

Experimental basis for the design of horizontal subsurface-flow treatment wetlands in naturally aerated channels with an anti-clogging stone layout

L. Pozo-Morales · M. Franco · D. Garvi · J. Lebrato

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas se ha generalizado en las últimas décadas a pesar de que su empleo tienen origen en el Max Planck Institute (Alemania) en los años 50. Se muestran como sistemas flexibles, con gran inercia ante cambios de caudales y cargas, amplia integración en el medio y de enorme simplicidad de explotación y de operación, sin costes energéticos. En particular los sistemas de flujo subsuperficial (SubSuperficial Flow Treatment Wetland SSF TW) al no presentar lámina de agua en contacto con la atmósfera tienen la ventaja adicional del bajo riesgo de exposición directa a personas y de aparición de insectos así como menor producción de olores y protección térmica que reduce la posible estratificación del agua evitando flujos preferenciales (García *et al.*; 2003). Todo ello los hace especialmente indicados para utilizar en pequeños y medianos núcleos urbanos.

Sin embargo, a día de hoy, su aplicación se ve amenazada por los grandes problemas de colmatación que presentan a corto plazo especialmente los de flujo horizontal (SSHF) causando encharcamientos, by-pass del agua, disminución generalizada de los Tiempos de Retención Hidráulicos (HRT), efluentes insuficientemente tratados (Caselles-Osorio and García, 2007; Nivala and Rousseau, 2009), generación de olores, mosquitos e inutilización del sistema de depuración. Debido a las pequeñas cargas orgánicas que soportan los requerimientos de espacio para su implantación son elevados y debe sumarse que la recuperación de los mismos una vez colmatados es difícil.



Figura 1. Efecto de la colmatación en SSHF TW

La magnitud del problema de los atascos en los SS humedales horizontales hace que las causas de colmatación de los SSHF TW hayan sido ampliamente estudiadas por distintos investigadores desde hace varias décadas existiendo numerosos estudios relacionados así como recientes y completos trabajos de revisión (Knowles *et al.* 2011; Nivala *et al.* 2012). Dichas causas han de ser analizadas una a una con el objetivo de establecer un diseño de humedal fiable incluyendo aquellos cambios que se estimen necesarios.

Si el atasco es causado por la reducción drástica de la Conductividad hidráulica hasta niveles prácticamente cero, puede decirse que este es el parámetro fundamental de diseño. En todos los estudios esta bien documentada su disminución en los primeros metros de los humedales debido a la sedimentación de las partículas de mayor tamaño y al gran desarrollo de biopelícula. Esta última además, excreta un fango polimérico (Madigan *et al.* 2006), análogo a un gel (Rittman and McCarty, 1980; Tanner and Sukias, 1995) relativamente impermeable (Taylor *et al.*, 199; Vandervivere and Vaveye, 1992) y con gran contenido en agua. Las recomendaciones de diseño en este sentido se refieren a limitación de carga horizontal en el humedal, basadas en correlaciones encontradas entre las colmataciones y las cargas de Sólidos Totales en Suspensión (SST) y de Materia Orgánica (COD).

Las relaciones cuadradas de la ecuación de Kozeny-Carmen nos indican que conductividad hidráulica de un medio poroso es muy sensible al tamaño de los poros (Kadlec y Knight, 1996) por lo que materiales de relleno de baja granulometría son especialmente propensos a la obstrucción rápida por oclusión de los poros de filtración (Blazejewski y-Murat Blazejewska, 1997; Platzer y Mauch, 1997; Langergraber et al., 2003, Wallace y Knight, 2006). Por este motivo se ha ido produciendo un aumento gradual en el tamaño de los lechos de piedra empleados en SSHF TW (EPA de EE.UU., 2000; Iwema et al, 2005.; Wallace y Knight, 2006; Kadlec y Wallace, 2009). La distribución de tamaño de partícula en el lecho y su propia forma, influyen también en la conductividad hidráulica como indica la ecuación de Ergun.

Prestando especial atención a la entrada como zona de obstrucción preferencial, la mayoría de los autores recomiendan una carga uniforme de las aguas residuales sobre la mayor superficie posible de manera que el sistema recomendado es aquel en que la anchura supera la longitud. Ello es debido a que los parámetros de diseño normalmente empleados en humedales artificiales son cargas superficiales. Sin embargo, en estos casos, la distribución del agua se convierte en un problema añadido registrándose continuos problemas de obstrucción y cargas no uniformes (Murphy y Cooper, 2010).

No obstante, en el diseño que se presenta en este trabajo no se puede asumir el riesgo de que el agua siga caminos preferenciales por lo que ésta ha de ser convenientemente dirigida para lo cual resulta especialmente apropiada una configuración en canal. Por otro lado el circuito de aireación previsto sólo funcionará en un reactor en estricto flujo pistón donde la anchura quede muy restringida en beneficio de la longitud ya que su funcionamiento se basa en la trayectoria del agua y el efecto succión. El flujo pistón garantiza además el aprovechamiento del volumen completo de reactor evitando zonas muertas. Finalmente, teniendo en cuenta que el avance del agua es en dirección horizontal y no vertical, el parámetro a tener en cuenta a la hora de diseñar la entrada del humedal debe ser la sección transversal atravesada por el flujo de agua como ya apuntan algunos autores.

la presente investigación se centra en dos de los factores importantes del proceso, primero en la distribución del agua a tratar en canales a lo largo de un ancho necesario en los que se maximiza la sección transversal efectiva de entrada del agua para reducir la acumulación preferencial de sólidos y proporcionar una mejora en la distribución en anchura (Murphy y Cooper, 2010) (Pozo, 2010; Ecological 2012) que junto al aumento de conductividad eviten las colmataciones iniciales.

una vez actuado sobre la porosidad del lecho, hay que actuar sobre el otro factor presente en el canal, las poblaciones bacterianas que trabajan en su interior.

Tradicionalmente se ha supuesto que la materia orgánica se descompone suficientemente de tal manera que solamente los sólidos inorgánicos contribuyen a la obstrucción. Sin embargo, la enorme variabilidad en las tasas de descomposición de la materia orgánica, las propiedades altamente coloidales de determinados compuestos húmicos y sus propiedades hidrofílicas (Christensen et al, 1998;. Nguyen, 2000) con aproximadamente un 80% en volumen de agua (Tanner y sukias, 1995) constituyen un gran potencial de obstrucción de poros por materia orgánica que es, en general, satisfactoriamente degradada.

Además hay que tener en cuenta el papel que juega la densidad de la materia ya que la pérdida de porosidad atribuible a la acumulación de sólidos inorgánicos (2.650 kg/m³ de densidad) puede equivaler a 1-3% de los poros, (Llorens et al. 2009). Sin embargo, la complejación con pequeñas cantidades de material biológico puede formar un lodo gelatinoso de baja densidad con alta capacidad de retención de agua (Kadlec y Watson, 1993; Tanner et al, 1998;. IWA, 2000). La materia orgánica de densidades de 33 y 371 kg/m³ aumenta la oclusión de los poros efectivos entre 27% y 77% (Llorens et al. 2009), estas circunstancias se dan además a bajos potenciales Redox (Kadlec y Watson, 1993).

Valores de densidad de los lodos en la región de entrada cuatro veces menores que en la región de salida (60 kg/m³ frente a 240 kg/m³) son doblemente eficaces para reducir la porosidad y por tanto colmatar el lecho (66% versus 28% de oclusión) (Llorens et al., 2009), con los valores más bajos de conductividad hidráulica (20 m/d frente 45 m/d) (Pedescoll et al., 2009).

Además se debe considerar un añadido importante en la consideración de la actividad bacteriana: de acuerdo a los estudios previos (Pozo et al, tu artículo anterior!) un aumento excesivo en las condiciones anaerobias del sistema, anaerobiosis adicional, hace que se produzca una síntesis "excesiva" de exopolímeros, polihidroxibutirato (PHB) que acabara atascando el sistema.

En los SSHF TW tradicionales el medio se encuentra saturado de agua, que desplaza a los gases atmosféricos de los poros. En estos casos la degradación de la materia orgánica transcurre por vía anaerobia (Salas, Pidre, Sánchez, 2007). Los exopolímeros PHB exudados al medio por estas bacterias son los principales responsables de los atascos junto con la precipitación de fosfatos (Lebrato, J. y col.; 1990). El PHB es un polihidroxialcanoato (PHA) que está producido por microorganismos (como *Alcaligenes eutrophus* o *Bacillus megaterium*) aparentemente en respuesta a condiciones de estrés fisiológico. Principalmente es un producto de la asimilación del carbón (de glucosa o almidón) que se emplea por los microorganismos como forma de almacenamiento molecular de energía para ser metabolizado cuando otras formas comunes de recursos energéticos no estén disponibles. En los sistemas anaerobios la formación de PHB se lleva a cabo por las bacterias metanogénicas como reserva energética y de formación de cadenas orgánicas para la biomasa celular (Gaudy, A.F.; Gaudy, E.T.; 1980). En general tienen propiedades de floculantes lo que explica las colmataciones que se registran en los SSHF TW con sistemas de degradación biológica anaerobios donde el exudado de estos exopolímeros por parte de las bacterias, origina mucinas y derivados que van generando un biofilm capaz de atrapar moléculas, bacterias, sólidos en suspensión, minerales redissueltos por las bacterias de los materiales donde se encuentran y fosfatos que precipitan.

Estas circunstancias ponen de manifiesto la importancia de la aireación del sistema para evitar la aparición excesiva de PHB y la complejacion de materiales biológicos en un lodo gelatinoso que ocurren a bajos potenciales de oxidación, además de las ya sabidas mejoras en rendimiento en depuración de materia orgánica,

Una evidencia de lo afirmado sobre la necesidad de aireación se constata en los humedales de flujo vertical que funcionan, en general, mucho mejor que los horizontales debido a que poseen mayores potenciales de aireación por la succión de aire conseguido al inyectar agua a pulsos en el humedal (Cooper, 2004).

En el presente trabajo se plantea una actuación sobre las causas directas de la colmatación modificando la configuración del lecho y la aireación. De este modo se actúa sobre la porosidad para que la inevitable disminución inicial de conductividad hidráulica sea controlada y no cause colmatación. Los primeros procesos que tienen lugar en el humedal son principalmente la sedimentación de los grandes sólidos y el crecimiento biopelícula, en ocasiones excesivo, que aumenta las posibilidades de colmatación. Conforme el agua avanza los mecanismos de depuración por degradación biológica de la materia orgánica predominan sobre la sedimentación de sólidos, con los problemas ya reseñados.

Si es un hecho demostrado que el gradiente de conductividad en los HSSF TWS llega a un 60% menos en la entrada que en la salida y pudiendo actuar sobre la porosidad (Kozeny) ¿por qué mantener la granulometría, en definitiva la porosidad, constante en el medio?

En el presente artículo se propone un lecho que pasa de una porosidad del 73% en los primeros metros al 51% a la salida, es decir para disminuciones graduales de hasta el 60% de conductividad hidráulica se proponen aumentos de graduales de porosidad del 45%. Para ello se diseña un canal longitudinal relleno de piedras de forma angulosa y sin geometría definida, que evite acoplamientos facilitando así la formación de huecos y el aumento de la porosidad, además se trabaja con granulometría lo suficientemente diversa como para que dichos huecos sean del tamaño apropiado en cada caso.

Se configura un lecho constituido por piedra organizada por tamaños a lo largo del canal, partiendo de granulometrías de 200 mm hasta 50 mm en los últimos metros. La organización se realiza según una diagonal longitudinal que parte del punto superior del primer metro del lecho y termina en el

punto inferior de la salida del humedal. Esta distribución ha dado excelentes resultados en estudios previos a escala piloto (Ecological engineering, 2012).

Una granulometría decreciente a lo largo del canal y creciente en el eje vertical, da lugar a mayor porosidad del lecho allí donde se prevee mayor acumulación de sólidos, para conseguir un aumento significativo de la conductividad hidráulica inicial con respecto a los diseños tradicionales de humedales, y va reduciendo el tamaño de las piedras conforme avanza el canal, de manera que la porosidad va siendo menor conforme menor es el riesgo de colmatación por sólidos del sistema y a su vez crece la superficie específica para el desarrollo de biofilm para aumentar de la degradación biológica a lo largo del canal, para disminuir acumulaciones de materia orgánica que disminuyan la porosidad. Es decir, se trata de acoplar el canal a las necesidades de proceso en cada tramo y momento del proceso.

Por todo ello, en esta investigación se ha trabajado en un diseño de fácil construcción y simplicidad de operación que consiga una aireación natural forzada que evite los atascos debidos a la anaerobiosis adicional en el fondo y propicie procesos aerobios en superficie, lo que contribuye a disminuir colmatación y aumentar depuración de materia orgánica.

La base del diseño está en la configuración del lecho de piedras con mayores tamaños de cámara de aire, actualmente limitadas a unos 5 cm por debajo de la superficie (cita). La cámara de aire subsuperficial en contacto continuo con el agua garantiza la circulación de los gases generados en el interior del humedal y del aire atmosférico exterior. Además se desarrolla un novedoso circuito de aireación natural forzada mediante la instalación un pozo situado en los primeros metros del humedal en combinación con una chimenea en el punto final. El pozo queda modelado con la propia piedra que rellena el lecho desde el fondo a la superficie mientras que la chimenea consiste en un tubo que partiendo de la base del humedal alcanza 1,5 metros de altura por encima de su superficie. El conjunto pozo-chimenea queda conectado en el seno de un lecho de granulometría decreciente longitudinalmente con una cámara de aire superior que ocupa el 40% del volumen interno total. La diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del humedal así como los efectos de succión que los pequeños aumentos de velocidad del agua al avanzar a través de huecos cada vez menores, y la diferencia de presión atmosférica entre el pozo y la chimenea propiciarán el funcionamiento del circuito de aireación con la entrada de aire por el pozo y la salida por la chimenea.

La suma de los dos mecanismos, diagonal de piedras y sistema de aireación da lugar a una estratificación de procesos, digestor anaerobio equivalente, DAE, en el fondo donde los fangos van digiriéndose a velocidades lentas, y tubería aireada equivalente en la parte más superficial, TAE, donde el agua con menos sólidos va corriendo rápidamente a la salida.

El objetivo del presente trabajo es establecer las bases para el diseño fiable de SSHF TW basado en una modificación innovadora, revolucionaria, de su geometría y sus procesos que permita superar esas limitaciones de cargas de agua residual de entrada y los tradicionales problemas de atascos en los humedales. Para ello se diseña la experimentación a escala real llevada a cabo en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) Sevilla, Spain, en un sistema en forma de canal longitudinal de 10 m, con una organización del lecho en diagonal de piedras grandes, medianas y pequeñas, que incluye un circuito de aireación natural forzada, diseñado al efecto en base a los estudios previos de los autores en laboratorio (Pozo et al...).

la investigación debe dar lugar a un canal tipo que permita el desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales en configuración de tantos canales en paralelo, como sea necesario en función de las cargas transversales de entrada teniendo en cuenta la esperada disminución de la conductividad hidráulica que debe tener lugar en los primeros metros de humedal.

Cada tramo inicial de canal-humedal será así mismo replicado en serie las veces que sea necesario hasta alcanzar la longitud que garantice la calidad exigida en cada caso del agua de salida.

Por último hay que considerar que un diseño de acuerdo a una geometría de canales trabajando en paralelo en el número que sea necesario permite, además, un mantenimiento con posibilidades de funcionamiento intermitente de algunos canales, con lo que se podrá, en su caso, restaurar las condiciones aerobias del agua y acelerar la mineralización de la materia que se encuentra obstruida

ya que la periodicidad carga y reposo determina la capacidad del sistema para operar sin oclusión (Cooper, 2005). La operación intermitente puede ser también beneficiosa para revertir la obstrucción en SSHF TW (Nguyen, 2000; Corzo et al., 2008).

El trabajo de investigación que se presenta se ha llevado a cabo con agua residual urbana por lo que no se consideren problemas adicionales que puedan aparecer de obstrucción y adsorción relacionados con la eliminación de metales, petróleo e hidrocarburos sintéticos, nitrógeno amoniacal, y fósforo (Wallace y Knight, 2006), que en general no contienen dichas aguas.

En una segunda derivada, este canal facilita la modelización, ya que permite el seguimiento efectivo del funcionamiento del humedal metro a metro. En los humedales tradicionales, hay que ser muy cuidadosos al hablar de conductividad hidráulica ya que rara vez sus valores reflejan las medidas de campo y además no es posible el seguimiento del sistema ni la localización exacta de posibles puntos conflictivos en un reactor inaccesible de gran superficie. Esta falta de precisión es, a día de hoy, una barrera para el desarrollo de herramientas de simulación (Langergraber, 2008) y por lo que se requieren nuevas técnicas experimentales (Knowless, Nivala y García, 2011).

Previamente a la experiencia real que se presenta en este artículo, fue llevada a cabo la monitorización en laboratorio de un reactor piloto similar, de 1 m de longitud, durante 18 meses (EE en revisión). Durante este periodo la circulación del agua fue plenamente satisfactoria incluso ante sobrecargas hidráulicas y orgánicas.

Los incrementos registrados de DO registrados fueron insuficientes para elevar el potencial redox a valores representativos de sistemas aerobios aunque si evitaron la consolidación de los procesos de estricta anaerobiosis que provocan la generación intensiva de PHB. Este hecho demostró ser la clave para la prevención de colmatación del sistema.

Para su desarrollo se lleva a cabo una experiencia real de 1 año de duración (podríamos decir que tuvimos el canal trabajando previamente 1 año mas y tomando datos un año, o al revés que leugo de la investigación lo estuvimos siguiendo otro año con resultados similares y desde luego sin atascos?) trabajando con un canal-humedal formado por 3 canales de 10 m de longitud conectados en serie y alimentados con agua residual urbana en los que se trabaja sin plantas para evitar su influencia.

Surge además una aplicación muy interesante en este diseño innovador que es su uso como tubería de saneamiento aprovechando la geometría de canal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MATERIALES

Canal-humedal con aireación natural forzada:

Se ha diseñado y construido un canal-humedal de flujo subsuperficial horizontal de 1 m de anchura media, 0,60 m de profundidad media y 30 m de longitud total, con sección transversal trapezoidal y constituido por tres tramos idénticos, conectados en serie, de 10 m de longitud cada uno y una pendiente total del 1,75 %. La relación de anchura:longitud por tramo ya es suficiente para caracterizar un flujo pistón. El sistema se ha excavado en el terreno impermeabilizado con lámina de polietileno de alta densidad PEAD.

La longitud total de canal se forma en base a la suma de tramos en serie de 10 metros, cada tramo conecta con el siguiente mediante un vertedero subsuperficial que garantiza el mantenimiento de un cierto nivel de lámina de agua en el interior del canal en su conjunto y por tanto tiempos de retención suficientes por tramo.

Cada tramo ha sido relleno con piedra granítica procedente de voladura machacada en cantera a granulometría de 200 mm a 50 mm. La piedra ha sido escrupulosamente colocada en orden descendiente de tamaño según la diagonal longitudinal de cada tramo. Con ello se pretende evitar pérdidas de conductividad hidráulica a la entrada del humedal y garantizar aumento gradual de la velocidad de circulación del agua en su interior.

De este modo una sección transversal del lecho en sus primeros metros mostrará un relleno completo de piedra de 200 mm que se enfrenta a la circulación de agua cargada de sólidos y que inevitablemente acumulará en su base el mayor porcentaje del total de fangos retirados al agua.

La sección transversal central contiene piedra grande en la zona inferior correspondiente a la zona de acumulación de fangos, piedra mediana en la zona intermedia principalmente atravesada por agua y piedra pequeña en los puntos próximos a la superficie zona correspondiente a la cámara de aire.

La sección transversal final en la que se recupera la pérdida de conductividad hidráulica inicial y en la que la acumulación de fangos en la base es mínima, muestra un relleno completo de piedra pequeña (50 mm) atravesada generalmente por agua ya desprovista de la mayoría de sólidos.

RETOCAR DIBUJO

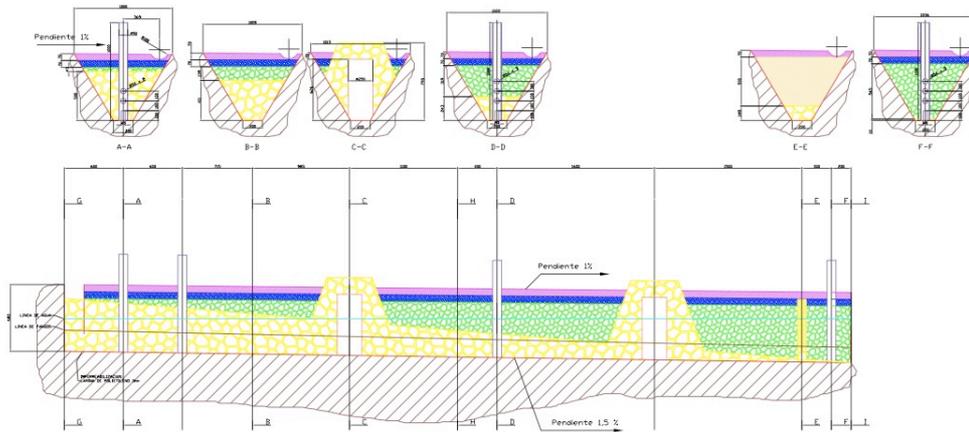


Figura 2: Distribución lecho de piedra en canal-humedal

El canal-humedal presenta un aumento de la sección transversal útil de entrada del flujo de agua frente a las secciones tradicionales de los SSHF TW conseguido a base de una mayor porosidad inicial del lecho y una posterior disminución gradual de la misma para compensar a la fuerte pérdida inicial de conductividad hidráulica y garantizar en conjunto suficiente superficie específica para el desarrollo de biopelícula.

El objetivo es repartir la carga de entrada en tantos canales paralelos como sean necesarios sin sobrepasar el límite de carga admisible por metro cuadrado de sección transversal de paso, así como tener el máximo control sobre las zonas especialmente problemáticas.

Dado que la anchura del humedal se limita a 1 m, el seguimiento del proceso y la localización de posibles atascos en el mismo se limita a una toma de muestras y medidas en longitud y altura. Por este motivo, se han dispuesto tubos de toma de muestra cada tres metros de longitud con suficiente diámetro para la introducción de sondas de medida para seguimiento de los parámetros de calidad y trazado del perfil de fangos.

La cubierta superior se ha sellado con sucesivas capas de grava, gravilla y arenas compactadas, de este modo se evita el aporte de finos inertes por escorrentía superficial y con ello se previenen atascos (García, J; 2004). El sellado superficial asegura el funcionamiento del circuito de aire e impide la penetración de aguas pluviales al interior del canal-humedal.

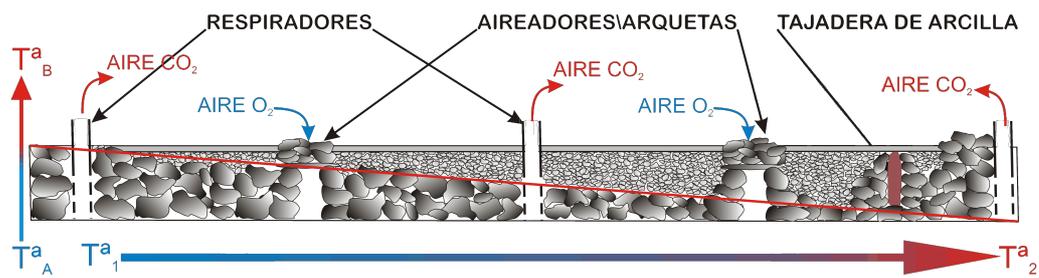


Figura 7. Diseño lecho y geometría del canal-humedal

Para facilitar la circulación de gases en el interior del canal-humedal el lecho de piedras se construye con un circuito de aireación natural forzada del siguiente modo: Los vertederos finales de cada tramo proporcionan una lámina de agua cuyo volumen en ningún caso supera el 60% del volumen interno disponible, quedando el 40% restante como cámara de aireación interna sobre la lámina de agua. La circulación interna de gases en el circuito de aireación y su intercambio con el exterior es posible gracias a la combinación de un pozo/aireador que se sitúa al inicio de cada tramo de canal y que conecta la atmósfera exterior con la cámara de gases interna y con la base del humedal en combinación con una chimenea en el punto final que partiendo desde el fondo del humedal se eleva hasta una altura de 1,5 m sobre el terreno. Los citados pozos/aireadores facilitan así mismo el mantenimiento del canal-humedal.



Figura 3. Excavación canal-humedal
Con espacio previo para fosa anaerobia bw



Figura 4. Vista final del canal-humedal

YO PONDRIA AQUÍ UNA FOTO INTERMEDIA DE LA LLENADA DE PIEDRAS... QUE SALGA BIEN VISTA LA DIAGONAL DE PIEDRAS, POR JEMPLO, NO?

Agua residual urbana

El núcleo urbano de Carrión de los Céspedes (Sevilla) carece de industrias y tiene una población de 2.300 habitantes, sus aguas son tratadas en una planta experimental del gobierno andaluz, PECC, donde se ha ubicado el canal-humedal. Por tanto aguas residuales de naturaleza típicamente doméstica son conectadas en tiempo real al canal-humedal, previo tratamiento primario en fosa séptica. El punto de vertido ha sido el Arroyo Alcarayón (Río Guadiamar, Sevilla).

Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. PECC

La PECC está situada a 99 m sobre el nivel del mar en las coordenadas 37º 22' N 6º 19' O. Fue concebida con el propósito de dotar al Plan de I+D de Tecnologías No Convencionales de Tratamiento de Aguas de la Junta de Andalucía (España) de una herramienta para el conocimiento concreto de las pautas óptimas de diseño y explotación de los sistemas de tratamiento de aguas de bajo coste de explotación y mantenimiento. Por este motivo da cabida, para su evaluación, a tecnologías innovadoras o diseños naturales, marco donde se encaja la experiencia que se presenta.

2.2 MÉTODOS

Régimen de alimentación

1. Alimentación a caudal medio de 5,00 m³/d durante un periodo de 12 meses.
2. Ensayos de situaciones límite de comportamiento en situaciones reales:
Sobrecarga hidráulica: Ensayos de aumento de caudal hasta un total de 16 m³/d durante una semana mes.
Ensayos de sobrecargas orgánicas puntuales.
Ensayos de paradas prolongadas (15 días) y nueva puesta en marcha.

Determinaciones Analíticas:

En la tabla 1 se representa la periodicidad de la toma de muestras y determinaciones en cada punto del canal-humedal.

PUNTO DE TOMA	DENOMINACION	ANÁLISIS FCO-QCO	ANÁLISIS μBIOLÓGICO	MEDIDAS IN SITU
CANAL-HUMEDAL				
2.1.1.	1 ^{er} Tramo. Entrada. 2 muestras/semana	ST, DBO ₅ , DQO	Patógenos: Ecoli, CF	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.1.2.	1 ^{er} Tramo. Punto medio.	-----	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.1.3.	1 ^{er} Tramo. Salida. 1 muestra/semana	ST, DBO ₅ , DQO	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.2.1.	2 ^o Tramo. Entrada. 1 muestra/semana	ST, DBO ₅ , DQO	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.2.2.	2 ^o Tramo. Punto medio.	-----	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.2.3.	2 ^o Tramo. Salida. 1 muestra/semana	ST, DBO ₅ , DQO	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.3.1.	3 ^{er} Tramo. Entrada 1 muestra/semana	ST, DBO ₅ , DQO	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.3.2.	3 ^{er} Tramo. Punto medio	-----	-----	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos
2.3.3.	3 ^{er} Tramo. Salida 2 muestras/semana	ST, DBO ₅ , DQO	Patógenos: Ecoli, CF	pH, OD, T ^a , Eredox, Conductividad, Altura fangos

Tabla 1. Determinaciones analíticas, puntos, periodicidad

Para identificar los puntos de toma de muestra se ha utilizado una notación numérica. Al actuar este canal-humedal como tratamiento secundario se define cada punto de toma de muestra con el número 2 siendo la notación 2.1, 2.2. y 2.3. para los tramos 1, 2 y 3 del canal respectivamente. Cada uno de ellos a su vez se acompaña de un tercer dígito para indicar si la muestra se toma al principio

(1), centro (2) o final (3) de cada tramo.

HACER FIGURA

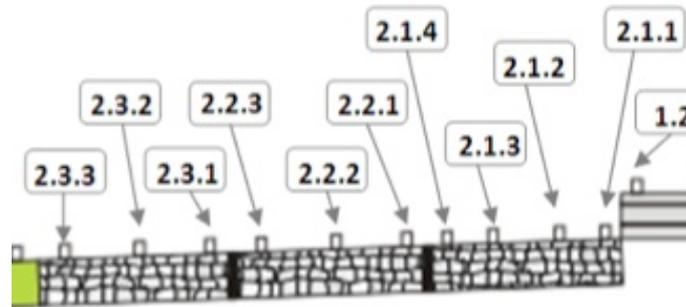


Figura 5. Puntos de toma de muestra y medida en canal-humedal

Las determinaciones analíticas recogidas en la tabla 1 se han realizado según los siguientes protocolos:

Análisis Físicos y Químicos

- * Total Suspended Solids (TSS) secados a 103-5 °C (APHA, 2540 D, 1992)
 - * Chemical Oxygen Demand (COD) (APHA, 5220 C, 1992)
 - * Biological Oxygen Demand BOD (APHA, 5210 D, 1992).
- Medida de la presión en la fase gas con sensor electrónico.

Medidas *in situ*

- * pH: . Actividad de los iones H⁺ por mediciones potenciométricas
- * Dissolved Oxygen (DO): Sensor electrónico por LOD.
- * Temperatura: Sensor electrónico , equipos de pH y OD
- * Potencial Redox (Eredox): Medida con sensor electrónico.
- * Conductividad eléctrica: Medida con sensor electrónico.

Determinación de la altura del lecho de fangos

- * Tubo medidor graduado

Medida en continuo del caudal afluente

- * Caudalímetro electromagnético PROline promag 50/53w

FALTA SEÑALAR EL METODO DE MEDIDA DE PERDIDAS DE CARGA QUE HICIMOS EN EL LABO CON LOS NIÑOS, NO?

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.- Hidráulica:

Desde el punto de vista meramente hidráulico el canal-humedal ha transportado 1.807 m³ durante un año de funcionamiento lo que representa una media diaria de 5 m³/d. Se han evacuado en superficie 15,4 m³ de aguas pluviales de acuerdo a los datos de la Agencia Española de Meteorología, sin que se hayan registrado charcas ni filtraciones hacia el interior.

2.- Régimen de alimentación:

Durante el arranque y hasta culminar los tres primeros meses la alimentación ha sido a un caudal comprendido entre 2 y 3 m³/d. Durante los tres meses siguientes se ha aumentado progresivamente el caudal hasta alcanzar valores de 16 m³/d con el fin de evaluar las cargas hidráulicas máximas admisibles en el proceso total. Así mismo se han ensayado puntas de carga

orgánica bypassando el tratamiento primario previo. Al término de los seis primeros meses se ha ensayado una parada del dren de 15 días de duración. Finalmente se ha mantenido un caudal de alimentación comprendido entre de 2 y 4 m³/d y una carga orgánica sólo variable en función de las condiciones reales correspondientes a periodos de lluvia (red saneamiento unitaria), altas y bajas temperaturas, fiestas de la localidad, para evaluar la buena marcha de los sistemas con cargas reales.

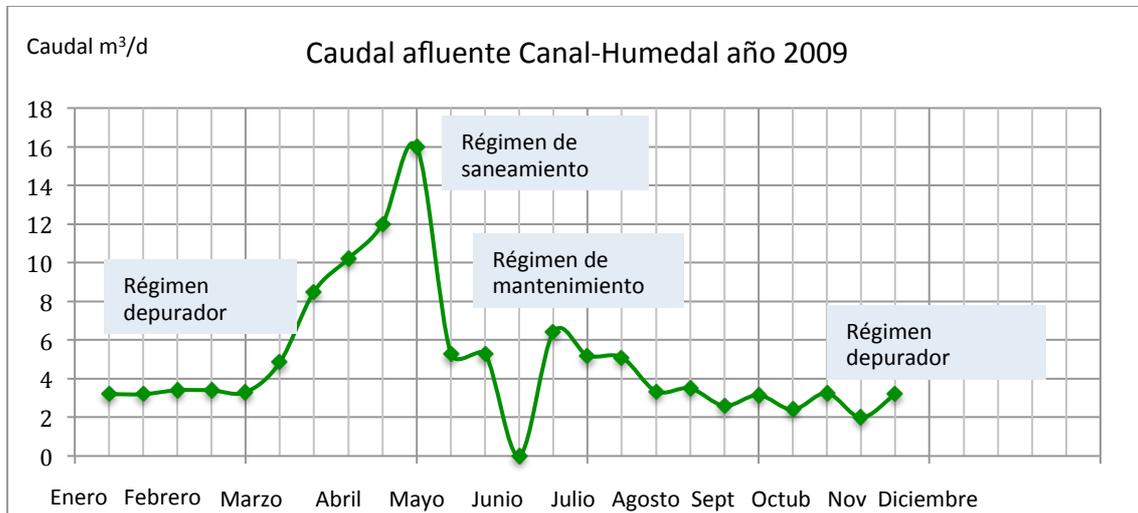


Gráfico 1. Caudal alimentación al canal-humedal, año 2009

No se han registrado obstrucciones ni señal de aflorar agua a la superficie, habiéndose mantenido una cámara de aire en el interior del canal, que ocupa más del 40% de su sección transversal lo que ha favorecido la permanencia de aerobiosis en los niveles superiores. Tanto la caracterización del influente como las calidades del efluente se muestran en los gráficos 2, 3, 4, 5 y 6.

3.- Control de procesos en el canal.

3.1.-Parámetros de depuración.

Se analiza el comportamiento del canal en su conjunto como sistema depurador.

BOD

El rendimiento medio del sistema en BOD fue del 65,62% ascendiendo en los últimos 6 en los que el caudal se estabilizó, hasta un 69,80 %. El sistema presentó una gran inercia ante variaciones en la carga de entrada con incrementos de hasta un 300 %, manteniéndose durante estas puntas los valores de salida muy estables, situados entre estrechos márgenes en torno a valores de 100 mg/l. (Gráfico 2.)

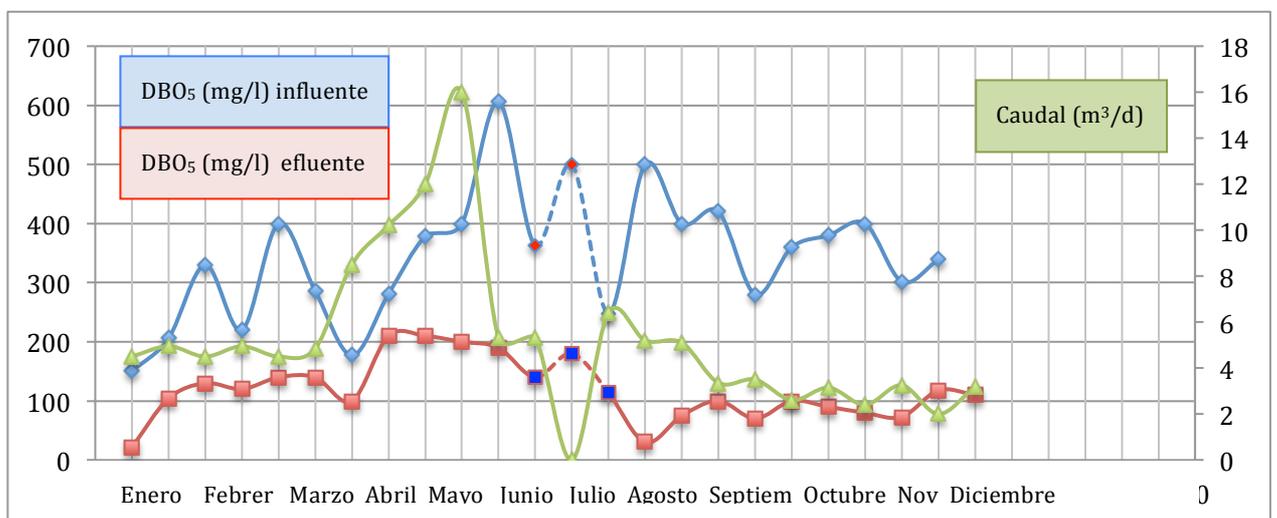


Gráfico 2. DBO₅ influente vs efluente. 2009

COD

El rendimiento en COD fue del 55,71% ascendiendo en los últimos 6 meses de estabilización de carga hidráulica al 63,05 %. La relación BOD/COD=0,43, se redujo en un 22 % lo que indica una disminución del carácter biodegradable de la materia orgánica que ha sido preferentemente consumida en el canal.(Gráfico 3).

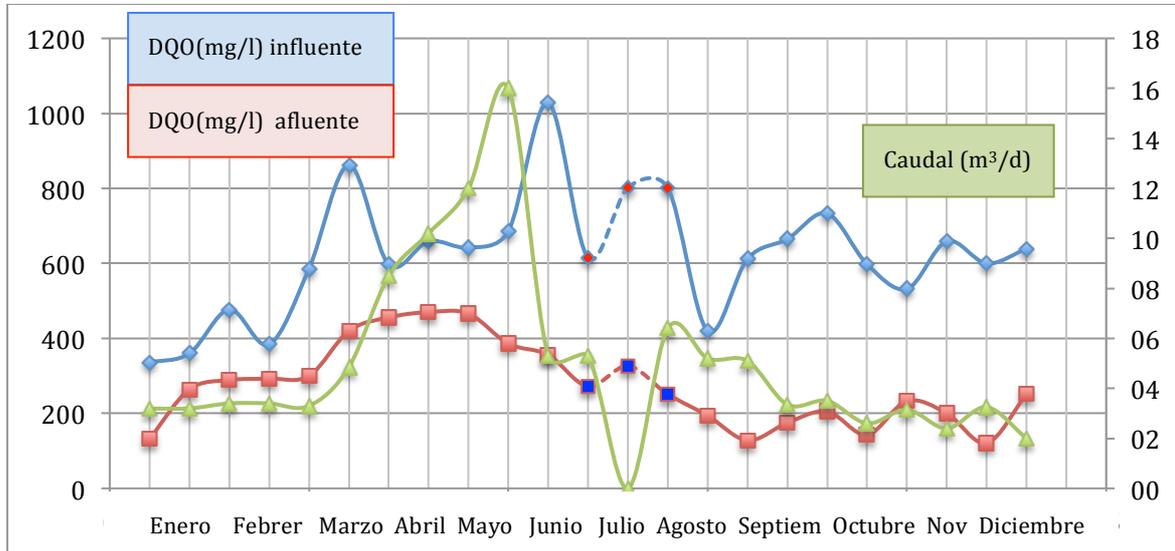


Gráfico 3. DQO influente vs DQO efluente. 2009

TSS

El rendimiento global del sistema se sitúa en un 79,89%. Habiendo aumentado en los últimos 6 meses al 84,96%. Al igual que en la carga orgánica se observa una gran estabilidad frente a puntas de carga y caudal. (Gráfico 4).

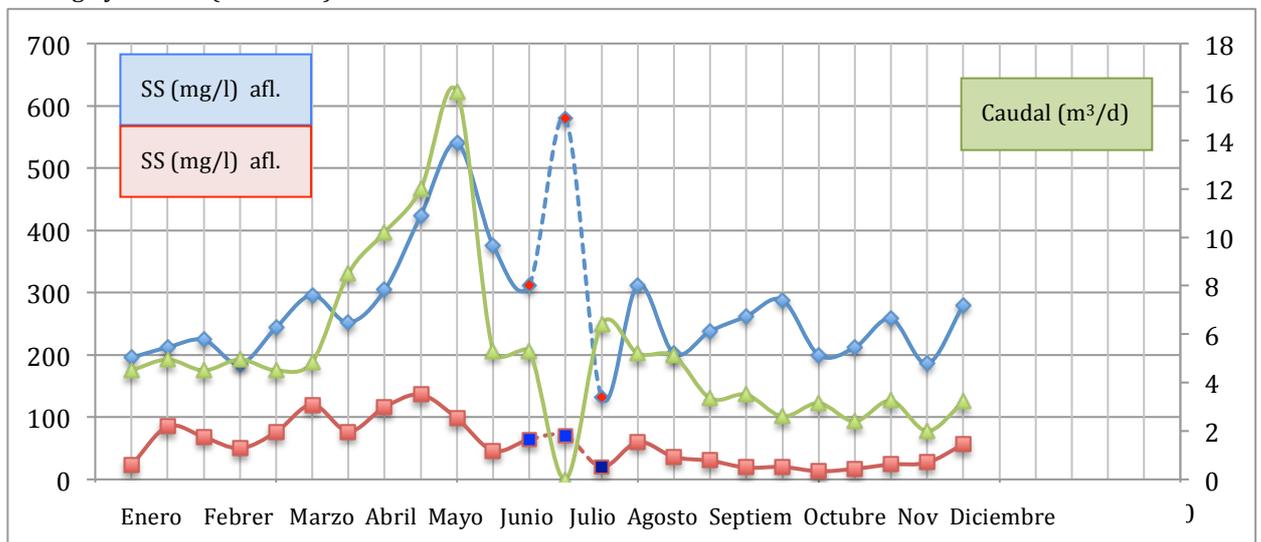


Gráfico 4. SST afluente vs efluente. 2009

Por tanto en los periodos correspondientes a regímenes de alimentación constante entre 2 y 3 m³/d se observan rendimientos en depuración importantes, los mayores en eliminación de sólidos, que se ven reducidos para cargas hidráulicas máximas cuando el caudal se incrementa hasta 16 m³/d. Sin embargo el comportamiento del oxígeno disuelto y el potencial redox ha sido el contrario, experimentando ambos aumentos conforme aumenta la carga hidráulica lo que confirma el efecto succión que ocasiona el aumento de velocidad del agua a su paso por el canal, especialmente acusado con el aumento de caudal.

La recuperación del sistema tras el ensayo de parada se produjo en 2-3 días debido a la estabilidad demostrada de la biomasa existente en el interior del canal lo que indica que no será especialmente problemática la operación intermitente, opción que se muestra en general beneficiosa para revertir obstrucciones (Nguyen, 2000; Corzo et al., 2008).

Caracteres Organolépticos

El efluente ha presentado normalmente un leve color gris-marrón suave y una considerable disminución de la turbidez. El olor es prácticamente inexistente ya que el biogás generado en los fondos anaerobios profundos del dren ha sido oxidado en su mayor parte por acción de las bacterias aerobias presentes en las zonas más superficiales del mismo, dando lugar a CO₂, H₂O, nitratos y sulfatos.

3.2.- Comportamiento frente a obstrucciones

1. Disminución de riesgos de colmatación en los primeros metros del humedal

Se presenta el estudio por tramos del perfil de fangos depositados en la base del canal al termino del año de investigación:

1^{er} tramo:

La línea límite de acumulación de fangos en la base del canal-humedal presentó una pendiente absoluta del 2,21%, teniendo en cuenta la pendiente de base del canal del 1,5 %, la pendiente real que marcó el comportamiento de lecho de fangos siendo negativa y tiene un valor del 0,71%. La cámara de aire se mantuvo constante.

Porosidad de la sección inicial 2.1.1.= 73%. Oclusión de poros = 54%

Porosidad de la sección intermedia 2.1.2.= 62%. Oclusión de poros = 35 %

Porosidad de la sección inicial 2.1.3.= 51%. Oclusión de poros = 23%

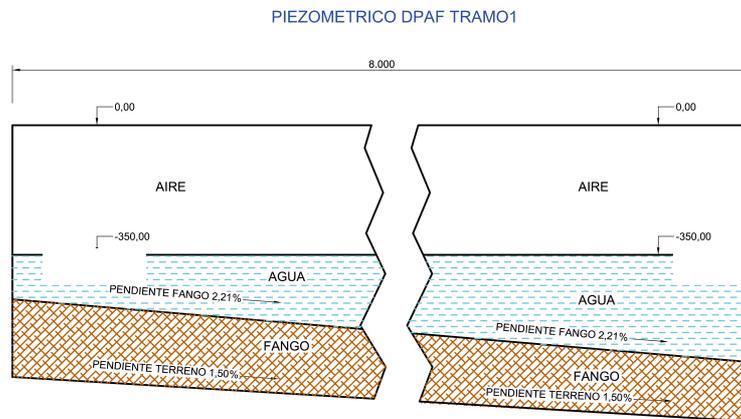


Figura 8. Lecho de fangos, Tramo 1 del canal-humedal.

2^o tramo:

La pendiente absoluta del lecho de fangos fue 0,9 % negativa, teniendo en cuenta la pendiente de la base del 1%, el lecho de fangos describe una pendiente positiva del 0,1 %. La cámara de aire se mantuvo constante.

Porosidad de la sección inicial 2.2.1.= 73%. Oclusión de poros = 27 %

Porosidad de la sección intermedia 2.2.2.= 62%. Oclusión de poros = 22 %

Porosidad de la sección inicial 2.2.3.= 51%. Oclusión de poros = 23%

PIEZOMETRICO DPAF TRAMO2

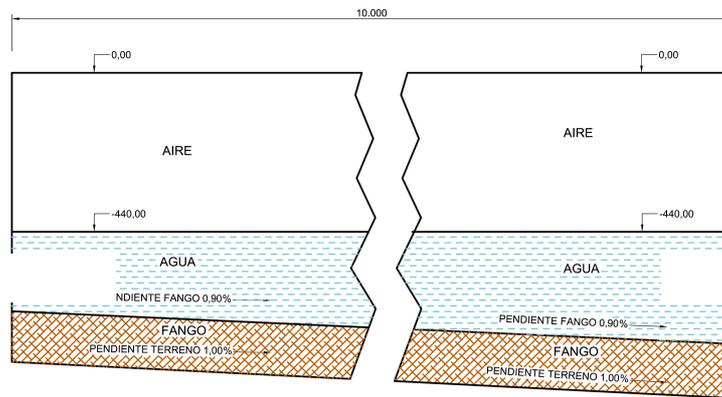


Figura 9. Piezométrico del tramo 2 del canal-humedal.

3^{er} Tramo:

La pendiente absoluta del lecho de fangos fue del 1,24 % negativa, sobre una pendiente del terreno del 1%, el lecho describió por tanto una pendiente negativa del 0,24 %.
Porosidad de la sección inicial 2.3.1.= 73%. Oclusión de poros = 18%
Porosidad de la sección intermedia 2.3.2.= 62%. Oclusión de poros = 14 %
Porosidad de la sección final 2.3.3.= 51%. Oclusión de poros = 12%

PIEZOMETRICO DPAF TRAMO3

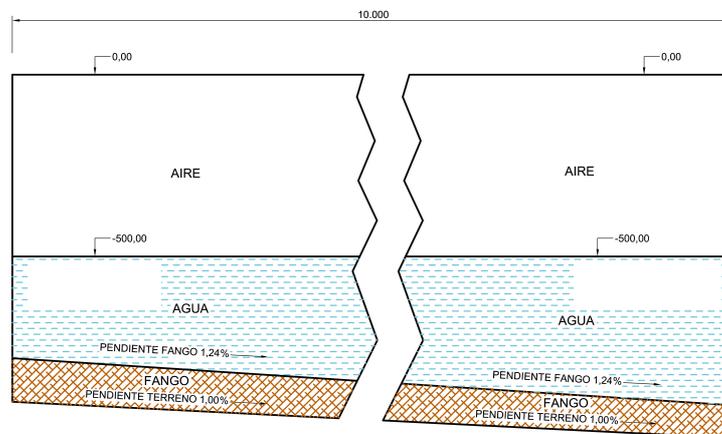


Figura 10. Piezométrico del tramo 3 del canal-humedal.

PON ESTOS RESULTADOS EN UNA TABLA Y LOS COMENTAS MAS FACIL QUE CON TANTO NUMERO INTERCALADO, NO? Y MS CORTOOO

El nuevo diseño de canal-humedal presenta una porosidad media (medida en laboratorio) hemos puesto en metodos como lo ehms0 medido? de la sección transversal al inicio del sistema del 73 % que pasa en los últimos metros a situarse en el 51% frente a valores constantes de porosidad del lecho que nunca sobrepasan el 45% en los diseños tradicionales. En ellos, los estudios realizados hasta el momento se refieren a reducciones de la porosidad del sustrato a la entrada que ocasionan oclusiones del 66% de los poros lo cual se corresponde con los mínimos de conductividad hidráulica, frente oclusiones del 28% a la salida del humedal. El sistema canal-humedal según se desprende de los datos anteriores presenta una oclusión del 46% de los poros en los primeros metros frente al 12% a la salida del humedal.

Debido a esto actualmente se recomienda no pasar de cargas horizontales correspondientes a 5 g/m² de TSS ni de 20 g/m² de COD. En la presente investigación, el aumento de la porosidad de entrada provocado en el canal-humedal en beneficio del aumento de la conductividad hidráulica ha permitido trabajar a valores medios en COD de 79,40 g/m², 64,00 g/m² y 56,00 g/m² en el primer, segundo y tercer tramo de canal respectivamente. En cuanto a carga de TSS los valores medios por tramo han sido de 14,18 g/m², 10,78 g/m² y 7,90 g/m² respectivamente.

A la vista de los resultados obtenidos en cuanto a comportamiento hidráulico tras un año de funcionamiento se observa una mejora progresiva de capacidad al pasar de un tramo a otro. La mayor retención de sólidos se produce en el primer tramo disminuyendo la acumulación de los mismos en un 35% al pasar al segundo tramo y registrándose el mismo porcentaje de disminución al pasar al tercero.

Aplicando la conductividad hidráulica del medio granular medida en el laboratorio, se han obtenido unas capacidades iniciales de circulación de agua a través del canal-humedal de 27,32 m³/d, 19,58 m³/d y 22,61 m³/d para los tramos primero, segundo y tercero respectivamente. Estos resultados indican una mayor capacidad de transporte en el primer tramo habiendo sido la entrada del tramo 2 el punto crítico exclusivamente a la geometría del canal, que proporciona en este punto la menor área transversal disponible.

Una vez transcurrido el primer año de funcionamiento los resultados muestran una nueva capacidad de transporte de 17,93 m³/d, 15,25 m³/d y de 19,55 m³/d para los tramos primero, segundo y tercero respectivamente. Estos resultados indican que efectivamente, la mayor reducción se ha producido en el primer tramo con una disminución del 34,39% sobre la capacidad inicial, mientras que el segundo y el tercero han registrado reducciones menores del 22,13 % y 13,54 % respectivamente. La importante mejoría observada al pasar al segundo tramo puede adjudicarse en exclusiva a la mejora de la calidad del agua. Finalmente el tercer tramo ha representado la recuperación del sistema.

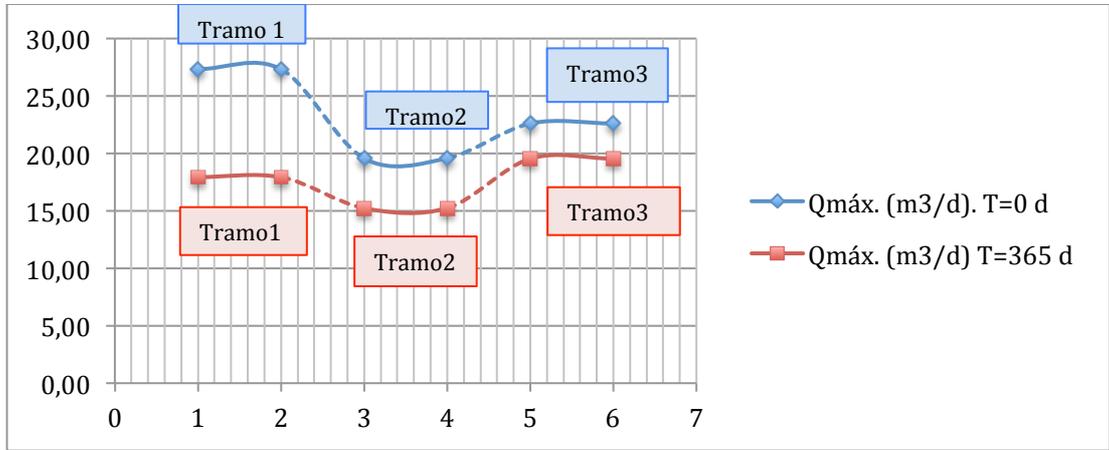


Gráfico 7. Caudal máximo admisible a los 365 d de investigación

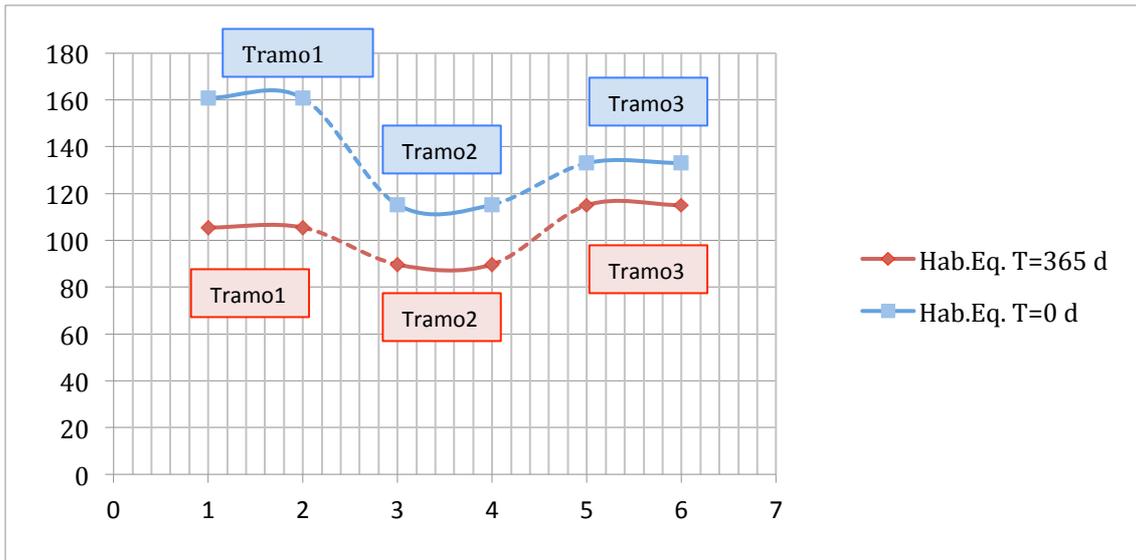


Gráfico 8. N° Máx. de Hab.Eq. a los 365 d de investigación

La carga hidráulica de trabajo a la entrada del sistema ha sido de $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ frente a los valores de entre $0,12 - 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ normalmente recomendados por los distintos autores. No obstante, como se ha indicado anteriormente, esta carga está limitada por la capacidad de tratamiento del canal no por su capacidad de transporte.

2. Aireación del canal-humedal

La importancia de la aireación natural en los humedales horizontales se pone por tanto de manifiesto por tanto como importante herramienta en la lucha contra la colmatación. En el lecho de piedras dispuesto en el canal-humedal el agua va circulando constantemente a través de huecos cada vez menores en virtud de las secciones transversales variables en los 10 m de longitud de cada tramo. A raíz del estudio de secciones transversales presentado puede establecerse que el agua transcurre a través de multitud de canales paralelos de sección transversal decreciente. Este gradiente de porosidades además de adaptarse a las consecuentes variaciones de conductividad hidráulica provoca aumentos graduales en la velocidad del agua que se ve obligada a circular cada vez por menores huecos (Ley de Darcy). Dichos aumentos discretos de velocidad generan pequeñas depresiones en la circulación del agua que facilitan la succión del aire a su paso por el lecho siempre que ello sea físicamente posible, para lo que se dispone el circuito de aireación descrito en el apartado anterior.

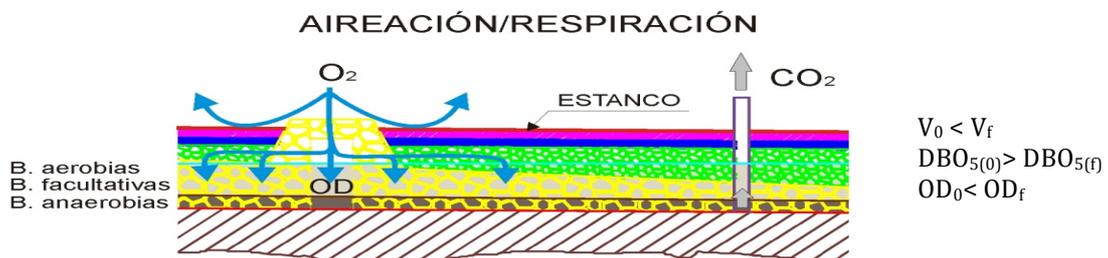


Figura 11. Circuito de aireación natural forzada en el canal-humedal

Los resultados obtenidos en el seguimiento de las variables de proceso han sido los siguientes:

Oxígeno disuelto, DO.

Los contenidos en oxígeno disuelto medidos en el efluente fueron superiores a los del influente, lo que indica un aporte eficaz de oxígeno al canal y por tanto un buen funcionamiento del circuito de aireación. El valor medio de OD en el efluente ha sido de $0,55 \text{ mg/l}$. (Gráfico 5).

Es muy importante destacar que al subir la cantidad de influente y por tanto la cantidad de materia orgánica a tratar, se demuestra que también aumenta drásticamente el oxígeno disuelto disponible en el medio, y eso es debido a la succión de aire por el agua que entra en el canal, así el sistema tiene una gran autorregulación en sí mismo que le permite ser eficaz en un rango alto de variaciones de caudal.

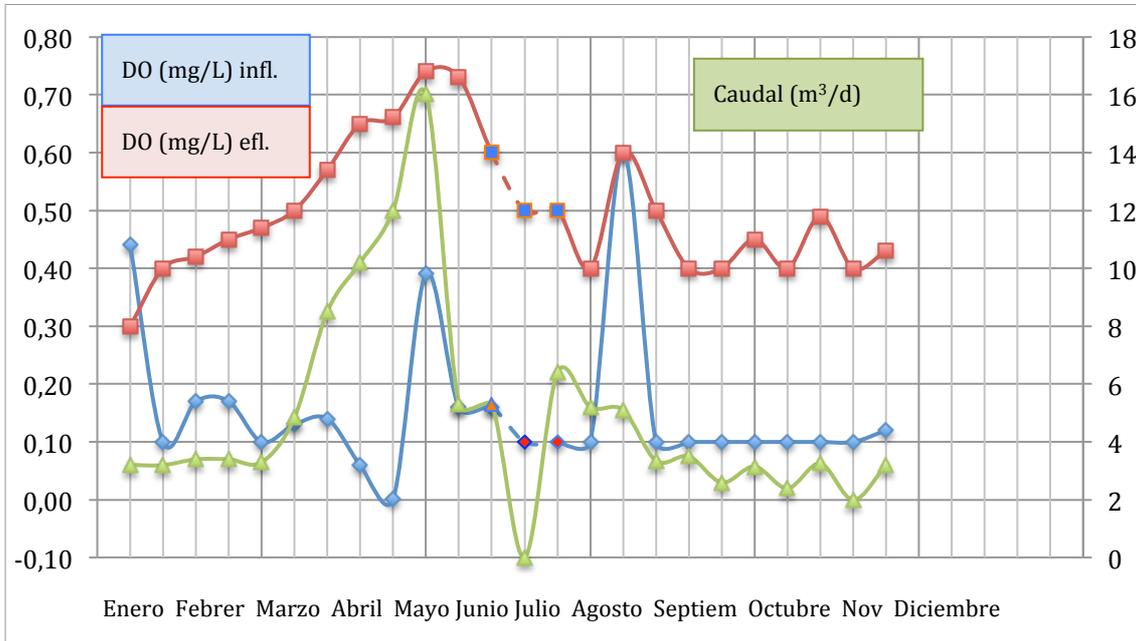


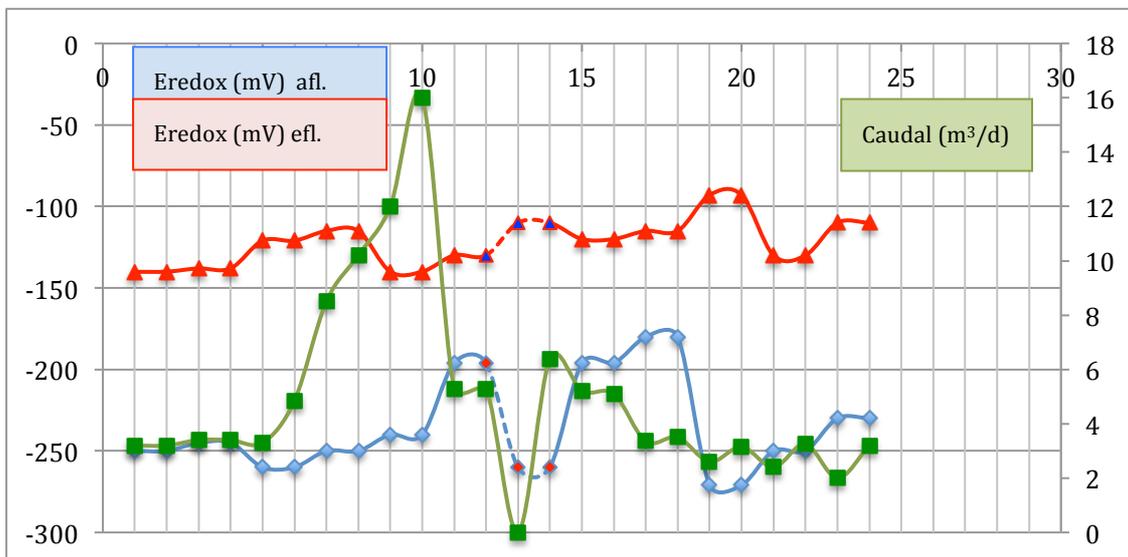
Gráfico 5. DO afluente vs efluente. 2009

Potencial REDOX

La medida del potencial redox en las aguas puede considerarse como una instantánea de la situación del sistema en cada momento (Dusek et al., 2008) cuyos valores cuanto más negativos sean mayores condiciones anaeróbicas indicarán (Caselles Osorio, A.; 2007) o del grado de tratamiento (Piriz, A.J.; 2000).

El potencial redox medido experimentó un aumento considerable a lo largo del canal. Los valores medios de salida registrados fueron de -117 mV, correspondiente a valores en los que las bacterias metanogénicas siguen activas, se constata que no apareció exudación de PHB.

Comparando entradas y salidas, se observa un aumento el Eredox del medio lo que supone que los microorganismos pasan de ser anaerobios estrictos a anaerobios aerotolerantes, poblaciones que resisten la presencia de oxígeno, si bien crecen mejor en su ausencia, en definitiva un paso progresivo de sistemas típicamente anaerobios a sistemas donde conviven procesos anaerobios en la base del humedal con procesos facultativos y aerobios para un perfil transversal ascendente en un mismo punto del dren de piedras y para un avance longitudinal. (Gráfico 6 y Tablas 1 y 2).



Enero Febrer Marzo Abril Mayo Junio Julio Agosto Sept Oct Nov Diciembre

Gráfico 6. Potencial Redox afluente vs efluente. 2009

Se confirma que el circuito de aireación favorece la difusión de O₂ a través del lecho de piedras habiendo conseguido un suministro suficiente de oxígeno al agua circulante. Un efecto secundario del aumento en la concentración de oxígeno en agua es la disminución de la carga orgánica propiciada por el rápido metabolismo de los microorganismos aerobios.

Muchos estudios indican que la cantidad de oxígeno aportada por transferencia directa es más necesaria que la aportación convectiva realizada por las plantas, ya que éstas usan el oxígeno en su mayor parte para consumo propio (Brix, H.; 1993), no obstante, en esta investigación se ha trabajado sin plantas para aislar su efecto.

Se observa como el sistema tiene una inercia muy importante en su comportamiento frente al potencial redox, ya que aumentos temporales significativos de caudal, no afectan significativamente sus valores. Esto es una potencialidad del sistema, que queda protegido ante puntas de vertido ocasionales, normales en cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas. Esto podría ir a conclusiones, si es que no lo has puesto y lo veo mas abajo... esto esta superinteresante, enhoraubenaaaa

Se ha efectuado también un análisis por tramos del potencial Redox y el Oxígeno Disuelto en agua en las tres secciones de los tres tramos del canal habiéndose obtenido los resultados que se recogen en la Tabla 1.

	1 ^{er} Tramo			2 ^o Tramo			3 ^{er} Tramo		
	2.1.1.	2.1.2.	2.1.3.	2.2.1.	2.2.2.	2.2.3.	2.3.1.	2.3.2.	2.3.3.
OD (mg/l)	0,16	0,30	0,35	0,43	0,41	0,37	0,44	0,46	0,55
ΔOD (%)		87,50	16,97	22,54	-4,65	-9,98	17,86	6,61	17,58
Redox (mV)	-242	-182	-135	-116	-101	-110	-120	-119	-117

Tabla 1. Valores registrados de OD y Eredox en el canal-humedal

El agua entra en el primer tramo del canal en condiciones anaerobias con una muy baja tasa de oxígeno disuelto y un redox que indica condiciones claramente reductoras. El OD experimenta una mejoría considerable al final del primer tramo, la más significativa del canal multiplicándose por 3 su contenido en el efluente con respecto a la entrada. Puede observarse un paralelismo con el potencial redox medido cuyos valores confirman la tendencia del canal a evolucionar a condiciones aerobias que no llegan a consolidarse. El aumento de OD en agua registrado no es suficiente para elevar el potencial redox a valores representativos de sistemas aerobios pero si permite evitar la entrada del sistema en altos niveles de anaerobiosis.

En los humedales horizontales poco profundos la principal vía de degradación de la materia orgánica es la desnitrificación seguida de la sulfatorreducción (Aguirre, P., 2004) obteniéndose sistemáticamente obtienen efluentes de mejor calidad que los profundos. Éstos últimos trabajan a potenciales redox inferiores a -300 mV y predomina mayoritariamente la sulfatorreducción. Aún así, los atascos son constantes en ambos (Salas, J.J.; Pidre, J.R.; 2007) debido principalmente a que la aireación del sistema es nula, pues los circuitos de aire son abiertos, sin entradas ni salidas ni o circulación de aire (Pozo, L.; Lebrato, J.; 2009).

En cuanto al gradiente vertical de Potencial Redox y DO, se han medido ambos parámetros en la superficie, TAE, y el fondo del dren, DAE, en los puntos inicial y final por tramo (Tabla 2).

	1 ^{er} Tramo		2 ^o Tramo		3 ^{er} Tramo	
	2.1.1.	2.1.3.	2.2.1.	2.2.3.	2.3.1.	2.3.3.
Redox (mV) agua	-242	-135	-116	-110	-120	-117
Redox (mV) lecho fangos		-326	-324	-316	-350	-161
OD (mg/l) agua	0,16	0,35	0,43	0,37	0,44	0,55
OD (mg/l) lecho de fangos	0,10	0,12	0,10	0,12	0,10	0,09

Tabla 2. Gradiente vertical redox

Se confirman condiciones de anaerobiosis invariables en la base del canal frente a progresivos aumentos de OD en la masa de agua circulante apreciándose por tanto claramente la diferenciación entre los dos sistemas, DAE y TAE.

Los valores obtenidos en este trabajo, sitúan experimentalmente el Eredox de -350 mV como el menor valor de operación obtenido en las peores condiciones de proceso en el que no se registran colmataciones por exudación de PHB, y en base a esta evidencia, marcamos este valor como el nivel de seguridad para evitar el riesgo real de colmatación del sistema. En puntos donde desciende algo más el valor de Eredox se empiezan a detectar flóculos mayores de bacterias y aparecen evidencias de polímeros exudados en exceso.

La evolución de ambos parámetros en el agua y en el lecho de fangos se representa en el Gráfico 9 con el eje de ordenadas principal mostrando el potencial redox y el secundario el OD.

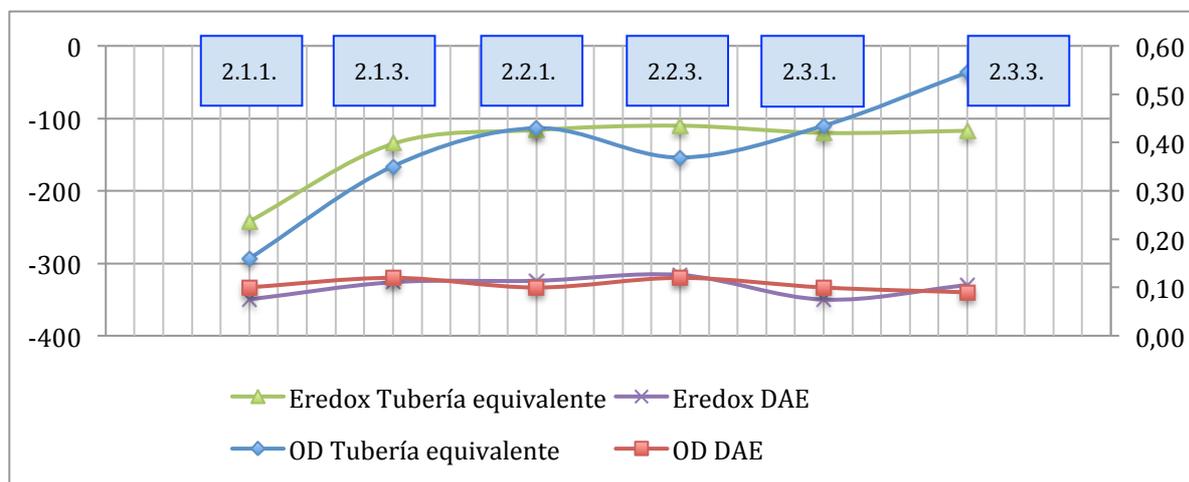


Gráfico 9. Valores de Eredox en agua y lecho de fangos

Si se observa el comportamiento del oxígeno disuelto en comparación con la mejora de la calidad del agua en cuanto a disminución de la DBO₅ se comprueba que conforme aumenta el OD, ésta disminuye lo cual es indicativo de la existencia de procesos aerobios de degradación de la materia orgánica.

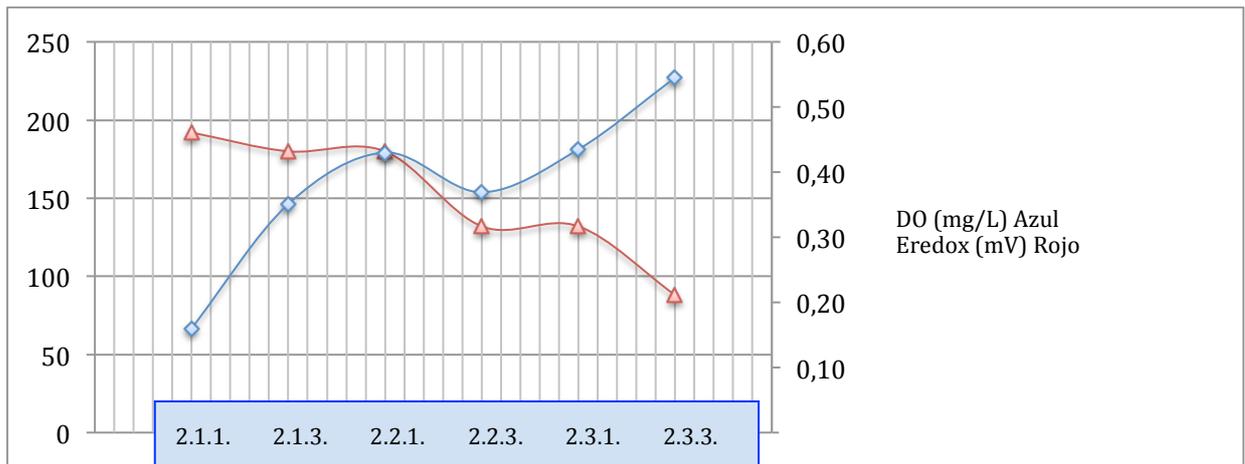


Gráfico 10. Evolución de la BOD con respecto al oxígeno disuelto

NO ME ENTERO BIEN DE ESTA GRAFICA, NO SE SI LE FALTAN las variables en las abcisas y ordenadas o que estoy torpe, o las dos cosas...

Al vista de los datos representamos, se concluye la necesidad de valores de al menos 0,45 mg/l de OD para esperar degradación aerobia ya que a partir de estas cifras incrementos de OD proporcionan directamente disminución de DBO_5

No es posible determinar con exactitud qué cantidad de materia orgánica eliminada se debe a procesos biológicos aerobios y cuánta a procesos anaerobios pero sí ha sido posible constatar un aumento neto del DO en el efluente con respecto al afluente, su cuantificación promedio nos indica se produce un aumento neto de oxígeno en agua de $0,085 \text{ g/m}^2 \text{ día}$.

En cuanto a la relación entre el DO y la temperatura se han estudiado los valores obtenidos en tres intervalos de temperatura del agua:

De 7°C a 9°C en el que los valores de OD en el efluente han llegado a alcanzar los $0,8 \text{ mg/l}$. (concentración de saturación en equilibrio del oxígeno $T < 9^\circ\text{C} = 11,6 \text{ mg O}_2/\text{l}$). De 9°C a 15°C en el que se han registrado valores medios de $0,64 \text{ mg/l}$ de OD. De 15°C a 21°C donde la media de valores en el efluente desciende a $0,25 \text{ mg/l}$ de OD.

Para temperaturas medias del agua $< 9^\circ\text{C}$ la concentración de saturación en equilibrio del oxígeno es igual a $11,6 \text{ mg O}_2/\text{l}$ mientras que en zonas cálidas para temperaturas medias del agua mayores o iguales a 18°C es $9,6 \text{ mg O}_2/\text{l}$. no se ha obtenido una correlación aceptable enfrentando los datos de oxígeno disuelto en el efluente con progresivos aumentos de caudal en el intervalo comprendido entre 2 y $9 \text{ m}^3/\text{d}$. Podemos decir que el efecto de la temperatura sobre el oxígeno disuelto es mayor que el efecto producido por incremento de caudal circulante dentro de los límites de la experimentación.

Discusión general de procesos comparados en el canal y los humedales tradicionales.

Esto estaba en el final de conclusiones, y creo que podemos traerlo a discusión general...

Los diseños de HSSF TW varían de unos lugares a otros, en UK se trabaja con elevadas relaciones de carga hidráulica y de sólidos (HLR media = $0,12 \text{ m/d}$ y TSS mediana = $7 \text{ g/m}^2 \text{ d}$) en comparación con otros conjuntos de datos, donde uno o ambos parámetros es relativamente menor. En Estados Unidos HLR media = $0,02 \text{ m/d}$ y TSS medio = $2 \text{ g/m}^2 \text{ d}$). En Alemania se emplean altos HLR (mediana = $0,3 \text{ m/d}$), pero relativamente bajas cargas de sólidos (mediana = $3 \text{ g/m}^2 \text{ d}$). La combinación de sobrecarga hidráulica y de sólidos disminuyen la longevidad de

estos sistemas.

Comparando los parámetros de diseño usuales en UK, Alemania y USA con el presente trabajo en la siguiente tabla se pueden observar las mejoras de proceso que se consiguen con la configuración en canal sobre los humedales tradicionales.

Hay que resaltar aquí las recomendaciones de diseño de los HSSF TW en Europa son de utilización de grava de 3-16 mm mientras que las de los EE.UU. han sugerido la inclusión de los lechos mayores 30 mm.

Tabla.	Canal	UK, Alemania y USA
Carga superficial hidraulica horizontal		
Cargas transversales		
Tamaño de lechos		
Parámetros de funcionamiento		
Como tubería:		

Puedes tomar todos estos datos juntos en la tabla y así se visualizan de un vistazo... no?

las cargas superficiales (horizontales) hidráulica, de materia orgánica y de sólidos usadas en UK, Alemania y USA, son del orden de $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y día - $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y día, frente a $0,07 - 0,53$ nuestro. En cuanto a SST son de $3 - 7 \text{ g SST}/\text{m}^2$ frente a los $6,4 - 51,2$ medidos en el presente trabajo.

Por otro lado tenemos las cargas transversales de $250 \text{ g}/\text{m}^2$ día de DBO usuales frente a $1.129 - 3411 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$ encontrados en el presente trabajo, es decir de 4 a 13 veces más, la situación más estudiada es la de 6 veces más.

Todo ello para lechos de ellos 3 a 30 mm nosotros de 50 a 200 mm. O sea aumentos de 16 veces el diámetro más pequeño y 6 veces el más grande aunque con organizaciones de lecho con gradiente mientras que ellos es constante.

Parámetros de funcionamiento como tubería (V, CH) vs reactor Corgánica y de sólidos . Ver gráfica carga volumétrica master y managua 3

En los estudios previos de atasco de humedales se constata que elevadas cargas orgánicas, HLR altas, aumentan la probabilidad de que la acumulación de materia obstruida cause problemas hidráulicos, mientras que a bajos HLR los sólidos orgánicos son capaces de mineralizarse suficientemente bien como para impedir la obstrucción en la mayoría de los casos.

La mayoría de los autores reportan una correlación positiva entre sistema de atascos y las tasas de carga de TSS y COD (Tanner y Sukias, 1995), correlacionando positivamente tasas de carga de TSS y COD con la severidad de la obstrucción Winter y Goetz (2003). Para valores de COD inferiores a $20 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$ y de $5 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$ de TSS no se han detectado problemas de obstrucción. Tasas de carga de COD de $12 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$ producen una tasa de acumulación de sólidos promedio de $11 \text{ kg}/\text{m}^2$ año. Tasas de COD mayores ($67 \text{ g}/\text{m}^2/\text{d}$) corresponden a tasas proporcionalmente mayores de acumulación de sólidos ($51 \text{ kg}/\text{m}^2$ año).

La sobrecarga hidráulica da generalmente lugar a flujos superficiales, las tasas de de acumulación pueden fácilmente superar a las tasas de mineralización produciéndose un fallo hidráulico completo (Platzer y Mauch, 1997; Langergraber et al, 2003; Zhao et al, 2004).

Como parámetros de trabajo hay autores que utilizan carga de sólidos totales, y cargas de BOD y COD, sin embargo hay otros que utilizan el área de la sección transversal en la dirección del flujo recomendándose un máximo de carga de DBO de 250 g/m² d para HSSF TWS en lechos de 3 a 16 mm, habiéndose llegado incluso a 30 mm.

The sedimentation of large particle size is the principal mechanism of solids removal which typically takes place in the first few meters of the wetland. Several studies conclude that greater biofilm development occurs at the inlet region where the concentration of the organic matter in the wastewater is greatest (García et al., 2003; García et al., 2007; Tietz et al., 2007) therefore the inlet hydraulic conductivity is reduced. A positive correlation between system clogging and TSS and COD loading rates has been described (Winter and Goetz, 2003). Clogging problems decreased in systems that receives less than 20 g/m²d COD and 5 g/m²d TSS.

Aquí pones unos datos de los humedales verticales Cooper, P. 2004. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rate. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for

Y resalta que con nuestro canal tenemos mayores capacidades de tratamiento y rendimientos que en los humedales y menor complejidad de construcción y funcionamiento que en los verticales

CONCLUSIONES

La "revolucionaria" organización de las piedras en una configuración en canal longitudinal con una diagonal de piedras grandes y por encima piedras medianas y pequeñas, sumado al sistema de aireación forzada sin coste energético con los pozos y chimeneas construidos, dan lugar a unos rendimientos excelentes sin que no hayan registrado problemas de atasco en los (dos) años de ensayo (y mantenimiento) que se han estudiado, como ocurre usualmente en los humedales subsuperficiales horizontales desarrollados hasta el momento.

La configuración en canal longitudinal disminuye drásticamente la posibilidad de cortocircuitos hidráulicos, que tantos problemas causa en los humedales tradicionales, y aumenta considerablemente los rendimientos del sistema al aprovechar todo el volumen útil del sistema al evitar espacios muertos.

El circuito de aireación diseñado y construido ha hecho que el canal haya funcionado en un estricto flujo pistón, ya que su funcionamiento se basa en la trayectoria del agua y el efecto succión de oxígeno a lo largo del mismo, mientras decae la materia orgánica en el proceso de depuración.

La diagonal de piedras ha hecho que el canal se haya desdoblado en dos zonas de comportamiento muy diferente, la de fondo que se comporta como un digestor anaerobio equivalente (DAE) y la más superficial, que se configura como un tubo aerobio equivalente (TAE).

El valor de la carga de materia orgánica medida en BOD referido a la sección transversal inicial del canal ha sido cuatro veces superior a los recomendados para diseños tradicionales, habiéndose trabajado a 1.129 g BOD/m²d frente a los 250 g BOD/m²d normalmente recomendados. Esto permite tratar volúmenes de agua mayores y/o más cargados en espacios mucho menores y por tanto realizar una modificación en el diseño tradicional de humedales en el que la anchura total del sistema venga determinada por máximos de carga o caudal que es capaz de admitir cada canal en su entrada y la longitud por el rendimiento deseado.

No me eches mucha cuenta, pero creo que esta es ya la mejor conclusión de tu trabajo... y así debes ponerla...

La configuración en canal longitudinal permite una construcción menos complicada que la de humedales verticales, todo ello con parámetros de rendimiento en depuración similares o mejores. Esta facilidad de construcción permite su aplicación en muchos entornos donde un humedal vertical no es viable técnica o espacialmente.

Los datos experimentales de aumento de oxígeno disuelto conforme aumenta el caudal de aguas de entrada, hasta un límite máximo, permite usar el canal como una muy buena herramienta de depuración. La respuesta a estos aumentos de caudal del potencial redox, que permanece estable para vertidos puntuales y de corta duración, hasta una semana, le da una inercia al canal que facilita las rutinas de mantenimiento en situaciones reales de servicio a poblaciones.

Surge además una aplicación muy interesante en este diseño innovador, que es la posibilidad de uso del canal como tubería de saneamiento aprovechando la geometría de canal, pues a grandes caudales y con suficiente pretratamiento, equivalente a un eficaz tratamiento primario, se comprueba que trabaja muy bien transportando agua, se registran entradas de aire mayores que a bajas cargas hidráulicas aunque al trabajar a bajos HRT no se alcanzan los grados de depuración exigidos por normativa.

Recomendaciones técnicas para la construcción de canales longitudinales de piedras

A la vista de los resultados obtenidos se recomienda el diseño de sistemas de depuración con una distribución del flujo de agua en canales de sección trapezoidal de 10 m de longitud por 1 m de anchura y 0,80 m de altura manteniendo una lámina de agua de 0,45-0,50 m para el mantenimiento de una cámara de aire en su interior.

Se instalarán en serie tantos canales como sea necesario para alcanzar los rendimientos en depuración requeridos teniendo en cuenta el rendimiento que aporta cada tramo unitario de canal. Por tanto será este criterio el que definirá la longitud del humedal.

Cada canal soportará una carga máxima de materia orgánica y sólidos en su sección transversal, por tanto la carga total influente se repartirá en tantos canales como sea necesario cuya longitud se prolongará después en función de lo indicado en el párrafo anterior.

La granulometría de lecho debe oscilar entre los 200 mm y los 50 mm de piedra angulosa siendo ésta más recomendable que los cantos rodados para evitar acoplamientos.

La organización de la piedra según una diagonal longitudinal de porosidad decreciente junto con el sellado en superficie de cada canal y la instalación de un pozo-aireador inicial en combinación con una chimenea respirador en su tramo final conformarán el circuito de aireación. La cámara de aire representará en cualquier caso un 40% al menos del volumen total del lecho.

De este modo la anchura total de humedal será la resultante de la suma del número de canales paralelos como sea necesario para que ninguno de ellos soporte un aporte en cabecera superior a 64 g/m² de DCO y 10 g/m² de SST medidos en carga horizontal de aporte habiéndose aplicado en esta recomendación los valores obtenidos en el segundo tramo de canal como medida de seguridad. La carga hidráulica de trabajo se sitúa en 0,5 m³/m²d. La carga máxima en sección transversal será de 1.000 g/m²d habiéndose aplicado un coeficiente de seguridad del 10 %.

PARA CONCLUSIONES

Water Pollution Control, Avignon (France), September 2004 153-160. (TOMADO DEL SMAWATT07)

Agradecimientos: MMAmb., Jta, Alumnos Gtar, pecc (sin centa)