

EVACUACION DE AGUAS RESIDUALES SOBRE EL TERRENO(*)

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
BIBLIOTECA

Por JOSE MARIA DURRUTI GALVETE

Licenciado en Ciencias Físicas
Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de
Estudios y Experimentación de Obras Públicas
Sección de Tratamientos del Agua

El tema de la evacuación de aguas residuales sobre el terreno lleva implícito aspectos relacionados con la recirculación, renovación y reutilización de aguas residuales y la recarga de acuíferos; aspectos todos ellos de indudable interés, especialmente la reutilización directa para riego agrícola, y más en un país predominantemente seco como el nuestro. Pero, bajo el punto de vista de lucha contra la contaminación, creo que el aspecto que merece mayor atención es el de la renovación que proporciona a las aguas residuales, y a él me voy a referir fundamentalmente al hablar sobre este tema.

En su desarrollo trataré de dar una idea muy general y esquemática de sus fundamentos y situación presente, con la única intención de actualizar un tema posiblemente olvidado o relegado, debido, en gran parte, a su limitada aplicabilidad y hasta cierto punto comprensibles objeciones de índole sanitaria y estética, pero que puede ser muy útil, particularmente en pequeñas comunidades y donde el terreno sea fácilmente disponible.

Generalidades.

La aplicación al terreno de las aguas residuales es anterior a cualquier otro método de tratamiento de desechos líquidos; por tanto, no hay nada nuevo en el concepto básico de verter sobre la tierra las aguas residuales, previamente tratadas o no, como un medio de evacuación. Lo que sí es nuevo es el objetivo de hacer de este método de evacuación un proceso de tratamiento de fundamentos científicos conocidos de posible diseño técnico, y que, correctamente operado y mantenido, alcance los requisitos de la mejor práctica tecnológica.

La aplicación al terreno de las aguas residuales se ha realizado en diversas partes del mundo desde antes del siglo pasado. La mayoría de las primeras instalaciones aplicaban aguas residuales domésticas sin tratar con diversos grados de control y éxito. Posteriormente, según fueron mejorando los conocimientos sobre procesos de tratamiento de aguas residuales y desarrollándose técnicas capaces de confinar en una superficie relativamente pequeña la totalidad del proceso necesitado para producir efluentes de cierta calidad, la aplicación al terreno fue relegándose hasta llegar a ser un proceso indeseable e inaceptable.

Ahora bien, los crecientes volúmenes de aguas residuales, domésticas e industriales, y consecuentemente las también crecientes de-

mandas de agua para abastecimientos, han creado dudas sobre la capacidad de las aguas receptoras de asimilar efluentes que no cumplan normas de alta calidad. Además, la evidencia de la eutrofización de ríos y lagos ha concentrado la atención sobre la necesidad de eliminar la presencia de nutrientes en los efluentes de aguas residuales.

Como consecuencia, han surgido nuevas tendencias sobre preservación y reutilización de los recursos hídricos que implican el desarrollo de métodos de tratamiento avanzado, entre los que la aplicación al terreno ofrece, mediante la purificación natural del contacto con el suelo, grados de tratamiento comparables o superiores a los otros métodos y, en determinadas circunstancias, beneficios agrícolas.

En la actualidad, se puede decir que la aplicación al terreno es un método alternativo de evacuación de aguas residuales que requieran grados de tratamiento avanzado. Puede considerarse, por tanto, como un tratamiento terciario al que se aplican efluentes previamente tratados. El grado de este tratamiento previo suele ser primario o secundario, en el caso de aguas residuales domésticas, y primario, o químico si lo requiere, en vertidos industriales. La aplicación de aguas residuales sin pretratamiento alguno hoy en día raramente se realiza y tiende a desaparecer.

Su fundamento se basa en la capacidad del suelo de eliminar y retener contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante mecanismos fi-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de marzo de 1977.

sicos, químicos y biológicos. En realidad, esta capacidad se utiliza en cierta manera en algunos métodos convencionales de tratamiento, como los lechos bacterianos y filtros de arena, que hacen uso "artificial" de los contactos suelo-agua. El movimiento del agua sobre y a través del suelo da origen a un conjunto complejo de reacciones, que bajo condiciones adecuadas y medidas de control mejoran notablemente la calidad del agua, produciendo un efluente marcadamente superior al aplicado.

La capacidad de los suelos de eliminar un gran porcentaje de los nutrientes en los efluentes de aguas residuales han conducido a considerar la aplicación al terreno como un procedimiento antieutrofización. Además, la utilización de tales nutrientes por las plantas le da un gran valor agrícola como fertilizante.

Igualmente, la captación por el suelo de otras sustancias potencialmente nocivas representa otro factor a tener en cuenta al comparar la aplicación al terreno con otros métodos de evacuación. Estas sustancias incluyen metales y componentes químicos que pueden ser absorbidos por el suelo o ingeridos por las plantas. Sin embargo, deben considerarse los efectos de tales sustancias químicas en la composición del suelo, su friabilidad y permeabilidad, o en la seguridad de los cultivos plantados.

Respecto a las razones por las que han surgido la mayoría de las instalaciones existentes de aplicación al terreno se pueden citar:

- Evitar la construcción de largos emisarios hasta aguas receptoras distantes.
- Como un medio económico de mejorar la calidad de los efluentes, sin recurrir a tratamientos convencionales.
- Recarga de acuíferos.
- Riego de cultivos y mejora de rendimientos agrícolas.

Clasificación de las técnicas de aplicación al terreno.

La aplicación al terreno cubre cualquier técnica que haga uso de la capacidad de asimilación del suelo mediante la interacción entre el suelo y las aguas residuales. Las técnicas de aplicación al terreno se pueden agrupar en tres categorías: riego, dispersión en superficie e infiltración-percolación.

Esta agrupación se basa principalmente en las diferencias de superficie requeridas y en

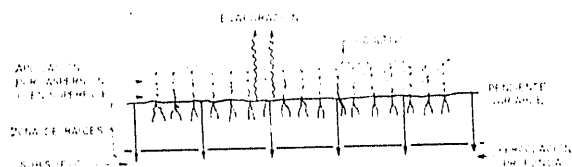
las distintas interacciones, que tienen lugar entre los componentes, plantas-suelo-agua de ecosistemas localizados.

Riego.

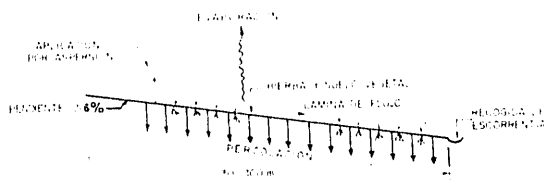
El riego es el sistema de aplicación al terreno de más amplia difusión. Se utiliza para cubrir las necesidades de las plantas, bien por inundación, surcos o por aspersión, en suelos de permeabilidad moderada. En él, las plantas juegan un papel relevante en la eliminación de nutrientes.

Es un sistema atractivo, entre otras razones, porque produce un beneficio económico a través de las cosechas, puede proporcionar protección contra incendios en terrenos boscosos y facilita y fomenta la existencia de zonas verdes.

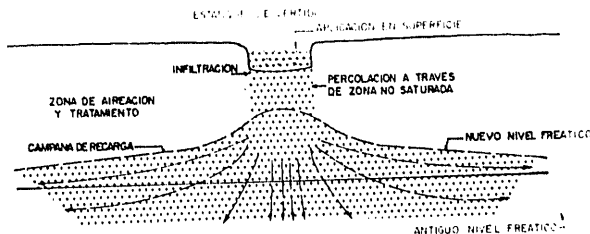
Sus principales inconvenientes son: la gran extensión de terreno que requiere debido a cargas hidráulicas bajas, la necesidad de distanciarse de núcleos habitados y las pérdidas por evapotranspiración, superiores a la cantidad de agua que percola, que originan importantes au-



(a) RIEGO



(b) DISPERSION SUPERFICIAL



(c) INFILTRACION-PERCOLACION

Fig. 1. — Técnicas de aplicación al terreno.

mentos en el contenido de las sales de dicha agua. También existen limitaciones sanitarias, contra las que hay medios de prevención, además de la desinfección.

Dispersión superficial.

Es el sistema de aplicación que hasta la fecha se ha utilizado menos y, por tanto, de menor desarrollo tecnológico. Casi todas las instalaciones existentes son de efluentes de aguas residuales industriales, aunque actualmente se comienza a utilizar con efluentes de aguas residuales domésticas.

En este sistema se hace "resbalar" el agua residual sobre suelos poco permeables, de pendiente suave y plana, plantados con hierba. La principal acción purificadora se lleva a cabo en la hierba y en la cubierta vegetal (filtración por hierba), según el líquido se mueve lenta y laminarmente sobre el terreno hasta un sistema de recogida.

Más de la mitad del agua aplicada se recupera al final con una calidad elevada y puede reutilizarse o verter en aguas receptoras. El resto del agua se pierde por evaporación y algo por percolación.

En este sistema no es necesario cortar la hierba, aunque mejora el rendimiento haciéndolo y no se producen fangos. La probabilidad de que afecte a las aguas subterráneas es muy ligera y las limitaciones son similares a las del riego, aunque se necesita menor superficie.

Infiltración-percolación.

Dentro de los sistemas de infiltración-percolación se encuentran los llamados estanques de infiltración, de recarga, o de inundación. En ellos, el agua aplicada se infiltra por la superficie y percola por los poros del suelo. Se realiza sobre suelos muy permeables de textura gruesa, por lo que las superficies necesarias son relativamente pequeñas con cargas hidráulicas elevadas. El tratamiento se realiza en el suelo sin la intervención de plantas.

Las pérdidas por evaporación son pequeñas, por lo que prácticamente toda el agua tratada se convierte en agua subterránea. Es un sistema de recarga y posible protección contra intrusiones salinas en los acuíferos. Su principal limitación es el peligro de contaminación de las aguas subterráneas en caso de deficiente operación.

RELACION CRONOLOGICA DE LAS PRIMERAS INSTALACIONES DE APLICACION AL TERRENO

Fecha	Lugar	Descripción	Area irrigada (Ha)	Caudal (m ³ /día)	Carga media cm/semana
1559	Bunzlau, Alemania.	Aplicación directa	—	—	—
1861	Croydon, Inglaterra.	Aplicación directa	170	17.034	7,1
1864	South Norwood, Inglaterra.	Aplicación directa	61	2.650	3,0
1869	Berlín, Alemania.	Aplicación directa	11.028	567.810	3,5
1875	Leamington, Inglaterra.	Aplicación directa	162	3.028	1,2
1880	Birmingham, Inglaterra.	Aplicación directa	486	83.279	11,9
1881	Cheyenne, EE. UU.	Riego	538	26.800	3,3
1893	Melbourne, Australia.	Riego	4.199	184.270	3,0
1893	Melbourne, Australia.	Dispersión superficial	1.405	264.978	13,2
1902	Méjico C., Méjico.	Riego	45.324	2.157.678	3,3
1912	Bakersfield, EE. UU.	Riego	971	42.275	3,0
1923	París, Francia.	Riego	5.099	454.248	6,3
1928	Vineland, EE. UU.	Riego	5,6	3.028	37,3
1928	Cape Town, Sudáfrica.	Riego	—	—	—

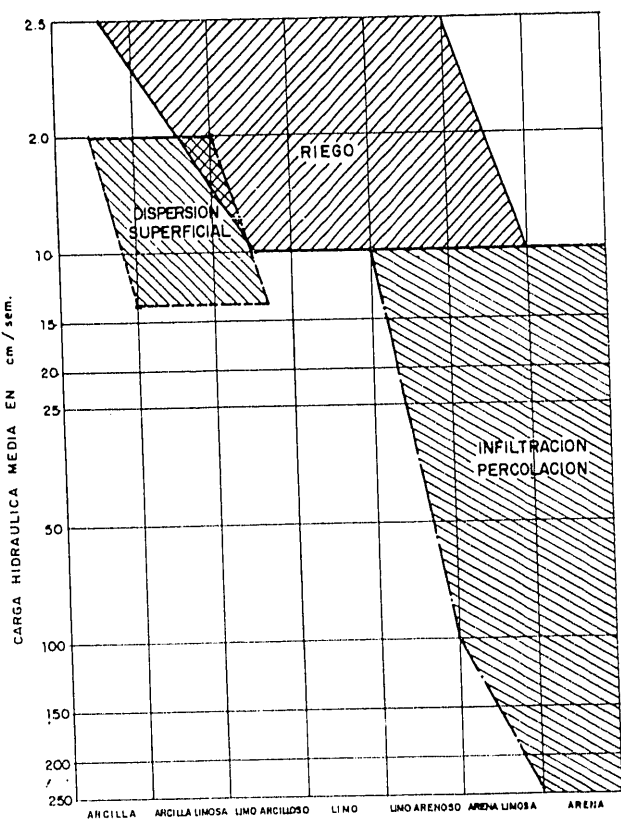


Fig. 2.— Cargas hidráulicas según el tipo de suelo para diferentes técnicas de aplicación al terreno.

Características de las aguas residuales.

Es esencial en el uso de técnicas de aplicación al terreno el conocimiento de las características de las aguas residuales y su influencia en el proceso depurativo.

La característica más importante de las aguas residuales es su contenido en sólidos, incluyendo flotantes en suspensión, coloidales y disueltos. Es importante porque tienden a obstruir los poros del suelo, y para algunos de los disueltos, el suelo no suministra un mecanismo de eliminación a largo plazo.

Otras características a tener en cuenta son:

- La temperatura, que sólo en el caso de algunos vertidos industriales puede ser elevada y producir la esterilización del suelo, reduciendo su capacidad de depuración.
- El pH y la alcalinidad, que también sólo en el caso de algunos vertidos industriales puede requerir su neutralización.

- El olor, que es seguro que se producirá en el caso de aplicación de aguas residuales que no se encuentren en condición aerobia.

Destino de los constituyentes de las aguas residuales.

Al aplicar aguas residuales al terreno, una cantidad considerable de sólidos en suspensión y disueltos se depositan en el suelo. Existen cuatro posibilidades para estos sólidos:

1. Volatilizarse y pasar a la atmósfera.
2. Pasar directamente a aguas superficiales.
3. Quedar retenidos, temporalmente o permanentemente, en el suelo.
4. Pasar a través del suelo a aguas subterráneas.

Hay, por tanto, cuatro receptores: atmósfera, suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas. La distribución de las materias aplicadas en estos cuatro receptores depende de las interacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurran en el suelo, interacciones que están influenciadas por diversos factores, algunos de los cuales escapan del control humano, mientras que otros pueden ser manipulados por el hombre.

En particular, lo que ocurra con estas sustancias durante el proceso de aplicación variará con el tipo de sistema de distribución, naturaleza del suelo, cargas de aplicación, clima, períodos de descanso y la localización y proximidad de las aguas subterráneas y superficiales.

Sólidos en suspensión.

Los sólidos en suspensión sedimentan o quedan atrapados en los intersticios del suelo o adheridos a las partículas del suelo por fuerzas electroquímicas. Los resultados de numerosos estudios demuestran la prácticamente completa retención de los sólidos en suspensión en el suelo en recorridos relativamente cortos, desde algunos centímetros hasta algo más de un metro, dependiendo de la textura del suelo.

Evidentemente, la continua retención y acumulación de sólidos en los poros del suelo conduciría a su obstrucción y, en consecuencia, a una drástica reducción de su permeabilidad, pero afortunadamente la mayor parte de los sólidos en suspensión son volátiles y se oxidan

bioquímicamente en productos estabilizados que evitan la obstrucción de los poros. De hecho, la DBO ejercida por esta fracción biodegradable es un factor clave en los sistemas de aplicación al terreno.

La información existente muestra una amplia divergencia en cuanto a la cantidad de sólidos biodegradables que pueden aplicarse al terreno sin producir la obstrucción de los poros del suelo, dándose valores máximos entre 200 y 300 Kg de DBO/Ha/día. En cambio, existen referencias que indican un valor de 25 Kg de carbono orgánico/Ha/día para mantener un contenido estático de materia orgánica en el suelo. Tal adición ayudaría a mantener el suelo en condiciones de cultivo y no es de esperar que cause problemas de obstrucción, por lo que puede ser un valor útil al plantearse las bases de diseño.

Sólidos coloidales.

Los sólidos coloidales pueden coagularse por aglomeración electromecánica y ser absorbidos por las partículas del suelo. Una vez absorbidos, sufren un proceso de oxidación bioquímica paralelo al de los sólidos en suspensión.

Sólidos disueltos.

De los sólidos disueltos son de especial interés los compuestos de nitrógeno y fósforo, los metales pesados y otros compuestos tóxicos.

Nitrógeno.—Los procesos del nitrógeno incluyen: mineralización e inmovilización. Mineralización es el proceso por el cual el nitrógeno se convierte en una forma que es móvil en el sistema suelo-agua y accesible para las plantas. En él, el nitrógeno orgánico y amoniacal es oxidado a nitrito y nitrato; es, por tanto, un proceso de nitrificación.

La inmovilización describe el proceso por el cual el nitrógeno queda retenido en la forma de nitrógeno orgánico como material celular.

Ambos procesos ocurren simultáneamente y dependen de la disponibilidad relativa de materias carbonosas y nitrogenadas biodegradables. Si existe materia nitrogenada en exceso, el nitrógeno se mineraliza, y si, por el contrario, el exceso es de carbono, el nitrógeno se convierte en material celular. Bajo condiciones anaeróbicas y exceso de carbono el nitrógeno oxidado puede reducirse a gases como óxidos de nitrógeno y nitrógeno molecular, es decir, sufre un proceso de desnitrificación. Al aplicar materia

nitrogenada, los iones amonio que se producen están cargados positivamente y apenas se mueven en el suelo debido a las fuerzas atractivas de las arcillas y coloides orgánicos cargados negativamente. Sin embargo, en suelos no saturados, el nitrógeno amoniacal se oxida a nitratos, los cuales, al estar negativamente cargados, se mueven libremente con el agua del suelo. Por tanto, cuando las necesidades de nutrientes de las plantas sean inferiores a la cantidad de nitratos existentes y el riego o la lluvia excedan la capacidad de almacenamiento de agua del suelo o las necesidades de las plantas, el exceso de agua, junto con los nitratos solubles, pasarán a través del suelo a las aguas subterráneas.

Las pérdidas de nitrógeno en el suelo, además de las debidas al consumo de las plantas y lixiviación de nitratos, pueden producirse por desnitrificación y volatilización. La desnitrificación, como ya he mencionado, tiene lugar cuando hay aireación pobre, alta demanda de oxígeno y materia carbonosa residual. La volatilización del amoníaco ocurre con pH alcalinos y cuando hay una considerable aireación o movimiento de aire sobre el suelo.

Fósforo.—Al aplicar compuestos de fósforo al suelo en poco tiempo se convierte en formas insolubles en el agua. Parte de este fósforo es consumido por las plantas y el resto se acumula en el suelo.

La inmovilización del fósforo está relacionada con los constituyentes minerales del suelo. En suelos ácidos se debe a la formación de compuestos insolubles de hierro y aluminio, mientras que en suelos alcalinos la fijación se debe a compuestos insolubles de calcio.

La capacidad de absorción de un suelo no es infinita, y puede sobrepasarse cuando se aplican grandes cantidades de fósforo aunque para llegar a esta situación, en aplicaciones normales, se pueden necesitar décadas, o siglos, en caso de suelos arcillosos. Por otra parte, en suelos poco oxigenados, pueden ocurrir cambios en la solubilidad de los fosfatos. En caso de los fosfatos férricos se pueden reducir a ferrosos, que son más solubles, produciéndose un aumento de pH. En suelos que contienen fosfatos de aluminio o calcio, la falta de oxígeno no da lugar necesariamente a un aumento de fósforo soluble.

Otros compuestos.—Los metales pesados y otros compuestos químicos también quedan fijados en el suelo mediante precipitación y ab-

sorción, siendo, lógicamente, los suelos de textura fina los que más lugares suministran para la fijación. Las concentraciones de estos constituyentes pueden aumentar por acumulación hasta niveles fitotóxicos, dependiendo del tipo de suelo.

Especial mención merece el sodio, cuya aplicación en altas concentraciones, en proporción con las de calcio y magnesio, puede originar la desfloculación de los suelos reduciendo su permeabilidad.

Microorganismos.

En cuanto a los microorganismos existentes en las aguas residuales, la información existente indica que las bacterias y los virus son, en su mayoría, eliminados de las aguas residuales cuando éstas percolan a través del suelo. A menos que existan fisuras en el suelo, la percolación, incluso en suelos de textura gruesa, elimina las bacterias y virus en un corto recorrido. La mayor parte de esta eliminación, más del 90 por 100, se produce en una fina capa del suelo en la superficie, necesitándose algo más de un metro, según los suelos, para eliminar el resto.

La causa de esta eliminación parece ser que se debe a la competencia por la obtención de alimentos, a sustancias antibióticas producidas por otros microorganismos y a la predación biológica. La persistencia en el suelo de los microorganismos depende de la temperatura, contenido de materia orgánica y del oxígeno disponible en el suelo. La supervivencia de microorganismos patógenos será mayor cuanto menor sea la actividad biológica, es decir, con bajas temperaturas y condiciones anaerobias.

Es de destacar que la presencia de patógenos entéricos frecuentemente se constata mediante la prueba para el grupo coliforme, utilizando los *E. coli* como organismos indicadores, por estar presentes en el tracto digestivo humano y ser más numerosos y más fácilmente detectables que los organismos patógenos. Ahora bien, las bacterias aerobacter, muy comunes en el suelo, exhiben muchas respuestas iguales a las *E. coli*, y para su diferenciación debe realizarse la prueba confirmada para coliformes, de lo contrario la eficiencia del suelo para eliminar coliformes será indeterminada.

Características del lugar.

En relación con los sistemas de aplicación al terreno de aguas residuales las características importantes del lugar son: clima, suelo, topografía, formaciones geológicas y aguas subterráneas.

Clima.

El clima es importante porque en la mayoría de los sistemas de aplicación al terreno la vegetación es un factor principal para el éxito del sistema, y tanto el crecimiento de la vegetación como la descomposición de la materia orgánica están reguladas, en gran parte, por la energía disponible.

Son la precipitación y la temperatura los factores que más influencia tienen, puesto que condicionan la posibilidad de aplicación de las aguas residuales y obligan a la construcción de estanques de almacenamiento.

Por otra parte, dado que las necesidades de agua de las plantas varían con la temperatura del aire, humedad y velocidad del viento, el clima afectará más en los sistemas de riego y dispersión superficial que en los de infiltración-percolación.

Suelo.

Las características importantes del suelo son: la permeabilidad, relacionada con su estructura y textura, y la capacidad de depuración, relacionada con la textura y características químicas.

La permeabilidad limita la carga hidráulica admisible por el suelo, condicionando la selección del sistema de aplicación. Suelos granulares, ligeros, de textura gruesa, son más adecuados para infiltración-percolación; en cambio, suelos pesados, de textura fina, arcillas en general, son más indicados para dispersión superficial.

Es de señalar que las pruebas estándar de percolación no son del todo fidedignas para fines de diseño, porque representan condiciones de inundación constantes en un punto localizado, sin tener en cuenta el flujo lateral en el suelo.

En cuanto a la capacidad de depuración, casi todos los suelos son eficaces para eliminar la materia orgánica. Esta eliminación es el resultado de la acción filtrante del suelo, seguida de

la oxidación biológica de la materia orgánica. Cuanto más fina sea su textura, los mecanismos de absorción, precipitación e intercambio iónico tendrán mayor incidencia en la retención de constituyentes de las aguas residuales. La capacidad de fijación del suelo, que incluye los tres mecanismos indicados, puede determinarse por investigaciones piloto o de laboratorio.

Topografía y formaciones geológicas.

La topografía del terreno afecta a la selección de la técnica de aplicación al terreno, debido a que la dispersión superficial requiere terrenos de pendiente suave y uniforme, y la infiltración-percolación los requiere planos. Asimismo, también puede influir en la forma en que se aplica el agua, especialmente en el riego, y en las posibilidades de utilizar maquinaria agrícola.

Las formaciones geológicas tienen importancia porque afectan a la permeabilidad del terreno, pudiendo mejorarla o restringirla. El conocimiento de las formaciones geológicas tiene mayor incidencia en la técnica de infiltración-percolación, cuyo uso generalmente requiere mapas geológicos.

Aguas subterráneas.

La profundidad a que se encuentran las aguas subterráneas es un factor determinante, ya que se necesita una distancia mínima de suelo no saturado para que se realice la depuración de las aguas residuales.

Asimismo, su movimiento y calidad tienen importancia en cuanto pueden verse afectados por el agua que percola, especialmente en los sistemas de infiltración-percolación.

Selección y operación de los sistemas de aplicación.

Sistemas de riego.

Selección del lugar.—El principal factor en la selección del lugar es la permeabilidad del suelo, porque, junto con el cultivo elegido o la vegetación existente, afecta directamente a la carga hidráulica. Son preferibles suelos moderadamente permeables capaces de filtrar, sobre una base de aplicación intermitente, aproximadamente 5 cm/día. En general, son adecuados

para el riego suelos en el rango entre limos arcillosos y limos arenosos.

La profundidad del suelo debe ser, como mínimo, de 60 cm y preferiblemente de 150 cm en la totalidad del lugar. Esta condición es requerida tanto para el desarrollo completo de las raíces de algunas plantas como para la depuración del agua. Además, es necesario que esta zona se encuentre en condiciones aerobias, por lo cual el nivel freático debe estar, por lo menos, a 150 cm de profundidad.

En el caso de que interese la reutilización de las aguas depuradas, o no se considere conveniente su entremezclado con las aguas subterráneas, pueden recogerse mediante un sistema de drenaje.

Como medida de seguridad es conveniente que el lugar se encuentre en un área donde el contacto entre el público, el agua de riego y terreno, esté controlado. La pendiente del terreno está únicamente condicionada por el empleo de equipos agrícolas, habiéndose irrigado con éxito laderas de hasta 30 por 100 de pendiente.

Cargas.—Las cargas más importantes son: la carga hidráulica, medida en centímetros por semana, y la de nitrógeno, en términos de kilos por hectárea y año. La carga orgánica es menos importante siempre que se siga un programa de aplicación intermitente. No obstante, se conocen casos en los que las cargas de 150 a 200 Kg DBO/Ha/día han producido efectos adversos.

Las cargas hidráulicas oscilan entre 1,5 y 10 cm/semana, dependiendo del suelo, cultivo, clima y características de las aguas residuales. Generalmente, las necesidades de agua de los cultivos fluctúan entre 0,5 y 5 cm/semana y varían según su estado de desarrollo. Aunque en algunos casos se han alcanzado cargas hidráulicas de 17 a 20 cm/semana, se puede fijar el límite para el riego en 10 cm/semana.

La carga de nitrógeno es importante porque, como ya se ha mencionado, el nitrógeno se acumula en el suelo en forma de nitrato y puede pasar a las aguas subterráneas. Para evitar la acumulación, los kilos de nitrógeno aplicados en un año no deben exceder en mucho a los kilos consumidos por el cultivo y eliminados al cosecharlo.

En la mayoría de los casos, en suelos limosos, la carga hidráulica será determinante; sin embargo, en suelos arenosos puede serlo la carga de nitrógeno.

Cultivo y prácticas de operación.—La selección del cultivo puede basarse en varios factores: elevados consumos de agua y nutriente, tolerancia para las sales, valor de mercado o cuidados requeridos. Lo más empleado son hierbas con altos consumos de agua y nitrógeno durante todo el año y pocas necesidades de mantenimiento.

Es necesario mantener el suelo en condiciones aerobias, lo que requiere unos períodos de secado, cuya longitud varía desde unas horas cada día hasta semanas, dependiendo del tipo de cultivo, de las características de las aguas residuales y de la longitud del período de aplicación. Se considera como mínimo una relación de 4 a 1 entre los períodos seco y húmedo, siendo la experiencia en operación quien determine en definitiva los ciclos de carga y descanso.

Los tres métodos fundamentales de riego: aspersión, surcos e inundación se emplean en la aplicación al terreno de aguas residuales, dependiendo su elección de la permeabilidad del suelo, del cultivo, topografía y aspectos económicos.

Por otra parte, dada la imposibilidad de realizar en continuo la aplicación al terreno, debido a las necesidades variables del cultivo, a las condiciones climatológicas y a los imprescindibles períodos de descanso, es necesario prever el almacenamiento de las aguas residuales. Con este fin, en muchas instalaciones se utilizan estanques de estabilización.

Depuración de las aguas.—La depuración de las aguas residuales generalmente tiene lugar durante su paso a través de los primeros 60 a 120 centímetros de suelo.

En las instalaciones existentes, normalmente no se comprueba el grado de depuración; sin embargo, en los casos comprobados se han obtenido eliminaciones del 90 por 100 de DBO, sólidos en suspensión y coliformes fecales, y de 80 a 99 por 100 de fósforo. El nitrógeno es consumido por las plantas, y si el cultivo se cosecha, la eliminación puede ser del orden del 90 por 100.

Dispersión superficial.

Selección del lugar.—Son adecuados para la dispersión superficial suelos de escasa permeabilidad, como arcillas y arcillas limosas, con pendientes del 2 al 6 por 100 y una superficie pla-

na, de forma que las aguas fluyan lentamente por todo el terreno. Pendientes superiores al 6 por 100 pueden originar problemas de erosión.

En las instalaciones existentes, en las que normalmente se aplica aguas residuales industriales, desbastadas y en algunos casos desgrasadas, la longitud de las pendientes varía entre 40 y 100 m.

El suelo debe plantarse con hierba que suministren un habitat a los microorganismos autores de la depuración, a la vez que previenen contra la erosión y consumen importantes cantidades de nutrientes.

Por otra parte, es necesario prever los medios adecuados para la recogida y disposición de la escorrentía, teniendo presente también la escorrentía pluvial.

Como las aguas subterráneas no es probable que se vean afectadas por la dispersión superficial, no son de importancia en la selección del lugar con la única condición de que el nivel freático esté por debajo de la zona de raíces.

Cargas.—Generalmente, los sistemas se diseñan sobre la base de la carga hidráulica, aunque se está tratando de desarrollar criterios basados en el tiempo de retención y la carga orgánica, ya que el proceso es esencialmente biológico y requiere un tiempo mínimo de contacto entre los microorganismos y el agua residual.

Las cargas hidráulicas utilizadas varían entre 6,5 y 14 cm/semana, con una carga típica para aguas residuales de industrias alimentarias de 10 cm/semana. Para aguas residuales urbanas se han utilizado cargas de 10 y 13,2 cm/semana.

Prácticas de manejo.—Las prácticas de manejo más importantes son: la programación del adecuado ciclo de carga hidráulica y el mantenimiento del cultivo.

Los ciclos de carga hidráulica o períodos de aplicación seguidos de descanso deben programarse para mantener los microorganismos en la superficie activa del suelo. Los períodos de aplicación deben controlarse de forma que no sobrecarguen el sistema y produzcan condiciones anaerobias, y por otro lado, los períodos de descanso deben ser lo suficientemente largos para permitir la reaireación de la capa superficial del suelo y lo suficientemente cortos para mantener a los microorganismos en estado activo. La experiencia en los sistemas existentes indican períodos de seis a ocho horas de aplicación se-

guidos de seis a dieciocho horas de descanso, según la estación del año.

En cuanto a la hierba es conveniente cortarla periódicamente, retirándola o no para obtener buenos resultados.

Depuración de las aguas.—De las comprobaciones realizadas en diferentes sistemas de dispersión superficial, tanto con aguas residuales urbanas como industriales, se deduce que las eliminaciones alcanzables pueden ser del orden del 95 al 99 por 100 de DBO y sólidos en suspensión, del 70 al 90 por 100 de nitrógeno y del 50 al 60 de fósforo.

La eliminación de materia orgánica es por oxidación biológica al pasar a través de la hierba y del lecho vegetal, y la eliminación de nutrientes se debe al consumo del cultivo, consumo biológico, desnitrificación y fijación en el suelo.

Infiltración-percolación.

Selección del lugar.—Para la utilización de esta técnica son necesarios suelos con valores de infiltración de 10 a 60 cm/día o más. Son suelos aceptables las arenas, limos arenosos y arenas limosas. Las arenas gruesas y gravas no son muy adecuadas porque permiten el paso muy rápido de las aguas residuales, no dando tiempo a que se realice la depuración.

Otros factores de importancia son: la profundidad, movimiento y calidad de las aguas subterráneas, la topografía y las formaciones geológicas subyacentes. Para controlar las aguas residuales después de infiltrarse por la superficie y percolar a través del suelo debe conocerse las características del subsuelo y del acuífero. La profundidad mínima de las aguas subterráneas no debe ser inferior a 4,5 m.

Cargas.—Existen dos tipos de sistemas de infiltración-percolación diferenciados por la carga hidráulica aplicada: sistemas de carga moderada, del orden de 10 a 150 cm/semana, y sistemas de alta carga, con cargas de 150 a 300 cm/semana, utilizados para recarga de acuíferos. En los primeros, la carga orgánica es de importancia secundaria, y en los segundos normalmente es del orden de 10 a 40 toneladas de DBO/Ha/año.

Prácticas de manejo.—Las prácticas más importantes se relacionan con los ciclos de carga hidráulica, cuidados de la superficie de aplica-

ción y control de niveles y calidad del agua subterránea.

El ciclo hidráulico es esencial para mantener las cargas de diseño y la capacidad de depuración del suelo. El período de descanso que puede variar entre uno y veinte días, permite al oxígeno atmosférico penetrar en el suelo y restablecer la condición aerobia, lo que da lugar a la descomposición de la materia orgánica y a la nitrificación. Cuando tenga lugar el período de inundación, los nitratos formados serán lixiviados con el agua aplicada hasta que se establezca una condición anaerobia y comience la desnitrificación. Normalmente, el ciclo hidráulico se determina por la experiencia en cada sistema.

La superficie del lugar de aplicación está diseñada para dispersar los sólidos, lo que se consigue plantando vegetación o añadiendo una capa de arena gruesa o grava. En este último caso la superficie debe rastrillarse cuando aparezcan acumulaciones de sólidos.

Se pueden diseñar sistemas de recogida del agua renovada para evitar que alcance acuíferos ajenos al sistema de recarga y pozos de recogida, previniendo así la contaminación, especialmente con nitratos de las aguas subterráneas. Las aguas recobradas pueden recibir un tratamiento adicional, tal como eliminación de nitrógeno o reutilizarse para fines acordes con su calidad.

Depuración de las aguas.—Las eliminaciones de DBO, sólidos en suspensión y coliformes, llegan hasta el 99 por 100. La eliminación de nitrógeno es menos efectiva y muy variable, del 0 al 80 por 100, a menos que se establezcan procedimientos especiales de operación para maximizar la desnitrificación. En cuanto al fósforo, su eliminación suele ser del orden del 70 al 90 por 100, dependiendo de las características físicas y químicas del suelo.

Fiabilidad de las técnicas de aplicación al terreno.

En la fiabilidad de las técnicas de aplicación al terreno intervienen consideraciones sobre utilización a largo plazo, depuración del agua residual y minimización de los impactos ambientales adversos.

A diferencia de las instalaciones de tratamiento mecánicas, las instalaciones de aplica-

ción al terreno no tienen una vida útil esperada que se pueda fijar. La vida útil depende de factores tales como operación, suelo, clima y características de las aguas residuales. También afectan a la vida esperada de un sistema las necesidades variables del uso del terreno y los diferentes objetivos del tratamiento de las aguas residuales.

Riego.

Se han comprobado que el riego con aguas residuales es fiable en términos de vida útil larga, ya que existen sistemas en operación desde finales del siglo pasado.

Como ya se ha dicho, la depuración de las aguas residuales mediante el riego es bastante elevada, y si se opera adecuadamente puede evitarse la degradación de las aguas subterráneas y los riesgos para la salud. Además, el riego ha tenido muchos efectos positivos sobre el medio ambiente, mejorando las condiciones del suelo y suministrando habitat para la vida silvestre.

Se puede decir que el riego es la técnica de aplicación al terreno de aguas residuales más fiable de los métodos investigados.

Dispersión superficial.

Se conoce menos acerca de la vida útil de un sistema de dispersión superficial que de la

de un sistema de riego. En Estados Unidos, el sistema más antiguo lleva menos de veinte años operando con aguas residuales industriales, pero según se deduce de la literatura existente, con una operación adecuada, la vida útil de un sistema de dispersión superficial puede ser indefinida.

Los rendimientos de eliminación de contaminantes son bastante buenos, aunque ligeramente inferiores a los conseguidos por el riego, principalmente en lo que se refiere a nutrientes. Como es un proceso biológico pasará por un período de tratamiento intermedio hasta que la biota esté completamente establecida.

Puesto que la infiltración en el suelo es ligera, la posibilidad de que las aguas subterráneas se vean afectadas es mínima.

Infiltración-percolación.

La vida útil de un sistema de infiltración-percolación es más corta, en la mayoría de los casos, que las de sistemas de riego y dispersión superficial. Esto es debido a las mayores cargas de constituyentes inorgánicos, principalmente fósforo y metales pesados, y al hecho de que estos constituyentes quedan fijados en la matriz del suelo y no son positivamente eliminados. El agotamiento de la capacidad de fijación para el fósforo y los metales pesados es función de la carga y de los lugares de fijación disponibles. En Lake George, Nueva York, recientes compro-

CARACTERISTICAS COMPARATIVAS DE LOS SISTEMAS DE APLICACION AL TERRENO

Factor	Riego	Dispersión superficial	Infiltración-percolación
Carga hidráulica (cm/sem.)	1,2 a 10,0.	5,0 a 14,0.	10,0 a 300.
Aplicación anual (m/año)	0,6 a 2,5.	2,5 a 7,3.	5,4 a 152,4.
Terreno requerido por 1.000 metros cúbicos/día (Ha)	15 a 60 más zonas neutras.	5 a 15 más zonas neutras.	0,2 a 6,6.
Suelos	Moderadamente permeables y productivos.	Poco permeables.	Muy permeables.
Probabilidad de influencia en aguas subterráneas	Moderada.	Ligera.	Cierta.
Profundidad necesaria a aguas subterráneas (m)	Sobre 1,5.	Indeterminada.	Sobre 4,5.
Pérdida de las aguas	Predominantemente por evaporación o percolación profunda.	Descarga superficial predomina sobre evaporación y percolación.	Percolación a aguas subterráneas.
Técnicas de aplicación	Por aspersión o en superficie.	Normalmente por aspersión.	Normalmente en superficie.

RENDIMIENTOS, SEGUN LOS USOS, DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE APLICACION
AL TERRENO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

Objetivo	Riego	Dispersión superficial	Infiltración-percolación
Utilización como un proceso de tratamiento con recuperación de aguas tratadas	Impráctico.	Recuperación del 50 al 60 %.	Recuperación del 90 %.
Utilización como tratamiento terciario:			
1. Eliminación de DBO y sólidos en suspensión	90-99 %	90-99 %	90-99 %
2. Eliminación del nitrógeno	Sobre 90 % (a)	70-90 %	0-80 %
3. Eliminación del fósforo	80-99 %	50-60 %	70-95 %
Utilización para cultivar productos para venta	Excelente.	Bueno.	Pobre.
Utilización para recarga de aguas subterráneas	0-30 %	0-10 %	Sobre 90 %.

(a) Dependiente del consumo del cultivo.

baciones han revelado que algunos lechos de percolación han agotado la capacidad de retención de fósforo hasta tres metros de profundidad, después de haber estado operando treinta y cinco años con cargas moderadas de 20 a 40 centímetros/semana.

El grado de depuración de las aguas residuales conseguido mediante infiltración-percolación varía considerablemente con las características de suelo y las prácticas de operación. Se han conseguido eliminaciones de nitrógeno de hasta 80 por 100 mediante una cuidadosa operación de los ciclos de carga hidráulica, aunque la eliminación promedio puede fijarse en 30 por 100, teniendo en cuenta la alta concentración de nitratos vertida a las aguas subterráneas al comienzo del período de inundación. Las eliminaciones de fósforo y metales pesados generalmente también son inferiores a las obtenidas con la técnica del riego.

Desde el punto de vista de los efectos sobre el medio ambiente, la infiltración-percolación puede considerarse la menos fiable de las tres técnicas, aunque en la mayoría de los sistemas que han sido operados adecuadamente los resultados han sido satisfactorios.

Consideraciones sobre salud pública.

Los peligros para la salud pública que enaña la aplicación al terreno de aguas residuales se derivan de los microorganismos patóge-

nos y sustancias tóxicas presentes en dichas aguas y su posible transmisión a formas biológicas superiores incluyendo al hombre. Existen tres vías posibles para esta transmisión:

- Los aerosoles que se forman en aplicaciones mediante aspersión.
- Contaminación de cultivos comestibles.
- Contaminación de aguas receptoras, subterráneas o superficiales de utilización para abastecimientos.

Supervivencia de patógenos.

La supervivencia de bacterias y virus en aerosoles, en el suelo y sobre la vegetación, ha recibido considerable atención. Es importante tener en cuenta que cualquier conexión entre los patógenos aplicados al terreno con el agua residual y la contracción de enfermedades en animales y en el hombre requiere un largo y complejo paso de acontecimientos epidemiológicos. No obstante se han dado casos, por lo que deben tomarse precauciones.

Existen varios estudios sobre el tiempo y distancia de viaje de los aerosoles, dándose distancias de 140 a 160 metros con velocidad del viento de 10 Km/h y 300 a 400 m, como máximo, con vientos de 20 Km/h. La humedad relativa y la temperatura del aire son factores importantes, ya que influyen en la mortandad bacteriana por desecación. La protección contra el peligro de los aerosoles incluye: desinfección,

aspersores de rocío horizontal y baja presión, zonas neutras (de 15 a 400 m) y plantación de pantallas de árboles y arbustos.

La supervivencia de organismos indicadores y patógenos en el suelo puede variar entre unos días y varios meses, según el tipo de organismos y la humedad y temperatura del suelo. Existen tablas de los tiempos de supervivencia de diversos organismos en el suelo, en el agua y sobre la vegetación (Seep y Dunlop). En general se puede decir que las bacterias mueren más rápidamente sobre la vegetación que en el suelo. Se conoce menos sobre la supervivencia de los virus, pero parece ser que son más resistentes que las bacterias.

Para evitar la contracción de enfermedades por contaminación de los cultivos regados con efluentes de aguas residuales se limitan los períodos de aplicación a las primeras etapas del desarrollo de los cultivos, y se regula la calidad de los efluentes aplicados y la forma de su aplicación en función del tipo de cultivo. En la tabla

adjunta están sintetizadas normas para el riego de cultivos con efluentes de aguas residuales en algunos países.

Contaminación de aguas subterráneas.

Es poco probable que los microorganismos patógenos alcancen las aguas subterráneas, puesto que la mayoría son retenidos por el suelo en recorridos relativamente cortos, dependiendo de la textura del suelo. Sólo en caso de que existan fracturas o canales en las formaciones geológicas subyacentes existe claro peligro de contaminación microbiana.

Por otra parte es muy posible que se produzcan aumentos en el contenido de sales disueltas en las aguas subterráneas, especialmente de nitratos, pudiendo alcanzar niveles que las conviertan en no aptas para el consumo humano. Particularmente, en los sistemas de infiltración-percolación se debe llevar un control de la calidad de las aguas subterráneas mediante muestreos sistemáticos en pozos de prueba.

	ALEMANIA	ISRAEL	CALIFORNIA
Huertas y viñas.	Prohibido el riego por aspersión.	Efluentes secundarios.	Efluente primario. Prohibido riego por aspersión. Prohibido utilización de frutas caídas.
Forrajes y cultivos para producción de fibras y simientes.	Efluentes primarios. Si es por aspersión, efluentes secundarios clorados.	Efluentes secundarios, pero prohibido el riego de cultivos para producción de simientes con los que se obtienen vegetales comestibles.	Efluentes primarios, en superficie o por aspersión.
Cultivos para el consumo humano que serán tratados para eliminar microorganismos patógenos.	Riego sólo hasta cuatro semanas antes de la cosecha.	Para vegetales de consumo humano, efluentes debidamente desinfectados (< 1.000 colis/100 ml en el 80 por 100 de las muestras).	Para el riego en superficie, efluente primario. Para el riego por aspersión, efluente secundario desinfectado (< 23 coliformes/100 ml).
Cultivos para el consumo humano en crudo.	Patatas y cereales riego solamente en la fase de floración.	Prohibido el riego con aguas residuales depuradas a menos que se trate de frutas que se comen peladas.	Para el riego de superficie, no más de 2,2 colis/100 ml. Para el riego por aspersión, efluentes desinfectados y filtrados con una turbiedad de 10 unidades, siempre que hayan sido tratados por coagulación.

Costos de sistemas de aplicación al terreno.

Los costos comparativos de diferentes técnicas de aplicación de efluentes de aguas residuales domésticas e industriales son difíciles de computar y evaluar debido a que dependen de factores variables.

Voy a limitarme a presentar unas tablas de costos de instalación y operación de diversos sistemas de aplicación de los que se tienen datos y una de costos comparativos de un hipotético sistema de 3.800 m³/día.

En esta última:

— No se ha incluido el *pretratamiento*.

— El terreno se calcula sobre la base de la carga supuesta más un 20 por 100 para zonas neutras.

— *Conducción*: 1.600 m de tubería de 600 Ø.

— *Recogida*: en dispersión superficial zanjas, y en infiltración-percolación, pozos con bombas.

— *Mantenimiento*: 10 por 100 de los costos de inversión de bombeos, distribución y recogida.

— *Energía*: 1,63 ptas./kWh.

— *Personal*: un peón.

COSTOS DE INVERSION Y OPERACION EN RIEGO POR ASPERSION

Lugar	Año de comienzo	Caudal m ³ /día	Superficie Ha	Costo de instalación		Costo de operación
				Ptas./Ha	Ptas./m ³ /día	Ptas./m ³
Beldin	1973	3.028	6,31	756.146	1.823	—
Ephrata	1972	1.665	22,26	548.576	7.450	1,08
Pennsyl. Uni.	1967	3.785	52,20	400.302	—	—
Middleville	1970	567	12,38	309.863	6.625	—
St. Charles	1966	1.892	20,23	281.694	3.012	1,38
Wayland	1970	1.892	21,45	280.211	3.170	—
Moulton	1966	3.785	—	222.390	—	—
Idaho	1968	2.384	32,27	118.608	—	—
Portales	1968	3.785	48,56	20.756	—	—
Calabasas	1965	11.356	169,97	—	3.646	0,43

COSTOS DE INVERSION Y OPERACION EN RIEGO POR SURCOS

Lugar	Año de comienzo	Caudal m ³ /día	Superficie Ha	Costo de instalación		Costo de operación
				Ptas./Ha	Ptas./m ³ /día	Ptas./m ³
Wisconsin (lechería)	1954	—	1,21	296.520	—	—
Minnesota (lechería)	1950	—	1,13	44.748	—	—
Bakerfield	1912	46.560	971,24	—	3.328,5	0,76
Mount Vernon	1948	—	404,68	11.120	—	—
Minnesota (conservera)	1953	—	—	—	—	3,51
Ontario (tenería) .	1950	2.650	—	—	—	2,01

COSTOS DE INVERSION Y OPERACION EN RIEGO POR INUNDACION

Lugar	Año de comienzo	Caudal m ³ /día	Superficie Ha	Costo de instalación		Costo de operación
				Ptas./Ha	Ptas./m ³ /día	Ptas./m ³
Abilene	1920	17.034	627,26	—	—	1,11
Woodland	1889	32.933	97,12	—	—	0,66
Ely	1908	5.678	566,56	—	1.743,5	0,63
San Angelo	1933	18.927	259,00	—	634	0,48

COMPARACION DE COSTOS DE INVERSION Y OPERACION PARA SISTEMAS DE RIEGO, DISPERSION SUPERFICIAL E INFILTRACION-PERCOLACION DE 3.800 M³/DIA

	Riego por aspersion	Dispersión superficial	Infiltración-percolación
Carga de líquido (cm/semana)	6,35	10,15	152,40
Terreno utilizado (Ha)	41,68	25,90	—
Terreno requerido (a) (Ha)	50,18	31,16	2,02
Gastos de inversión (millones de pesetas):			
Terreno (a 7,41 ptas./m ²)	3,72	2,31	0,15
Explanación	0,62	3,84	0,60
Estación de bombeo	3,00	3,00	—
Conducción	7,92	7,92	7,92
Distribución	8,64	3,84	0,30
Recogida	—	0,36	1,80
Total costos de inversión (millones de pesetas)	23,90	21,27	10,70
Costo de inversión por Ha comprada (millones de ptas./Ha)	0,474	0,682	5,308
Costo de amortización (b) (millones de ptas./año)	2,22	2,08	1,17
Costo de inversión por m ³ (ptas./m ³)	1,62	1,52	0,85
Costos de operación (millones de ptas./año):			
Personal	0,60	0,60	0,45
Mantenimiento	1,16	0,72	0,21
Energía	0,35	0,35	0,11
Total costos de operación (millones de ptas./año)	2,11	1,67	0,77
Costos de operación por m ³ (ptas./m ³)	1,54	1,22	0,56
Costo total por m ³ (ptas./m ³)	3,15	2,74	1,41

(a) 20 por 100 adicional para zonas neutras.

(b) Quince años de vida, excluyendo el terreno. Interés de 7 por 100.