

# Tecnologías de depuración avanzada para la reutilización de las aguas residuales: la infiltración-percolación

M. SALGOT (\*); M. FOLCH (\*); C. VERGÉS (\*\*); F. BRISSAUD (\*\*); G. PEÑUELAS (\*\*\*); J. PIGEM (\*\*\*\*)

**RESUMEN** En el marco de la optimización de los recursos hídricos en las zonas áridas y semiáridas debe plantearse la reutilización de las aguas residuales en combinación con los procesos convencionales de depuración, especialmente los sistemas de lodos activados. El planteamiento requiere el uso de tratamientos adicionales, avanzados o terciarios, para conseguir calidades de agua recuperada que permitan la reutilización con un riesgo sanitario mínimo.

Dentro de este contexto se ha estudiado la optimización del método de infiltración-percolación, empleando diversas cargas hidráulicas para establecer la efectividad del sistema y la posibilidad de establecer combinaciones con otros tratamientos, especialmente de desinfección. Para ello se cuenta con dos plantas a escala real, situadas en Palamós (Gerona) y Piera (Barcelona) en las que se han analizado los parámetros biológicos (coliformes fecales, bacteriófagos y huevos de helminto) y físico-químicos (pH, conductividad, DQO, SS,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) con distintas cargas hidráulicas.

La evaluación de los resultados permite determinar que existe una carga hidráulica hasta la cual se consigue un grado elevado de desinfección; a partir de este límite, la eficacia de desinfección disminuye pero se sigue manteniendo una eliminación total de los sólidos en suspensión, una reducción muy importante de la DQO y una transformación casi total del amonio a nitratos.

El sistema de tratamiento permite la obtención de un efluente de muy buena calidad, que se puede emplear directamente o con una desinfección complementaria para cualquier tipo de reutilización, especialmente la relacionada con los sistemas de riego agrícola, urbano o de espacios verdes.

Se indican los futuros desarrollos del método, especialmente las posibles combinaciones con otros métodos de desinfección. Se evalúa el tratamiento en función de la reutilización prevista, teniendo en cuenta los caudales depurables, la relación coste/beneficio, las necesidades de espacio,...

## ADVANCED DEPURATION TECHNOLOGIES FOR THE REUTILIZATION OF RESIDUAL WATERS: INFILTRATION-PERCOLATION

**ABSTRACT** *When considering the optimisation of water resources in arid and semiarid areas, wastewater reclamation and reuse must be considered in relationship with conventional wastewater treatment processes, mainly activated sludge systems. Nevertheless, additional reclamation treatments, advanced or tertiary, are needed in order to obtain water with a quality that could allow the reuse with minimal health hazards.*

*Infiltration-percolation technology has been studied using different hydraulic loads in order to optimise and establish the effectiveness of the system and the possibility to combine it with disinfection systems. Two full scale plants were used for this purpose, located in Palamós (Gerona province, Spain) and Piera (Barcelona province, Spain). Reclaimed wastewater was analysed for microbiological (faecal coliforms, bacteriophage and helminth eggs) and physico-chemical parameters (pH, E.C., COD, SS,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) with different hydraulic loads as indicated before.*

*When evaluating results could be established that there is a maximum hydraulic load until when good disinfection results are obtained; beyond this limit the disinfection performances diminish, but total elimination of suspended solids, good COD reduction, and quite complete transformation of  $\text{NH}_4^+$  to  $\text{NO}_3^-$ , are still obtained.*

*This reclamation system generates a good quality effluent, useful for reuse either directly or with an additional disinfection, to be used for any purpose, especially agricultural, urban or green areas irrigation*

*Further developments of the technique, mainly in combination with disinfection procedures are indicated. The treatment is evaluated taking into account the scheduled reuse, amount of water to be reclaimed, cost/benefit relationship, surface needed,...*

**Palabras clave:** Infiltración; Percolación; Reutilización; Depuración; Recuperación; Nemátodos; Coliformes; SAT; Osmosis inversa; Ultrafiltración.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los planes de reutilización de aguas residuales prevén el uso de las aguas regeneradas principalmente en agri-

cultura, parques públicos, y campos de golf. Estos usos requieren que el agua tenga una buena calidad, especialmente si el riego es superficial. De acuerdo con las recomendaciones de la OMS y francesas, y de las autoridades sanitarias de Baleares, Andalucía y Cataluña; deben eliminarse completamente los huevos de nemátodo y los contenidos en coliformes fecales deben ser inferiores a  $10^3$  UFC/100 ml (WHO 1989, CSHPF 1991, Salgot *et al.*, 1994).

Por otra parte, no se establecen en las recomendaciones mencionadas límites para el contenido en virus, lo que desde nuestro punto de vista debería ser subsanado. Se debe considerar el riesgo derivado de la presencia de virus, no calculable a

(\*) Facultad de Farmacia. Universitat de Barcelona.

(\*\*) AGBAR.

(\*\*\*) Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II.

(\*\*\*\*) Junta de Sanejament, Generalitat de Catalunya.

(\*\*\*\*\*) SEARSA.

partir de los datos de coliformes fecales (Crook and Surampalli, 1996).

Deberían proponerse restricciones adicionales a la calidad del agua, como son el establecimiento de unas distancias mínimas entre lugares de riego y carreteras y zonas residenciales, así como la obligación de regar de noche o la prohibición del riego con vientos fuertes, si se pretende reducir los riesgos de regar con agua residual a un mínimo aceptable.

En España la mayor parte de las depuradoras de aguas residuales llevan a cabo tratamientos secundarios que generan aguas de una calidad no suficiente para los usos propuestos. En principio, se ha propuesto la desinfección de las aguas residuales para poder cumplir lo que se indica como calidad microbiológica. En este sentido, la efectividad de los procedimientos convencionales de desinfección, especialmente cloración y radiación UV, está estrechamente relacionada con la calidad físico-química de los efluentes, principalmente con los contenidos de materia orgánica, sólidos en suspensión y determinadas formas de nitrógeno. Conociendo las calidades obtenidas con los tratamientos secundarios habituales, podemos afirmar que se requieren unos tratamientos terciarios del agua residual previos a la desinfección.

El óptimo deseable sería disponer de tecnologías capaces de dar un tratamiento terciario y al mismo tiempo una desinfección adecuada. Algunas tecnologías cumplen este requisito, especialmente las de membrana, como la ósmosis inversa y la ultrafiltración. La primera es excesivamente cara para la regeneración de aguas residuales, y, en cuanto a la segunda, podemos decir que está en fase de desarrollo, aunque es prometedora para caudales comparativamente elevados o cuando no se dispone de espacio para soluciones extensivas como el lagunaje terciario. Estas soluciones extensivas son, en comparación, mucho más baratas y manejables tecnológicamente.

Los autores han desarrollado un método de tratamiento terciario extensivo, la Infiltración-Percolación modificada (IPm), que cumple las condiciones de calidad expuestas, con la ventaja de requerir menos espacio que los sistemas de lagunaje y que tiene la facilidad de poderse adaptar a distintas calidades de agua residual, incluso procedente de tratamientos primarios.

En cuanto a esta técnica alternativa, podemos mencionar que los predecesores han sido los sistemas SAT (Tratamiento Suelo-Acuífero) y los sistemas de Infiltración-Percolación a través de lechos de arena, que se estudiaron en Arizona (Rice and Bouwer, 1984, Bouwer 1991), e Israel (Shelef, 1991), y de forma más sofisticada y modernizados en Francia (Brissaud and Lesavre, 1993), España (Salgot *et al.*, 1996) y Marruecos (Guessab *et al.*, 1993). Estos sistemas de Infiltración-Percolación modificada (IPm) se alimentan de forma secuencial con efluentes secundarios o primarios de buena calidad que percolan a través de 1,5 a 2 metros de arena no saturada, de granulometría definida, y se recuperan mediante sistemas de drenaje.

En estos sistemas, los microorganismos se eliminan mediante numerosos procesos físicos, físico-químicos y biológicos interrelacionados, especialmente filtración, adsorción y degradación microbiana. Se ha descrito también que la eliminación de huevos de nemátodo es realmente efectiva (Guessab *et al.*, 1993). La eficiencia en la eliminación de coliformes depende principalmente de los tiempos de detención del agua en los filtros y de la capacidad de oxidación del agua filtrada (Schmitt, 1989, Makni, 1995).

Los tiempos de detención están relacionados con la carga hidráulica, el fraccionamiento de la alimentación y la existencia de caminos preferenciales. La oxidación del agua filtrada y los tiempos de detención del agua dependen de la homogeneidad de la velocidad de infiltración. La aspersión del agua residual sobre el lecho de filtración con un sistema de riego mediante pivote mejora la homogeneidad de la aplicación y la velocidad de infiltración (Salgot *et al.*, 1996).

Se ha dispuesto para la experimentación de dos plantas de demostración construidas en Vall-Llobrega (provincia de Gerona) y Piera (provincia de Barcelona, España) para evaluar el funcionamiento de la IPm en el afinado de efluentes secundarios. Se han analizado los contenidos de huevos de helminto, coliformes fecales y bacteriófagos (como indicadores de virus) y diversos parámetros físico-químicos, así como la relación con la carga hidráulica aplicada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### PLANTAS DE DEMOSTRACION

La depuradora del sistema de Palamós-Palafrugell, ubicada en Vall-Llobrega, sirve a 32.000 habitantes durante el invierno y hasta a 60.000 en verano. Dispone de un filtro circular de IPm, con un espesor de 1,5 m de arena, y está alimentado con efluente secundario mediante un pivote de riego equipado con aspersores diseñados para no producir aerosoles y cuyo flujo es proporcional a la distancia del centro del pivote. Los aspersores están colocados a 0,5 metros por encima de la superficie de arena recubierta de césped. La alimentación es de caudal constante y aporta 20 m<sup>3</sup>/hora. Las variaciones de caudal aportado se consiguen haciendo que el pivote de más o menos vueltas al día. La superficie regada es aproximadamente de 575 m<sup>2</sup>. Una vuelta entera del pivote tarda 1 hora y 10 minutos, aportando 4,1 cm de agua.

El movimiento del pivote y el bombeo pueden programarse. La superficie está dividida en 10 sectores iguales, que pueden dejarse sin riego individualmente. Esta planta está en funcionamiento desde principios de 1992.

La planta depuradora de Piera está sobredimensionada y, además, parte del agua que entra en ella procede de infiltraciones de agua subterránea a la red de colectores, por lo que el agua residual de llegada está diluida en una proporción importante por agua limpia. El filtro de IPm, construido en 1995 con un espesor de 1,5 m de arena, es semicircular, tiene una superficie útil de 334 m<sup>2</sup> y su caudal de alimentación es de 12 m<sup>3</sup>/hora. La ida y vuelta del pivote de alimentación toma 50 minutos, dando un aporte de agua de 3 cm en cada paso. Las características restantes son idénticas a las del filtro anterior.

Ambos filtros trabajan de modo que todos los sectores están regados 5 días y descansan 2. Se investigó la capacidad de desinfección para cargas hidráulicas entre 16 y 67 cm/día

### MUESTREO Y ANÁLISIS

En Vall-Llobrega se ha estado trabajando desde 1992, aunque los resultados que representamos corresponden al período entre 1995 y 1997. Se consideraron 6 cargas hidráulicas: 16, 25, 33, 41, 55 y 67 cm/día, que corresponden respectivamente a 4, 6, 8, 10 y 16 vueltas del pivote por día. En cada carga se procedió a realizar controles físico-químicos y microbiológicos durante una secuencia de riego (el tiempo entre dos pasos consecutivos del pivote por un mismo punto). Se recogieron 3 muestras de efluente terciario en intervalos de 35 minutos al principio, mitad y final de la secuencia de riego, así como una muestra del efluente aplicado.

En Piera, controlado durante 1996 y 1997, se llevaron a cabo análisis microbiológicos en las aguas filtradas (3 muestras en intervalos de 1 hora) para las cargas hidráulicas de 22 y 31 cm/día; en intervalos de 17 minutos (3 muestras) para 52 cm/día y en intervalos de 12 minutos (5 muestras) para la carga de 68 cm/día. En todos los casos se analizó también una muestra del agua aportada al filtro.

Para los análisis físico-químicos se realizaron determinaciones con muestras medias procedentes de las anteriores.

Los parámetros físico-químicos y los coliformes fecales se analizaron como se especifica en el "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (1995). Para los bacteriófagos F<sup>+</sup> y CN13 se empleó la técnica de doble capa propuesta por Adams (1959) y los huevos de helminto mediante la técnica de la OMS (1989) modificada por Schwartzbrod (1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 1, 2, 3 y 4, se indican los resultados obtenidos.

CARGA HIDRÁULICA	C.E. ENTRADA	C.E. SALIDA	pH ENTRADA	pH SALIDA
0,165	1520	1230	7,90	7,30
0,247	1950	1750	7,50	7,20
0,330	1370	1315	7,80	7,12
0,412	1600	1500	7,90	7,10
0,550	1664	1585	7,80	7,10

TABLA 1. Datos de CE (mS/cm) y pH de entrada y salida del sistema de Infiltración-percolación, con 5 cargas hidráulicas distintas.

CARGA HIDRÁULICA	SS ENTRADA	SS SALIDA	DQO ENTRADA	DQO SALIDA
0,165	17	2	70	49
0,247	7	3	58	44
0,330	17	2	96	54
0,412	7	2	176	58
0,550	5	1	186	45

TABLA 2. Datos de SS (mg/l) y DQO (mg/l) de entrada y salida del sistema de Infiltración-percolación, con 5 cargas hidráulicas distintas.

CARGA HIDRÁULICA	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ENTRADA	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> SALIDA	N-NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> ENTRADA	N-NH <sub>3</sub> <sup>-</sup> SALIDA
0,165	29,33	0,87	0,60	76,00
0,247	37,92	1,62	0,00	33,10
0,330	34,00	1,42	0,00	35,44
0,412	39,67	4,49	0,00	83,95
0,550	17,57	1,60	0,90	21,49

TABLA 3. Datos de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/l) y N-NH<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l) de entrada y salida del sistema de Infiltración-percolación, con 5 cargas hidráulicas distintas.

## RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS

Para todos los parámetros, podemos indicar una cierta variabilidad del efluente secundario de la depuradora de Vall-Llobrega. Las variaciones de la DQO pueden tener una cierta influencia en el rendimiento de la depuración.

Por lo que respecta a la calidad del efluente terciario, podemos indicar que la eliminación de sólidos en suspensión fue realmente efectiva y que la eliminación de la materia orgánica no depende de la carga hidráulica (para las cargas empleadas). En ningún caso, la DQO residual superó los 58 mg/l, y el 90% del nitrógeno Kjeldahl fue oxidado. Las cantidades excesivas de nitratos encontradas se debieron a arrastres de este anión debido a que las muestras se tomaron después del periodo de reposo semanal del filtro.

La carga contaminante del sistema de Piera fue muy baja, debido a las circunstancias ya indicadas, con excepción de unas pruebas que se llevaron a cabo con afluente procedente del pre-tratamiento.

En todos los casos se consiguió una excelente eliminación de la DQO, independientemente de la carga hidráulica. Debido a las características de la planta, la mayor parte del nitrógeno ya se encontraba en forma oxidada antes de llegar al tratamiento terciario. La eliminación de sólidos en suspensión fue excelente en todos los casos.

## RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS

No se detectaron huevos de helminto en ninguna de las dos plantas, comprobando así las aseveraciones de Guessab et al. (1993). En las tablas correspondientes se encuentran los valores de los contajes de microorganismos expresados en unidades logarítmicas.

Los contenidos de coliformes fecales de la planta secundaria de Vall-Llobrega varían poco, mientras que los de Piera no siguen un modelo uniforme. Prácticamente siempre se obtienen contajes del orden de las 2-3 unidades logarítmicas, lo que indica una buena reducción de este indicador.

Por lo que respecta a los contenidos en bacteriófagos, su evaluación se hace difícil, ya que se está procediendo a los ensayos de estos organismos como indicadores de contaminación vírica (IAWPRC, 1991). De todas formas, se puede definir una reducción para los dos tipos controlados. No se puede hablar de una correlación entre reducción de bacteriófagos y carga hidráulica.

## CONCLUSIONES

Estamos trabajando con un sistema de tratamiento terciario que permite la obtención de efluentes adecuados para la reutilización de aguas residuales en riegos no restringidos según los criterios de la OMS.

No es preciso proceder a desinfecciones posteriores, excepto para aquellos casos en que se requiera una calidad del agua regenerada próxima a la del agua potable (reutilización en parques urbanos, por ejemplo).

Entre las ventajas del sistema puede citarse que no elimina los nutrientes que serán útiles en la reutilización agrícola.

La IPm es un sistema que puede ser empleado con mayor o menor tecnificación en numerosas circunstancias, con poco coste de mantenimiento y con una instalación comparativamente barata.

CARGA HIDRÁULICA	CF ENTRADA	CF SALIDA	BACTERIÓFAGOS CN13 ENTRA.	BACTERIÓFAGOS CN13 SAL.	BACTERIÓFAGOS F <sup>+</sup> ENTRADA	BACTERIÓFAGOS F <sup>+</sup> SALIDA
0,165	5,14	1,42	4,82	1,99	3,83	2,06
0,247	4,82	1,25	4,83	1,51	3,83	1,35
0,330	4,28	0,25	4,68	1,69	3,63	2,57
0,412	5,11	1,51	4,42	2,17	3,43	1,90
0,550	5,20	1,68	4,60	1,17	1,20	1,17

TABLA 4. Datos de Coliformes fecales (log ufc/100 ml), y colifagos CN13 y F<sup>+</sup> (log ufp/100 ml) de entrada y salida del sistema de Infiltración-percolación, con 5 cargas hidráulicas distintas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer constar que las instalaciones y los trabajos han sido financiados en parte por ayudas de la Unión Europea (Programa Avicena, Contrato 93AVI076). También desean agradecer la ayuda de los Sres. David López y Daniel Gómez y el personal de la depuradora de Palamós, de SEARSA, en el funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones.

La Sra. Claudia Campos ha colaborado en las determinaciones analíticas de colifagos.

## REFERENCIAS

- ADAMS, M. (1959) Bacteriophages. Interscience Publisher, New York.
- ASANO, T.; LEONG, L. Y.; RIGBY, M. G. and SAKAJI, R. H. (1992) Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Wat. Sci. Tech.* **26** (7-8):1513-1524.
- BANCOLÉ, A. (1995). Influence du mode d'application des eaux usées sur leur décontamination bactérienne en infiltration percolation. Mémoire DEA, Univ. Montpellier 2, 87 pp.
- BOUWER, H. (1991) Ground water recharge with sewage effluent. *Wat. Sci. Tech.* **23**: 2099-2108.
- BRISSAUD, F. and LESAVRE, J. (1993) Infiltration percolation in France: 10 years experience. *Wat. Sci. Tech.* **28** (10): 73-81.
- CROOK, J. and SURAMPALLI, R. Y. (1996) Water reclamation and reuse criteria in the U.S. *Wat. Sci. Tech.* **33** (10-11):451-462.
- CSHPF (1991) Recommandations sanitaires concernant l'utilisation, après épuration, des eaux résiduaires urbaines pour l'irriga-

tion des cultures et des espaces verts. Circulaire DGS/SDI n° 51, CSHPF, Ministère chargé de la Santé, 40 pp.

GUESSAB, M.; BIZE, J.; SCHWARTZBROD, J.; MAUL, A.; NIVAUULT, N. and SCHWARTZBROD, L. (1993) Wastewater treatment by infiltration percolation on sand: results in Ben Sergao, Morocco. *Wat. Sci. Tech.*, **27** (9):91-95.

IAWPRC (1991). Bacteriophages as model viruses in water quality control. *Wat. Res.* **25**(5):529-545.

MAKNI, H. (1995). L'oxydation et la décontamination en infiltration percolation. Th. Doct. Montpellier II, 163 pp.

RICE, R. C. and BOUWER, H. (1984) Soil-aquifer treatment using primary effluent. *J. Water Poll. Contr. Fed.*, **56** (1):84-88.

SALGOT, M.; CORTÈS, A.; GOMÀ, P. and PASCUAL, A. (1994) Prevenció del risc sanitari derivat de la reutilització d'aigües residuals depurades com a aigües de reg. Direcció General de Salut Pública. Departament de Sanitat i Seguritat Social. Generalitat de Catalunya. Barcelona, 51 pp.

SALGOT, M.; BRISSAUD, F. and C. CAMPOS (1996). Disinfection of secondary effluents by infiltration-percolation. *Wat. Sci. Tech.* **33** (10-11):271-276.

SCHMITT, A. (1989) Modélisation de l'épuration par infiltration. Th. Doct. Montpellier II, 297 pp.

SHELEF, G. (1991) Wastewater reclamation and water resources management. *Wat. Sci. Tech.* **24** (9):251-265.

WHO, (1898) Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Tech. Rep. Series 778 (WHO Geneva), 74 pp.



# Tecnología Canaria del Agua

## Empresa Canaria que diseña y construye:

- Plantas desaladoras de agua de mar y salobre.
- Plantas de tratamientos de aguas residuales.
- Plantas Potabilizadoras e intercambio iónico.
- Plantas Pilotos y Experimentales.
- Explotación y mantenimiento de instalaciones de tratamiento.
- Plantas de preparación de aguas para la industria.

