

# HUMEDALES COMO ALTERNATIVA PARA LA LIMPIEZA DE AGUAS RESIDUALES

Ana Laura Lara-Domínguez y John W. Day

## Introducción

**Las aguas que quedan como residuo** de la actividad humana se definen como de origen doméstico y de naturaleza industrial. Sin duda que el mayor volumen de aguas residuales corresponde a aquellas que son propias de la vida cotidiana del ser humano como son las que resultan de la limpieza, la preparación de alimentos y las necesidades fisiológicas. Se calcula que cada persona consume aproximadamente entre 150 y 250 litros diarios para satisfacer estas necesidades. A su vez, la demanda de agua aumenta con el incremento de la población y actualmente las fuentes más accesibles y económicas ya están agotadas o están cerca de estarlo.

El empleo del agua potable en los hogares genera aguas residuales que contienen los residuos propios de la actividad humana. Entre 70 y 80% de las aguas recibidas a domicilio se transforman en residuales. Parte de los residuos contenidos en estas aguas son materia que consume o demanda oxígeno para su oxidación, tales como material fecal, restos de alimentos, aceites y grasas. Otra parte de los residuos son detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable y también microorganismos patógenos. La materia orgánica biodegradable y algunas sales inorgánicas constituyen nutrientes para los microorganismos.

Estas aguas residuales también se conocen como aguas negras o municipales, las cuales se vierten a las redes de saneamiento—cuando las hay— o en drenajes de diversos tipos, para que finalmente en la inmensa mayoría de los casos terminen por vaciarlas a los cuerpos de agua naturales como son ríos, lagos, lagunas y finalmente el mar, generando así problemas de contaminación en los mismos (Díaz-Delgado y Antón, 1999). Sin embargo, por razones de salud pública, así como por consideraciones socioeconómicas y estéticas, las aguas residuales no deben verse, sin tratamiento, a los cuerpos de agua.

Se estima que cada persona consume diariamente entre 150 y 250 litros de agua, desechando entre 70 y 80% de la misma.

Son varios los parámetros físicos, químicos y biológicos utilizados para evaluar la calidad de las aguas residuales y éstos son: el oxígeno disuelto (OD), los sólidos suspendidos totales (SST), los sólidos disueltos totales (SDT), el contenido de bacterias (B), de parásitos (P) y de nutrientes (N), la acidez (pH), así como los compuestos químicos tóxicos, entre los que se destacan los compuestos orgánicos volátiles, los neutralizadores ácidos/básicos, metales pesados, cianuros y agroquímicos. La demanda o consumo de oxígeno que requieren los microorganismos para vivir (DBO), junto con la presencia de materia orgánica que les sirve de nutrientes, se emplean como medida para indicar la cantidad de residuos que existen en el agua.

La importancia del OD para la vida acuática se debe a que, en los casos en los que el nivel de OD se sitúa por debajo de 4-5 mg/l, se pueden producir efectos nocivos en determinadas especies. Los sólidos suspendidos afectan la transparencia de la columna de agua y acaban por sedimentarse en el fondo, lo cual puede dar lugar a un enriquecimiento béntico, toxicidad y mayor demanda de oxígeno de los sedimentos. La presencia de bacterias coliformes se suele adoptar como indicador de la presencia de otros organismos patógenos de origen fecal, y como tal, es usada para determinar la seguridad de la utilización de un agua para usos recreativos, entre otros.

1846

Los parámetros que indican la calidad del agua son el oxígeno disuelto, los sólidos suspendidos, el total de sólidos disueltos, el contenido de bacterias y de nutrientes, la acidez, así como la presencia de compuestos químicos tóxicos.

El propósito de este capítulo es describir de forma general el proceso de tratamiento de aguas residuales, y mostrar que éste puede ser sustituido en parte por otros procesos no convencionales, el caso del uso de los humedales como plantas de tratamiento. Además, demuestra la viabilidad de esta alternativa, especialmente en poblados pequeños, y presenta algunas experiencias pioneras en México.

### **Tratamiento convencional de aguas residuales**

El proceso convencional de tratamiento de aguas residuales domésticas se divide en tres etapas: el tratamiento primario, el secundario y el terciario.

**El tratamiento primario elimina los sólidos que no se mezclan con el agua como son arenas, grasas y espuma.**

El tratamiento primario consiste en eliminar los sólidos que no se mezclan con el agua como son arena, grasas y espuma. El primer paso de esta etapa es la sedimentación y filtración de sólidos a través de rejillas. La sedimentación separa tanto los sólidos que se hunden en el agua, como aquellos que flotan; estos últimos son aceites, ceras, ácidos grasos y jabones insolubles que se conocen genéricamente como grasas. Durante el hundimiento o decantación primaria existe la tendencia a que las partículas formen agregados, proceso que puede acelerarse con la adición de compuestos químicos.

El tratamiento secundario consiste en que los microorganismos aerobios y anaerobios descomponen la materia orgánica, la cual al degradarse se sedimenta o se convierte en gases como el dióxido de carbono y el metano. Este último se puede separar y quemar como una fuente de energía. Este proceso disminuye el contenido de sustancias orgánicas del efluente líquido.

1047

**Durante el tratamiento secundario los microorganismos degradan la materia orgánica, se forman gases y ocurre la sedimentación del material.**

Este tratamiento biológico utiliza la materia orgánica biodegradable como nutrientes o alimento para las bacterias a las cuales se les proporciona oxígeno y condiciones controladas para que crezcan. El tratamiento biológico es una oxidación de la materia orgánica biodegradable con participación de bacterias que aceleran el proceso natural y evitan posteriormente la presencia de contaminantes y la ausencia de oxígeno en los cuerpos de agua. Para evitar la inhibición en el crecimiento de las bacterias es preciso que no se encuentren sustancias tóxicas como son los metales pesados cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), así como cianuros, fenoles y aceites.

El tratamiento terciario tiene como objetivos eliminar la carga orgánica remanente de un tratamiento secundario, desinfectarla para eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olor indeseables, remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales,

que ocasionan espuma y eutrofización, respectivamente, para luego utilizarla en otras actividades como la acuacultura, riego de cultivos. Para ello se aplican diferentes procesos como cloración, ultrafiltración, nanofiltración, entre otros, siendo el primero el más común.

**El tratamiento terciario mejora la calidad del agua después del tratamiento secundario, lo cual permite su reutilización en actividades de riego, acuacultura, recreación, entre otras.**

### **Legislación Mexicana en materia de descarga de aguas residuales**

La captación, tratamiento y suministro de agua se incluyen en el marco legal de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en los artículos 27 y 115. El artículo 27 establece que todos los recursos hídricos son propiedad pública, bajo el control del gobierno federal. Se concede derechos de usufructo por 50 años y pueden ser revocados si se cambia el uso que se dé al agua. El artículo 115 fracción III señala que "los municipios con el concurso de los estados cuando así fuere necesario y lo determinen las leyes, tendrá a su cargo el servicio de agua potable y alcantarillado".

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento, la Ley General de Salud Pública, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, el Convenio sobre la Preyención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por Buques, el Reglamento para prevenir y controlar la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias y las Norma Oficiales Mexicanas NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997 son los instrumentos jurídicos que regulan los vertimientos de aguas residuales y su tratamiento.

La Ley de Aguas de 1992 es la única ley referente al agua con la que cuenta el país, y sienta las bases para regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y

calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Las disposiciones de esta ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo, así como a los bienes nacionales. Entre otras cosas establece la obligatoriedad de formular el Programa Nacional Hidráulico, sienta las bases para la asignación de permisos y concesiones, y reconoce como utilidad pública la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales y la ejecución de medidas para el reuso de dichas aguas, así como la construcción de obras de prevención y control de la contaminación del agua. Además, cada estado cuenta con su propia ley de agua potable y de saneamiento, dirigida a establecer las condiciones de suministro de los servicios correspondientes (Cházaro, 1999).

La Ley de Derechos en Materia de Agua estipula los siguientes principios: 1) el agua ostenta un valor económico, según su disponibilidad, y 2) el que contamina paga. Esta ley se actualiza cada año y fija cuotas de uso y multas por contaminación, para diferentes categorías de uso, según la disponibilidad del líquido en una zona particular.

1049

Por otra parte, la Ley General de Salud Pública estipula los estándares respecto al agua potable y las enmiendas a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), exige un cambio a favor de un sistema integrado de permisos y a la creación de un inventario de todas las emisiones al ambiente, incluidas las descargas de efluentes al agua.

La LGEEPA menciona que las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos con corrientes de agua (artículo 117); éstas deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir la contaminación del cuerpo receptor, la interferencia en los procesos de depuración y el mal funcionamiento de los sistemas (artículo 122), así como satisfacer las Normas Oficiales Mexicanas (artículo 123). Además, no podrán descargarse o infiltrarse aguas residuales, en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, sin previo tratamiento y el permiso de la autoridad federal o local (artículo 121).

Corresponderá a quien genere dichas descargas realizar el tratamiento previo requerido, mediante los equipos de tratamiento de las aguas residuales de origen

urbano que cumplan con la normatividad vigente (artículo 126); mientras que los gobiernos del estado y de los municipios se encargan del control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado, así como de la vigilancia del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (artículo 119).

Se enfatiza la importancia de la participación social con responsabilidad como condición indispensable para evitar la contaminación del agua.

### Normas Oficiales Mexicanas

Los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales, así como a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal están regulados por las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996, respectivamente. Mientras que la calidad de las aguas tratadas para reuso en servicios al público está regulada por la NOM-003-SEMARNAT-1997.

1050

**Existen normas oficiales mexicanas que regulan la calidad del agua que se reutiliza en otras actividades, así como la que es descargada a los cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado.**

Así mismo, las normas oficiales NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996 establecen las fechas en que los poblados deben cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, respectivamente. El cumplimiento es gradual y progresivo en función del rango de población. Los poblados con menor cantidad de habitantes (2,501-20,000 habitantes) tienen como fecha límite el 1º de enero del 2009 para la NOM-002-SEMARNAT-1996 y el 1º de enero del 2010 para la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Cuadro 1).

### Los humedales como plantas de tratamiento de aguas residuales

Durante muchos años los humedales han sido utilizados como planta de tratamiento de aguas residuales, pero sólo en las últimas décadas se ha analizado

Rango de población	Fecha de cumplimiento a partir de:	
	NOM-001-SEMARNAT-1996	NOM-002-SEMARNAT-1996
Mayor a 50,000 habitantes	1º de enero del 2000	1º de enero del 1999
De 20,001 a 50,000 habitantes	1º de enero del 2005	1º de enero del 2004
De 2,501 a 20,000 habitantes	1º de enero del 2010	1º de enero del 2009

**Cuadro 1** | Fecha límite para el cumplimiento de los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (NOM-001), y a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (NOM-002). Fuente: Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996.

este proceso científicamente. Desde una perspectiva ecológica, el interés de que los humedales puedan purificar las descargas de aguas residuales está basado en la creencia de que la energía de los sistemas naturales es muy eficiente en el manejo del ciclo de producción, uso, degradación y reutilización.

Los humedales naturales son muy eficientes en la eliminación del exceso de nutrientes y de contaminantes funcionando como tratamiento terciario de las aguas residuales.

Numerosos estudios han demostrado que los humedales pueden ser muy eficientes como plantas de tratamiento terciario de aguas residuales (Kadlec y Knight, 1996). Estos estudios indican que, tanto los humedales naturales como los artificiales, se han empleado con éxito para purificar las descargas de aguas residuales (Richardson y Davis 1987; Conner *et al.*, 1989; Reed 1991; Kadlec y Knight, 1996). Estos sistemas son muy eficientes por sus propiedades, ya que eliminan el exceso de nutrientes y contaminantes. Los procesos metabólicos y biológicos que se llevan a cabo en los humedales ayudan a que se generen procesos de sedimentación, filtración, precipitación química y absorción, dando como resultado la deposición, el entierro y el almacenamiento en la vegetación, así como la disminución de nutrientes y materia orgánica (Conner *et al.*, 1989; Kadlec y Alvord, 1989; Patrick, 1990). Antes de implementarse el uso de los humedales como plantas de tratamiento de aguas residuales, todos los efluentes se descargaban directamente en los cuerpos de agua abiertos.

Las descargas de aguas residuales en humedales también pueden servir como una herramienta para la restauración de humedales costeros que han sido impactados por las altas tasas de elevación del nivel del mar. Se ha demostrado que los humedales persisten ante la elevación del nivel del mar cuando el crecimiento vertical de la vegetación y la elevación del nivel del mar son iguales o exceden la tasa de subsidencia (es decir, el hundimiento de las masas terrestres) (Delaune *et al.*, 1983; Cahoon *et al.*, 1995). Por ejemplo, las inundaciones históricas del río Mississippi provocaron el depósito de sedimentos y nutrientes en los humedales que se encuentran en la planicie deltáica y contribuyeron al crecimiento vertical de la vegetación del humedal (Nyman y Delaune, 1991).

Son cuatro las hipótesis que se tienen acerca de los beneficios que pueden lograr utilizar un humedal como planta de tratamiento de aguas residuales: 1) mejoran la calidad del agua que se descarga; 2) incrementan la tasa de crecimiento vertical de la vegetación y la acumulación de sedimentos; 3) aumentan la productividad vegetal; y 4) contribuyen al ahorro financiero, ya que su precio es considerablemente más bajo, comparado con los sistemas convencionales de tratamiento terciario (Breux, 1992; Breux y Day, 1994).

Otras razones adicionales que justifican el uso de los humedales como plantas de tratamiento de aguas residuales en Louisiana, Estados Unidos, es que en este Estado las tasas de subsidencia (hundimiento de las masas terrestres) y de desnitrificación son superiores al promedio nacional, por lo que existe una elevada tasa de hundimiento de los humedales con su consecuente pérdida. El aumento de la productividad vegetal es crítico, especialmente en muchas áreas de Louisiana, donde la subsidencia costera del Delta del Mississippi se incrementa hasta casi diez veces como resultado de la elevación del nivel del mar (Conner y Day 1988; Penland *et al.*, 1988). Al incrementar la productividad de los humedales, se da un mayor crecimiento de las raíces, lo que conduce a la formación de suelo orgánico que puede compensar la subsidencia o hundimiento de la planicie deltáica y por lo tanto, contribuye a disminuir la pérdida de humedales.

En general, los humedales que pueden recibir descargas de aguas residuales han sido alterados en su dinámica hidrológica por alguna combinación de cualquiera de los

siguientes factores: construcción de albardones (lomas de tierra a lo largo de las lagunas y esteros para prevenir inundaciones y represar agua), bancos del despojo (productos de los dragados que impiden el flujo natural del agua en los humedales), carreteras, caminos de acceso a las instalaciones de explotación de petróleo y gas, líneas de ferrocarril, entre otras. La descarga de aguas residuales a los humedales les proporciona un tratamiento que elimina el exceso de nutrientes del efluente antes de ser liberados a los cuerpos de agua.

Desde 1988 el Instituto de Ecología Costera de la Universidad de Louisiana ha estado trabajando con la EPA (Environmental Protection Agency = Agencia para la Protección Ambiental) para evaluar el impacto que pueden tener los humedales arbóreos o arbustivos en el tratamiento de aguas residuales en la costa de Louisiana. Para ello se han conducido varios estudios en diferentes localidades de la Costa de Louisiana con la finalidad de evaluar las cuatro hipótesis sobre la utilización de los humedales como planta de tratamiento de aguas residuales; los sitios estudiados son Thibodaux (Conner y Day, 1989), Breaux Bridge (Day *et al.*, 1994), Amelia (Day *et al.*, 1997a) y St. Bernard Parish (Day *et al.*, 1997b).

#### Mejoran la calidad del agua

Las aguas residuales que se descargan a estos sistemas mejorarán su calidad a través de la captación y eliminación eficaz de nutrientes dentro del humedal arbóreo. Existe un mejoramiento neto en la calidad del agua que permite reducir y asimilar significativamente la carga de nutrientes, en función de la distancia desde donde se vierten las aguas residuales hasta donde la reducción de nutrientes puede ser total, siendo como máxima de 800 metros. Se registró una disminución en la carga de fósforo y nitrógeno de las aguas tratadas en el humedal, lo que indica que estos sistemas funcionan como un sumidero neto de nutrientes, por lo tanto, estas áreas pueden proporcionar un efectivo tratamiento terciario de las aguas negras.

Los humedales mejoran la calidad del agua, ya que funcionan como sumidero de nutrientes, absorbiendo el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales.

Incrementan la tasa de crecimiento vertical de la vegetación y la acumulación de sedimentos

Actualmente, la evidencia indica que la elevación del nivel del mar está provocando la pérdida de humedales, induciendo la erosión costera, así como la intrusión de agua de mar en numerosas áreas costeras, antes caracterizadas por presentar influencia dulceacuícola (Stevenson *et al.*, 1988; Sestini, 1992). Si los humedales costeros, especialmente los deltáicos, no crecen verticalmente a una tasa igual a la tasa de la elevación relativa del nivel del mar, éstos se someten a una fuerte tensión ambiental debido a la inundación y al efecto del agua de mar, para finalmente desaparecer (Mendelssohn y McKee, 1988). Muchos humedales en Louisiana presentan un fuerte déficit de crecimiento vertical, es decir, no están creciendo y aumentando al mismo nivel que el nivel del mar. La descarga de un efluente, con un tratamiento secundario, puede estimular la producción de la biomasa y reforzar la tasa de acumulación de sedimentos debido a la gran cantidad de nutrientes que contiene.

1054

Los estudios en campo y la modelación revelaron que al descargar aguas residuales en los humedales no se afecta la producción vegetal por debajo del suelo, ni las tasas anuales de descomposición. Sin embargo, incrementan de manera significativa la producción de la vegetación acuática flotante y con ello la tasa de acumulación de sedimentos (Rybczyk *et al.*, 1996; Rybczyk, 1997; Rybczyk *et al.*, 1998).

Un modelo reveló que la elevación del humedal, en esta región con fuerte subsidencia (hundimiento de las masas terrestres), fue más sensible a la elevación eustática del nivel del mar (elevación del nivel del mar a nivel global) y a la profundidad de la subsidencia que a los posibles cambios del efluente relacionados con los procesos autógenos, tales como la descomposición y la producción primaria. Además, mostró que la adición de nutrientes no es suficiente para lograr una restauración a largo plazo de los humedales, por lo que es necesario suministrar sedimentos minerales (Rybczyk, 1997).

Las aguas residuales que se vierten a los humedales están cargadas de gran cantidad de nutrientes, lo cual estimula la producción de la vegetación acuática flotante y enraizada y con ello reduce la tasa de acumulación de nutrientes en agua y en sedimentos.

### Aumentan la productividad vegetal

Las descargas de aguas residuales con tratamiento secundario son aguas ricas en nutrientes que estimulan la productividad vegetal. Esta hipótesis ha sido probada en los humedales de Breaux Bridge, donde desde hace cerca de 50 años se han descargado aguas residuales en un área de 1,475 hectáreas de cipreses. La evaluación del crecimiento del tronco en esta área mostró un crecimiento significativamente mayor en comparación con un área control (sin descarga), lo cual permite el mantenimiento del humedal a largo plazo.

### Contribuyen al ahorro financiero

Las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales frecuentemente son muy costosas para las posibilidades económicas de muchas poblaciones pequeñas. Por ejemplo, un estudio realizado en Dulac, Louisiana, cotizó una planta convencional de tratamiento de aguas residuales en \$177,000 USD anuales, durante 25 años. En contraste, con el uso de los humedales como planta de tratamiento el costo se reduce a \$35,000 USD anuales, lo que representa un ahorro potencial de 1.9 millones de dólares en 25 años (Breaux *et al.*, 1995). Estos datos muestran la factibilidad económica de esta alternativa.

1055

En los casos en que no se cuente con humedales o éstos no tengan una calidad adecuada, se puede explorar la opción de humedales construidos.

El uso de humedales como planta de tratamiento de aguas residuales es mucho más económico que el empleo de plantas de tratamiento convencionales.

## Humedales artificiales

Los sistemas de humedales artificiales son tratamientos biológicos con gran potencial por su facilidad de operación y por representar técnica y económicamente una opción viable para ser utilizados. Estos sistemas artificiales consisten en un diseño de áreas con sustrato saturado por aguas superficiales o subterráneas y con plantas emergentes (generalmente tule, carrizo y juncos), con una distribución y duración suficientes para mantener condiciones saturadas. El agua residual pasa a través del humedal y es depurada por los microorganismos existentes. Sin embargo, el agua

resultante no es potable, pero puede utilizarse para riego agrícola y forestal, limpiar maquinaria, vehículos y equipo industrial o bien para uso sanitario.

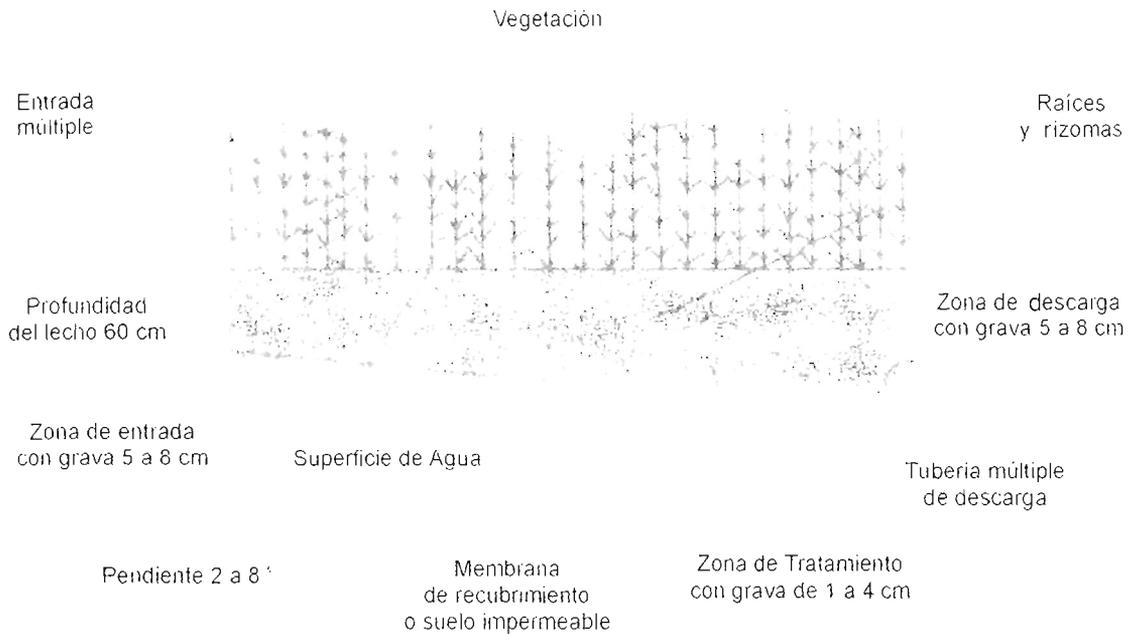
El funcionamiento de un humedal artificial se basa en tres principios básicos: 1) la actividad bioquímica de diversos microorganismos; 2) el aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día; y 3) el apoyo físico del lecho del humedal que tiene una actividad filtrante y funciona como soporte y hábitat de las mismas plantas y microorganismos mencionadas en los puntos anteriores.

Los humedales construidos consisten en un área con sustrato saturado por agua, cubierta por plantas emergentes, tolerantes a la inundación.

La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial, en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera; mientras que un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado de manera específica para el tratamiento de algún tipo de agua residual o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (Figura 1). Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. En contraste, la superficie del agua está expuesta a la atmósfera en los humedales naturales y en los artificiales de flujo libre superficial (EPA, 2000).

Antes de verter el agua residual a un humedal construido, se recomienda aplicarle al menos un tratamiento primario para eliminar basura, ramas o residuos mayores a 0.5 mm de diámetro.

Antes de iniciar el proceso de limpieza por las plantas emergentes, se recomienda que el agua pase por un tratamiento preliminar dependiendo de su origen. En este tratamiento preliminar, se filtrarán basura, ramas o residuos con un diámetro superior a los 0.5 mm, por medio de una rejilla. El tratamiento de las aguas residuales con humedales artificiales es mucho más eficiente por la interacción entre microorganismos y plantas emergentes que el efecto que se producirá utilizando solamente uno de ellos. Los resultados son óptimos con poco esfuerzo operativo humano y mecánico ya



**Figura 1** | Arreglo típico de un humedal artificial de flujo subsuperficial (modificado de EPA, 2000).

que la naturaleza trabaja sin descanso, superando cualquier tecnología para el tratamiento de aguas residuales (EPA, 2000).

La tecnología de los humedales artificiales es adecuada porque:

- Proporciona un tratamiento efectivo en forma pasiva y minimiza la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo, por parte de operadores calificados.
- La operación al nivel de tratamiento terciario es posible durante todo el año en climas cálidos y semicálidos.
- Los humedales artificiales son efectivos en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y algunos metales. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible, pero se requiere de un tiempo de retención mayor.
- Elimina los problemas de malos olores, de mosquitos y de disposición de lodos, propios de las tecnologías convencionales.

- Es una tecnología apropiada y más sustentable porque hace uso de los recursos naturales sin disminuirlos. De hecho los humedales artificiales sirven como parques, jardines, espacios deportivos y culturales, en diversas partes del mundo.
- Tiene un tamaño flexible y puede ser instalada en cualquier lugar sin grandes obras adicionales para colectar las aguas negras.
- Permite el uso de materiales y mano de obra de la zona, tanto para su operación como para su construcción, dejando buena parte de lo invertido en ella.
- Tiene bajo costo de inversión, operación y mantenimiento.
- No requiere de grandes estructuras, lo que posibilita el uso de tierras inservibles para otras actividades.

Los humedales construidos tienen un bajo costo de inversión, operación y mantenimiento, utilizan materiales y mano de obra locales, eliminan malos olores, mosquitos y mejoran considerablemente la calidad del agua. Además, pueden ser utilizados todo el año en climas cálidos y semicálidos.

A pesar de las ventajas de esta tecnología, es importante hacer notar las siguientes limitaciones:

- Un humedal con flujo subsuperficial requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales pesados y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello con el tiempo se acumulan.
- Los sistemas de humedales reducen al menos en un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección posterior.

Los humedales construidos requieren de grandes superficies, por lo que se recomiendan para poblados pequeños.

## Experiencias en México

En México este tipo de plantas naturales de tratamiento de aguas residuales se está implementando de manera experimental, tanto en la Universidad de Las Américas, Puebla, como en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Así mismo, se han llevado a cabo proyectos de pequeñas dimensiones en diferentes estados de la República Mexicana como Chihuahua, Tlaxcala y Quintana Roo.

En la frontera México-Estados Unidos, el tratamiento de las aguas residuales es una de las principales preocupaciones de la población que se incrementa, en contraste con la disminución del cauce del Río Grande/Río Bravo, debido a las fuertes sequías que han ocurrido en los últimos años. Como una propuesta, se está desarrollando un proyecto para la reutilización de las aguas, así como en la generación de oportunidades económicas para la población de un pequeño ejido llamado San Isidro, situado en las afueras de Ciudad Juárez, Chihuahua. Para ello se construirá un humedal piloto para determinar los lineamientos de operación adecuados para México, puesto que esta tecnología fue importada de los Estados Unidos. De igual modo, servirá como plataforma para el lanzamiento de tres micro empresas locales.

1059

Los habitantes del ejido de San Isidro, con el apoyo de la Fundación Ford, y asesorados por un ingeniero, construyeron en 1997 un humedal para el tratamiento de sus aguas residuales. Al principio los ejidatarios se organizaron en el marco del Programa Nacional de Solidaridad (PRONASOL), pero debido a la crisis financiera se suspendió el apoyo oficial, y actualmente los residentes están excavando los canales necesarios para encauzar las aguas negras de 50 hogares hasta los humedales. En el humedal se cultivará mezquite, el cual jugará un papel importante en el proceso de tratamiento hasta ser transplantado un año después. Los árboles transplantados aportarán beneficios y, eventualmente combustible, alimento y forraje. Las flores del mezquite y otras plantas del humedal servirán de base para una micro empresa que se dedicará a la apicultura. Si desea profundizar en este tema consulte <http://www.americaspolicy.org/borderlines/spanish/1996/bl25fei.html>

Otro ejemplo es el del municipio de Santa Cruz Quilehtla, Tlaxcala, donde en 1993 los gobiernos estatal y municipal se dieron a la tarea de resolver el problema de las

El ejido de San Isidro, en las afueras de Ciudad Juárez, Chihuahua, construye un humedal con doble propósito: darle tratamiento a sus aguas residuales y producir miel con las flores de las plantas utilizadas en este sistema.

aguas negras, resultado de la actividad agropecuaria, industrial y doméstica, a través de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, mediante el empleo de tecnología de humedales artificiales. Esta tecnología además de sanear las agua negras, no contamina el entorno en etapas posteriores al tratamiento, como sucede con algunas de las plantas convencionales, ya que transfieren la contaminación del agua al aire en forma casi integral (Jhabvala, 1998).

Los resultados en el Municipio de Quilehtla, Tlaxcala fueron más eficaces en operación que lo planteado debido a las condiciones del lugar, esto relacionado con el tipo de material de alta porosidad, las plantas emergentes empleadas (junco, carrizal y tule) adaptadas al clima de la región, la luminosidad y los microorganismos. Fue diseñado para tratar 320 m<sup>3</sup>/día (3.7 litros/segundo) de aguas negras, pero consistentemente trata volúmenes de más de 500 m<sup>3</sup>/día. El crecimiento de las plantas ha permitido atender una población de casi 5 mil habitantes y la calidad del efluente es mejor de lo previsto. En el cuadro 2 se presenta la eficiencia global de los compartimentos del humedal.

1060

Parámetro	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Remoción (mg/l)	% Eficiencia
SST	2080	34	2046	98.37
DBO	800	20	780	97.50

**Cuadro 2** | Resultados de la calidad del agua del humedal artificial de Quilehtla, Tlaxcala. SST: Sólidos suspendidos totales; DBO: Demanda bioquímica de oxígeno. Fuente: Jhabvala (1998).

La experiencia del Municipio de Quilehtla, Tlaxcala, muestra una eficiencia mayor a 97% en un humedal construido al tratar las aguas residuales de casi cinco mil habitantes.

En la península de Yucatán, los sistemas tradicionales de disposición de aguas residuales resultan ineficaces por las características únicas de los suelos. Éstos son muy pobres en tierra y permiten la filtración de cualquier líquido hacia los extensos mantos freáticos subterráneos. La Fundación Planetary Coral Reef está implementando en diferentes lugares de la costa del estado de Quintana Roo, particularmente en Akumal y algunos desarrollos en la Costa Maya, un sistema de tratamiento de aguas negras basado en el uso de humedales artificiales. Este sistema también es conocido como Sistema Hidrobotánico de Tratamiento o como Sistema de Filtrado Biológico-Macrofítico. En él las aguas negras fluyen lentamente a través de los estanques-humedales de tratamiento y son purificadas por el contacto de los medios biológicos y de las zonas de raíces de la vegetación que absorbe los nutrientes (Molina *et al.*, 1998). El sistema desarrollado en esta localidad consiste en:

1. Un tanque impermeabilizado subterráneo equipado con un sistema especial de filtración para contener sólidos, donde se inicia el proceso de descomposición microbiana (anaeróbica y aeróbica).
2. Un estanque subsuperficial sellado e impermeabilizado para el flujo de aguas negras dividido en dos compartimientos de tratamiento. Está construido con cemento y relleno con grava calcárea, con un humedal plantado en la superficie conteniendo diversas especies locales de palmeras, arbustos, zacates y pastos de la región.
3. Un jardín de horticultura maya plantado alrededor del sistema que utiliza los nutrientes remanentes del afluente del sistema. El sistema requiere de una poda ocasional mínima de las plantas de los dos compartimientos de tratamiento para estimular el crecimiento. La vegetación recolectada puede ser empleada como forraje o como material artesanal.

## Conclusiones

Los resultados de los diferentes estudios indican que las metas ecológicas son factibles para incrementar la calidad del agua, estimular el crecimiento vertical de la vegetación de los humedales, así como aumentar su productividad. Económicamente, los

ahorros son sustanciales para poblados pequeños e industrias procesadoras no-tóxicas. Los humedales como plantas de tratamiento de aguas residuales proporcionan una alternativa económicamente viable y efectiva a las plantas convencionales de tratamiento terciario. Así mismo, este tipo de uso de los humedales servirá para la restauración de las costas, principalmente aquellas afectadas por los procesos naturales de hundimiento y la elevación del nivel del mar ante el cambio climático global. Al prevenir la contaminación del agua, el aire y los suelos, se disminuyen las posibilidades de contraer enfermedades. Además, el humedal constituye un espacio comunitario para la educación ambiental y el fomento de la responsabilidad ciudadana en el cuidado de los recursos. Todos estos aspectos mejoran la calidad de vida de los pobladores locales.

El uso de humedales naturales y contruidos resultan alternativas viables, desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, para el tratamiento de aguas residuales de poblados pequeños.

## BIBLIOGRAFÍA

- Breaux, A. M.** 1992. The use of hydrologically altered wetlands to treat wastewater in coastal Louisiana. Tesis de doctorado. Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, E.U.A.
- Breaux, A. M., y J. W. Day, Jr.,** 1994. Policy considerations for wetland wastewater treatment in the coastal zone: a case study for Louisiana. *Coastal Management* 22: 285-307.
- Breaux, A., S. Farber y J. Day.** 1995. Using natural coastal wetlands systems for wastewater treatment: an economic benefit analysis. *Journal of Environmental Management* 44: 285-291.
- Cahoon, D., D. Reed y J. Day.** 1995. Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology* 130: 1-9.
- Cházaro, S.** (coord.) 1999. *Uso Sustentable del Agua en México. Reto de Nuestro Tiempo.* Seguros Comercial América.
- Conner, W. H. y J. W. Day, Jr.** 1988. Rising water levels in coastal Louisiana: implications for two coastal forested wetland areas in Louisiana. *Journal of Coastal Research* 4(4): 589-596.
- Conner, W. H. y J. W. Day, Jr.** 1989. A use attainability analysis of wetlands for receiving treated municipal and small industry wastewater: a feasibility study using baseline data from Thibodaux, LA. Center for Wetlands Resources, Louisiana State University, Baton Rouge, LA., 78 p.

- Conner, W. H., J. W. Day Jr., y J. D. Bergeron.** 1989. A use attainability analysis of forested wetlands for receiving treated municipal wastewater. Report to the City of Thibodaux, Louisiana. 89 p.
- Day, J. W., A. M. Breaux, S. Feagley, P. Kemp, y C. Courville.** 1994. A use attainability analysis of longterm wastewater discharge on the Cypriere Perdue Forested Wetland at Breaux Bridge, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University. Baton Rouge, Louisiana, E.U.A., 54 p.
- Day, J. W., J. Rybczyk, R. Pratt, A. Westphal, T. Blahnik, G. Garson, y P. Kemp.** 1997a. A use attainability analysis for longterm wastewater discharge on the Ramos Forested Wetland at Amelia, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University. Baton Rouge, Louisiana, E.U.A., 65 p.
- Day, J. W., J. Rybczyk, R. Pratt, M. Sutula, A. Westphal, T. Blahnik, P. Delgado, P. Kemp, A.J. Englande, C.Y. Hu, G. Jin, y H.W. Jeng.** 1997b. A use attainability analysis for longterm wastewater discharge to the Poydras-Verret Wetland in St. Bernard Parish, LA. Coastal Ecology Institute, Louisiana State University. Louisiana, E.U.A., 68 p.
- Delaune, R. D., R. H. Baumann, y J. G. Gosselink.** 1983. Relationship among vertical accretion, coastal submergence, and erosion in a Louisiana gulf coastal marsh. *Journal of Sedimentary Petrology* 53: 147-157.
- Díaz-Delgado, C. y D. Antón,** 1999. Sequía en un Mundo de Agua.  
<http://www.cosmovisión.com/sequia>
- EPA,** 2000. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. Estados Unidos, Agencia para la Protección Ambiental. Office of Water Washington, D.C. EPA 832-F-00-023, septiembre de 2000.
- Jhabvala, F.,** 1998. La experiencia de la tecnología de pantanos artificiales para el saneamiento de las aguas residuales de Quilehla, Tlaxcala, págs. 95-101. En: E.J. Olguín, G. Sánchez, S. Galicia y E. Hernández (comp.). Tercer Simposio Internacional Bioprocesos más Limpios y Desarrollo Sustentable. WAITRO, CITELDES, INECOL, A.C. 176 p.
- Kadlec, R. H. y H. Alvord, Jr.** 1989. Mechanisms of water quality improvements in wetland treatment systems. Pages 489-498 en: D.W. Fisk (ed.) *Wetlands: Concerns and Successes*. Proceeding sponsored by American Water Resources Association, September 17-22, 1989, Tampa, FL, E.U.A.
- Kadlec R. H. y R. L. Knight.** 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, New York, E.U.A.
- Molina, C., P. Rubinoff, y J. Carranza,** 1998. Normas Prácticas para el Desarrollo Turístico de la Zona Costera de Quintana Roo, México. Programa de Manejo Integrado de los Recursos Costeros en Quintana Roo, México. Amigos de Sian Ka'an, Coastal Resources Center, University of Rhode Island, USAID, 69 p.
- Mendelsshon, I. y K. McKee.** 1988. *Spartina alterniflora* die-back in Louisiana: time-course investigation of soil waterlogging effects. *J. Ecology* 76: 509-521.
- Nyman, J. A. y R. D. Delaune.** 1991. Mineral and organic matter accumulation rates in deltaic coastal marshes and their importance to landscape stability. GCSSEPM Foundation 12th Annual Research Conference. Program and Abstract: 166-170.
- Patrick, W. H., Jr.** 1990. Microbial reactions of nitrogen and phosphorus in wetlands, pp. 52—63. En: *The Utrecht Plant Ecology News Report*, Utrecht, Holanda.

- Penland, S., K. E. Ramsey, R. A. McBride, J. T. Mestayer, y K. A. Westphal.** 1988. Relative sea level rise and delta-plain development in the Terrebonne Parish Region. Coastal Geology Technical Report No. 4. Louisiana Geological Survey. Baton Rouge, Louisiana, E.U.A.
- Reed, S. C.** 1991. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Biocycle* 32: 44-49.
- Richardson, C. J. y D. S. Davis.** 1987. Natural and artificial wetland ecosystems: ecological opportunities and limitations pp. 819-854 En: K.R. Reddy y W.H. Smith (eds.) *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*, Magnolia Publishing Inc., Orlando.
- Rybczyk, J. M.** 1997. The use of secondarily treated wastewater effluent for forested wetland restoration in a subsiding coastal zone. Tesis de doctorado. Department of Oceanography and Coastal Sciences. Louisiana State University. Baton Rouge, E.U.A., 228 p.
- Rybczyk, J. M., J. W. Day, I. D. Hesse y P. Delgado Sánchez.** 1996. An overview of forested wetland wastewater treatment projects in the Mississippi River delta region. Kathryn Flynn (ed.) *Proceedings of the Southern Forested Wetlands Ecology and Management Conference*. Clemson University, South Carolina, E.U.A., 78-82 pp.
- Rybczyk, J. M., J. C. Callaway, y J. W. Day.** 1998. A relative elevation model (REM) for a subsiding coastal forested wetland receiving wastewater effluent. *Ecological Modelling* 112: 23-44.
- Sestini, G.** 1992. Implications of climatic changes for the Po Delta and the Venice Lagoon, pp. 429-495. En: L. Jeftic, J. Milliman y G. Sestini (eds.), *Climate Change and the Mediterranean*. E. Arnold, Londres
- Stevenson, J. C., L. Ward, and M. Kearney.** 1988. Sediment transport and trapping in marsh systems: implications of tidal flux studies. *Marine Geology*. 80: 37-59.