

4. Diseño de humedales para aplicaciones específicas

4.1 Introducción

Basado en el enfoque de diseño de humedales presentado en el capítulo 3, en este capítulo el enfoque de diseño se aplica a 15 aplicaciones u objetivos de tratamiento diferentes, respectivamente. Los humedales que tratan aguas residuales domésticas no se describen en este capítulo, ya que esta aplicación principal ya está descrita en varios libros de texto (por ejemplo, Kadlec y Wallace, 2009; Dotro et al., 2017).

La estructura general de cada uno de los subcapítulos es la siguiente:

1. Se define el objetivo de diseño.
2. Se discute el proceso para alcanzar el objetivo de diseño y las bases de este y se discute la selección del tipo de humedal para tratamiento a usar.
3. Se mencionan las consideraciones específicas para diseño y construcción.

4.2 Humedales para tratamiento para regiones en desarrollo

Marcos von Sperling ¹, Christoph Platzer ²

¹ Federal University of Minas Gerais, Brazil

² Rotaria do Brasil, Brazil

4.2.1 Introducción

En el contexto actual, los países o regiones en desarrollo son aquellos que se caracterizan por tener bajos ingresos y, como tales, tienen recursos limitados para la implementación, operación y mantenimiento de infraestructuras. Varios países en desarrollo muestran altos contrastes económicos regionales, con áreas técnicamente desarrolladas que coexisten con regiones pobres, pero el enfoque aquí se centra exclusivamente en aquellos con recursos financieros limitados.

Aunque los principios de funcionamiento de los Humedales para tratamiento en las regiones en desarrollo siguen siendo los mismos que en las áreas desarrolladas, hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta en la planificación, el diseño y el funcionamiento de los sistemas de tratamiento.

Otro aspecto relevante para considerar aquí es que muchas regiones en desarrollo en el mundo se encuentran en zonas de clima cálido. El factor climático debe tenerse en cuenta en el diseño de humedales en estas regiones. Nuevamente, los principios de funcionamiento del sistema de tratamiento serán los mismos, aunque se deben tener en cuenta las características específicas.

En esta sección, el estado de desarrollo y los factores climáticos están en muchos casos entrelazados. Sin embargo, en el mundo hay áreas desarrolladas en regiones cálidas, y también regiones en desarrollo en áreas templadas o frías. Siempre que sea posible, se mencionará la influencia del nivel de desarrollo y del clima.

4.2.2 Consideraciones específicas durante la planificación, diseño, construcción y operación.

Los siguientes aspectos deben tenerse en cuenta al planificar, diseñar, construir y operar humedales para tratamiento en regiones en desarrollo, con consideraciones adicionales con respecto a las posibles condiciones de clima cálido:

a) Aspectos relacionados con el estado de desarrollo regional

- **Necesidad de bajos costos de inversión y de operación (CAPEX y OPEX, respectivamente).** En regiones con recursos financieros limitados, es esencial que los costos de construcción sean bajos, para que la implementación de los sistemas de tratamiento sea viable. Además, los costos de operación y mantenimiento (O&M) también deben ser bajos, a fin de garantizar que la planta sea sostenible a largo plazo y no se descuide debido a la falta de fondos. En muchos casos, en los países en desarrollo, el financiamiento para la implementación de la planta de tratamiento proviene de una agencia estatal o internacional (frecuentemente con financiamiento a bajas tasas de interés), pero los costos de operación y mantenimiento son asumidos por el operador o proveedor de servicios, y esto puede ser afectado por la estructura tarifaria (si es que existe), que debe ser suficiente para cubrir todos los costos relacionados con el buen funcionamiento de la planta de tratamiento. Los humedales para tratamiento son muy competitivos en términos de costos de construcción y con frecuencia son muy ventajosos en términos de costos de operación y mantenimiento, en comparación con otros sistemas de tratamiento. Por lo tanto, es importante garantizar una O&M de rutina adecuada, ya que los humedales son sistemas que son muy robustos durante mucho tiempo hasta que fallan por completo, y necesitan grandes sumas para recuperar la eficiencia.
- **Necesidad de simplicidad.** En la mayoría de las aplicaciones en las regiones en desarrollo, la simplicidad conceptual es imprescindible. Es frecuente la falta de mano de obra calificada para realizar tareas operativas básicas, y esto refuerza la idoneidad de los sistemas naturales como los humedales para tratamiento. A menos que apunte a aplicaciones específicas, el nivel de mecanización debe mantenerse al mínimo. La operación de bombas y válvulas es a menudo el límite del conocimiento en las zonas rurales. Por supuesto, en los países en desarrollo puede haber áreas bien desarrolladas, y el nivel operativo puede elevarse y justificar un ligero aumento en el nivel de mecanización, si esto conduce a una reducción en los requisitos del suelo o una mejora en la calidad del efluente.
- **Riesgos asociados con una exageración excesiva del concepto de simplicidad.** El hecho de que los humedales para tratamiento sean un sistema muy simple de operar, no debe convertirse en una excusa para descuidar las tareas básicas asociadas con la operación de la planta de tratamiento. Se observa que existe una tendencia en muchos países en desarrollo a abandonar el mantenimiento y la operación en lugar de emprender una operación y mantenimiento básico rutinario a bajo costo. Es importante tener en cuenta que todos los sistemas fallan sin una operación y mantenimiento adecuado, y este también es el caso de los humedales. Las fallas típicas en el desempeño de los humedales debido a una inadecuada O&M son:
 - Fallo en la etapa de pretratamiento (por ejemplo, fosas sépticas) debido a la falta de eliminación de lodo, lo que puede causar el desbordamiento de lodo a los humedales. Este lodo puede conducir a una rápida obstrucción de los humedales y su posterior falla. Las medidas preventivas para eliminar las unidades de pretratamiento a la frecuencia correcta son mucho más baratas que la acción correctiva de desatascar un humedal, que es laborioso y costoso.
 - Fallo del sistema de distribución, especialmente en humedales de flujo vertical, donde existe la necesidad de una distribución uniforme del líquido en toda la superficie del lecho. Cuando fallan las bombas o los sifones, o una parte del sistema de distribución se llena de lodo, esto conduce a una sobrecarga y finalmente a obstruir algunas áreas del lecho. La obstrucción se extiende y conduce finalmente al fallo del sistema. En una etapa temprana, es posible controlar el proceso de obstrucción en humedales verticales.
 - Los humedales son sistemas extensivos y, como tales, la mayoría de ellos funcionan bien al principio. Esto puede inducir una relajación que ocultará problemas en el rendimiento del sistema, asociados con deficiencias en el diseño o en las prácticas operativas, que aparecerán solo más adelante. El punto crítico es que en algunos

casos esto puede ser demasiado tarde para resolver el problema, mientras que una corrección en los primeros días podría haberse hecho con mucho menos esfuerzo.

- **Diferencias en las características de las aguas residuales.** Al planificar y diseñar sistemas de tratamiento en las regiones en desarrollo, incluidos los humedales, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos (von Sperling y Chernicharo, 2005; von Sperling, 2007):
 - Las tasas de crecimiento de la población pueden ser diferentes de las de los países desarrollados. Es común ver tasas de crecimiento de la población mayores en las zonas urbanas de los países en desarrollo, debido a las mayores tasas de fertilidad y al éxodo rural, en comparación con las naciones desarrolladas. Por otro lado, también es común ver tasas de crecimiento insignificantes o incluso negativas en pueblos pequeños de áreas rurales, debido a la migración a ciudades más grandes. Las plantas de tratamiento están diseñadas para poblaciones futuras (con horizontes de planificación entre 20 y 30 años), y los pronósticos de población enfrentan el desafío de ser representativos de las tendencias futuras en la región específica a cubrir.
 - Los flujos de aguas residuales per cápita pueden ser diferentes de los que se consideran típicos en los países desarrollados. En áreas con escasez de agua, el consumo de agua per cápita en las actividades domésticas tiende a ser pequeño, al igual que la producción de aguas residuales. Se puede hacer un comentario similar en las áreas de bajos ingresos, en las cuales el consumo de agua per cápita tiende a ser menor que en las áreas acomodadas. Sin embargo, se observa que, en los asentamientos urbanos en los que no existe una medición doméstica del consumo de agua, puede producirse un desperdicio de agua, lo que conduce a una mayor producción de aguas residuales. Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es el valor del coeficiente de retorno (relación entre la producción de aguas residuales y el consumo de agua) en las ciudades pequeñas y en las zonas rurales: podría ser diferente del valor tradicional del 80%, debido a la práctica habitual de descargar aguas grises en el patio trasero para el riego de plantas para la agricultura doméstica. Otro factor que debe tenerse en cuenta al calcular el flujo de aguas residuales a tratar se relaciona con el hecho de que, en lugares donde se ha implementado un sistema de alcantarillado separado (alcantarillado y aguas pluviales en redes separadas), hay hogares que practican conexiones ilegales, descargando aguas pluviales en el sistema de alcantarillado, lo que puede causar sobrecargas hidráulicas en el sistema de tratamiento durante tormentas. Afortunadamente, la naturaleza extensiva de los humedales para tratamiento los hace más robustos a este tipo de inestabilidad.
 - Las cargas de contaminantes en masa per cápita pueden ser diferentes de las consideradas típicas en los países desarrollados. Por ejemplo, las cargas típicas de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) per cápita utilizadas en el diseño de plantas de tratamiento en países desarrollados oscilan entre 60 g.pe⁻¹.d⁻¹, mientras que en las regiones en desarrollo estos valores pueden ser más bajos, de 40 a 60 g. pe⁻¹.d⁻¹. Además, la composición de las aguas residuales puede ser diferente, como resultado de los hábitos alimenticios y las actividades domésticas, y las concentraciones de nitrógeno y fósforo también pueden ser variables. En regiones con bajos niveles de vida, es probable que la carga de patógenos sea alta, aunque las concentraciones de coliformes, como se espera, no difieren de las presentes en áreas desarrolladas.
 - Las variaciones en el flujo y la composición de las aguas residuales tendrán un impacto en el diseño de los humedales para tratamiento. En lugar de simplemente utilizar la literatura internacional, con frecuencia basada en la experiencia de los países desarrollados, el diseñador debe tener el incentivo de usar datos y experiencia locales o regionales, que reflejarán de una manera mucho mejor las características reales de las aguas residuales a tratar.
- **Diferencias en los objetivos de tratamiento y en los requisitos de los efluentes.** La legislación en los países en desarrollo puede ser diferente de la que hay en naciones desarrolladas con respecto a los requisitos de calidad de los efluentes para la descarga en

cuerpos de agua o para la reutilización planificada. En general, se encuentran requisitos más estrictos en los países desarrollados, aunque esto puede no ser cierto en varios países en desarrollo, que, a veces, simplemente copian los estándares de los países de altos ingresos, sin adaptaciones a su realidad y necesidades específicas (von Sperling y Fattal, 2001). Si se considera una evolución temporal gradual en los requisitos para la eliminación de contaminantes en los países en desarrollo, se debe dar prioridad a la eliminación de materia orgánica (DBO y DQO), para lo cual los humedales para tratamiento son muy adecuados. Otro objetivo importante, especialmente si se busca la reutilización del agua, es la eliminación de patógenos, con especial atención a los huevos de helmintos. Esto es fácil de lograr en Humedales para tratamiento dada su capacidad de filtración. La eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) debe incluirse si existe una necesidad local real, y debe recordarse que los humedales diseñados con criterios tradicionales no son específicamente eficientes para la eliminación de nutrientes. Es preciso planear de forma adecuada el monitoreo relacionado con la comprobación del cumplimiento de las necesidades de la legislación, con el fin de tener demandas realistas sin incurrir en costos innecesarios en zonas con pocos recursos financieros.

b) Aspectos relacionados con condiciones climáticas favorables (regiones de clima cálido)

- **Diferencias en la temperatura ambiental.** Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los países en desarrollo se encuentran en zonas de clima cálido. Obviamente, hay poblaciones de bajos ingresos en áreas templadas y frías, y para estos pueden aplicarse las pautas de diseño tradicionales descritas en este libro, sujetas a las consideraciones especiales enumeradas anteriormente. Sin embargo, en regiones de clima cálido, con una temperatura más alta de las aguas residuales, las reacciones bioquímicas y algunos procesos físicos tienen lugar a un ritmo más rápido, lo que puede considerarse ventajoso en términos de los siguientes dos aspectos: (i) para una calidad de efluente dada, es probable que los requisitos de suelo sean menores en condiciones climáticas más cálidas; (ii) para una superficie específica asignada para humedales, se espera que la eficiencia de remoción sea mayor a temperaturas más elevadas. Por lo tanto, bajo la prevalencia de condiciones cálidas, es posible adoptar tasas de carga más altas para el diseño de humedales para tratamiento y, por lo tanto, ahorrar en el área (Hoffmann et al, 2011). Además, se pueden aplicar menos etapas o unidades en paralelo en algunos procesos específicos, como en los humedales franceses de flujo vertical, en los que solo la primera etapa puede ser suficiente en algunas aplicaciones, y se pueden adoptar ahorros adicionales implementando solo dos unidades en paralelo (en lugar de las tres unidades habituales) (Lombard - Latune y Molle, 2017). Puede haber un compromiso entre el ahorro de área y las reducciones en las eficiencias de remoción, y el diseñador debe encontrar un buen equilibrio que se adapte bien a los requisitos de cada aplicación específica.
- **Diferencias en el régimen de lluvias.** El comportamiento hidrológico de los humedales para tratamiento puede estar influenciado por el régimen de lluvias. En áreas áridas, es probable que la evapotranspiración juegue un papel importante, lo que lleva a pérdidas de agua y a la concentración de constituyentes en el efluente. Además, en áreas áridas, es común tener una gran amplitud de variaciones de temperatura entre el día y la noche. Por otro lado, en regiones de lluvias intensas, los flujos de aguas pluviales pueden ingresar al sistema de alcantarillado y aumentar considerablemente el flujo de entrada hacia los humedales. Afortunadamente, debido a que los humedales son sistemas extensivos, tienden a ser más robustos para resistir estas cargas hidráulicas máximas en comparación con los sistemas compactos. Finalmente, en regiones con lluvias intensas prolongadas, como las zonas de monzones, este hecho debe tenerse en cuenta en el diseño del sistema (Lombard - Latune et al., 2018).
- **Limitaciones en términos de disponibilidad de pautas en el diseño regional.** La mayor parte de la literatura sobre humedales proviene de países desarrollados de climas templados o fríos, en los que existe una considerable experiencia acumulada como resultado de miles

de unidades en funcionamiento. Sin embargo, como se destaca en esta sección, las áreas en desarrollo y las regiones de clima cálido tienen especificidades que deben tenerse en cuenta. Debería haber un fuerte incentivo para el desarrollo de pautas de diseño regional de humedales para tratamiento basados en la experiencia real en áreas cálidas y de bajos ingresos, de modo que los diseños futuros se adapten realmente bien a las condiciones locales.

4.2.3 Consideraciones específicas para aplicaciones en regiones en desarrollo

Esta sección cubre aspectos de algunas aplicaciones específicas de humedales para tratamiento en regiones en desarrollo. Las aplicaciones similares a otras ya cubiertas en este libro, no se repiten aquí.

- **Zonas rurales en regiones de bajos ingresos.** Un diseño típico para estas áreas debe apuntar a la simplicidad y reducir al mínimo los costos de operación y mantenimiento. Siempre que se planifique la solución, debe incorporarse el concepto simple de "lo que puede fallar, fallará", y los sistemas deben ser lo más robustos posible. El equipo electromecánico debe restringirse a las bombas. El humedal francés de flujo vertical, compuesto solo por la primera etapa, podría ser una buena solución debido a su simplicidad inherente, sin necesidad de pretratamiento (eliminación de arena y tanques sépticos), sin necesidad de tratamiento de lodos por separado, construcción simple y posible cumplimiento con los requerimientos en la calidad del efluente.
- **Zonas rurales en regiones de bajos ingresos: efluentes para la reutilización.** Si se necesita una calidad mejorada, se podría aplicar un humedal francés de flujo vertical (SF), ya que elimina de forma segura los huevos de helmintos. Alternativamente, la segunda etapa del tratamiento puede ser realizada por un humedal de flujo horizontal (FS).
- **Áreas de vivienda.** Los humedales son una posibilidad muy prometedora para las áreas de vivienda en las regiones en desarrollo. Suponiendo que la disponibilidad de suelo puede ser escasa, la planta de tratamiento debe tener una huella relativamente pequeña. Las soluciones compactas que involucran procesos técnicos sofisticados, como las variantes de lodos activados, acostumbran a fallar debido a operación y mantenimiento inadecuados. Aun conservando parte de la simplicidad de los sistemas tradicionales de humedales, los humedales aireados ofrecen una posibilidad adecuada para un sistema algo compacto, con solo un pequeño incremento en términos de requisitos de O&M. Son resistentes a las variaciones en el flujo y la carga de entrada, un atributo importante para este tipo de aplicación.
- **Zonas turísticas.** Muchos países en desarrollo tienen áreas turísticas que están sujetas a una alternancia de períodos con altas cargas máximas, seguidas de períodos más largos con una ocupación menor. A diferencia de las plantas compactas tecnificadas de tratamiento, varias configuraciones de humedales muestran robustez en el manejo de variaciones tan amplias en el flujo y la carga de entrada. Los tiempos cortos de sobrecarga pueden no presentar problemas cuando son seguidos por períodos de baja carga. En condiciones de clima cálido, esto puede ser válido para períodos de fin de semana, así como para períodos de sobrecarga de verano (períodos de hasta tres meses). Para tratamientos con solo ocupación de fin de semana, el humedal puede diseñarse como si la ocupación se distribuyera a lo largo de la semana, multiplicado por un factor de seguridad. Para temporadas turísticas de hasta tres meses, también se puede incluir un factor de seguridad en la carga diaria promedio.
- **Sistemas descentralizados hasta 10,000 PE.** Para esta aplicación, se pueden aplicar varias configuraciones de humedales. Factores importantes en el proceso de decisión son la disponibilidad de suelo y los requisitos para la calidad final del efluente (descarga en cuerpos de agua o reutilización).
- **Manejo de lodos.** El lodo es una de las principales razones del fracaso o mal funcionamiento de los sistemas de tratamiento en los países en desarrollo. Con frecuencia, el desalojo no se realiza debido a la falta de instalaciones de tratamiento o debido a los costos involucrados en el transporte o en el manejo constante. En este caso, las variantes de humedales

específicamente concebidas para recibir lodos (sistemas de humedales para lodos, humedales para secado de lodos o lechos de mineralización de lodos) son una posibilidad muy efectiva para estabilizar y deshidratar el exceso de lodo generado en otros procesos de tratamiento. El sistema es simple, con bajos costos de operación y mantenimiento en comparación con otras alternativas de manejo de lodo, es capaz de almacenar lodo por largos períodos de tiempo y produce un lodo seguro para aplicaciones agrícolas.

- **Tratamiento de lodos fecales.** En muchas áreas y ciudades de los países en desarrollo no existe un sistema de alcantarillado por tuberías, y la materia fecal se almacena en pozos, letrinas y fosas sépticas. El sedimento o el lodo fecal deben eliminarse periódicamente de cada sistema individual, y un tratamiento y eliminación adecuado es muy importante. Los humedales también son una alternativa muy conveniente, y funcionan de manera similar a los sistemas de humedales de lodo, humedales de secado de lodo o humedales de lodos mineralizado, mencionados anteriormente (Strande et al, 2014).

4.3 Tratamiento de aguas pluviales

Katharina Tondera¹, Dirk Esser², Stéphane Troesch³

¹ *IMT Atlantique, GEPEA, UBL, F-44307 Nantes, France.*

² *Société d'Ingénierie Nature & Technique (SINT), Chef-Lieu, F-73370 La Chapelle du Mont du Chat, France.*

³ *Eco Bird, 3 route du Dôme, 69630 Chaponost, France.*

4.3.1 Introducción

La escorrentía provocada por eventos de lluvia es extremadamente variable tanto, en las cargas de contaminantes como en los volúmenes de agua. La escorrentía de las autopistas transporta altas cargas de metales pesados e hidrocarburos, mientras que la escorrentía de sectores urbanos puede ser caracterizada por una importante contaminación microbiana, por ejemplo, provocada por heces animales, y a veces altas cargas orgánicas por la basura y la limpieza de caminos y mercados (Tabla 3). Las conexiones ilícitas entre los sistemas de alcantarillado separados aportan a cargas de nutrientes y cargas microbianas adicionales en las aguas pluviales.

Tabla 3: Concentraciones de escorrentía de aguas pluviales (Reproducida con permiso de Chocat et al., 2007)

Tipo de cuenca urbana	Residencial y comercial		Autopista y camino con tráfico intenso	
	Media	Min - Max	Media	Min - Max
SST (mg/L)	190	1 – 4,582	261	110 – 5,700
DBO₅ (mg/L)	11	0.7 – 220	24	12.2 – 32
DQO (mg/L)	85	20 – 365		128 – 171
NH₄-N (mg/L)	1.45	0.2 – 4.6		0.02 – 2.1
NT (mg/L)	3.2	0.4 – 20		
P tot (mg/L)	0.34	0.02 – 14.3		
Pb tot (µg/L)	210	10 – 3,100	960	241 – 34,000
Zn tot (µg/L)	300	10 – 3,680	410	170 - 355
HCT (mg/L)	1.9	0.04 – 25.9	28	2.5 – 400
HAP (µg/L)	0.01	<0.01 – 3.2	-	0.03 – 6
Glifosato (µg/L)	<1.5	<0.1 – 4.72	0.72	0 – 1,750
Diuron (µg/L)	<1	<0.05 – 13	0.05	0 – 2
Coliformes totales (MPN/100mL)	6430	40 – 500,000		10 – 1,000

Las aguas pluviales tienen una carga alta de partículas muy finas, las cuales no necesariamente se sedimentan, se flocculan o se precipitan, incluso a lo largo de periodos más largos, por su tamaño, carga electrostática y baja carga orgánica (Tabla 4). La mayoría de las cargas de contaminantes están adjuntas a estas partículas finas (Xanthopoulos 1990, Boogaard et al. 2014). Además, los contaminantes orgánicos en la escorrentía pluvial, particularmente los que se originan de la escorrentía de autopistas, no son fácilmente biodegradables.

Tabla 4: Fracción particulada de contaminantes en la escorrentía pluvial (Reproducida con permiso de Chocat et al., 2007)

Contaminante	Fracción particulada
DQO	80 – 90 %
DBO ₅	75 – 95 %
NTK	48 – 80 %
Pb	80 – 98 %
Zn	15 – 40 %
Cu	35 – 60 %
Cd	20 – 60 %
HCT	80 – 90 %
HAP	75 – 97 %

Las metas principales del tratamiento de aguas pluviales son la protección de las aguas superficiales de las alternaciones a la morfología del lecho, turbidez elevada, eutroficación, concentraciones tóxicas de metales pesados y, en algunos casos, contaminación microbiana. Además, los humedales para tratamiento también se usan como amortiguadores hidráulicos y embalses para proteger los sectores aguas abajo de las inundaciones. Debido a la naturaleza estocástica de la lluvia, la capacidad necesaria de almacenamiento y tratamiento es extremadamente variable. Las concentraciones de contaminantes a menudo presentan patrones

de primera descarga. Los humedales para tratamiento ofrecen la posibilidad de equipar un gran número de sitios descentralizados con un sistema eficiente de tratamiento pasivo que puede transformarse en características positivas para el paisaje, con bajos requisitos operacionales. Actualmente, el diseño para humedales para tratamiento está empleado, dependiendo de la disponibilidad de espacio local y los co-beneficios deseados, junto con las metas de tratamiento. Los más comunes son variaciones de humedales FS, pero también se usan distintas variaciones de humedales FV, los cuales pueden tratar la salida de alcantarillados pluviales o, como sistemas descentralizados muy pequeños, como por ejemplo, la escorrentía de las calles directamente. Estos últimos se denominan sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS – Woods-Ballard et al., 2015), diseño urbano sensible al agua (WSUD – Wong et al., 2009), desarrollo de bajo impacto (LID – Dietz, 2007) y ciudades esponja (Li et al., 2017).

4.3.2 Objetivos de diseño

Los humedales para tratamiento para el tratamiento para la escorrentía pluvial deben tener una función doble:

- Una función de almacenamiento: El agua a tratar debe estar almacenada en o sobre el humedal de tratamiento, lo cual requiere un volumen adecuado de almacenamiento y una salida regulada. Esto es necesario para tener tiempos de retención (en el caso de FS) o velocidades de filtración (en el caso de sistemas de flujo subsuperficial) compatibles con una buena eficiencia de tratamiento. Sin embargo, la función de almacenamiento puede ser una meta en sí, para asegurar protección de inundaciones en sectores aguas abajo. En algunos casos, las restricciones legales de la salida pueden superar los requisitos técnicos para el tratamiento y, por lo tanto, pueden transformarse en un parámetro clave para el dimensionamiento. Los filtros de bio-retención no tienen una salida regulada, pero si tienen una capa de filtración más fina y menos permeable (Brisbane City Council, 2011).
- Una función de tratamiento: El objetivo del tratamiento son los sólidos, particularmente sólidos finos suspendidos y, en menor medida, las sustancias disueltas. Los humedales para tratamiento también pueden ser diseñados para permitir la biodegradación y oxidación de materia orgánica disuelta durante periodos de tiempo seco, si los contaminantes disueltos están retenidos por sorción en las plantas y los sedimentos (en sistemas FS) o en la matriz del filtro (en sistemas de flujo subsuperficial) durante la tormenta. Por lo tanto, la eficiencia de tratamiento es óptima si el humedal de tratamiento funciona en dos etapas: una etapa inicial durante la tormenta, en la cual los contaminantes están retenidos por filtración o sorción, y una segunda etapa de duración variable durante el periodo de descanso para la biodegradación de los contaminantes orgánicos.

4.3.3 Procesos necesarios y tipo de humedales para tratamiento a usar

Los sólidos sedimentables y suspendidos pueden sedimentarse y/o ser filtrados. Sin embargo, debido al monto alto de partículas muy finas, la eficacia de la sedimentación es limitada y la filtración y/o sorción es necesaria.

La materia orgánica puede ser eliminada aeróbica o anaeróbicamente. Ya que volúmenes de agua cuantitativamente grandes ocurren en periodos relativamente cortos, los contaminantes de las cargas de la primera descarga deben ser capturadas y posteriormente tratadas durante los periodos secos. Los metales pesados disueltos, si es necesario, deben ser retenidos por absorción en medios de filtración reactivos.

Los diseños adecuados son humedales FS con vegetación emergida o sumergida o humedales FV (Tabla 5). Los dos sistemas pueden combinar muy fácilmente la función de almacenamiento en el humedal en sí (en el caso de los humedales FS) o encima de la superficie del filtro, si el francobordo es lo suficiente alto (para los humedales FV). Si es necesario eliminar metales pesados, o humedales para tratamiento flotantes o humedales FV con medios reactivos específicos deberían ser usados (Hatt et al., 2008 Borne et al., 2013; Fassmann et al., 2013).

Tabla 5: Eficiencia de humedales para tratamiento en el tratamiento para escorrentía pluvial (datos de Giroud et al., 2007; Grotehusmann et al., 2016b; Blecken et al., 2018; Branchu, 2018; Stott et al., 2018; Tondera et al., 2018a, b, c)

Parámetro	Humedales FS	Humedales FV (incl. filtros de bio-retención)
SST	- 97 – + 89 %	95 – 97%
SS finos (< 0.063 mm)	No investigado	95 %
P	10 – 90 %	50 – 80 % ¹
Bacterias indicadoras	0.1 – 2.1 log ₁₀	1 – 3 log ₁₀
TKN	2 – 60 %	50 – 60 %
Zn	30 – 95 %	75 – 90 %
Pb	80 – 90 %	80 – 95 %
Glifosato	Disipación/dilución de plaguicidas observada	58 – 80 %
Suma de los 16 HAP de la EPA de EE. UU.	No es concluyente	> 86 %

¹ solo con medios activos especiales de filtración

Los humedales FS tienen la ventaja de ser menos caros de construir, típicamente tienen biodiversidad más alta que los humedales de flujo subsuperficial y pueden ser diseñados como instalaciones recreativas. También proveen una capacidad de almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, la cría de zancudos puede ser un problema.

Los humedales FV tienden a ser más compactos y eficientes, ya que la filtración y sorción en la matriz del filtro es más eficaz que la sedimentación y la biosorción en los sedimentos y las plantas. En el caso de los sistemas más grandes con superficies de filtración de varios cientos de metros cuadrados y capacidades de almacenamiento para asentamientos completos, la integración al paisaje aún no ha sido una consideración clave en su diseño, pero es posible integrarlos como un bien en sectores públicos de acceso abierto. Los sistemas más pequeños como los filtros de bio-retención pueden ser integrados como paisajes urbanos en los asentamientos urbanos (ver Brisbane City Council, 2011).

En unos pocos casos una combinación de humedales FV y FS ha sido aplicada exitosamente, combinando la capacidad de almacenamiento elevada

, biodiversidad y valor recreativo de un humedal de flujo subsuperficial con la eficiencia del paso a través de un medio de filtración (Jost et al., 2018)

Los humedales FV más grandes, particularmente para el tratamiento de la escorrentía de las autopistas, típicamente son precedidos por tanques de sedimentación equipados con deflectores de espuma que eliminan sólidos gruesos y, más importante, protegen el filtro contra la contaminación accidental, particularmente por los hidrocarburos y el aceite. Los filtros de bio-retención no son equipados con tanques de sedimentación primarios.

4.3.4 Consideraciones específicas durante el diseño y construcción

La capacidad de almacenamiento del humedal debería ser determinada mediante modelación hidráulica, a partir del máximo de los desbordes soportados durante un tiempo determinado. Esto entrega el evento de tormenta a almacenar, por ejemplo, el evento mensual, anual o decenal, la ocurrencia estocástica de los eventos y su intensidad, los patrones de escorrentía generados por estos eventos, y la salida regulada de los humedales. La capacidad de tratamiento debe ser adaptada a las cargas de contaminación y los patrones de escorrentía específicos de la cuenca, considerando los efectos de primera descarga.

En algunos casos, un volumen adicional de almacenamiento puede ser proveído para el agua que no tiene que someterse al tratamiento completo, y en todos los casos, en algún momento el agua en exceso debe ser evacuada por desbordes. Sin embargo, el diseño debería asegurar siempre que esté tratada correctamente la parte más contaminada de la escorrentía (a menudo, pero no siempre, la primera descarga).

Las condiciones para la transformación del nitrógeno en los humedales FS son más eficaces cuando el nivel de agua permanente está suficientemente poco profundo (profundidad de aprox. 0.3 m) para permitir el intercambio superficial de oxígeno. Humedales para tratamiento de tratamiento flotantes pueden ser usados en zonas con mayores profundidades o cuando el espacio está restringido. Sin embargo, es importante que el diseño favorezca las condiciones hidráulicas sin atajos. Deberían ser usadas las especies de plantas locales con crecimiento radicular extenso en la columna del agua, las cuales eliminan partículas finas y sustancias disueltas, mediante sorción en la biopelícula que se forma adherida a las raíces.

Humedales FV mayores y “fin de tubo” para el tratamiento de la escorrentía pluvial se pueden diseñar como los que se usan para el tratamiento de los reboses de excesos combinados del alcantarillado (Capítulo 6.2), como se muestra en la Figura 2, aunque la eliminación de los sedimentos puede tener un papel menor debido a la carga orgánica. Los volúmenes de almacenamiento encima del nivel del filtro pueden ser diseñados entre 0.3 m y 1.0 m o incluso más alto para inmersiones menos frecuentes (una vez al mes o menos). Los filtros de bio-retención usualmente tienen un francobordo superficial de menos de 0.4 m.

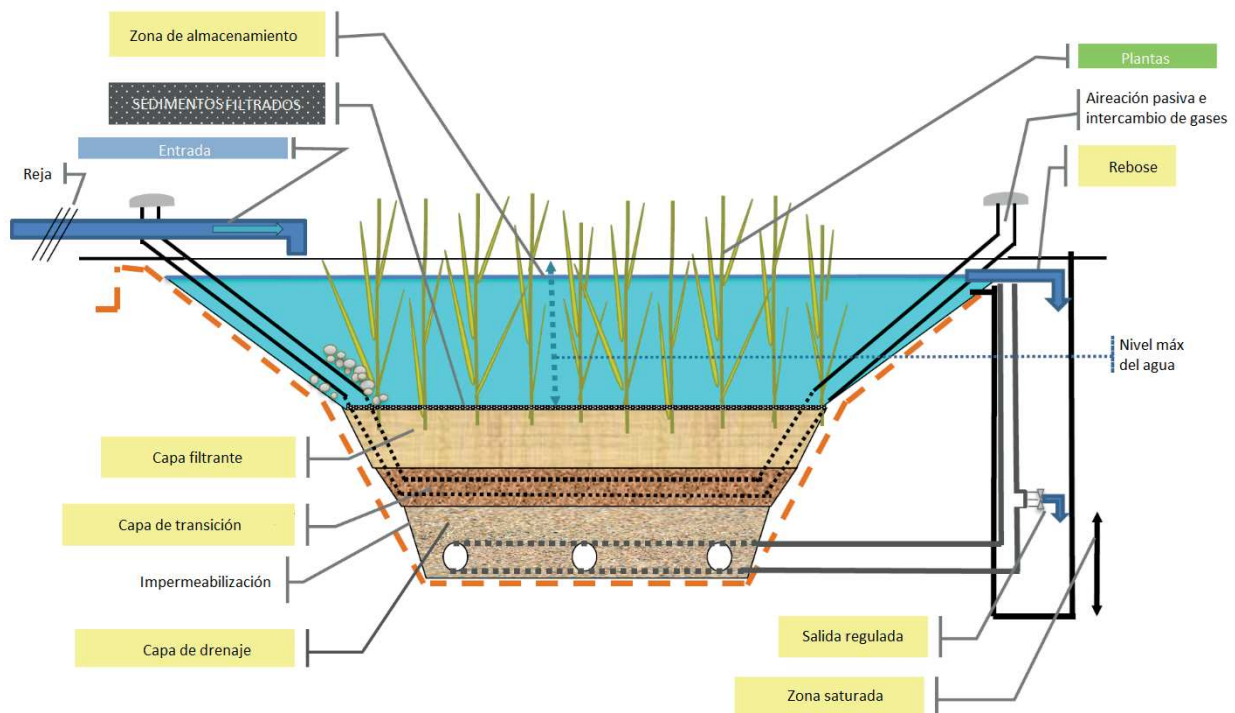


Figura 2: Sección transversal de un humedal FV con volumen de almacenamiento encima de la superficie del filtro y salida regulada, tal como se usa para el tratamiento y almacenamiento de las aguas pluviales y los desbordamientos de alcantarilla combinados.

Las velocidades de filtración recomendadas que son compatibles con una buena eficiencia de tratamiento pueden alcanzar $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, lo que significa regular la salida a $0.05 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ (Molle et al., 2013; Grotehusmann et al. 2016b). Deberían ser $1 \cdot 10^{-5}$ m/s si se requiere la eliminación de patógenos, pero a menudo está preferido poner una lámpara UV a la salida para la eliminación de patógenos en vez de usar la velocidad de tratamiento más lenta.

El material de filtro recomendado para los humedales FV que tratan la escorrentía pluvial es la arena fina a gruesa (d_{10} entre 0.2 y 0.5). La arena más fina es más eficiente, particularmente para la eliminación del amoníaco, pero la arena gruesa es menos propensa a los atascos. Para los filtros de bio-retención sin regular la salida, se recomienda una marga arenosa como material de filtro (e.g. Woods-Ballard et al., 2015). A lo largo del tiempo, una capa secundaria del filtro se forma encima de la capa superficial a partir de los sólidos retenidos, la cual provee capacidad de sorción adicional, y la cual aumentará la eficiencia de filtración. La eliminación de fósforo se puede mejorar usando medios reactivos, pero hay que tomar en cuenta que los medios reactivos estarán saturados en algún momento y la eficiencia del abatimiento de P, por lo tanto, disminuirá a lo largo del tiempo, limitando la duración de vida de los medios reactivos. En Alemania, se considera que la adición de un pequeño porcentaje de hidróxido de hierro a la masa del filtro puede permitir una duración de vida de 50 años (Grotehusmann et al. 2016b).

Dado que la mayoría de la capacidad de tratamiento se basa en la filtración y la sorción en biopelículas fijas, a profundidad del material del filtro es menos importante, y una profundidad de 30 cm de la capa de arena puede ser considerado satisfactorio en la mayoría de los casos (Molle et al., 2013). Una profundidad de 0.5 m a 0.75 m se recomienda en Alemania (Grotehusmann et al., 2016b). Los filtros más profundos pueden tener una capacidad más alta de adsorción para el amoníaco y, si se usa un material de filtro reactivo, para el fósforo.

Por lo general, la superficie de filtro necesaria varía entre un 0.5 y 2% de la superficie impermeable de captación para los humedales FV mayores con material de filtro arenoso y una salida regulada, un 4 a 8% para los humedales FS y hasta un 6% para los filtros de bio-retención. La inundación demasiado frecuente de la superficie del filtro y/o periodos demasiado largos para drenar el filtro después de un evento de lluvia puede provocar una falta de oxígeno para la degradación anaeróbica de la carga de contaminantes durante el periodo seco, dando lugar a una eficiencia de tratamiento reducida y, más importante, la posible obstrucción del filtro. Por lo tanto, el dimensionamiento del filtro se puede basar en:

- la carga anual de sólidos finos: Grotehusmann et al. (2016b) recomiendan una carga anual máxima de 7 kg/m² sólidos finos (< 0.063 mm/m²·año)
- el tiempo que el filtro necesita para drenarse tras el evento de tormenta (24 a 48 h; ver Grotehusmann et al., 2016b; Molle et al., 2013).
- la carga anual acumulada que se usa en lineamientos alemanes más antiguos tales como el DWA-M 178 (2005), el cual recomienda dimensionar los humedales FV para la escorrentía pluvial de acuerdo con una carga hidráulica acumulada de 40 - 50 m (=m³/(m²·año)) y un máximo de 70 m/año. Sin embargo, Grotehusmann et al. (2016b) recomiendan solamente que se cuente con una superficie de filtro 100 m² por ha de superficie activa de cuenca si la lluvia anual supera los 1000 mm.

En los climas con lluvia frecuente, se debería considerar la división de la superficie del filtro en dos partes, las cuales deberían ser usadas de forma alternada de forma semanal para los eventos de lluvia más frecuentes, pero menos importantes. En el caso de los eventos de lluvia menos frecuentes, pero más importantes, el diseño debería permitir el uso de la superficie entera del filtro y el volumen entero de almacenamiento.

En los climas con largos periodos secos, el diseño de tratamiento debe ser funcional incluso tras etapas extensivas sin lluvia. Esto se puede superar parcialmente con una capa saturada en las partes más bajas del filtro, la cual provee una reserva hidráulica para las plantas. En ese caso, la ventilación pasiva intermedia es necesaria para permitir el intercambio de gases la superficie del filtro se inunda rápidamente. Sin embargo, la biopelícula en la capa no saturada se degrada durante largas etapas secas, de este modo reduciendo la eficiencia de tratamiento para la contaminación disuelta.

Como en el caso de los sistemas de desbordamiento de alcantarillado combinado, las especies de plantas usadas para los humedales FV deben enfrentar un bajo suministro de nutrientes y etapas largas sin cargas, seguidos por la carga de choque hidráulica.

4.4 Tratamiento de desbordamientos de alcantarillado combinado

Katharina Tondera ¹, Anacleto Rizzo ², Tamás Gábor Pálfy ^{3,4}

¹ IMT Atlantique, GEPEA, UBL, F-44307 Nantes, France.

² Iridra Srl, via La Marmora 51, 50121, Florence, Italy.

³ University of Sopron, Institute of Geomatics y Civil Engineering, H-9400 Sopron, Hungary.

⁴ Department of Ecotechnologies, Irstea, Villeurbanne, France.

4.4.1 Introducción

Los desbordamientos de alcantarillado combinado (DAC) de los sectores urbanos son una fuente subestimada de contaminación hídrica. Ocurren durante los eventos de tiempo húmedo, cuando la escorrentía superficial que entra a un sistema de alcantarillado combinado agrega al flujo de tiempo seco y supera la capacidad de las secciones descendentes o la planta de tratamiento. El punto de la descarga a menudo se construye como una barrera de desbordamientos simple. Se puede instalar un tanque de sedimentación después de estos puntos para proveer almacenamiento adicional y sedimentación primaria antes de que el agua servida diluida entre al cuerpo de agua receptor. Debido a las altas tasas de flujo, los DAC descargan cargas enormes de contaminantes y patógenos en comparación al flujo medio proyectado para un año. Los volúmenes descargados pueden tener impactos severos sobre la ecología del agua superficial y ramificaciones relacionadas a la salud, particularmente cuando las personas usan las aguas superficiales receptores para fines recreativos.

Una meta principal del tratamiento de los DAC es retener los sólidos y los contaminantes que agotan el oxígeno tales como la materia orgánica y el amonio. Además, se requiere la eliminación de patógenos, particularmente en las aguas superficiales en sectores densamente poblados. Comparado con el tratamiento de aguas residuales con flujo continuo, la capacidad de almacenamiento necesaria está definida por la recurrencia estadística de distintos volúmenes de flujo. Los volúmenes de flujo máximos a tratar dependen de los requisitos de descarga y de la sensibilidad del cuerpo de agua receptor.

Durante los últimos 25 años, los humedales para tratamiento han demostrado proveer el tratamiento más integrado de los DAC. La mayoría de los humedales para tratamiento para DAC han sido implementados en Alemania (Dittmer et al., 2016; Grotehusmann et al., 2016a; Tondera, 2017)), pero los primeros sistemas fueron construidos en Francia, Italia (Meyer et al., 2013) y los Estados Unidos (Tao et al., 2014).

4.4.2 Objetivos de diseño

Los humedales para tratamiento para el tratamiento de las DAC están enfocados principalmente en la eliminación de los sólidos suspendidos y los parámetros que agotan el oxígeno (materia orgánica expresada como la DBO o DQO y el amonio). Los factores principales que afectan el desempeño del tratamiento de los humedales para tratamiento son el número de eventos de carga al año y su ocurrencia estocástica, ya que determinan el tiempo de regeneración (a menudo denominado el periodo seco). Los problemas potenciales relacionados con un diseño que no está correctamente conectado a la naturaleza estocástica de los DAC son (Pálfy et al. 2017a):

- Un tiempo de descanso insuficiente puede dar lugar a atascos;
- Las cargas infrecuentes pueden dañar la biopelícula ya que el periodo seco produce espacios porosos secos. Esto afecta el desempeño de la eliminación de la materia orgánica y podría provocar el lavado de la biopelícula muerta.

- Etapas extensivas sin alimentación y lluvia pueden dar lugar a las madrigueras, la invasión por las plantas competidoras, particularmente las ortigas, y el decaimiento de las plantas.

El tratamiento de los DAC requiere capacidad de almacenamiento adicional, la cual se puede proveer en forma de tanques de concreto o encima de la capa de filtración. La segunda alternativa tiene la ventaja de no requerir la limpieza de las partículas sedimentadas, ya que se mineralizan en la capa de filtración y, a lo largo del tiempo, forman una capa secundaria que aumenta la capacidad de adsorción total.

4.4.3 Procesos necesarios y tipo de humedal de tratamiento a usar

Los sólidos sedimentables y suspendidos requieren sedimentación y/o filtración. Para la oxidación de la materia orgánica (N orgánico y DBO₅) y el amonio-N al nitrato-N, condiciones aeróbicas son cruciales. Ya que volúmenes cuantitativamente grandes ocurren durante periodos relativamente cortos, la oxidación es principalmente un proceso retrasado de las sustancias adsorbidas y absorbidas. Por lo tanto, son necesarias tecnologías de humedales para tratamiento para el tratamiento con altas capacidades de sorción y posterior disponibilidad de oxígeno.

Debido a la alta carga orgánica de las aguas residuales domésticas, los humedales de FV ofrecen el diseño más confiable. Los tubos de drenaje o tubos separados de aireación proveen aireación pasiva durante los periodos secos para la nitrificación o mayor degradación biológica. Por lo tanto, debería ser posible el acceso al interior de tales tubos para la limpieza. Se puede evitar que las raíces crezcan en los hoyos de los tubos de drenaje poniendo tiras de papel de aluminio que cubran los tubos de drenaje (DWA-A 178, 2019). Puede que las cargas frecuentes limiten el tiempo de regeneración, particularmente a bajas temperaturas de lecho del filtro, a las cuales la nitrificación puede ser incompleto tal que los sitios de adsorción se saturan progresivamente (Pálffy et al., 2017b).

Si se requiere el N total, el diseño tendrá que incluir el proceso de desnitrificación para eliminar el nitrato generado del proceso de nitrificación aguas arriba. Los tipos de humedal para tratamiento adecuados para la desnitrificación incluyen: los humedales de FS, en los cuales la vegetación emergente provee una fuente interna directa de carbono orgánico para el proceso, y los humedales de FH, los cuales tienden a promover las condiciones anaeróbicas y también pueden devolver una porción del carbono orgánico de la vegetación a las aguas subsuperficiales.

Los sistemas de humedales de DAC son adecuados para ser diseñados para propósitos múltiples, entregando servicios ecosistémicos además de mejoras de calidad de agua. Efectivamente, se puede integrar la protección de las inundaciones, explotando la capacidad de almacenamiento de agua, y diseñando una segunda etapa de FS como un depósito de detención (Rizzo et al., 2018a). Además, una segunda etapa con FS también puede proveer el pulimiento debido a un TRH más largo (Masi et al., 2017a), aumentar el valor de biodiversidad y facilitar la inclusión de los humedales para tratamiento para el tratamiento de DAC en los parques públicos, entregando beneficios sociales (Liquete et al., 2016).

4.4.4 Consideraciones específicas durante el diseño y la construcción

La altura del lecho del filtro y el material del filtro son críticos para del desempeño del tratamiento:

- Los medios de filtración deberían ser arenas y gravas finas con una curva de tamizado empinada sin suplemento orgánico para evitar la obstrucción;
- Materiales especiales pueden aumentar la capacidad de adsorción (por ejemplo, zeolitas);
- Las adiciones al material del filtro tales como la caliza (como capa superior o mezclada con el material del filtro) pueden proveer un amortiguador contra la acidificación.

Las aguas subterráneas infiltrantes u otros flujos cuasi-continuos, si son conducidos al humedal para tratamiento, dan lugar a la inundación permanente o podrían causar obstrucciones

biológicas; por lo tanto, la superficie del filtro debe ser suficientemente grande para evitar las obstrucciones. Sin embargo, puede que el sobredimensionamiento de los filtros FV conduzca a problemas distintos, uno de los cuales corresponde a los extensos periodos secos. Como resultado de una simulación de larga duración, un mínimo de 10 alimentaciones al año deber ser la meta (DWA-A 178, 2019); aunque esta recomendación emerge de climas templados con eventos de lluvia regulares que mojan la superficie del filtro durante los periodos secos. En los climas secos, alimentaciones más frecuentes deben ser fijado como objetivo, o el riego de las superficies de filtración durante largos periodos secos deberían ser mantenido.

Las especies de planta usadas para los humedales para tratamiento para el tratamiento de DAC deben ser capaces de enfrentar etapas de larga duración sin alimentación seguidas por la carga de choque, tanto hidráulicamente como en términos de cargas de contaminantes. *Phragmites australis* (genotipo local) ha demostrado ser resiliente bajo estas circunstancias. Debido a la baja carga general de nutrientes, la cosecha de las plantas no es necesaria y, al contrario, ha mostrado efectos negativos sobre el crecimiento de la primavera anterior.

Parecido a los humedales para el tratamiento de las aguas pluviales descritos en el Capítulo 4.3, un aspecto clave en el diseño de los humedales de DAC es como garantizar tasas de infiltración suficientemente lentas para un tratamiento adecuado de los DAC, lo cual se resuelve mediante la regulación de la salida. Para valores de referencia de las tasas reguladas de flujo del efluente y otros criterios de diseño, sugerimos aquellos revisados por Meyer et al. (2013), junto con los lineamientos alemanes o franceses. La herramienta de diseño-apoyo *Orage* (Pálfy et al., 2017b, 2018) también está disponible para un diseño más detallado de los humedales de DAC.

4.5 Aguas de drenaje agrícola

Stevo Lavrnić, Attilio Toscano

Alma Mater Studiorum - University of Bologna, Department of Agricultural y Food Sciences, Viale Giuseppe Fanin 50, Bologna 40127, Italy

4.5.1 Objetivos de diseño

Las prácticas agrícolas han sido reportadas como causa de contaminación de los cuerpos de agua superficial en varias partes del mundo (Dunne et al, 2005; Blankenberg et al, 2008; Díaz et al, 2012; Lenhart et al, 2016; Mendes et al, 2018). Por ejemplo, el nitrato ha sido reconocido por la Comisión Europea como uno de los mayores contaminantes agrícolas y la directiva de nitrato emitida en 1991 busca reducir este tipo de contaminación en la UE (EEC, 1991).

Se pueden reducir las pérdidas de nitrato de la agricultura a través de métodos en campo (por ejemplo, disminuir el uso de fertilizantes o mejorar la absorción de fertilizantes) o borde de campo (por ejemplo, tratamiento de aguas de drenaje agrícola) (Groh et al, 2015). Los humedales naturales, pequeños riachuelos naturales y riberas vegetadas de riachuelos tienen una cierta capacidad de purificar el agua, pero la pérdida de estos sistemas ha provocado una caída de la calidad de los cuerpos de agua superficial que reciben el drenaje agrícola (Borin y Tocchetto, 2007). Por lo tanto, se necesita un enfoque más sistemático a este problema. Por ejemplo, se han reportado tiras de pasto como opciones efectivas de tratamiento exitoso de las aguas de drenaje agrícola, pero su capacidad al respecto es limitada, y reducida considerablemente cuando el suelo se encuentra saturado (Tournebize et al, 2017). Por el otro lado, se sabe que los humedales para tratamiento son capaces de tratar las aguas residuales mediante de una tecnología que es sustentable y de bajo costo (Li et al, 2018), que también pueden tratar exitosamente las aguas de drenaje agrícola (Groh et al, 2015; Vymazal y Březinová, 2015; Kasak et al, 2018) y que son más económicos para reducir la contaminación difusa en comparación con otros métodos (Lavrnić et al, 2018). Su ventaja adicional se encuentra en el hecho de que los humedales para tratamiento también pueden proveer varios servicios ecosistémicos si son manejados adecuadamente (Tournebize et al, 2017), un enfoque que ha dado lugar al concepto

de humedales para tratamiento integrados, como sistemas que combinan el control de calidad de agua y mejoras de biodiversidad (Scholz et al, 2007).

Los humedales para tratamiento de la escorrentía agrícola pueden ser on-stream or off-stream dependiendo de si están ubicados adentro o afuera del corriente de las aguas de drenaje (Kasak et al, 2018). El primero es más adecuado para la eliminación del nitrato ya que la concentración del nitrato es típicamente comparable durante distintos periodos. Por una parte, los humedales para tratamiento off-stream son aplicados en casos en los cuales la eliminación de plaguicidas es una prioridad ya que la concentración de estas sustancias es la más alta durante el primer flujo tras su aplicación. Por lo tanto, el flujo se puede desviar hacia los humedales para tratamiento solamente después la aplicación de plaguicidas para aumentar el TRH del sistema y permitir eliminación de plaguicidas más alta (Tournebize et al, 2017). La mayoría de los humedales para tratamiento que tratan la contaminación difusa son off-stream ya que los sistemas in-stream no pueden tratar todas las aguas de drenaje, o la superficie que requieren es demasiada grande (Kasak et al, 2018).

4.5.2 Procesos necesarios y tipo de humedales para tratamiento a usar

El tipo de humedales para tratamiento que más se usan para el tratamiento de las aguas de drenaje agrícola es el humedal de FS (Dal Ferro et al, 2018; Vymazal y Dvořáková Březinová, 2018). Su ventaja con respecto a los otros tipos de humedales para tratamiento es que puede soportar los flujos pulsos y niveles de agua variables (Kadlec y Wallace, 2009), las dos condiciones típicas en el tratamiento de las aguas de drenaje. Además, los humedales FS también se pueden usar para la atenuación de inundaciones, la retención de agua y mejoras de biodiversidad (Díaz et al, 2012; Dal Ferro et al, 2018).

Aunque los desempeños de eliminación varían, la mayoría de los estudios que informan la eficiencia de los sistemas de humedales para tratamiento que tratan el drenaje agrícola ha mostrado mejoras de calidad del agua (Díaz et al, 2012). Por ejemplo, estos sistemas presentan una eliminación promedio de 1175 kg NT ha⁻¹ año⁻¹ y 157 kg PT ha⁻¹ año⁻¹, valores que son comparables con los de varios tipos de humedales para tratamiento que tratan distintos tipos de influentes (Vymazal y Dvořáková Březinová, 2018). Sin embargo, la mayoría de los autores que abordan este tema se enfocaron en sistemas que operaron durante un periodo corto, y pocos reportan la eficacia a largo plazo (Groh et al, 2015). Por lo tanto, los resultados obtenidos durante los primeros años deberían tomarse con precaución. Ha sido sugerido que los humedales para tratamiento que tratan las aguas de drenaje agrícola obtendrán su máxima eliminación de NT después de un cierto periodo de transición (Borin y Tocchetto, 2007; Dal Ferro et al, 2018), el cual podría ser particularmente largo en sectores con un clima frío ya que el periodo de vegetación ahí es corto (Kasak et al, 2018). Por el otro lado, puede que la eliminación de PT disminuya a lo largo de los años como resultado de la saturación de los sitios de sorción y almacenamiento de biomasa (Dal Ferro et al, 2018). Sin embargo, los humedales para tratamiento también podrían ser una solución a largo plazo.

La eficiencia hidráulica es una característica importante de estos sistemas y afecta los procesos de eliminación de contaminantes. Las estructuras como represas o piedras pueden aumentar la eficiencia hidráulica y su atraktividad para una variedad de fauna (Braskerud, 2002; Kasak et al, 2018). Además, los meandros o caminos sinuosos de agua pueden aumentar el tiempo de retención, un factor que afecta la eliminación (Lenhart et al, 2016; Mendes et al, 2018).

El drenaje agrícola típicamente tiene una baja relación C/N y una alta concentración de nitratos (Li et al, 2018). Ya que la desnitrificación es la ruta dominante de la eliminación de los nitratos en los humedales FS (Groh et al, 2015; Tournebize et al, 2017), la eliminación del NT puede ser limitado debido a un déficit de carbono. Se podría superar este problema agregando una fuente adicional de carbono que podría ser en forma líquida o sólida. La fuente de carbono líquido debe ser agregado continuamente y podría provocar contaminación secundaria, dificultades que no existen si se usa una fuente de carbono sólido (Li et al, 2018). Por el otro lado, ha sido reportado que se puede aumentar la retención de nitrógeno en los humedales de FS agregando paja (Blankenberg et al, 2008) o no retirando la biomasa cosechada (Tournebize et al, 2017).

Aparte de los casos en los cuales el contenido de materia orgánica no es suficiente para permitir la desnitrificación, la eliminación de NT mediante este proceso puede ser baja cuando el sistema recibe una baja carga anual o cuando las inundaciones o condiciones anaeróbicas dentro del sistema ocurren solo durante periodos cortos (Borin y Tocchetto, 2007). Además, ya que la desnitrificación ocurre a temperaturas bajas, existe una cierta variabilidad en la eficiencia de eliminación entre las distintas temporadas (Tournebize et al, 2017), y puede ser particularmente baja durante el invierno (Borin y Tocchetto, 2007). La eliminación de NT también puede ser impedido por condiciones de aguas estancadas, ya que se puede agotar el oxígeno, resultando en la prevención de nitrificación completa (Díaz et al, 2012).

Un proceso particularmente importante en los humedales de FS es la sedimentación de partículas de suelo ya que generalmente el fósforo y otros contaminantes están adjuntos a ellos (Braskerud, 2002). Por lo tanto, el diseño típico de estos sistemas es una sección de entrada más profunda para facilitar la sedimentación (1-2 m de profundidad), seguida por un lecho vegetado (0.1-0.5 m de profundidad) (Vymazal y Dvořáková Březinová, 2018). Los factores que afectan la retención de las partículas de suelo son la velocidad de sedimentación, la tasa de flujo y la superficie. Ya que la concentración de partículas de suelo es alta durante el principio del evento de lluvia, la sedimentación típicamente no representa un problema en esta etapa. La resuspensión de las partículas de suelo no es deseable, y puede ser mitigada por la presencia de vegetación (Braskerud, 2002; Kasak et al, 2018). Además, la vegetación en los humedales de FS también puede aumentar las eficiencias de eliminación mediante la provisión de una fuente de carbono para la desnitrificación o la transferencia pasiva de oxígeno de la atmósfera al suelo del humedal (Kasak et al, 2018).

Los humedales para tratamiento pueden eliminar el fósforo a través de rutas biológicas (absorción vegetal y microbiana), físicas (sedimentación) y químicas (sorción y precipitación) (Dunne et al, 2005), de las cuales las primeras dos son las principales (Lenhart et al, 2016). Las características fisicoquímicas de los suelos y sedimentos de los humedales corresponden a uno de los factores principales en estos procesos, ya que afectan las dinámicas de sorción de P inorgánico (Dunne et al, 2005). Además, puede que las condiciones anaeróbicas provoquen la liberación de fósforo de los sedimentos, y por lo tanto el sistema debería estar en estado óxico (Kasak et al, 2018). Otros factores que pueden afectar la estabilidad a largo plazo del fósforo ligado en los sedimentos son el suministro de sorbentes de fósforo, condiciones de reducción-oxidación de sedimento y relaciones molares $Fe_{tot}:P$ (Mendes et al, 2018). Los humedales de FS pueden sufrir una reducción en la eliminación de PT después de un cierto tiempo debida al hecho de que los sitios de sorción están saturados y que el crecimiento inicial de la vegetación se ha estabilizado. Por lo tanto, es importante realizar manejo apropiado de vegetación y eliminación de sedimentos para permitir el mismo nivel o un nivel parecido de eliminación de PT (Díaz et al, 2012).

Aunque la concentración de patógenos en el drenaje agrícola es baja a menos que existan granjas de animales en la cuenca, es importante considerar este parámetro ya que los humedales para tratamiento pueden actuar como una fuente de coliformes, en vez de un sumidero cuando la concentración de patógenos del influente es relativamente baja (100 CFU 100 mL⁻¹ de coliformes fecales) (Beutel et al, 2013). Por ejemplo, puede que la eliminación de *Escherichia coli* sea más baja en humedales de FS que no cuentan con un flujo de agua continuo y que a menudo son caracterizados por periodos más largos en los cuales el agua se encuentra en condiciones estancadas. El agua estancada puede tener distintas condiciones ambientales (propiedades químicas y térmicas) en la columna de agua que pueden favorecer el desarrollo de las bacterias coliformes en general. Estas condiciones pueden evitarse si se mezcla agua en forma constante al flujo que alimenta el humedal construido (Díaz et al, 2012). Además, las bacterias coliformes pueden ser introducidas a los sistemas por animales de sangre caliente tales como mamíferos o aves (Díaz et al, 2012; Beutel et al, 2013).

Fenómenos parecidos también pueden inhibir la eliminación de plaguicidas, ya que se pueden acumular en la biopelícula de los rizomas de las plantas y/o grava (Tournebize et al, 2017) y la sedimentación es un mecanismo importante para la eliminación de las plaguicidas (Díaz et al,

2012). Por lo tanto, la eliminación de los plaguicidas depende no solamente de las características de los sedimentos (es decir, contenido orgánico, tamaño de partícula, conductividad hidráulica), sino también de las propiedades de los plaguicidas (por ejemplo: vida media, solubilidad, coeficiente de partición de agua octanol y coeficiente de distribución o sorción) (Mahabali y Spanoghe, 2014). La vegetación en el sistema puede aportar a la eliminación de las plaguicidas a través de su absorción (Mahabali y Spanoghe, 2014) o permitiendo el desarrollo de la biopelícula en la cual puede ocurrir la biodegradación de los plaguicidas (Tournebize et al, 2017).

4.5.3 Consideraciones específicas durante el diseño y construcción de un HT

Para los humedales que tratan el drenaje agrícola, las consideraciones específicas durante el diseño y para la construcción son:

- La escorrentía pronosticada debería ser tomada en cuenta al planificar un humedal construido para ajustar la profundidad. Esto es particularmente importante cuando la superficie es limitada (Blankenberg et al, 2008).
- La textura del suelo debería ser estimada antes de la construcción de un humedal de FS ya que la infiltración puede presentar un componente importante del balance hídrico de los sistemas no impermeables y puede provocar altas pérdidas de agua (Lavrnić et al, 2018).
- Los sistemas deberían ser diseñados para facilitar la cosecha, un proceso que puede aumentar la eliminación permanente del fósforo y evitar su liberación (Lenhart et al, 2016).
- La relación humedal para tratamiento a cuenca es un parámetro importante a considerar durante la etapa de diseño y para permitir un TRH que sea lo suficiente largo para permitir un tratamiento suficiente de agua de drenaje; debería ser al menos 1%, o aún más alta en las regiones con un clima frío (Tournebize et al, 2017).
- Se puede mantener la resuspensión de sedimentos a un nivel mínimo si la cobertura de vegetación es aproximadamente 50%. Por lo tanto, deberían considerarse los requisitos vegetales para crecimiento óptimo al momento de diseñar el sistema (Braskerud, 2002).
- La existencia de zonas muertas y cortocircuitos debería ser evitada mediante un posicionamiento apropiado de los puntos de entrada y salida y la creación de diques (Tournebize et al, 2017).
- El desarrollo de vegetación debería ser promovido antes de que el sistema empiece a operar, ya que el manejo del nivel de agua puede ser controlado en ese periodo y puede afectar el establecimiento apropiado de vegetación (Lenhart et al, 2016).

4.6 Humedales para tratamiento de lodos

Steen Nielsen¹, Alexandros Stefanakis²

¹ *Orbicon, Linnés Allé 2, DK - 2630 Taastrup, Denmark*

² *Bauer Nimr LLC, PO Box 1186, PC114 Al Mina, Muscat, Oman*

4.6.1 Objetivos del diseño

El resultado de los procesos de tratamiento de aguas residuales en plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales es la producción de gran cantidad de lodos como residuo. Este exceso de lodos se produce en las diferentes etapas de la planta de tratamiento, tales como los lodos que se produce en los sedimentadores de lodos primario y secundarios y en la etapa de tratamiento biológico. El lodo se caracteriza por alto contenido de humedad, nutrientes, sólidos orgánicos, e inclusive metales pesados compuestos orgánicos sintéticos, microorganismos patógenos y sustancias inorgánicas (Stefanakis et al., 2014). Por lo tanto, descargar lodos sin tratamiento adecuado al medio ambiente está prohibido por las normas, aunque el lodo contiene