

DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: LA EDAR DE LOS GALLARDOS (ALMERÍA)

AGUSTÍN LAHORA

Gestión de Aguas del Levante Almeriense, S. A. GALASA, Ctra. Nacional 340, km 533, 04620, Vera, Almería, e-mail: alahora@galasa.es

DEPURACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES

Según el Convenio de Ramsar sobre humedales, son: «Extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros» (Ramsar Convention, 1971).

Los humedales naturales son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año (Fig. 1). En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tóxicos; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo” (Tabla 1; Mitsch y Gosselink, 2000).

Se ha tratado de aprovechar este gran potencial depurador de los humedales para el tratamiento de aguas residuales, diseñando instalaciones capaces de reproducir las características de los humedales naturales.

Los humedales específicamente construidos con el propósito de controlar la contaminación del agua han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde han sido usados (Crites *et al.*, 2000). La denominación más extendida es “Humedales Artificiales” o “Humedales Construidos” (“Constructed Wetlands”; U.S. Environmental Protection Agency, 1988).

En depuración de aguas residuales, generalmente se consideran humedales aquellos sistemas que usan macrófitos (plantas que se ven a simple vista), en contraposición a los



FIG. 1.- Humedal natural en la desembocadura del Río Antas (Almería) (foto: A. Lahora).

micrófitos (generalmente microalgas), y por tanto los lagunajes no suelen ser considerados como humedales.

En España se han implantado humedales artificiales en el río Besós (Cataluña) (Alarcón *et al.*, 1997) y se han realizado experiencias en otros lugares: Cantabria (Castillo *et al.*, 1996); León (García *et al.*, 1997; García *et al.*, 1999; Soto *et al.*, 1999); Andalucía (Junta de Andalucía, 1997); Almería (Lahora, 1998, 1999); Barcelona (Pigem *et al.*, 1999).

Las clasificaciones más recientes de humedales artificiales (U.S. Environmental Protection Agency, 2000a) se hacen en función de la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera:

- “Free Water Surface” (FWS): Las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal y el flujo de agua se hace a través de las hojas y tallos de las plantas (Fig. 2).
- “Vegetated Submerged Bed” (VSB): La lámina de agua no es visible, y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las plantas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua. Son equivalentes a los humedales de flujo subsuperficial (U.S. Environmental Protection Agency, 1993). Tiene la ventaja de no

TABLA 1

Principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en los humedales.

Contaminante	Proceso de eliminación
Materia orgánica	Sedimentación
	Asimilación
	Mineralización
Sólidos en suspensión	Floculación
	Sedimentación
	Filtración
	Degradación
Nitrógeno	Amonificación
	Volatilización de amonio
	Nitrificación
	Desnitrificación
Fósforo	Adsorción
	Sedimentación
	Precipitación química
	Asimilación vegetal
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual
	Radiación UV
	Antibióticos naturales
	Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación
	Inmovilización
Metales pesados	Fijación al sedimento
	Adsorción por las plantas

producir olores ni mosquitos y de ocupar menos terreno, pero los procesos en su interior son anaerobios (Fig. 3).

Papel de los macrófitos y del sedimento

Un humedal con flujo subsuperficial, puede considerarse como un reactor biológico tipo “proceso biopelícula sumergida”. El agua entra por uno de sus extremos, y se reparte, atravesando la zona de grava sembrada con los helófitos. En el otro extremo, el agua es recogida en el fondo. El nivel máximo se regula de manera que no aflore la lámina de agua y se mantenga unos centímetros por debajo de la grava, haciendo visitable el humedal e impidiendo la proliferación de moscas y mosquitos.

Un tipo especial de macrófitos son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra aérea emergente. Los helófitos, más usados en depuración son aneas (*Typha*), carrizos (*Phragmites*), juncos (*Juncus*), *Scirpus*, *Carex*, etc.

Los helófitos son capaces de transportar oxígeno desde los tallos y hojas hacia sus raíces y rizomas, pero en los humedales de flujo subsuperficial la cantidad de oxígeno aportada es muy pequeña en comparación con la demanda de las aguas residuales, por lo que los procesos de

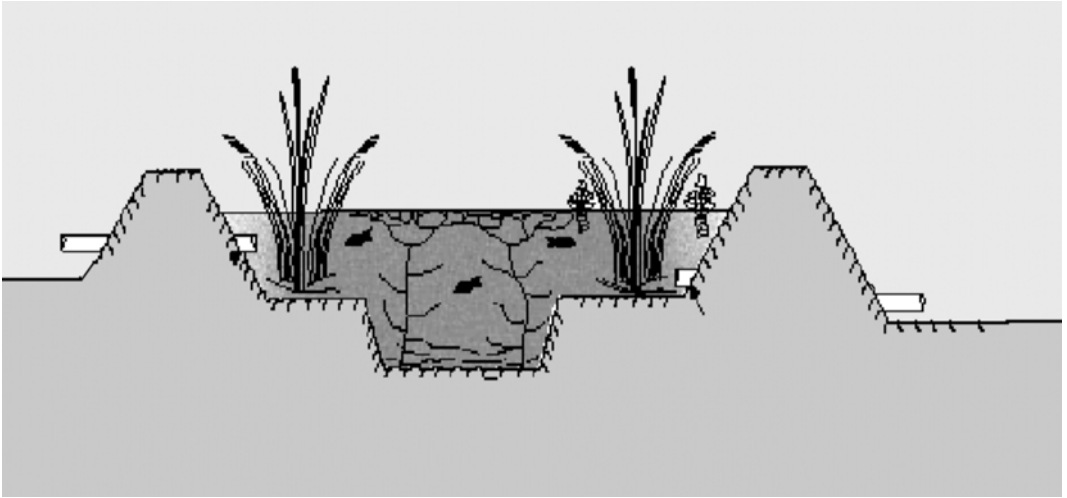


FIG. 2.- Humedal artificial de flujo superficial libre (FWS, "Free Water Surface"), con plantas emergentes, flotantes y sumergidas.

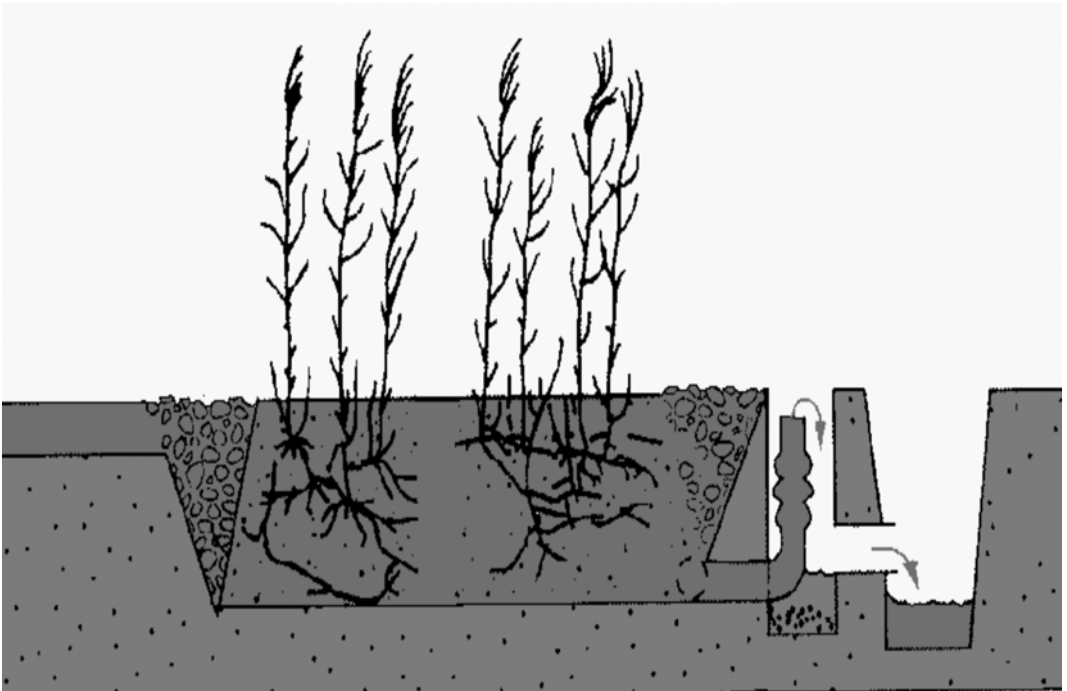


FIG. 3.- Humedal de flujo subsuperficial (VSB, "Vegetated Submerged Bed").

eliminación de materia orgánica son básicamente anaerobios, no ocurriendo, por tanto la nitrificación-desnitrificación. Hasta ahora, se creía que gran parte del poder depurador de los humedales se debía a los helófitos, sin embargo, recientes estudios que comparan el rendimiento de humedales plantados y no plantados, parecen indicar que se ha sobreestimado la capacidad de transporte de oxígeno de los helófitos hacia las zonas sumergidas (U.S. Environmental Protection Agency, 2000a).

Otros estudios, realizados en condiciones de laboratorio, indican que el oxígeno transportado por los helófitos puede ser utilizado por los microorganismos que crecen sobre ellos en forma de biopelícula. En las capas de esta biopelícula más próximas a los rizomas se dan procesos aerobios, mientras que en las más alejadas, al no difundir el oxígeno, los procesos serían anaerobios, esta situación sí permitiría el proceso de nitrificación-desnitrificación. (Brix, 1997).

La capacidad de transferencia de oxígeno por los helófitos se estima entre 0-3 g O₂/m²/día, equivalente a 30 kg DBO₅/ha/día, muy bajo para las cargas usuales del agua residual. Por otra parte la transferencia de oxígeno desde la atmósfera se sitúa entre 0-0,5 g O₂/m²/día, por lo que las condiciones en el interior de los humedales de flujo subsuperficial son fuertemente reductoras (Lienard, 1987; U.S. Environmental Protection Agency, 2000a).

Los helófitos asimilan macronutrientes (N y P) y micronutrientes, incluidos metales pesados, en unas tasas calculadas en 12-120 g N/m²/año y 1,8-18 g P/m²/año; muy bajas también en comparación con el contenido en aguas residuales (Reedy y DeBusk, 1985). La muerte de las plantas puede volver a liberar estos elementos al agua, por lo que sería necesario un frecuente cosechado de los helófitos antes de que esto suceda.

Los helófitos tienen un efecto termorregulador sobre el sistema, aminorando la insolación en verano y actuando como aislantes en invierno, con un efecto positivo sobre los procesos biológicos (Smith *et al.*, 1997).

El efecto de los helófitos sobre la conductividad hidráulica subsuperficial del sistema se creía positiva, por la apertura de canales por las raíces, sin embargo recientes estudios parecen demostrar que la presencia de raíces tiene un efecto negativo en la conductividad hidráulica, favoreciendo la obstrucción del medio y la aparición de flujos superficiales no deseados, ya que producen malos olores, mosquitos, y disminuyen el tiempo de retención hidráulica (Sandfor *et al.*, 1995).

En cualquier caso los helófitos aportan una calidad estética a este tipo de instalaciones (U.S. Environmental Protection Agency, 2000b).

El sedimento orgánico es un elemento fundamental en el proceso de depuración por humedales, ya que sirve de sustrato para el crecimiento de multitud de microorganismos, incluyendo los responsables de la nitrificación y desnitrificación; presenta, además, una elevada capacidad de cambio. Así mismo, juega un papel fundamental en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es, junto con la asimilación por los seres vivos, su adsorción a las arcillas y la precipitación y formación de complejos con Al, Fe y Ca presentes en los sedimentos.

Eliminación de DBO₅

La eliminación de la DBO₅ particulada ocurre rápidamente por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre la grava y las raíces. La DBO₅ soluble es eliminada por los

microorganismos que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las plantas. La degradación de la materia orgánica es aerobia en micrositios de la superficie de las raíces de las plantas, pero en el resto del lecho sumergido ocurre por vías anaerobias: fermentación metánica y sulfato reducción. Estos procesos son muy dependientes de la temperatura, por lo que se observan variaciones estacionales en la DBO_5 del efluente. Se puede obtener una DBO_5 por debajo de 25 mg/l, aunque no es posible bajar de una DBO_5 de 7-10 mg/l, que parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema, y no del agua residual original (U.S. Environmental Protection Agency, 2000a).

Estudios realizados en USA (U.S. Environmental Protection Agency, 2000a), indican que la DBO_5 es eliminada rápidamente a la entrada del humedal, siendo suficiente un tiempo de retención de aproximadamente 2 días. Este aspecto es decisivo para el diseño del humedal, en particular para la relación longitud anchura (L:A), generalmente se recomendaba 10:1, sin embargo, no se ha encontrado ninguna relación entre el aspecto del humedal y su capacidad de eliminación de DBO_5 , ya que humedales con relaciones de 2:1 hasta 17:1, tenían el mismo rendimiento en % de DBO_5 eliminada.

En humedales de flujo subsuperficial, la carga superficial (kg/ha/día) debe ser manejada con prudencia, ya que la carga influente es reducida rápidamente a la entrada del humedal y no puede ser repartida uniformemente en toda la superficie, al contrario de lo que sucede en otro tipo de sistemas. En algunos casos se instalan diferentes puntos de aplicación del agua al humedal.

Eliminación de sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión son eliminados de una manera muy efectiva en los humedales, ocurriendo en los 5 primeros metros de distancia desde la entrada y consiguiendo siempre valores de salida inferiores a 20 mg/l.

Una parte de los sólidos en suspensión están formados por materia orgánica, algas o microorganismos, que son degradados hasta productos gaseosos, por lo que los procesos de colmatación de los humedales suelen ser largos.

Como en el caso de la DBO_5 , el rendimiento es independiente del tiempo de retención, siendo suficiente 1 día para alcanzar el máximo rendimiento, que es también independiente de la relación de aspecto (L:A).

Eliminación de nitrógeno

El nitrógeno influente en los humedales se encuentra básicamente como nitrógeno orgánico o amoniacal, con escasas cantidades de nitratos. Los procesos de descomposición y mineralización convierten este nitrógeno en amonio.

Por lo general los procesos en el interior del humedal son anaerobios, ya que no existe suficiente oxígeno para la nitrificación y posterior desnitrificación, por lo que no existen reducciones importantes de nitrógeno en los humedales de flujo subsuperficial.

La desnitrificación puede estar también limitada por la falta de una fuente de carbono para el proceso, ya que por cada gramo de nitrógeno son necesarios aproximadamente 3 gramos de DBO_5 .

Sin embargo en algunos casos se han obtenido importantes reducciones, asociadas a un aporte de oxígeno por las raíces de las plantas, en sistemas de poca profundidad (0,3 m).

El cosechado frecuente de la vegetación incrementa el rendimiento en eliminación de nitrógeno, sin embargo esta operación aumenta los costos de mantenimiento.

Eliminación de fósforo

La cantidad de fósforo en el efluente es prácticamente igual que en el influente, en la mayoría de los casos. La cantidad de fósforo asimilado por la vegetación o fijada al sedimento es pequeña en relación a la aportada por el agua residual. Por tanto los humedales no son un método muy efectivo para la eliminación de fósforo, excepto si se usan grandes áreas con grava rica en hierro y aluminio o tratamientos alternativos de eliminación de fósforo (Gómez *et al.*, 2001).

Eliminación de patógenos

Como norma general, los humedales pueden reducir los coliformes fecales en uno o dos órdenes logarítmicos, en algunos casos se han obtenido 200 UFC/100 ml o menores (García *et al.*, 1999). También son capaces de reducir otros patógenos, como protozoos y helmintos (Rivera *et al.*, 1995)

DEPURACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL LEVANTE ALMERIENSE

Gestión de Aguas del Levante Almeriense, S.A. (GALASA), desarrolló entre diciembre de 1996 y noviembre de 1997 el Proyecto de Investigación denominado: “El uso de humedales artificiales en la depuración de aguas residuales”.

Para el desarrollo de este proyecto, GALASA construyó una planta experimental (Fig. 4) donde se ensayaron: tipos de flujo hidráulico, tipo de sustrato, capacidad de carga, tiempos de retención y especie de helófito (*Phragmites australis* y *Typha dominguensis*). A intervalos regulares se tomaron muestras de agua y sedimentos, para analizar entre otros los siguientes parámetros: DBO₅, DQO, Sólidos en Suspensión (SS), Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (PT), coliformes fecales, temperatura, gradiente de O₂, pH, salinidad, etc. (APHA-AWWA-WPCF, 1992). Los resultados han sido publicados por Gómez *et al.* (2001).

Las reducciones de carga orgánica (DBO₅ y DQO), así como la de sólidos en suspensión son muy elevadas, lo que hace que el efluente final del humedal experimental tenga un aspecto cristalino, totalmente clarificado, a pesar de ser alimentado con aguas de una laguna de maduración que presentan un intenso color verde y gran cantidad de sólidos en suspensión debido a las microalgas.

Se obtuvieron importantes reducciones de nitrógeno total. En cuanto al fósforo, aunque la reducción es muy importante, con los tiempos de retención del experimento no se alcanzan las cantidades exigidas para zonas sensibles. Otros resultados obtenidos en el humedal experimental, indican que se puede mejorar este rendimiento usando sustratos calizos y ricos en hierro.

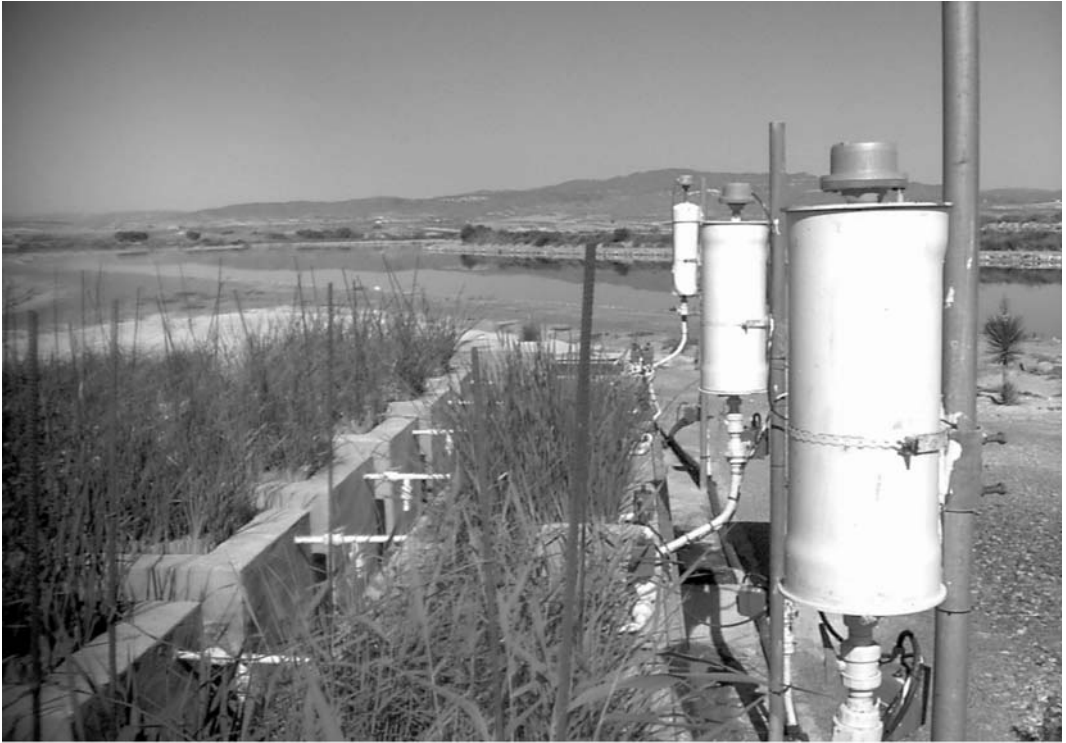


FIG. 4.- *Planta experimental de GALASA (foto: A. Lahora).*

Observados los favorables resultados obtenidos en el humedal artificial, se decidió construir un humedal a escala 1:1 en la EDAR de Los Gallardos, municipio de Almería con una población de 1.200 habitantes. La Tabla 2 recoge los datos de habitantes y caudales.

La EDAR de Los Gallardos, consta de un pretratamiento (tamiz de 3 mm y desarenador), laguna anaerobia (1.500 m³), lechos de turba (1.080 m²) y laguna de maduración (1.470 m³) y un humedal artificial de flujo subsuperficial de 671 m² (Fig. 5).

Para la implantación del humedal, se ocupó parte de la laguna de maduración preexistente, impermeabilizándola con polietileno de alta densidad de 1,5 mm de espesor. Sobre el polietileno, se colocó una capa de arcilla rica en hierro de 10 cm de espesor y sobre la arcilla, 80 cm de grava procedente de graveras fluviales. La granulometría de la grava está comprendida entre 30 y 70 mm de diámetro. Su composición es heterogénea, correspondiendo el 35 % a rocas carbonatadas (mármol, caliza y dolomía) y el resto a rocas silicatadas (cuarcita, micaesquitos, etc.).

El agua que sale de los lechos de turba entra en la laguna de maduración y después al humedal a través del gavión dispuesto en toda la anchura de la laguna. De esta manera, el humedal se considera formado por una laguna de maduración y un lecho de flujo subsuperficial unidos.



FIG. 5.- Entrada (arriba) y salida del agua (abajo) en el humedal de flujo subsuperficial de Los Gallardos (Almería) (foto: A. Lahora).

Se ha construido una obra de salida, en la que existe un dispositivo que permite regular el nivel del agua en el humedal, de forma que se consigue un flujo subsuperficial. Se ha dotado al humedal de salida de fondo, para su total vaciado en caso necesario.

La plantación de carrizo se realizó en octubre de 1999, a partir de brotes vegetativos de varios metros de longitud, procedentes de zonas húmedas próximas a la EDAR. Actualmente el carrizo ha colonizado todo el humedal, mediante la emisión de densas raíces en los nudos de los plantones y gran cantidad de tallos aéreos tanto erectos como reptantes.

Se ofrece a continuación una tabla (Tabla 3) con las principales características del humedal experimental y del existente en la EDAR de Los Gallardos.

TABLA 2

Parámetros de diseño de la planta experimental de GALASA y el humedal de Los Gallardos (Almería).

Parámetro	Unidades	Planta experimental	EDAR Los Gallardos
Datos influente			
DBO ₅ media	mg/l	61	102
DQO media	mg/l	301	224
SS media	mg/l	180	59
N-T media	mg/l	33,6	57
P-T media	mg/l	8,0	10
Carga diaria DBO ₅	kg/día	0,018	15,8
Carga diaria DQO	kg/día	0,087	34,7
Carga diaria SS	kg/día	0,052	9,1
Carga diaria NT	kg/día	0,010	8,8
Carga diaria PT	kg/día	0,002	1,6
Caudal diario	m ³ /día	0,288	155
Habitantes			
Habitantes 1991	Censo		1107
Habitantes 1999	Padrón		1215
Habitantes 2020	Estimación		1256
h. e. entrada humedal	Calculado	0,3	264
h. e. entrada EDAR	Calculado	2,0	667
Parámetros diseño			
Ocupación h.e. entrada EDAR	m ² /he	1,1	1,0
Ocupación h.e. entrada humedal	m ² /he	7,1	2,5
Tiempo de retención hidráulica	días	3	1,6
Aporte O ₂	kg O ₂ /ha/día	30	30
Carga orgánica	kg DBO ₅ /ha/día	84	236
Carga de sólidos	kg SS/ha/día	247	136
Carga hidráulica	m ³ /ha/día	1371	2312

TABLA 3

Características de la planta experimental de GALASA y el humedal de Los Gallardos (Almería).

Parámetro	Unidades	Planta experimental	EDAR Los Gallardos
Características humedal			
Vegetación		<i>Phragmites australis</i> <i>Typha dominguensis</i>	<i>Phragmites australis</i>
Impermeabilización		Pintura	Polietileno 1,5 mm
Aporte O ₂ teórico	g O ₂ /m ² /día	3	3
Tamaño del relleno	mm	Varios	30-70
Porosidad	m ³ /m ³	0,5	0,47
Espesor del relleno	m	0,8	0,8
Resguardo	m	0,2	0,5
Pendiente del lecho	m/m	0,010	0,010
Dimensiones del humedal			
Número de lechos		3	1
Forma de los lechos		Rectangular	Triangular
Longitud máxima	m	1	39
Anchura media	m	0,7	15
Longitud:anchura (media)		4,3	2,6
Superficie unitaria útil	m ²	0,7	671
Superficie total útil	m ²	2,1	671
Volumen total	m ³	1,7	536
Volumen útil	m ³	0,8	252

RESULTADOS Y DISCUSIÓN OBTENIDOS EN LA EDAR DE LOS GALLARDOS

El humedal ha estado operativo desde noviembre de 1999 hasta la actualidad, si bien es necesario al menos un año para que la vegetación y los microorganismos del sustrato alcancen un desarrollo óptimo, a veces es necesario un tiempo mayor.

El humedal recibe agua de los lechos de turba, aunque en realidad, existe una laguna de maduración antes de su entrada, instalada con el fin de tratar de oxigenar el influente al humedal.

El objetivo del humedal es complementar a los lechos de turba, para alcanzar los valores de vertido de los parámetros recogidos por la Directiva 91/271/CEE.

La Tabla 4 recoge la media de los valores de los parámetros analizados durante dos años de funcionamiento del humedal de Los Gallardos. Respecto al influente al humedal, no se ha tenido en cuenta la producción de algas en la laguna de maduración.

Eliminación de DBO₅

El rendimiento total del conjunto lechos de turba-humedal, alcanza porcentajes de reducción superiores a los exigidos en la Directiva. La DBO₅ media, es superior a 25 mg/l, ya que sufre

TABLA 4

Resultados obtenidos en la EDAR de Los Gallardos (noviembre 1999-noviembre 2001).

Parámetro	Entrada EDAR	Salida lechos de turba	Salida humedal		Salida EDAR	Directiva 91/271/CEE		
	mg/l	mg/l	Rend. %	mg/l	Rend. %	Rend. %	mg/l	Rend. %
DBO ₅	258	102	60	70	31	73	25	70-90
DQO	707	224	68	151	33	79	125	75
SS	275	59	79	17	71	94	35	90
Coliformes fecales	7,4x10 ⁶	1,48x10 ⁶	80	4,4x10 ⁴	97	99,4	-	-
CE (micro S/cm)	3000	3031	-	3068	-	-	-	-
Zonas sensibles								
N-T	78	57	27	49,9	12	36	15	70-90
P-T	33	10	70	9	10	40	2	80

un aumento durante los meses invernales, volviendo a bajar por debajo de esa cifra a partir de mayo. Este efecto puede ser debido a la muerte invernal de la parte aérea de la vegetación y un descenso de la actividad biológica anaerobia, particularmente sensible a las bajas de temperaturas.

Eliminación de DQO

Tiene un comportamiento muy parecido al de la DBO₅, consiguiéndose valores de salida próximos a los 125 mg/l, excepto los meses invernales. Expresada como porcentaje de reducción se alcanzan los valores de la Directiva.

Eliminación de sólidos en suspensión

El rendimiento en eliminación de sólidos en suspensión es óptimo desde la puesta en marcha del humedal, estando generalmente por debajo de 35 mg/l.

Se debe tener en cuenta que existe una producción de microalgas en la laguna de maduración previa al humedal, que supone una cantidad adicional de sólidos en suspensión, que es también eliminada por el humedal, obteniéndose en todos los casos un efluente altamente clarificado dentro de lo exigido por la Directiva tanto en porcentaje, como en mg/l.

Eliminación de nutrientes

La eliminación de nitrógeno y fósforo en el humedal de Los Gallardos es muy limitada, resultado cantidades muy parecidas a la entrada y la salida del sistema. Estos resultados están de acuerdo con lo observado en otros humedales de flujo subsuperficial, donde debido a sus condiciones anaerobias, no es posible la nitrificación. El nitrógeno que abandona el humedal está en forma amoniacal.

El vertido no se realiza a zonas sensibles, por lo que no es de aplicación la Directiva Europea, la EDAR consigue reducciones medias de 36 % para el N y 40 % para el P.

Otros parámetros

Se ha medido la conductividad eléctrica a la entrada y salida del humedal, con el resultado de que este tratamiento, para el tiempo de retención ensayado, no incrementa significativamente la conductividad. Este dato es interesante, con el fin de determinar si el sistema puede ser apto para reutilizar sus efluentes en riego agrícola, sin incrementar el aporte de sales por agua aplicada.

En cuanto a patógenos se han observado reducciones de coliformes fecales del 97 % (dos órdenes logarítmicos), por lo que se precisaría una desinfección adicional.

Ocasionalmente se han medio también nemátodos intestinales, no habiéndose detectado ni a la entrada ni a la salida del humedal.

CONCLUSIONES

Como conclusiones obtenidas en el humedal de Los Gallardos, se puede afirmar que los humedales artificiales de flujo subsuperficial son un tratamiento terciario apto para riego agrícola, ya que elimina los sólidos y la materia orgánica que pueden obstruir los sistemas de riego por goteo. Además no incrementa sustancialmente el contenido en sales del agua.

El contenido en nitrógeno y fósforo es muy positivo en agricultura, ya que son fertilizantes agrícolas. Es necesaria una desinfección adicional para riego de ciertos cultivos.

Como conclusiones adicionales apoyadas en las referencias bibliográficas, se puede afirmar que los humedales artificiales son una tecnología válida para depurar aguas residuales, como tratamiento secundario o terciario, sobre todo para pequeñas o medianas comunidades, con bajo coste de construcción y mantenimiento. Son aplicables a gran diversidad de influentes, tanto procedentes de EDAR de bajo costo como de convencionales. Son ecológicamente positivos y pueden contribuir a la protección de humedales naturales y zonas sensibles, especialmente en espacios naturales protegidos, con hábitats para la fauna y buena integración paisajística. Son muy bien aceptados socialmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, A.; Kolb, P. y Marull, J. (1997). Recuperación medioambiental del tramo final del río Besós. *Bio*, 10: 7-11.
- APHA-AWWA-WPCF (1992). *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales*. Díaz de Santos, S.A. Madrid.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35: 11-17.
- Castillo, P. A. y Collado, R. (1996). Eliminación de nitrógeno en sistemas naturales de depuración de aguas residuales: análisis comparativo. *Retema*, 52: 49-55.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. Mc Graw Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá.
- García, M.; Bécares, E.; Soto, F. y de Luis, E. (1999). Macrófitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de bacterias. *Tecnología del Agua*, 185: 64-67.
- García, J.; Ruiz, A. y Junqueras, X. (1997). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*, 165: 58-65.

- Gómez, R.; Suárez, M. L. y Vidal-Abarca, M. R. (2001). The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain. *Ecological Engineering*, 16: 501-517.
- Junta de Andalucía (1997). *Planta Experimental de Depuración de Aguas Residuales. Evolución y Experiencias*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Sevilla.
- Lahora, A. (1998). Humedales controlados como tratamiento terciario de aguas residuales urbanas. En, Rivera, J. (ed.): *Conclusiones del Encuentro Medioambiental Almeriense, Recursos Hídricos*. CD-ROM. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), Instituto de Estudios Almerienses (Diputación Provincial de Almería), Universidad de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo. Almería.
- Lahora, A. (1999). Tratamientos terciarios de bajo coste. *Hidropress*, 13: 16-20.
- Lienard, A. (1987). Domestic wastewater treatment in tanks with emergent hydrophytes. *Water Science Technology*, 19: 373-375.
- Mitsch W. J. y Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands*. 3ª edición. Wiley John and Sons, Inc. New York.
- Pigem, J.□; Marzo, R.; de la Peña, J. L. y Llagostera, R. (1999). Infiltración/percolación y humedales como tratamientos blandos en la depuración de aguas residuales. *Tecnología del Agua*, 186: 48-53.
- Ramsar Convention (1971). *Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas*. Ramsar Convention Bureau. Ramsar.
- Reedy, K. R. y DeBusk, W. F. (1985). Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 19: 261.
- Rivera, F.; Warren, A.; Ramírez, E.; Decamp, O.; Bonilla, P.; Gallegos, E; Calderón, A. y Sánchez, J. T. (1995). Removal of pathogens from wastewaters by the root zone meted (RZM). *Water Science and Technology*, 32: 211-218.
- Sandfor, W. E.; Steenhuis, T. S.; Parlange, J. Y.; Surface, J. M. y Peverly, J. H. (1995). Hydraulic conductivity and sand as substrates in rock-reed filters. *Ecological Engineering*, 4: 321-336.
- Smith, I. D.; Bis, G. N.; Lemon, E. R. y Rozema, L. R. (1997). A thermal analysis of a sub-surface, vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 35: 55.
- Soto, F.; Bécares, E.; García, M. y de Luis, E. (1999). Macrófitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de nutrientes. *Tecnología del Agua*, 185: 68-72.
- U.S. Environmental Protection Agency (1988). *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment*. EPA/625/1-88/022. US EPA Office of Research and Development. Cincinnati.
- U.S. Environmental Protection Agency (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment*. S.C. Reed, ed., EPA/832/R-93/008. US EPA Office of Water. Washington.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000a). *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010. US EPA Office of Research and Development. Cincinnati.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000b). *Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing for Water Quality and Wildlife Habitat*. EPA 843-B-00-003. US EPA Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. Washington.