

# **METODOS NATURALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

## ***Sistemas de tratamiento mediante aplicación en el terreno***

***Características de diseño***

***Mecanismos de depuración y rendimientos***

***Condiciones de emplazamiento***

*Información lenta:*

*Información rápida:*

*Flujo superficial:*

## ***Sistemas acuáticos***

***Mecanismos de depuración y rendimientos***

***Caracterización de emplazamientos***

***Economía de los métodos naturales***

# Métodos naturales de tratamiento de aguas residuales

**B**AJO LA DENOMINACION de métodos de depuración natural, se engloban aquellos procedimientos en los que el tratamiento principal es proporcionado por componentes del medio natural. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos: los métodos de tratamiento mediante aplicación en el terreno y los sistemas acuáticos. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, suelo, microorganismos (terrestres y acuáticos) y, en menor medida, a la acción de animales superiores, sin la intervención de agentes artificiales.

Estos procedimientos naturales se caracterizan, en general, por sus menores necesidades de personal de operaciones, menor consumo energético y menor producción de fangos. Sin embargo, habitualmente requieren mayores superficies de terreno disponibles. Este factor, a veces limitante, es el que determina que los llamados métodos naturales de depuración sean los apropiados y aconsejados para pequeños núcleos rurales.

Algunos de estos métodos o conceptos de depuración han sido conocidos y empleados desde hace siglos, habiéndose puesto de actualidad con la aparición y divulgación del concepto *vertido de contaminación cero o vertido cero*.

Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente tres tipos:

- Infiltración lenta.
- Infiltración rápida.
- Flujo superficial.

El rasgo común a todos ellos es la depuración conseguida a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta-suelo-agua-matriz rocosa. El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios de diseño y operación para estos sistemas.

Los llamados métodos acuáticos se basan en la creación de un flujo controlado, en el que microorganismos y plantas principalmente, transforman los contaminantes. Incluyen tres tipos básicos:

- Lagunajes
- Humedales
- Cultivos acuáticos (plantas flotantes)

Estos últimos se han desarrollado como una variante del lagunaje convencional, aprovechando la captación de nutrientes por las plantas, lo que mejora los rendimientos de las lagunas de estabilización. Estos métodos acuáticos, en general, se proyectan para un flujo continuo con descarga a ríos o lagos próximos. Su sistema de operación puede ser estacional o anual, en función del clima o de los objetivos de tratamiento.

## Sistemas de tratamiento mediante aplicación en el terreno

Como ya se ha citado, se distinguen tres tipos: infiltración lenta, infiltración rápida y flujo superficial.

El tratamiento mediante *infiltración lenta*, habitualmente designado por las siglas inglesas *SR (slow rate)*, consiste básicamente en la aplicación de un caudal controlado de agua residual sobre una superficie de terreno con cubierta vegetal cultivada. Habitualmente, los sistemas SR se operan en ciclos de aplicación semanales, durante la temporada de crecimiento del cultivo. Las cargas hidráulicas de agua residual aplicadas anualmente sobre la superficie activa de tratamiento varían entre 0.5 y 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. En climas fríos puede ser necesario el almacenamiento temporal

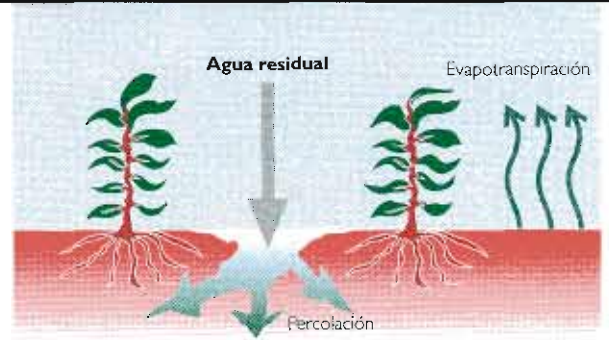


de agua residual durante los períodos en que no se produce crecimiento de la cubierta vegetal. Tras su infiltración, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo, que puede recuperar sus condiciones aerobias gracias a los procedimientos cíclicos de aplicación. La cubierta vegetal juega un importante papel en el proceso de tratamiento. Su selección y cuidado dependen principalmente del grado de tratamiento perseguido y de las características de los suelos. La infiltración lenta tiene el mayor potencial de tratamiento de todos los sistemas de depuración en el terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

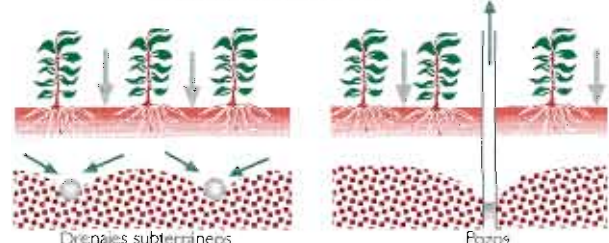
El tratamiento mediante *infiltración rápida*, conocido en la literatura inglesa como RI (*rapid infiltration*), se define como la aplicación controlada de agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta. Generalmente, la aplicación se realiza de forma cíclica, para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento. El agua residual requiere, al menos, tratamiento primario previo a la aplicación, siendo las cargas hidráulicas anuales normales de 6 a 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. No es necesario que las balsas de infiltración estén cultivadas, pero exigen mantenimiento periódico de la superficie. La evolución del efluente en el suelo y subsuelo es similar a la de los sistemas SR. No obstante, por tratarse caudales muy superiores, el suelo y formaciones infrayacentes han de tener mejores características hidráulicas.

El tratamiento mediante *flujo superficial*, OF (*overland flow*), es adecuado para zonas con suelos relativamente impermeables. Consiste en forzar la escorrentía del agua residual sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y vegetación), para ser posteriormente recogida mediante diques artificiales. Las aplicaciones de agua residual suelen realizarse en ciclos de horas, durante 5 a 7 días a la semana, tras un escaso pretratamiento consistente en la separación de las fracciones sólidas de mayor tamaño. El grado de tratamiento alcanzable es equivalente a uno secundario, generalmente con buena reducción de nitróge-

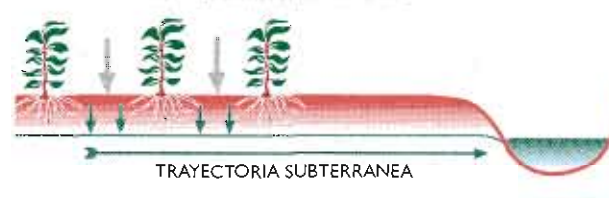
**Representación esquemática del método de infiltración lenta (SR)**



**TRAYECTORIA HIDRAULICA**



**SISTEMAS DE RECUPERACION**



no y un peor rendimiento en fósforo.

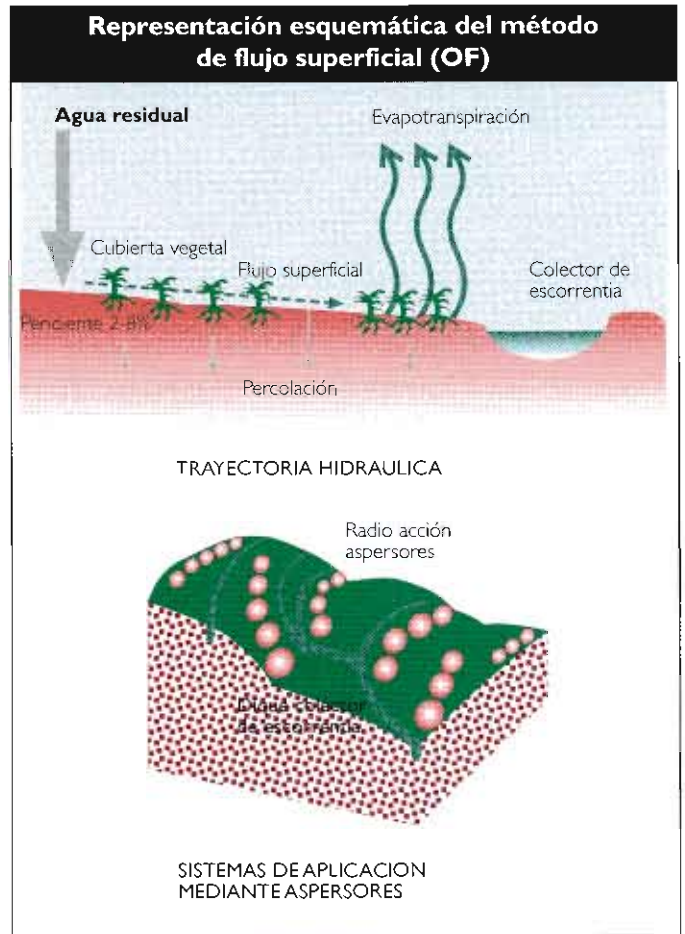
La evaluación preliminar de las posibilidades de aplicación de los sistemas de tratamiento en el terreno requiere un conocimiento previo de los aspectos básicos de diseño, de su rendimiento y condiciones mínimas del emplazamiento.

**Características de diseño**

En el cuadro se comparan las principales características

**Cuadro comparativo de las principales características de diseño de los sistemas de tratamiento en el terreno**

Característica	Infiltración Lenta	Infiltración Rápida	Flujo Superficial
Técnica de aplicación	Aspersión o en superficie	En superficie	Aspersión o en superficie
Carga hidráulica anual (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.5 - 6	6 - 125	3 - 20
Pretratamiento mínimo	Sedimentación primaria	Sedimentación primaria	Separación de sólidos
Evolución del agua residual	Evapotranspiración y percolación	Percolación	Escorrentía, evapotranspiración y percolación débil
Empleo de vegetación	Necesario	Opcional	Necesario



de diseño de los sistemas de tratamiento en el terreno. Los rasgos diferenciadores recogidos son la técnica de aplicación, necesidad de pretratamiento, carga hidráulica anual, evolución del residuo y requerimientos de cultivo.

Las figuras presentan esquemáticamente los aspectos de técnica de aplicación, evolución del agua residual y destino final de la misma (recuperación o vertido natural).

### Mecanismos de depuración y rendimientos

En la tabla adjunta se resumen los niveles habituales de tratamiento que se alcanzan con los métodos basados en el terreno, referidos a los parámetros más comunes de caracterización de las aguas residuales. Las diferencias entre los rendimientos esperados entre sistemas SR y RI dependen principalmente de los procedimientos de aplicación del agua residual, las cargas hidráulicas y la existencia de vegetación como agente de tratamiento. Las capas superiores del suelo, que contienen las raíces de la vegetación, constituyen la zona de mayor actividad biológica de los sistemas. El SR aprovecha al máximo este potencial mediante aplicaciones de caudales relativamente bajos sobre la superficie del terreno. Por contra, las elevadas cargas hidráulicas aplicadas hacen que la vegetación no sea un factor de tratamiento significativo en los sistemas RI.

La reducción de nitrógeno mediante procesos de nitrificación/desnitrificación se produce en los niveles más superficiales del suelo. Por ello, los sistemas SR y RI se operan habi-

tualmente en ciclos de 1-2 días de aplicación, seguidos de varios días de secado que permiten la restauración aeróbica del suelo. La vegetación también juega un importante papel en la separación del nitrógeno en los sistemas SR.

El proceso SR es el que ofrece una mayor capacidad y fiabilidad en el tratamiento entre todos los sistemas de depuración en el terreno. Mediante sistemas SR diseñados y manejados adecuadamente, puede obtenerse un elevado grado de depuración, asegurando razonablemente la protección del nivel de calidad de las aguas subterráneas adyacentes. La DBO desciende mediante filtración y adsorción iniciales, con posterior oxidación biológica. Los sólidos en suspensión son eliminados por filtrado. El nitrógeno es captado principalmente por la cubierta vegetal, cuya eficiencia depende de las especies seleccionadas y de su grado de crecimiento. Para una reducción eficaz de nitrógeno, la vegetación ha de ser recolectada y replantada periódicamente. El fósforo se depura mediante procesos de fijación en el suelo tales como adsorción y precipitación químicas. La reducción de fósforo en sistemas SR es generalmente alta y depende más de las características del suelo que de sus concentraciones en el agua residual.

En el proceso RI, los efectos de filtrado y circulación intersticial en el suelo proporcionan un excelente rendimiento en la eliminación de los constituyentes del agua residual. Los sólidos en suspensión, DBO y coliformes fecales son eliminados prácticamente en su totalidad. La nitrificación obtenida es casi completa en aquellos sistemas con ciclos de carga hidráulica bien diseñados. El rendimiento en eliminación de

nitrógeno es habitualmente próximo al 50% y puede ser incrementado recirculando las fracciones de mayor contenido, aumentando las cantidades de carbono presente y optimizando los ciclos de aplicación. La eliminación de fósforo puede alcanzar entre el 70 y el 99%, dependiendo de las características físico-químicas del suelo. Al igual que en el proceso SR, los mecanismos principales de reducción de fósforo son adsorción y precipitación.

En el proceso de flujo superficial (OF), los fundamentos y niveles de la depuración varían sensiblemente respecto a los dos anteriores. Básicamente, el tratamiento se produce mediante mecanismos físicos y de crecimiento biológico que tienen lugar en la cubierta vegetal. La oxidación biológica, sedimentación y filtración son los principales sistemas de reducción de sustancias orgánicas y sólidos en suspensión. El nitrógeno se elimina por el consumo de las plantas, procesos de desnitrificación y volatilización de amoníaco. Los factores que controlan la preponderancia de uno u otro mecanismo son la forma del nitrógeno presente en el agua residual, la cantidad de carbono presente, la temperatura y la carga hidráulica y tipo de ciclo de aplicación. La reducción de nitrógeno está comprendida normalmente entre el 75 y el 90% para este tipo de sistemas, aunque puede verse sensiblemente disminuida por efecto de climas fríos. Su reducción permanente requiere la renovación periódica de la cubierta vegetal. En los procesos OF la eliminación de fósforo se debe, al igual que en los procesos anteriores, a mecanismos de adsorción y precipitación. Dado que el contacto con la matriz del

suelo es muy inferior en este método, su eficacia en la reducción de fósforo se limita al 50-70% en términos de masa.

### Condiciones de emplazamiento

La selección de emplazamientos para depuración mediante aplicación en el terreno no se limita a la búsqueda de terrenos con suficiente extensión, disponibles en zonas bien situadas respecto a la red de saneamiento. Otros factores como el suelo, el subsuelo, el agua subterránea y las condiciones climáticas afectan de un modo determinante a la viabilidad de estos sistemas.

Los datos necesarios sobre los posibles emplazamientos han de cubrir generalmente los siguientes aspectos: topografía, tipo y permeabilidad del suelo, temperaturas, precipitaciones, evaporación y evapotranspiración, usos y zonificación del suelo, prácticas agrícolas, profundidad y calidad del agua subterránea y exigencias regulatorias para el vertido en las aguas superficiales y subterráneas.

#### Infiltración lenta:

La necesidad de utilización de cubierta vegetal en estos sistemas introduce un condicionante estacional a la aplicación anual de agua residual, restringiéndola a las épocas de crecimiento en la zona. Si además se realizan cultivos estacionales aprovechables, el tiempo de aplicación puede verse aún más

### Expectativas de rendimiento en la depuración de los principales métodos de tratamiento basados en el terreno (1)

Constituyente	Infiltración lenta (SR) <sup>2</sup>		Infiltración rápida (RI) <sup>3</sup>		Flujo superficial (OF) <sup>4</sup>	
	Media	Rango Alto	Media	Rango Alto	Media	Rango Alto
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	<2	<5	5	<10	10	<15
SS (mg/l)	<1	<5	2	<5	10	<20
N-NH <sub>3</sub> (mg/l)	<0.5	<2	0.5	<2	<4	<8
N <sub>tot</sub> (mg/l) <sup>5</sup>	3	<8	10	<20	5	<
P <sub>tot</sub> (mg/l)	<0.1	<0.3	1	<5	4	<6
Coliformes fecales (col/100ml)	0	<10	10	<200	200	<2000

1 De acuerdo con la banda media-baja de las cargas hidráulicas reseñadas en la tabla anterior.

2 Percolación, tras tratamiento primario o secundario, a través de 1.5 m de suelo no saturado.

3 Percolación, tras tratamiento primario o secundario, a través de 4.5 m de suelo no saturado.

4 Tras desbaste y filtrado de sólidos, sobre pendientes de 30-36 m de longitud.

5 Valores de SR dependientes de carga y cultivo: OF aporta valores más altos con clima moderadamente frío o a mayores cargas.

Fuente U.S.E.P.A (1981). "Process design natural for land treatment of municipal wastewater".

### Características básicas de los emplazamientos para tratamiento mediante aplicación en el terreno

Característica	Infiltración Lenta (SR)	Infiltración Rápida (RI)	Flujo Superficial (OF)
Pendiente del terreno	Hasta 15% en superficies cultivadas. <30% en arbolado.	No es crítica; pendientes excesivas exigen mucha obra de nivelación.	Máximo 15%. Normalmente comprendidas entre 2-8%
Permeabilidad del suelo	Moderadamente baja a moderadamente alta.	Alta	Baja (suelo) con barreras impermeables
Profundidad del agua subterránea	Mínimo 1-1.5m.	Mínimo 5m.	Superior a 1m (sólo importante en suelos con permeabilidad significativa)
Profundidad del substrato rocoso	Mínimo 1.5 m.	Superior a 5m.	Superior a 1m.
Restricciones climáticas	Necesario almacenamiento y operación estacional en períodos lluviosos y/o fríos	Ninguna (posible adaptación del método operativo en tiempo frío)	Frecuente necesidad de almacenamiento en periodos de tiempo frío
Necesidad global de terreno <sup>(1)</sup>	$0.02 Q_m < A < 0.03 Q_m$	$A = 0.006 Q_m$	$0.01 Q_m < A < 0.018 Q_m$

(1) A=superficie necesaria (ha),  $Q_m$ =caudal medio diario a tratar ( $m^3/d$ )

reducido por los períodos de plantación y cosecha. En aquellos casos en que el período operacional del sistema sea inferior a 12 meses al año, será necesario prever un sistema de almacenamiento temporal. Generalmente suelen utilizarse con este fin balsas profundas (de 3 a 5 m), diseñadas para proporcionar un pretratamiento.

A partir del caudal medio diario de diseño puede obtenerse, mediante el gráfico de la página siguiente, una estimación preliminar de las necesidades de terreno. Para situaciones climáticas intermedias puede interpolarse entre rectas. Las áreas obtenidas responden a un criterio muy conservador, e incluyen previsiones para instalaciones complementarias de pretratamiento y almacenamiento, por lo que únicamente deben emplearse en estimaciones preliminares.

El caudal medio diario de agua residual a tratar puede determinarse de forma sencilla a partir de la expresión:

$$Q_D = 365 Q_a / N$$

donde,

$Q_D$  = caudal medio diario de tratamiento

$Q_a$  = caudal medio diario de aguas residuales generadas

N = número de días operativos del sistema al año

#### Infiltración rápida:

Este sistema de tratamiento no se basa en la acción de la cubierta vegetal, por lo que no será sometido a limitaciones de uso estacional. Sin embargo, al ser sus cargas hidráulicas de mayor magnitud, deben extremarse las precauciones en los aspectos relativos a la conservación de la calidad de las aguas subterráneas.

Una estimación preliminar de las necesidades de terreno para un sistema RI puede realizarse a partir del gráfico de la figura citada, bajo las mismas consideraciones que en el caso anterior.

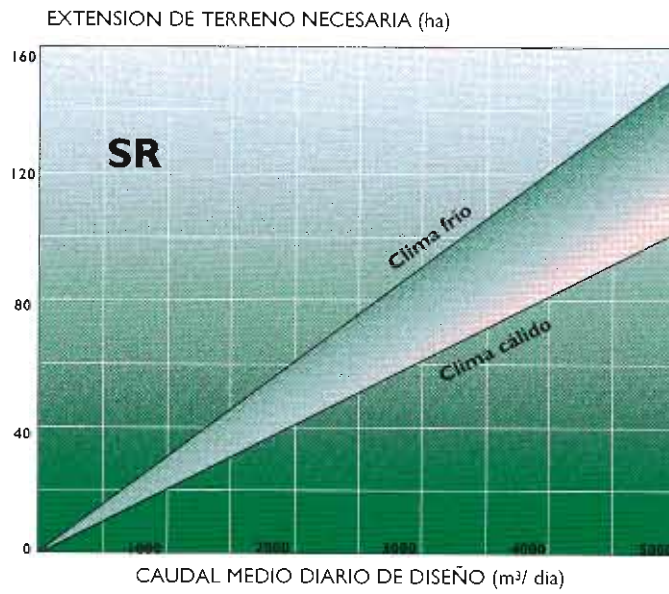
#### Flujo superficial:

La naturaleza del proceso, con flujo sobre suelos relativamente impermeables y con tratamiento por acción de la cubierta vegetal, condiciona notablemente las características del emplazamiento. Generalmente serán necesarios ciclos operativos estacionales.

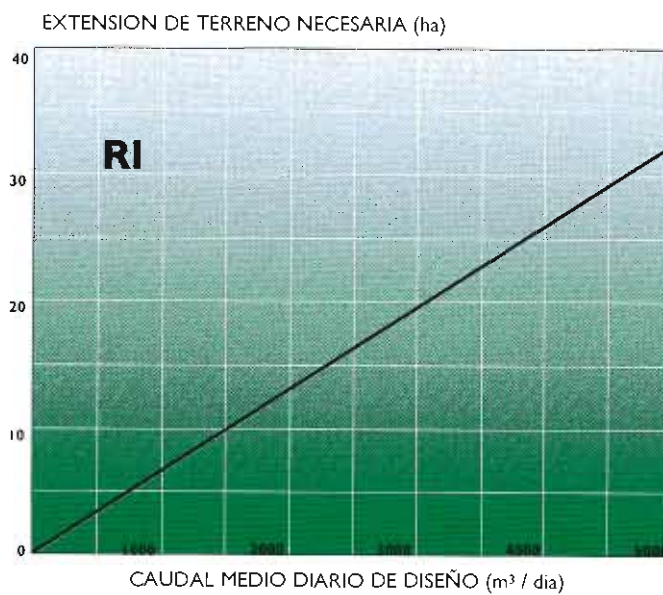
Al igual que para los sistemas anteriores, la extensión aproximada de terreno necesaria para un tratamiento mediante OF puede deducirse, a partir del caudal medio diario de aplicación, mediante el gráfico adjunto.

**Estimación preliminar de necesidades de terreno**

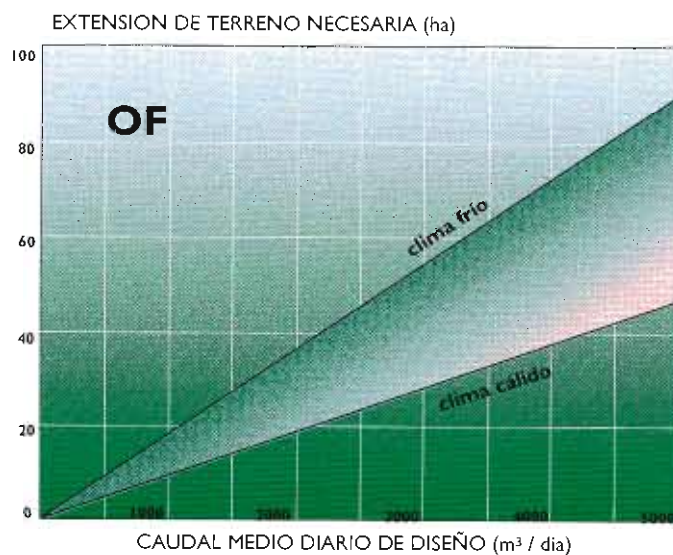
**Sistemas de infiltración lenta**



**Sistemas de infiltración rápida**



**Sistemas de flujo superficial**



## Sistemas acuáticos

En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquéllos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a lo largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son: humedales, lagunajes y cultivos acuáticos.

Los *humedales* son sistemas en los que el agua fluye continuamente, cuya superficie libre permanece al nivel del suelo, o por encima del mismo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo período del año. Existen humedales de tratamiento creados a partir de zonas húmedas naturales, y humedales construidos artificialmente. Los humedales de origen natural forman parte del sistema de escorrentía superficial de la zona, por lo que en caso de ser utilizados para la depuración de aguas residuales, han de observarse las normas limitativas respecto a la calidad del agua vertida.

Los humedales construidos forman parte del sistema de depuración proyectado. Suelen tener un fondo o base impermeable sobre la que se deposita un lecho de gravas, suelo u otro medio para el desarrollo de las plantas, que constituyen el principal agente depurador. Existen dos tipos de humedales construidos, dependiendo de la situación del nivel de agua: el denominado de superficie libre de agua (en la literatura anglosajona, *free water surface*, FWS), en el que el agua está en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal del oxígeno para aireación; y el denominado de flujo subsuperficial (*vegetated submerged beds*, VSB), donde la superficie del agua se mantiene a nivel de la superficie del lecho permeable o por debajo de la misma. La transferencia de oxígeno desde las hojas hasta las raíces de las plantas, actúa como mecanismo suministrador de oxígeno al agua. La presencia de plantas emergentes con raíces es esencial en ambos tipos de sistemas. La carga hidráulica anual aplicada

varía en el rango de 3 a 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de sistema, características del agua de alimentación, límites impuestos al efluente, etc.

Los sistemas de *lagunaje* son muy conocidos desde hace siglos. El tratamiento o proceso de depuración se produce gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que tienen lugar en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos producidos tienen relación con: sedimentación, oxidación, fotosíntesis, aireación, evaporación, digestión, etc. Entre las ventajas de los sistemas de depuración por lagunaje cabe destacar su estabilidad frente a variaciones de caudal y carga contaminante, y sus bajos costos de exploración y mantenimiento. Por contra, entre las principales desventajas hay que citar: necesidad de grandes superficies de terreno, presencia de olores cuando se alcanzan condiciones anaerobias, y elevada concentración de microorganismos en el efluente. Aunque son sistemas naturales, se incluyen habitualmente dentro de los sistemas convencionales de tratamiento debido a la amplia experiencia existente en su uso y explotación.

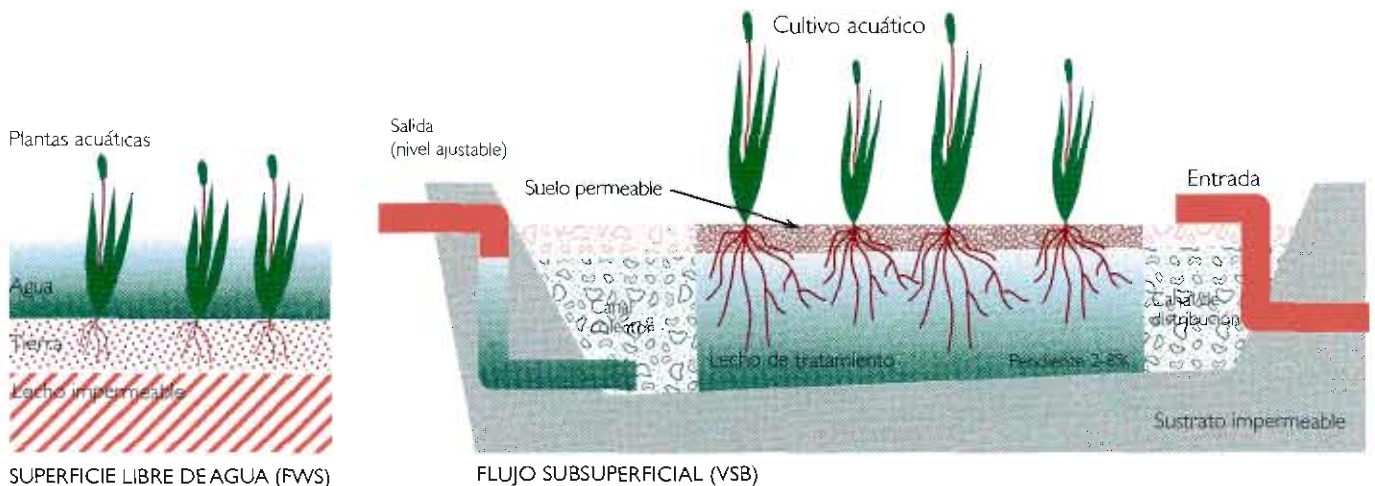
Los llamados sistemas de *plantas flotantes o cultivos acuáticos* son básicamente una variante del lagunaje, en la que se introduce el cultivo de plantas flotantes, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen sustrato responsable de una parte importante del tratamiento.

Además de aportar tratamiento, las plantas flotantes evitan la entrada de la luz solar al estanque, deteniendo así el crecimiento de las algas. Estos sistemas han sido utilizados también como medios de producción de proteínas o biomasa, en cuyo caso la depuración de agua constituye un objetivo secundario del proyecto.

Las plantas más comúnmente cultivadas son los jacintos de agua, existiendo amplia documentación sobre estos cultivos. El clima es un factor limitativo de su rendimiento, ya que las plantas sólo crecen a determinadas temperaturas.

Estos sistemas de cultivo acuático suelen utilizarse como afino incorporados a otra cadena de procesos, empleándose generalmente como tratamiento terciario. En operaciones

### Representación esquemática de los humedales de tratamiento





### Carga contaminante de los efluentes de sistemas acuáticos

Constituyente	Humedales			Lagunajes		Cultivos acuáticos	
	FWS	VSB	Facultativo	Oxidación	Parcialmente aireadas	Jacinto aliment. con efluente primario	Jacinto aliment. con efluente secundario
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	10-20	5-10	30-40	20-40	30-40	<30	<10
SS (mg/l)	10	5-15	40-100	80-140	30-60 <sup>(1)</sup>	<30	<10
Nitrógeno total (mg/l)	<10	5-20	-	-	-	-	<5 <sup>(2)</sup>
Fósforo total (mg/l)	<6	5-10	-	-	-	-	<5 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Los sólidos en suspensión del efluente dependen de la concentración de algas en las balsas.

<sup>(2)</sup> La eliminación de N y P en cantidades significativas requiere la cosecha periódica de las plantas.

- Valores no disponibles.

bien controladas, en las que las plantas se cosechan periódicamente, se pueden alcanzar rendimientos altos en la depuración. La carga orgánica admitida por estos procesos es del orden de 30-50 kg/ha.día, lo que para aguas de moderada carga contaminante (DBO: 240 mg/l), significa una carga hidráulica anual del orden de 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

#### Mecanismos de depuración y rendimientos

Como ya se ha indicado, la presencia de vegetación en los humedales tiene la finalidad de transmitir el oxígeno desde las hojas hasta las raíces, donde se produce la interacción planta-agua durante los procesos de nitrificación-desnitrificación. En estos procesos la temperatura es un factor muy influyente, que ha de tenerse en consideración a la hora de proyectar los sistemas. A veces, para mejorar el rendimiento, puede ser necesario recircular una parte del efluente como aporte extra de oxígeno.

La eliminación del fósforo es limitada en estos procesos, debido a la falta de contacto con el suelo, que constituye el elemento de adsorción y precipitación.

En la tabla se presenta una relación de valores indicativos de la calidad del efluente generado en los diferentes tipos de sistemas acuáticos, expresada en términos de DBO<sub>5</sub> y concentración de sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo. Estos valores, obtenidos a partir de datos generales más o menos comunes a todos los procesos, resultan meramente orientativos a efectos de seleccionar los más viables, por lo que no deben emplearse para el estudio detallado de sistemas.

Entre los sistemas acuáticos, los humedales se muestran como los más efectivos en la depuración de aguas residuales.

Los sistemas de lagunaje se utilizan habitualmente como tratamiento secundario, por lo que su principal objetivo es la reducción de la DBO. La eliminación de nitrógeno y de fósforo en estos sistemas es muy limitada. Para mejorar los resultados del tratamiento, a veces es necesaria la adición de compuestos químicos.

Los sistemas de plantas flotantes, como ya se ha mencio-

nado, tienen habitualmente una finalidad de afino tras el tratamiento secundario, por lo que los efluentes conseguidos son de muy buena calidad. En la tabla comparativa se han incluido dos casos diferentes según que el agua de alimentación proceda de un tratamiento primario, o de un tratamiento secundario. En el primer caso, el papel principal de las plantas flotantes es evitar la penetración de la luz solar y controlar el crecimiento de algas.

#### Caracterización de emplazamientos

En los sistemas acuáticos, los procesos de depuración se producen fundamentalmente en el seno del agua, por lo que las características del emplazamiento son menos críticas que en los sistemas de aplicación al terreno. Si bien es conveniente disponer de suelos impermeables, la compactación del terreno o el empleo de membranas permiten dotar al emplazamiento de las características adecuadas.

Uno de los factores más limitativos es la disponibilidad de cauces superficiales que admitan el vertido de los efluentes finales. Asimismo, hay que valorar la proximidad a la fuente de agua residual que se desea depurar y la posibilidad de transporte por gravedad entre el foco productor, el sistema acuático de depuración y el punto de vertido.

En aquellos sistemas que requieren excavaciones (balsas profundas, humedales construidos, etc.), debe controlarse la presencia de acuíferos poco profundos que pudieran interactuar con el sistema acuático.

La disponibilidad de superficie para la creación de balsas o humedales es el primer factor a considerar durante la selección de emplazamientos para sistemas acuáticos. A este respecto, la fórmula siguiente permite realizar un primer cálculo de las necesidades de superficie:

$$A = \frac{K_i q}{1000}$$

donde A es la superficie necesaria (ha), K<sub>i</sub> un coeficiente

### Requerimiento de superficie en sistemas acuáticos

Sistema	Condiciones de operación	Valor $K_1$
Lagunaje Aerobio (oxidación)	Clima templado. Tiempo de residencia 30 días. Carga orgánica <90 kg/ha.día	3.2
Lagunaje Facultativo	Clima templado. Tiempo de residencia 60 días. Carga orgánica <60 kg/ha.día	5.1
Lagunaje Facultativo	Clima templado. Tiempo de residencia 80 días. Carga orgánica >80 kg/ha.día	8.5
Cultivo de Jacintos de Agua.	Clima templado. Tiempo de residencia 50 días. Carga orgánica <30 kg/ha.día	9.5
Tratamiento secundario		
Cultivo de Jacintos de Agua.	Alimentación con efluente secundario. Tiempo de residencia 6 días.	0.71
Tratamiento terciario	Carga orgánica <60 kg/ha.día	
Humedal con superficie libre de agua (FWS)	Tiempo de residencia 7 días. Carga orgánica <100 kg/ha.día	8.2
Humedal con superficie de agua a nivel del suelo (VSB)	Tiempo de residencia 7 días. Carga orgánica <150 kg/ha.día	2.7

### Costes de construcción y costes operacionales de los diferentes métodos naturales de tratamiento

(Para sistemas de 400 m<sup>3</sup>/día de capacidad)

Sistema	Coste de Construcción (ptas/m <sup>3</sup> /d)	Coste específico de Tratamiento (ptas/m <sup>3</sup> )
<b>Aplicación al terreno</b>		
Infiltración lenta	140.000 - 350.000	16-32
Infiltración rápida	70.000 - 150.000	8-15
Flujo superficial	100.000 - 180.000	12-25
<b>Acuáticos</b>		
Lagunas facultativas	80.000 - 160.000	12-22
Lagunas aireadas	100.000 - 2.00.000	16-25
Cultivos acuáticos	80.000 - 160.000	12-24
Humedales construidos	70.000 - 150.000	6-15

variable según el sistema y las condiciones de operación, y  $q$  el caudal diario a tratar en m<sup>3</sup>/día.

En la tabla se recogen los valores de  $K_1$  para diferentes sistemas y condiciones de operación.

### Economía de los métodos naturales

La descripción de las características de los diferentes tipos de métodos naturales de tratamiento de aguas residuales anteriormente expuesta, proporciona los criterios necesarios para seleccionar, de forma preliminar, los que resulten más viables para el objetivo de depuración propuesto. No obstante, las hipótesis planteadas deberán ser revisadas y,

en su caso, confirmadas en base a datos más concretos, obtenidos mediante un reconocimiento detallado de los posibles emplazamientos.

Una vez culminada esta fase, se procede a realizar un análisis preliminar de costes, que proporciona nuevos criterios objetivos al proceso de selección. Adoptando unas bases comunes de cálculo para los diferentes sistemas, así como condiciones de operación similares, se ha elaborado el cuadro comparativo de costes de construcción y costes específicos del tratamiento que se adjunta. Los valores fueron obtenidos a partir de estadísticas referentes a sistemas operativos en los Estados Unidos, por lo que tienen únicamente carácter orientativo.