vertical de un área grande.

Quizá la caracterización de los valores de infiltración para un proyecto de este tipo con infiltrómetros grandes puede ser cara. Para reducir los costes y el esfuerzo, se ha desarrollado un procedimiento simplificado para convertir los valores de infiltración a corto plazo, medidos con un infiltrómetro de cilindro simple convencional, a valores finales de infiltración para grandes áreas (asumiendo que el suelo es uniforme y que no se producen otros efectos como colmatación, actividad biológica, etc.).

Para este propósito, puede ser apropiado el uso de un cilindro de 60 cm de diámetro y 30 cm de altura con un bisel. El cilindro de acero se introduce en el suelo hasta una profundidad de 2 a 5 cm y el suelo pegado a la cara interna y externa del cilindro se compacta contra ellas para proporcionar un buen contacto entre éste y el suelo. Cuando el cilindro

está lleno hasta arriba, se deja de verter agua y se mide el tiempo que el agua tarda en bajar unos 5-10 cm, se mide el descenso, y , y el tiempo transcurrido, y el cilindro se vuelve a llenar hasta arriba.



Foto 3.10 Ensayo de infiltración simplificado mediante el empleo de un anillo único. Un periodo de lluvias intenso y prolongado garantizaba que el suelo se encontraba a capacidad de campo y permitió el empleo de un anillo único para la realización de las medidas.

El experimento debe repetirse durante 6 horas o hasta que la infiltración acumulada alcance los 50 cm, lo que ocurra primero. En el último vertido de agua se mide la profundidad del agua alcanzada en el cilindro y_n y el tiempo en alcanzarla para obtener el incremento de tiempo Δt_n para y_n . Se usa una excavadora para profundizar en el suelo y determinar la distancia x de humectación lateral.

El valor de la infiltración i_n durante el último vertido de agua al cilindro se calcula como $y_n/\Delta t_n$. Debido a que la mayoría del flujo en la zona humectada es hacia abajo, se puede asumir que el flujo es vertical en toda la zona humectada, de forma que los valores correspondientes al flujo descendente i_w en la zona mojada se calculan como:

$$i_w = \frac{i_n \pi r^2}{\pi (r+x)^2}$$

La profundidad del frente humectante L al final de la experiencia se calcula a partir de la infiltración acumulada y_t , que es la suma de las bajadas de nivel del agua dentro del cilindro durante el tiempo que ha durado la experiencia,

$$L = \frac{y_t \pi r^2}{n \pi (r+x)^2}$$

Donde n es la porosidad del suelo susceptible de albergar el agua vertida. El valor de n se estima a partir de la textura del suelo y el contenido inicial de agua. De esta forma, el

valor de n puede ser aproximadamente de 0,3 para suelos secos y uniformes, 0,2 para suelos moderadamente húmedos y 0,1 para suelos relativamente húmedos. Los suelos con varios estratos suelen tener valores más bajos de n que los suelos uniformes. El valor de L también se puede determinar excavando inmediatamente después del test para ver qué profundidad del suelo se ha mojado. Esto se ve más fácilmente si el suelo inicialmente está muy seco y hay un buen contraste entre el suelo mojado y el seco. Aplicando la ecuación de Darcy al flujo descendente en la zona mojada durante la infiltración del último agua vertida en el cilindro y asumiendo nuevamente que el flujo es vertical en toda la zona mojada entonces obtenemos

$$i_w = K \frac{(z + L - h_{we})}{L}$$

donde z es la profundidad media del agua en el cilindro durante el último descenso del agua al ir infiltrándose y_n . El término h_{we} es el valor de la entrada de agua en el suelo y se usa para estimar la succión del frente de humectación al ir descendiendo. El valor de h_{we} se estima para un suelo determinado a partir de los valores listados anteriormente.

Debido a que K es ahora el único valor desconocido, se puede determinar mediante la siguiente ecuación

$$K = \frac{i_w L}{(z + L - h_{we})}$$

Este valor calculado de K se puede usar como estimación de los valores de la infiltración a largo plazo en áreas poco profundas, grandes e inundadas, sin colmatación superficial y sin estratos restrictivos en profundidad. Debido al aire que queda atrapado en los poros, K de la zona húmeda es menor que K_{sat} en condiciones de saturación; por ejemplo, sobre 0.5 K_{sat} para suelos arenosos y sobre 0,25 K_{sat} para suelos más finos (Bouwer 1978).

En los casos en que los datos obtenidos en los ensayos con infiltrómetros parezcan prometedores, se puede pasar a realizar algún ensayo en balsas de infiltración, para contrastar la validez de los datos obtenidos mediante los ensayos con los infiltrómetros de cilindro desde el punto de vista de la variabilidad lateral y espacial del suelo y para estudiar la evolución de la infiltración a largo plazo (durante al menos un año, si es posible) para medir los efectos de la colmatación, especialmente si el agua a verter posee sólidos en suspensión o es residual.

c) Ensayos de inundación

Los ensayos de inundación consisten en la preparación de una pequeña balsa de infiltración (excavada o no según se tenga previsto en el diseño final de las instalaciones) en la que se vierte agua hasta un nivel similar al que tendrán las balsas operativas y se mide la capacidad de infiltración de las mismas. La realización de este tipo de ensayos, suele proporcionar resultados de mayor fiabilidad que el empleo de infiltrómetros de anillo o simuladores de lluvia a pequeña escala. Para que los datos obtenidos sean representativos del material en estudio es necesario que el área inundada tenga suficiente extensión, al menos 12 m² y tener la seguridad de que el material se encuentra perfectamente saturado antes de comenzar el ensayo.

Obviamente este tipo de pruebas requieren un volumen de agua importante, y en ocasiones es este el principal problema operativo. El control de la humedad del suelo se lleva a cabo mediante la instalación de tensiómetros u otros dispositivos de control de la humedad in situ, generalmente es suficiente con instalar seis sensores, desde unos 15 cm de profundidad hasta unos 15 cm por debajo de la interfase entre los dos últimos horizontes; en cualquier caso la instalación de los tensiómetros dependerá de la distribución en perfiles del suelo en estudio.

Un problema importante que hace que los datos medidos lo sean por exceso cuando la balsa de ensayo es excavada, es el flujo lateral de agua a través de las paredes de la excavación. Como norma general, pero especialmente cuando se trabaja con materiales finos o la balsa es pequeña (una relación ancho/alto menor de 100) conviene impermeabilizar, por ejemplo con bentonita, sus paredes.

La balsa ha de ser inundada varias veces para calibrar los aparatos y asegurar las condiciones de saturación. El ensayo definitivo, que se suele realizar tras 24 horas de ensayos preliminares, en la mayoría de los suelos, que potencialmente pueden servir de lecho filtrante, deberá tener una duración de 3 a 8 horas.

Debido a que el propósito básico del ensayo es definir la conductividad hidráulica de los primeros horizontes del suelo, en la mayoría de los casos se puede emplear agua limpia (con la misma composición iónica que el agua residual que se pretende verter).

Hay una excepción notable, si el agua residual que se va a tratar en el sistema de infiltración directa sobre el terreno, tiene un alto contenido en sólidos en suspensión (algas, residuos industriales biodegradables), es necesario utilizar un líquido similar en el ensayo. Tales sólidos colmatan la superficie de infiltración por lo que el ensayo con agua limpia podría dar un resultado engañoso para el diseño de las balsas. Además el ensayo tiene que durar el tiempo suficiente (quizá varias semanas) para determinar el ciclo de humectación / desecado propuesto para este sistema de infiltración. En esta situación, es permisible realizar un número apropiado de ensayos estándar de inundación de la balsa para definir las características básicas del lugar. Asumiendo que las condiciones previas son generalmente uniformes, se puede realizar un test largo para definir la influencia en la infiltración de un único tipo de aguas residuales.

En grandes instalaciones se recomienda realizar como mínimo un ensayo de infiltración en balsa en cada tipo mayoritario de suelo. Para zonas grandes y homogéneas suele ser suficiente realizar un ensayo por cada 10 ha. Éste debe realizarse en el horizonte que va a ser usado como superficie de la balsa de infiltración en el sistema operativo definitivo.

En la medida de lo posible debe evitarse el empleo de materiales de relleno en la construcción de balsas de IR. En los casos en que la utilización de este material de relleno sea absolutamente necesario debido a las condiciones topográficas del terreno, y si los suelos tienen unos niveles aceptables de arcilla, es recomendable realizar un ensayo de infiltración en balsa en esa zona. El rellenado para el ensayo debe realizarse usando el mismo equipo y procedimientos que serían usados en la construcción a gran escala del sistema definitivo. La profundidad del relleno debe ser la requerida por el lugar del diseño. La parte supe-

rior de la zona rellenada debería ser como mínimo de 5 m de ancha y 5 m de larga para permitir la realización del ensayo estándar de inundación de la balsa cerca del centro.

d) Simuladores de lluvia

La medida de la capacidad de infiltración mediante simuladores de lluvia se debe realizar cuando la aplicación del agua residual se vaya a realizar mediante aspersores. Se trata de un sistema poco adecuado a los dispositivos de infiltración rápida debido a los problemas de obstrucción de boquillas y conducciones y a la formación de aerosoles potencialmente transmisores de microorganismos patógenos. De todas formas en el trabajo de Tovey (Tovey, 1963) puede encontrarse la información necesaria para la medida de la capacidad de infiltración del agua aplicada mediante aspersores.

e) Medida de la conductividad hidráulica vertical

La velocidad a la cual percola el agua aplicada en una balsa de infiltración a través del perfil del suelo dependerá de la conductividad saturada media (K_s). Si el suelo es uniforme K puede considerarse que se mantiene constante con la profundidad. En estos casos la media de K puede considerarse como la media aritmética (K_{am}) de las medidas (1, 2, 3, n) tomadas, es decir:

$$K_{am} = \frac{K_1 + K_2 + \dots + K_n}{n}$$

En ocasiones el suelo se presenta formando horizontes con valores de K diferentes, normalmente decrecientes en profundidad, en estos casos la K se calcula como la media armónica K_{hm}

$$K_{hm} = \frac{D}{\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \dots + \frac{d_n}{K_n}}$$

Donde D es la profundidad del perfil y d_n es la profundidad de la capa n .

Cuando en el análisis estadístico no se observa un valor dominante de K puede suponerse que existe una distribución aleatoria, en estos casos parece ser que la media geométrica (K_{gm}) de los valores de K proporciona un valor que se ajusta mejor al verdadero valor de K :

$$K_{gm} = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^{1/n}$$

La medida de conductividad hidráulica es compleja y cada caso requiere una cuidadosa selección del método en función de las técnicas disponibles, de su coste y de la precisión que esperemos obtener de ellas. En principio pueden diferenciarse dos grandes grupos de técnicas según se realicen en campo o en laboratorio a partir de muestras inalteradas (esta es una condición que no puede obviarse). Otra diferencia puede establecerse según se empleen métodos con carga constante o con carga variable.

Las técnicas de laboratorio, presentan como principal inconveniente la necesidad de

tomar una muestra de pequeño tamaño, que puede no ser representativa de un cuerpo tan extenso como es el suelo, y mas o menos perturbada. Sin embargo este tipo de medidas es imprescindible cuando se trabaja con materiales a los cuales no se puede acceder directamente en campo que son en general, todos los que están situados mas allá de una cierta profundidad.

En la práctica los dos métodos más empleados en campo son el de tubo doble y los permeámetros de entrada de aire y en laboratorio los permeámetros sobre cilindros inalterados a carga constante y a carga variable.

f) Ensayos de infiltración

Tanto predecir como manejar los valores de la infiltración, constituyen aspectos de vital importancia en el planeamiento, diseño y manejo de un sistema de depuración por IR, porque es necesario saber qué cantidad de terreno necesitamos tener para la cantidad de agua que queremos depurar, o qué cantidad de agua podemos verter en función de la cantidad de terreno que tenemos y de su capacidad de infiltración. Para sistemas de infiltración superficial en suelos uniformes sin colmatación superficial, los valores de infiltración son aproximadamente iguales a la conductividad hidráulica vertical del suelo. El flujo será esencialmente hacia abajo debido a la acción de la gravedad y al gradiente hidráulico que se produce.

g) Predicción de la altura que alcanza el agua infiltrada sobre un estrato restrictivo

La elevación excesiva de los niveles del agua subterránea bajo las balsas de infiltración puede producirse debido a dos razones: bien porque el nivel freático no esté lo suficientemente profundo bajo las balsas de infiltración, o bien por la presencia de un estrato colmatado en el perímetro de humectación de la balsa. Esto último puede hacer que el agua se acumule sobre este nivel restrictivo y el material que quede debajo pueda permanecer insaturado.

En cualquiera de los dos casos, el aumento del nivel freático se puede ver traducido en una disminución de la capacidad de infiltración del sistema.

Para evitar que se produzca el aumento del nivel del agua debido a la primera causa, es de vital importancia que la profundidad del nivel piezométrico bajo las balsas de infiltración se encuentre, al menos, entre 18 y 20 m.

En el segundo caso, se hace necesario predecir los aumentos a largo plazo del nivel del agua sobre el estrato restrictivo. Conociendo los valores de infiltración y la conductividad hidráulica saturada del nivel restrictivo, se puede calcular, aplicando la ley de Darcy, la altura del domo de agua residual que se formaría L_p . Esta altura no debe ser superior a 0,5 m bajo las balsas de infiltración si no queremos que los valores de infiltración se vean afectados. (Bouwer, 1999)

Si el material que hay debajo del estrato restrictivo es relativamente potente la presión ejercida por el agua en la parte inferior del nivel restrictivo puede ser próxima a cero. Cuando bajo el estrato restrictivo hay materiales finos, se pueden tomar como una prime-

ra estimación los valores de entrada de agua propuestos en el apartado dedicado al uso de infiltrómetros de cilindro. La altura del domo de agua acumulada sobre el estrato restrictivo, asumiendo que la presión para el agua en la parte inferior del mismo es cero, se puede calcular de la siguiente forma:

$$L_p = L_r \frac{(i / K_r) - 1}{1 - (i / K_s)}$$

Donde:

L_p = altura que alcanza el domo de agua acumulada sobre el nivel restrictivo;

L_r = espesor del estrato restrictivo;

i = valor de la infiltración;

K_r = conductividad hidráulica en el estrato restrictivo;

K_s = conductividad hidráulica en el suelo de encima del nivel restrictivo.

En ocasiones, el valor de i puede ser más pequeño que K_s cuando los suelos superficiales sean de textura más fina que los suelos profundos, o cuando exista un estrato colmatado en el fondo del sistema que reduzca los valores de infiltración. Otras veces, i puede ser mucho más grande que K_r , para estas condiciones la ecuación anterior se puede simplificar de la siguiente forma:

$$L_p = i \left(\frac{L_r}{K_r} \right)$$

Si no hay estrato colmatante habrá una continuidad hidráulica entre las balsas de infiltración y el acuífero. En este caso, la profundidad del agua subterránea fuera del área de influencia de la recarga puede llegar a ser del doble que en la zona de recarga al estar los valores de infiltración, fuera de esta zona, controlados únicamente por la gravedad sin tener relación con la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea ni la pendiente que forma el nivel freático del área de recarga.

Para balsas de infiltración relativamente pequeñas, el domo de agua acumulada se puede extender lateralmente sobre el estrato confinante de forma que, en estos casos, L_p puede ser menor que el calculado mediante las dos ecuaciones anteriores, ya que éstas se aplican sólo al flujo vertical. De igual forma, cuando los estratos confinantes no son continuos, sino que van formando lentejones, o donde se produce la formación de grietas u otras discontinuidades en los estratos confinantes los domos de agua acumulada pueden ser más altos de lo que se recomienda para casos generales.

En los casos en que el nivel restrictivo se encuentre a poca profundidad, la mejor solución, siempre que sea posible, sería la construcción de las balsas de infiltración a profundidades superiores a las del nivel restrictivo.

Una vez que el agua residual se infiltra, si el acuífero no es confinado, el agua depurada terminará alcanzando el agua subterránea original, desplazándose junto a ésta horizontalmente a través del acuífero. Si, por el contrario, el acuífero es confinado, el agua depurada puede formar una capa no confinada sobre el estrato confinante superior del acuífero original.

La altura del domo de agua depurada que se formaría se puede predecir también, conociendo la transmisividad del acuífero, mediante métodos como los desarrollados por Hantush y Glover (en Bouwer, 1978 y Ortiz et al, 1979). Donde el agua drena de forma natural hacia aguas superficiales, el flujo lateral a través del acuífero se puede calcular mediante la ecuación de Darcy. En este caso el agua se va depurando a través de la franja de infiltración que atraviesa y es transmitida lateralmente a través del acuífero sin que aumente el nivel del agua de las balsas de infiltración (Bouwer. 1974).

En los casos en que el agua depurada se pretenda captar para su reutilización, hay que tener en cuenta (Bouwer en Asano, 1985) diversas posibilidades: Cuando el agua depurada se capta mediante drenes, el drenaje puede ser empleado para determinar la combinación más deseable de anchura del área de infiltración y distancia entre ésta y los drenes. Cuando el agua depurada se capta mediante pozos es necesario analizar el sistema de flujo para determinar la localización óptima, espaciamiento, calendario de bombeo etc.

La intrusión de las aguas residuales depuradas en las aguas subterráneas se puede detectar midiendo los niveles del agua subterránea en la periferia del sistema de infiltración, mediante pozos de observación y variando el ritmo de bombeo del agua depurada de los pozos entre las balsas de forma que los niveles de agua en los pozos de observación no se eleven más que la lámina de agua en el acuífero adyacente al sistema. De esta forma no habrá gradientes hidráulicos fuera del sistema y, por tanto, no habrá movimiento del agua residual renovada hacia fuera del sistema.

Si el ritmo de bombeo para el agua residual depurada aumenta ligeramente puede producir un pequeño descenso de los niveles de agua subterránea en los pozos de observación respecto al exterior del sistema, esto puede crear un ligero gradiente a través del sistema de infiltración rápida, de manera que el agua subterránea original puede ser atraída hacia el agua depurada, en su flujo desde debajo de las balsas a los pozos.

Si hay un gradiente natural fuerte de agua subterránea en el área ocupada por el sistema de infiltración rápida, algunos de los pozos que se construyan con el objetivo de captar el agua depurada deberán situarse en función de la dirección del gradiente, gradiente abajo, para asegurarnos así de que el agua depurada es interceptada.