

AVANCES EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL.  
LIBRO DE TEXTOS  
COMPLETOS DE LAS  
JORNADAS INTERNACIONALES  
DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
Volumen: 2

AGUAS



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA  
Departamento de Ingeniería Química  
y Ambiental



UNIVERSIDAD  
DE MURCIA

CARTAGENA DEL 9 AL 10 DE ENERO DE 1999

Ficha Técnica:

Título: Avances en Ingeniería Ambiental. Libro de textos completos de la Jornadas Internacionales de Ingeniería Ambiental.

Volumen 2: Aguas.

Coordinadores del volumen 2: Stella Moreno Grau, José Moreno y Javier Bayo.

ISBN Obra completa: 84-95781-00-X

ISBN volumen 2: 84-95781-02-6

Depósito Legal: MU-1.835-2002

Edita: Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Universidad Politécnica de Cartagena

Imprime: LOYGA Artes Gráficas - Cartagena

No está permitida la reproducción de esta obra, ni su transmisión en forma o medio alguno, sea electrónico, mecánicos, fotocopia, o de cualquier otro tipo sin permiso previo y por escrito del editor.

La Información contenida en esta publicación constituye únicamente, y salvo error u omisión involuntarios, la opinión de sus autores con arreglo a su leal saber y entender, opinión que subordinan tanto a los criterios que la jurisprudencia establezca, como a cualquier otro criterio mejor fundado.

Ni el editor, ni el autor, pueden responsabilizarse de las consecuencias, favorables o desfavorables, de actuaciones basadas en las opiniones o informaciones contenidas en esta publicación.

# COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DEPURADOR DE AGUA RESIDUAL URBANA UTILIZANDO TRES SISTEMAS EXPERIMENTALES DE BAJO COSTE DE MANTENIMIENTO II.- ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES

**González, J. M.; G. Ansola; E. de Luis y E. Bécares**

*Area de Ecología. Facultad de Biología.  
Universidad de León. 24071. LEÓN.*

*Tel: 987 29 15 68. Fax: 987 29 15 01. E-mail: [degigm@unileon.es](mailto:degigm@unileon.es)*

## INTRODUCCIÓN

La Directiva 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991 (DOCE, 1991a) (Tabla 1) establece una serie de requisitos para los vertidos de plantas de tratamiento de aguas residuales a más tardar, el 31 de diciembre del año 2005 para poblaciones con un número de habitantes equivalentes de 2.000 a 15.000. Dentro de esta legislación se establecen además, los requisitos de eliminación que deberán cumplir en la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) las plantas de tratamiento de agua residual en las zonas catalogadas como "sensibles", y la necesidad de establecer por cada Estado miembro estas zonas antes de 1993. En nuestro país, hasta la fecha, no se ha realizado una definición de estas zonas. Las propuestas realizadas en este sentido se correlacionan con pequeños municipios de población como es el ejemplo de la Comunidad Autónoma de Castilla y León en su libro verde (Junta de Castilla y León 1997)

**Tabla 1:** Directiva Comunitaria 91/271.

DIRECTIVA (91/271/CEE)	Unidades	Concentración máxima diaria	Rendimiento (%)
<b>Demanda Biológica de Oxígeno</b> (DBO <sub>5</sub> a 20°C)	mg O <sub>2</sub> /l	25	70-90
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg O <sub>2</sub> /l	125	75
<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	mg/l	35	90
<b>Fósforo total</b>	mg/l P	2*	80
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/l N	10 o 15**	70-80

\*: población mayor de 100,000 hab. Eq. el valor será 1 mg/l

\*\* : 10 ppm para poblaciones mayores de 100,000 hab. eq. y 15 ppm para aquellas entre 10,000-100,000 hab eq.

En la mayoría de los casos, los costes que deben satisfacer los múltiples procesos del tratamiento en los que se incluye la eliminación de nutrientes en las zonas denominadas sensibles, requieren de un elevado esfuerzo inversor en su construcción y mantenimiento.

Estos pequeños núcleos de población en su mayor parte, se encuentran ubicados en zonas muy dispersas y en enclaves de montaña o en cabecera de ríos, presumiblemente zonas que se catalogarán como sensibles y en consecuencia requerirán de tratamiento terciario esto es, eliminación de nutrientes, o bien se encuentran en zonas de páramo o meseta, pero muy ligado a actividades agro-ganaderas e igualmente condicionados al tratamiento de sus vertidos a nivel terciario según se desprende de la directiva UE 91/676 (DOCE 1991b). A ello se agrava la falta de recursos económicos propios, por lo que la solución de los sistemas de tratamiento de sus aguas residuales necesita de un mayor esfuerzo en el desarrollo de sistemas adecuados y capaces de ser mantenidos y explotados, ya que la solución de un sistema integral de tratamiento para diversos grupos de localidades, no es siempre económicamente viable.

En la provincia de León como ejemplo de lo que sucede en el resto del país, los núcleos de población menores a 10.000 habitantes suponen un 97,2 % del total, y los menores de 2.000 habitantes representan el 82,5 % de los núcleos poblacionales. Que como se refleja en la publicación I sobre esta materia, (Ansola, G *et al.*) carece de sistemas adecuados de tratamiento según los requisitos de la Directiva comunitaria.

En España se ha demostrado de forma oficial (BOE, 1995 y MOPT, 1992) que los sistemas de depuración convencionales aplicados a municipios pequeños y medianos han tenido muchos problemas de funcionamiento, estando en la actualidad parados o abandonados en su gran mayoría. Esto es debido, no a que los procesos no sean los adecuados, sino a lo elevado de sus costes de explotación. Como alternativa a los tratamientos convencionales de depuración se está desarrollando en España, sistemas de depuración de bajo coste de explotación en pequeños y medianos municipios (González, J.M. 1998).

## MATERIAL Y MÉTODOS

El campo experimental de depuración de bajo coste se sitúa en la localidad de Mansilla de las Mulas (León, España), se trata de un pueblo fundamentalmente agrícola, con una población de 1.637 habitantes, distante a unos 15 km de la ciudad de León en el cuadrante suroriental de la provincia del mismo nombre. La planta experimental está ubicada a 1 km del núcleo de la población.

El tipo climático en la zona es Mediterráneo Templado (Papadakis, 1961), caracterizado por unos niveles anuales de precipitación de 500 mm

aproximadamente, una temperatura media anual de 11 °C y una temperatura media de las mínimas de -1,1 °C.

El agua residual que abastece a los sistemas se toma directamente del colector de la población y que vierte finalmente en el río Esla. Los sistemas que han sido elegidos para la realización del ensayo han sido: humedal artificial (Wetland), laguna de alta carga (HRAP) y laguna convencional (WSP). (Ver figura 3 de la publicación I Ansola, *et al* precedente).(Tabla 2).

El diseño de la planta piloto para el humedal artificial ha sido desarrollado a partir del modelo creado por la "Fondation Universitaire Luxembourgeoise" en Arlon (Bélgica) bajo la dirección del Dr. M. Radoux (Radoux and Kemp, 1982).consta de cinco series, de 3 cubetas cada una, construidas en fibra de vidrio y de dimensiones 0,85x1,3x0,55 m, con una capacidad de 0,6 m<sup>3</sup> y 1,1 m<sup>2</sup> de superficie. Cada una de las series ha sido diseñada para 2 habitantes equivalentes, lo que ha supuesto aproximadamente 1,5 m<sup>2</sup>/he. Las características de su diseño se detallan en la publicación I Ansola *et al*, precedente.

El HRAP ha sido diseñado para 1 he. Consta de un estanque somero de 0,5 m<sup>3</sup> de volumen, 1,54 m<sup>2</sup> de superficie y una profundidad de 30 cm. En su diseño se ha tenido en cuenta las recomendaciones de Oswald, W.J. (1988) y García, J. (1996). Los tiempos de retención hidráulica han ido alternándose, entre 10, 5 y 3 días. El mecanismo de remoción del agua se ha realizado mediante aspas giratorias con una velocidad de rotación de 3 rpm, lo que ha conferido una velocidad traslacional del agua de 15 cm/seg.

El WSP, consta de una balsa de 12 m<sup>3</sup>, con una profundidad de 75 cm y una superficie de 15 m<sup>2</sup>. Se ha mantenido durante el periodo de estudio con un tiempo de retención hidráulica de 20 días.

El tratamiento primario consta de un depósito de 1 m<sup>3</sup> con un tiempo de retención de 24 horas y ha sido común a todos los sistemas ensayados.

Tabla 2.- Parámetros operacionales (valores medios)

	Q (l/d)	t.r. (d)	c.h. (cm/d)	PT (g/m <sup>2</sup> d)	NT (g/m <sup>2</sup> d)
WETLAND	300	2,91	7,7	1,10	0,95
HRAP 10	46,2	9,65	5,99	0,27	0,53
HRAP 5	92,4	4,37	7,77	0,54	1,14
HRAP 3	154	3,33	9,86	0,78	1,11
WSP	503	24,13	3,62	0,26	0,52

Q: Caudal

t.r.: tiempo de retención hidráulica

c.h.: carga hidráulica

Durante el periodo experimental, se han tomado muestras del afluente y el efluente de cada uno de los sistemas haciéndose coincidir con cada tiempo de retención. Las muestras han sido transportadas al laboratorio dentro de las 2 horas siguientes a su recogida para ser procesadas y se han analizado los siguientes parámetros: Nitrito, Nitrato, Amonio, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Ortofosfato y Fósforo Total. Los métodos analíticos utilizados se han efectuado de acuerdo con APHA,(1989).

Los rendimientos de eliminación se calcularon según:

$$\left( \frac{Ca - Ce}{Ca} \times 100 \right)$$

Donde "C" representa la concentración; "a" el afluente y "e" el efluente. Para detectar las diferencias significativas en los rendimientos de eliminación de los contaminantes de los diferentes sistemas se ha empleado un test de la "t" de Student.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3, recoge los valores medios, máximo y mínimo, así como las desviaciones típicas de los parámetros analizados en el agua residual urbana que sirve de afluente a los diferentes sistemas que configuran el ensayo, caracterizándose como un agua residual típicamente urbana (Metcalf & Eddy, 1995), observándose en alguno de los muestreos un claro aumento de la concentración de nitratos, muy posiblemente achacable al uso de nitrato amónico cálcico como fertilizante, puesto que la planta experimental está ubicada en una zona eminentemente agrícola.

**Tabla 3.-** Características físico-químicas y de nutrientes del agua residual que se utiliza como afluente.

	MEDIA	MAXIMO	MINIMO	DESV. TIPICA
pH	7,3	7,9	6,4	0,4
Conductividad (µS/cm)	481	716	379	107,4
Oxígeno disuelto (mg/l)	0,59	1,30	0,20	0,35
Ortofosfato (mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	8,1	13,7	5,6	2,7
Fósforo Total (mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	14,9	22,0	6,4	4,9
Nitrito (mg/l NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,49	0,56	0,03	0,19
Nitrato (mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	64,6	265,0	1,25	93,7
Amonio (mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	12,6	73,0	3,8	21,0
NTK (mg/l)	38,7	93,1	7,2	26,7

El análisis comparado de los rendimientos de eliminación correspondientes a los parámetros analizados, permite establecer como más destacados los siguientes aspectos:

El sistema de HRAP se conforma como el más eficaz en la eliminación de fósforo y dentro de los tiempos ensayados a mayor retención hidráulica mejores rendimientos se ofrecen, el sistema de humedal artificial obtiene una eliminación semejante al sistema de lagunaje convencional, siendo la menor eliminación ofrecida por la serie "control" del humedal artificial (Tabla 4 y Figura 1). como consecuencia de la importante precipitación y asimilación de las formas del fósforo en los sistemas basados en microalgas (Cromar 1992, Li 1991, Mesplé 1995, Nurdogan 1995)

La eliminación de nitrógeno ha sido muy dispar en cada una de las formas analizadas: Nitrato, Amonio y Nitrógeno Total. (Tabla 4)

La eliminación del Nitrógeno Total (NTK) no ha sido ostensible en todos los sistemas, alcanzándose como máximo en torno el 50%. Las mayores eficiencias se corresponden al sistema basado en helófitos seguido por el lagunaje convencional y finalmente por el HRAP, dentro del cual las mayores reducciones se producen al operar a un mayor tiempo de retención hidráulica.

**Tabla 4:** Rendimientos de eliminación medios, (%) en los parámetros estudiados para los diferentes ensayos realizados

	Ortofosfato	PT	Nitrato	Amonio	NTK
TIS	66,37	54,83	82,25	82,57	43,51
TSP	64,84	68,43	82,09	88,03	52,03
SIP	67,67	68,57	83,59	88,86	54,14
TIP	62,66	65,13	85,10	79,89	48,75
CONTROL	33,93	44,30	78,19	60,13	37,37
HRAP 10	85,52	85,44	26,12	82,30	33,42
HRAP 5	67,94	73,05	34,76	89,50	14,12
HRAP 3	65,61	78,46	52,30	90,46	7,81
WSP	61,18	68,06	38,42	89,31	27,02

La reducción de nitrato ha ofrecido unas diferencias evidentes. Con la excepción de la línea "control" dentro del sistema de macrófitos, que representa un rendimiento de eliminación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por debajo del 80%, las líneas con vegetación helofítica se sitúan mayoritariamente en torno al 80%, mientras que los sistemas de lagunaje apenas alcanzan el 50% dentro de estos la mayor eficacia corresponde al HRAP mantenido con un tiempo de retención de 3 días, que supera el 50%. (Figura 1)

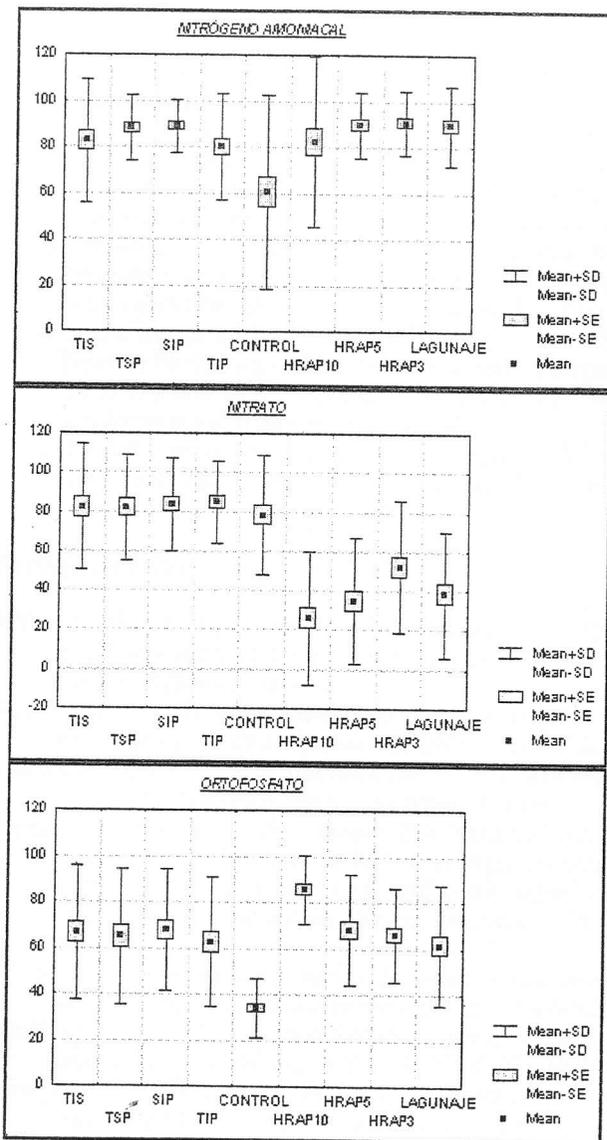


Figura 1.- Rendimientos medios de eliminación de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ , expresando la desviación típica y el error estándar en todos los sistemas ensayados.

En cuanto al Amonio su eliminación ha sido más eficaz en los sistemas basados en microalgas como el lagunaje convencional y el HRAP, relacionado con los altos valores de pH que se observaron en los sistemas y la volatilización del amonio, con eficiencias de hasta el 90% y por encima del 80%. La menor eficiencia corresponde a la línea de "control" del sistema de Wetlands que apenas alcanzó el 60% en su rendimiento de eliminación. (Figura 1)

Estas observaciones han sido confirmadas mediante un test de la "t" de Student que ha permitido comprobar la existencia o no de diferencias significativas entre los rendimientos de eliminación de los nutrientes.

Todas las líneas de macrófitos se diferencian significativamente de ambos sistemas de lagunaje en la eliminación de Nitrato (Tabla 5). En la reducción de otras formas del nitrógeno, no se ha encontrado significación de los niveles de eficacia alcanzados por los tres sistemas, y no permiten hacer una clara separación entre aquellos basados en microfitos y los que utilizan macrófitos.

La mejor eliminación de Fósforo por el HRAP a su mayor tiempo de retención hidráulico, se detecta en el test, sin embargo no con una clara significación frente al resto de sistemas y ensayos.

Tabla 5- Resultados obtenidos al comparar mediante una "t" de Student los rendimientos de los sistemas de depuración ensayados en la eliminación de nutrientes.

	Ortofósforo	HRAP10			
	HRAP3	○			
	WSP	○			

Nitrato	TIS	TSP	SIP	TIP
HRAP10	●	●	●	●
HRAP5	●	●	●	●
HRAP3	○	○	○	○
WSP	●	●	●	●

○ 95%  $p < 0,05$       ● 99%  $p < 0,01$

## CONCLUSIONES

La comparación y estudio de los resultados obtenidos pueden concluirse de la siguiente forma:

- La reducción del amonio se facilita por su volatilización a altos valores de pH que se obtienen en los sistemas basados en microalgas.
- Los sistemas con macrófitos han presentado diferencias significativas en la eliminación de Nitrato respecto a los sistemas de lagunaje analizados.
- La reducción de Fósforo ha alcanzado valores de eliminación muy semejantes en todos los sistemas ensayados, no permitiendo hacer una clara separación entre ellos a excepción del HRAP10.
- Con una misma eficiencia en la eliminación de nutrientes, el sistema de lagunaje de alta carga (HRAP), muestra unos requerimientos de superficie menores y una mayor estabilidad frente a los cambios en las condiciones climáticas que el lagunaje convencional.
- Todos los sistemas se han mostrado adecuados a los requerimientos de la U.E. para zonas catalogadas como sensibles en la eliminación de nutrientes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA-AWWA-WPCF.(1989). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. *Clesceri, L.S.; A.E. Greenberg & R.R. Trussell. 17 th Edition. Baltimore. Marylan.*
- BOE nº 113 (1995). Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales. BOE de 12 de mayo de 1995: 13808-13824.
- Borowitz, M.A. & L.J. Borowitzka. Ed. (1988). *Microalgal Biotechnology.* Cambridge University Press. Cambridge. 477 pp.
- Cromar, N.J.; N.J. Martin; N. Christofi; P.A. Read and H.J. Fallowfield, (1992). Determination of nitrogen and phosphorus partitioning within components of the biomass in a high rate algal pond: significance for the coastal environment of the treated effluent discharge. *Wat. Sci Tech.* 25 (12): 207-214.
- DOCE (1991b) Directiva el Consejo de protección de aguas contaminadas por nitratos utilizados en la agricultura. DOCE (91/676/CEE).
- DOCE nº L 135, (1991a). Directiva del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOCE (91/271/CEE). 40-52.
- García, J. (1996). Eliminació de matèria orgànica i nutrins en llacunes d'alt rendiment. Ph. D. Thesis. Universitat de Barcelona (Spain). 301 pp.
- Gersberg, R.M.; Elkins, B.V. & Goldman, C.R.. 1984. Use of artificial wetlands to remove nitrogen from wastewater. *Journal of Water Pollution Control Federation* 56:152-156.
- Gersberg, R.M.; Elkins, B.V., Lyon, S.R. & Goldman, C.R.. 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research* 20(3):363-368.
- González, J.M. and Cabo, A.(1998). Libro Blanco sobre calidad de agua en el Bierzo (León, Spain). Universidad de León. León (Spain). 222 pp.
- Green, F.B.; L.S. Bernstone; T.J. Lundquist and W.J. Oswald. (1996). Advanced integrated wastewater pond system for nitrogen removal. *Wat Sci Tech.* 33 (7): 207-217.
- Hammer, D.A. (Editor). 1990. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.* Municipal, Industrial and Agricultural. Ed. LEWIS. Michigan. 831 pp.
- Junta Castilla y León (1997). Libro Verde del Medio Ambienteen Castilla y León. Junta de Castilla y León. Salamanca. 203 pp.
- Li J.; J. Wang and J. Zhang. (1991). Removal of nutrient salts in relation with algae in ponds. *Wat. Sci. Tech.* 24 (5): 75-83.
- Mann, R.A. & Bavor, H.J.; 1993. Phosphorus removal in constructed wetlands using gravel and industrial waste substrata. *Water Science and Tecnology.* 27(1):107-113.
- Mesplé, F.; M. Troussellier, C. Casellas and J. Bontoux. (1995). Difficulties modelling phosphate evolution in a high rate algal pond. *Wat. Sci. Tech.,* 31 (12): 45-54.
- Metcalf - Eddy. INC. 1984. *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales.* Ed. LABOR S.A. 969 pp.
- Nurdogan, Y. and W.J. Oswald. (1995). Enhanced nutrients in high rate ponds. *Wat. Sci. Tech.,* 31 (12): 33-43
- Oswald, W.J. (1988). Micro-algae and waste-water treatment. In: Borowitz, M.A. & L.J. Borowitzka. Ed. (1988). *Microalgal Biotechnology.* Cambridge University Press. Cambridge. 305-328
- Papadakis P. (1961). Climatic tables for the word. *P.Papadakis, Buenos Aires.*
- Radoux, M. & Kemp, D. 1982. Approche écologique et expérimentale des potentialités épuratrices de quelques hélophytes: *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud., *Typha latifolia* L. et *Carex acuta* L. *Tribune de Cebedeau.* 465-4466(35):325-340.