

Humedales: Tres propuestas tendientes a mitigar los daños antrópicos

Wetlands: Three proposals aimed at mitigating anthropogenic damage

**Salvador Alejandro Sánchez-Tovar*¹, Amado Enrique Navarro-Frómeta²,
Irina Salgado-Bernal³,**

¹Consultor independiente, Río Nazas 500-2, Morelia, 58020 Michoacán, México

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, México

**³Universidad de La Habana, Facultad de Biología, Departamento de Microbiología y
Virología, La Habana, Cuba**

**Correos-e (e-mails): salvadorinvestigador@gmail.com, navarro4899@gmail,
irina.salgado@yahoo.com.mx**

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Corresponding author*

Recibido / *Received*: Enero / *January* 15, 2024

Aceptado / *Accepted*: Marzo / *March* 14, 2024

Publicado / *Published*: Junio 30, 2025 (Número 2, julio-diciembre) / *June 30, 2025 (Number 2, July-December)*

Resumen

Los avances recientes en sistemas de tratamiento de agua, ya sean construidos o naturales, se han centrado en mejorar la eficiencia y la eficacia del tratamiento de aguas residuales. Las áreas clave incluyen mejoras de diseño, sistemas híbridos, la combinación con otras tecnologías, la eliminación asistida por microorganismos y la integración de prácticas sostenibles. Una opción interesante desde una perspectiva de sostenibilidad es el uso de reactores anaerobios como sistemas de tratamiento de agua, seguido de un humedal artificial. Y, ahora ¿Qué es un humedal artificial? Es un sistema que simula lo que ocurre en un humedal natural pero que puede controlarse e irse operando de acuerdo con lo que se desea que ocurra a su interior. El sistema clásico de un humedal es el de flujo horizontal subsuperficial ya que en países como México no son deseables los humedales de tratamiento superficiales por la posible presencia de mosquitos u otros vectores dañinos. En el caso de los humedales artificiales una nueva estrategia para mejorar la eficiencia de los procesos de biorremediación es la de incluir en estos sistemas la bioaumentación. La bioaumentación es la adición de poblaciones microbianas altamente concentradas y especializadas, de cepas simples o consorcios, a un determinado sitio contaminado. Las opciones más comúnmente empleadas para acometer esta estrategia son la adición de cepas bacterianas puras pre-adaptadas, la adición de consorcios pre-adaptados, la introducción de bacterias modificadas genéticas y la incorporación de grupos de genes relevantes en la interacción con el contaminante mediante un vector. La bioaumentación representa una alternativa más promisoría para mejorar la eficiencia de la biorremediación y la búsqueda de microorganismos competentes para aplicación en cada sitio o componente contaminado es una de las mejores soluciones en la actualidad para el cumplimiento de la legislación en las descargas de agua y sus subproductos, incluyendo cuerpos de agua en ríos, arroyos, canales, embalses, lagos, lagunas, zonas marítimas mexicanas, áreas verdes, infiltración y suelos cársticos.

Palabras clave: Humedal natural, artificial, tratamiento, contaminantes

Abstract

Recent advances in water treatment systems, both constructed and natural, have focused on improving the efficiency and effectiveness of wastewater treatment. Key areas include design improvements, hybrid systems, combination with other technologies, microorganism-assisted removal, and the integration of sustainable practices. An interesting option from a sustainability perspective is the use of anaerobic reactors as water treatment systems, followed by a constructed wetland. Now, what is a constructed wetland? It's a system that simulates what occurs in a natural wetland but can be controlled and operated according to what is desired within it. The classic wetland system is horizontal subsurface flow, since in countries like Mexico, surface treatment wetlands are undesirable due to the potential presence of mosquitoes. In the case of constructed wetlands, they are a new strategy to improve the efficiency of bioremediation processes, since these systems include bioaugmentation. Bioaugmentation is the addition of highly concentrated and specialized microbial populations, either single strains or consortia, to a given contaminated site. The most commonly used options for this strategy are the addition of pre-adapted pure bacterial

strains, the addition of pre-adapted consortia, the introduction of genetically modified bacteria, and the incorporation of gene clusters relevant to the interaction with the contaminant through a vector. Bioaugmentation represents a more promising alternative for improving bioremediation efficiency, and the search for competent microorganisms for application at each contaminated site or component is one of the best current solutions for compliance with legislation regarding discharges of water and its byproducts, including water bodies in rivers, streams, canals, reservoirs, lakes, lagoons, Mexican maritime zones, green areas, infiltration areas, and karst soils.

Keywords: Natural wetland, artificial wetland, treatment, pollutants

Introducción

Los avances recientes en humedales de tratamiento o construidos o artificiales, como también se les conoce, se han centrado en varias áreas clave para mejorar su eficiencia y eficacia en el tratamiento de aguas residuales:

- Mejoras en la ingeniería de diseño: Uso de sistemas con aireación forzada; uso de materiales con capacidades de adsorción mejoradas o específicas; celdas microbianas de combustible, entre otras;
- Uso de sistemas híbridos: Combinando sistemas de flujo libre (SFL), subsuperficial horizontal (SSH) y subsuperficial vertical de flujo descendente (SSVFD) y ascendente (SSVFA);
- Combinación con otras tecnologías de tratamiento: Digestores o reactores anaerobios (RA), electrocoagulación, reactores de membrana, entre otras tecnologías;
- Remoción asistida por microorganismos: Utilización de microorganismos para reducir los tiempos de adaptación de los HT o mejora de la remoción de contaminantes;
- Integración de prácticas sostenibles: Utilización de plantas autóctonas, inserción en el entorno urbano, gestión comunitaria.

Una opción interesante desde el punto de vista de la combinación con otras tecnologías de tratamiento es la de los digestores o reactores anaerobios con los humedales de tratamiento. A continuación se abordarán algunos ejemplos exitosos desarrollados en México.

Sistema reactor anaerobio más humedal artificial: Una solución para pequeñas poblaciones en México

Para abordar la problemática de México es importante considerar la legislación vigente en este país:

- ▶ CONSTITUCIÓN POLITICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS (CPEEUMM¹²)
- ▶ *Artículo: 115 Fr III. Cede a **los municipios** la obligación del tratamiento de las aguas residuales de origen público*
- ▶ LEY DE AGUAS NACIONALES (LAN)
- ▶ **Artículo 44 de la LAN:** Corresponde al **MUNICIPIO** el tratamiento de las aguas residuales de uso público urbano
- ▶ LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA)
- ▶ Artículos: 88-97, 117, 121 y 134 que establecen la obligación de tratar aguas residuales municipales o privadas y el permiso de descarga requerido
- ▶ Además de prohibir la infiltración de aguas residuales sin tratar

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), de carácter obligatorio para la descarga de aguas residuales y sus subproductos, son las siguientes:

¹² En el Glosario, al final de este documento, se encuentran las abreviaturas presentadas en él. Esta se encuentra citada en la sección de referencias bibliográficas [Nota de las(os) editores(as)]

- ▶ **NOM-001-SEMARNAT-2021:** Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación
- ▶ **NOM-002-SEMARNAT-1996:** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal
- ▶ **NOM-003-SEMARNAT-1997:** Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se 'reúsen' (reutilicen) en servicios al público
- ▶ **NOM-004-SEMARNAT-2002:** Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
- ▶ **NORMAS DE INFORMACIÓN FINANCIERA O NORMAS NIS**
Estas últimas son normas ambientales semi-privadas; las cuales se utilizan en el sector financiero para la aprobación de capitales, inversiones, estímulos fiscales y créditos y están ampliamente ligadas al sector ambiental

Con respecto de la primera NOM, la más recientemente actualizada, la **NOM-001-SEMARNAT-2021** (DOF, 2022):

- ▶ **Entre los aspectos que se actualizan en ella se encuentran las especificaciones, métodos de prueba, muestreos, parámetros de temperatura, medición de la toxicidad, procedimiento para la evaluación de la conformidad, la clasificación de los cuerpos receptores y el enfoque de usos posteriores para mejorar la gestión y la protección de los cuerpos de agua, así como la concordancia con normas internacionales.**
- ▶ **Se consideran cuerpos de aguas nacionales:**
 - ▶ Ríos, Arroyos, Canales, Drenes, Embalse, lagos, Lagunas
 - ▶ Zonas Marítimas Mexicanas
 - ▶ Riego de áreas verdes
- ▶ **Infiltración**
 - ▶ Suelos cársticos (Muy permeables)

Y, al hablar del tratamiento de las aguas residuales, es importante señalar las

CAUSAS DEL MAL FUNCIONAMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PTAR, especialmente las municipales.

- ▶ ENVEJECIMIENTO Y OBSOLECENCIA DE LOS EQUIPOS (PTAR CON MÁS DE 50 AÑOS)
- ▶ ALTO COSTO DE MANTENIMIENTO, REPARACIÓN Y REPOSICIÓN
- ▶ ALTO COSTO DE LOS INSUMOS Y LA ENERGÍA
- ▶ LOS ORGANISMOS OPERADORES NO CUENTAN CON LOS DRENAJES QUE CONDUZCAN LAS AGUAS RESIDUALES A LAS PTAR
- ▶ ELEVADO COSTO DE TRATAMIENTO QUE LLEVA A UN SUBTRATAMIENTO
- ▶ FALTA DE PERSONAL DE OPERACIÓN CAPACITADO
- ▶ FALTA DE POLITICA Y LOGISTICA DEL 'REÚSO' (REUTILIZACIÓN) DEL AGUA TRATADA

Poniendo el ejemplo de Michoacán, este estado tiene 113 municipios y 120 PTAR de lodos activados y solamente funcionan 7 de ellas. Sus sistemas de aireación son tradicionales (sopladores, difusores) y tienen eficiencias del 30% de la energía suministrada y hay grandes pérdidas por calor.

Con estos antecedentes, se ve la necesidad de modificar estas plantas y, para ello, se propuso la combinación de sistemas anaerobios con humedales de tratamiento. A continuación se da un breve recordatorio de lo que es la degradación anaerobia y después de lo que son los humedales de tratamiento para seguir con sus posibles combinaciones y las aplicaciones reales.

Digestión o degradación anaerobia (sin aire)

Estos sistemas han sido usados justamente para sustituir sistemas aerobios de tratamiento de los lodos producidos en las plantas mencionadas arriba por la conversión de los contaminantes disueltos en las aguas residuales en biomasa microbiana y después la aplicación de la **NOM-004-SEMARNAT-2002** (DOF, 2002) para separar el exceso de microorganismos aerobios y estabilizarlos.

La Figura 1 muestra esto. Allá a principios del siglo XX se usaban sistemas aerobios para supuestamente estabilizar el exceso de biomasa producida en los sistemas de lodos activados por el desconocimiento de lo que ocurría con los microorganismos pero, actualmente, se usan los sistemas anaerobios.

¿Y qué son estos sistemas anaerobios? Las Figuras 2 y 3 presentan la diferencia ingenieril entre un biodigestor y un reactor anaerobio. Y en la Figura 4 se muestra lo que ocurre al interior de un reactor anaerobio. Estas biorreacciones son las que transforman a la biomasa o directamente a los compuestos que vienen contaminando el agua vertida por la población o las industrias que manejan compuestos carbonosos o nitrogenados (hidratos de carbono o glúcidos, lípidos y proteínas) en un biogás rico en metano que puede ser útil como fuente de energía para el propio sistema anaerobio si se usa como primer paso en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Humedales de tratamiento

Y, ahora ¿Qué es un humedal de tratamiento? Es un sistema que simula lo que ocurre en un humedal natural pero que puede controlarse e irse operando de acuerdo con lo que se desea que ocurra a su interior. La Figura 5 muestra el sistema clásico de un humedal de flujo horizontal subsuperficial ya que en países como México, como ya se mencionó, no son deseables los humedales de tratamiento superficiales por la posible presencia de mosquitos u otros vectores dañinos.



Figura 1. Detalle de una planta de lodos activados (fotografía y diagramas propios) donde una parte de la biomasa microbiana producida se recicla como nuevo inóculo y el excedente debe enviarse a estabilización y reducción de volumen y masa para cumplir con la norma correspondiente (DOF, 2002)

- BIODIGESTOR
- RECIPIENTE CAÓTICO
CARENTE DE INGENIERÍA



- REACTOR ANAEROBIO
- CONTIENE UN MÍNIMO DE INGENIERÍA
- QUÍMICA (REACTORES, CINÉTICA)
- CIVIL
- HIDRÁULICA
- ELÉCTROMECAÁNICA
- CONTROL DE: pH, ALCALINIDAD
- TEMPERATURA, NUTRIENTES
- PRODUCCIÓN Y TRATAMIENTO DE BIOGÁS



Figura 2a. Biodigestor (recipiente caótico carente de ingeniería) *versus* **Figura 2b.** Reactor anaerobio (que involucra estudios de cinética, catálisis y diseño de reactores) (fotografías propias)

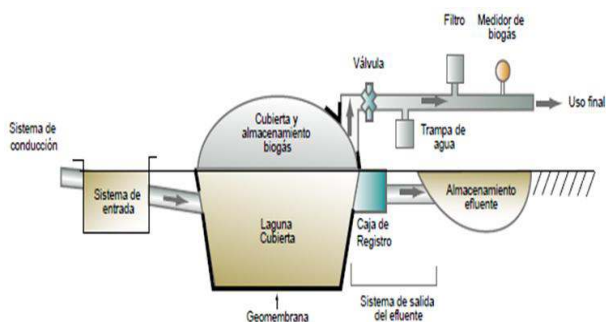


Figura 3a. Diagrama esquemático del biodigestor

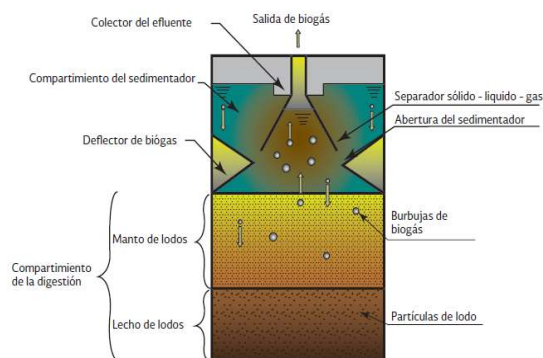


Figura 3b. Diagrama del reactor anaerobio

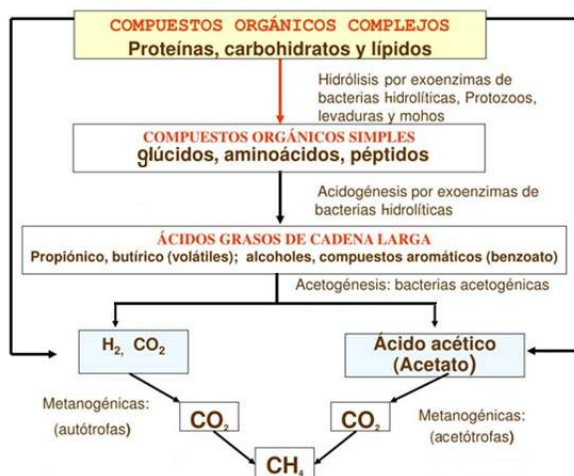
El esquema de un humedal aparece desde fines del siglo pasado y sigue siendo muy didáctico (Durán-de-Bazúa, 1992). Después ha ido apareciendo en materiales de la misma autora a lo largo de estos años y muchos lectores lo usan ya que, como las patentes, después de 20 años son del dominio público (Figura 6a).

Aquí puede observarse el horizonte radicular, donde ocurren las reacciones bioquímicas de transformación de los compuestos carbonosos y nitrogenados en nueva biomasa en condiciones aerobias, ya que la planta proporciona el oxígeno gracias a su fotosíntesis (Durán-de-Bazúa et al., 2008; Fenoglio-Limón, 2003).

Y, por la noche, al no haber fotosíntesis la biomasa es degradada anaerobiamente y su masa reducida en la rizosfera permitiendo que, a la mañana siguiente, vuelva a repetirse el ciclo aerobio.

El pionero del estudio de los humedales de tratamiento en México, el Dr. Fermín Rivera publicó un esquema muy ilustrativo de la rizosfera que aparece en la Figura 6b (Rivera y Calderón, 1993).

REACCIONES ANAEROBIAS (AUSENCIA DE AIRE)



Lodo granular anaerobio



TAREA: ARQUEAS versus BACTERIAS

Figura 4. Reacciones anaerobias "catalizadas" por consorcios de arqueas y bacterias (modificadas de varias fuentes (biorreacciones de Celis-García, 2000; imagen de lodos anaerobios de las redes internacionales; gránulo de lodo anaerobio estratificado de las redes internacionales)

Con estos dos elementos, reactores anaerobios y humedales de tratamiento y otras operaciones unitarias pueden diseñarse los sistemas combinados mostrados en la Figura 7.

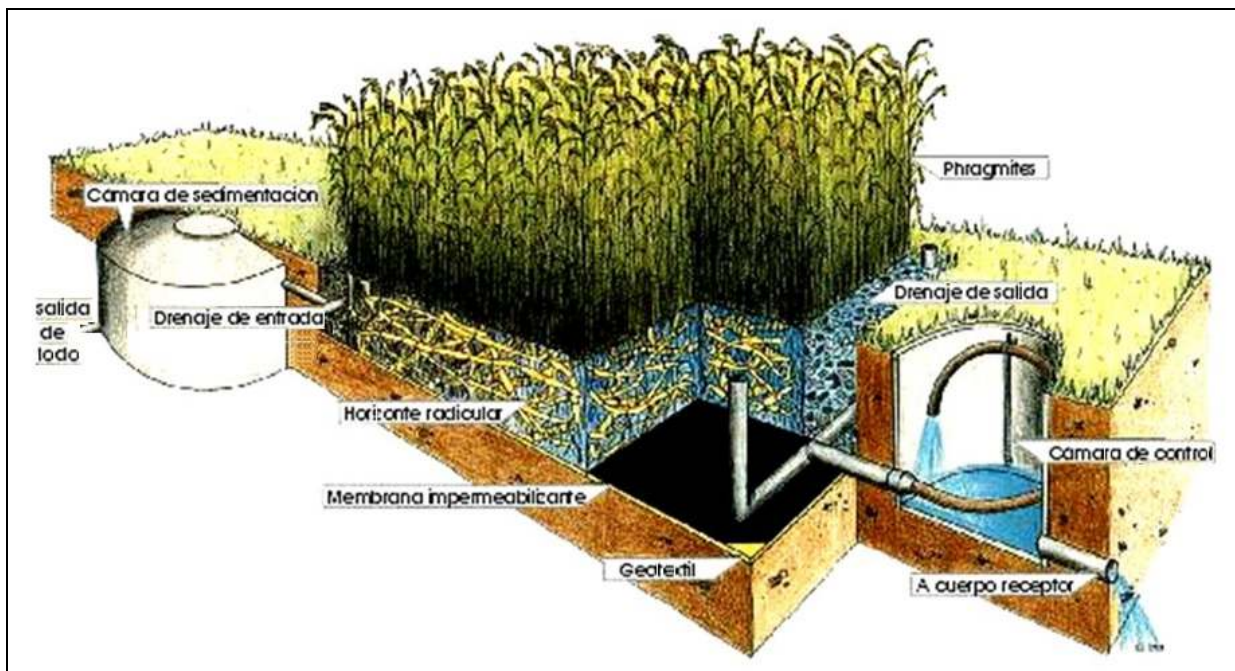


Figura 6a. Sistema clásico de un humedal subsuperficial flujo horizontal para el tratamiento controlado de drenajes clarificados previamente en un sedimentador (Durán-de-Bazúa, 1992)

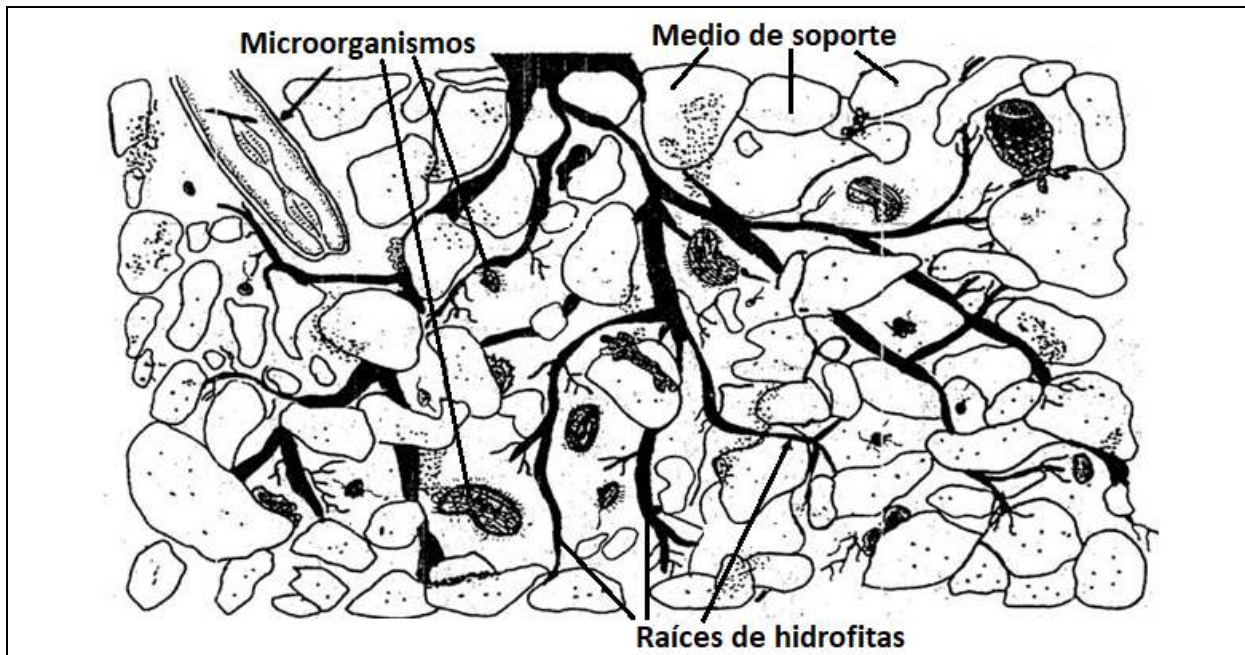


Figura 6b. Rizosfera con sus tres elementos principales: Microorganismos, raíces de hidrofita y medio de soporte (Rivera y Calderón, 1993; Rivera et al., 1993, 1995)

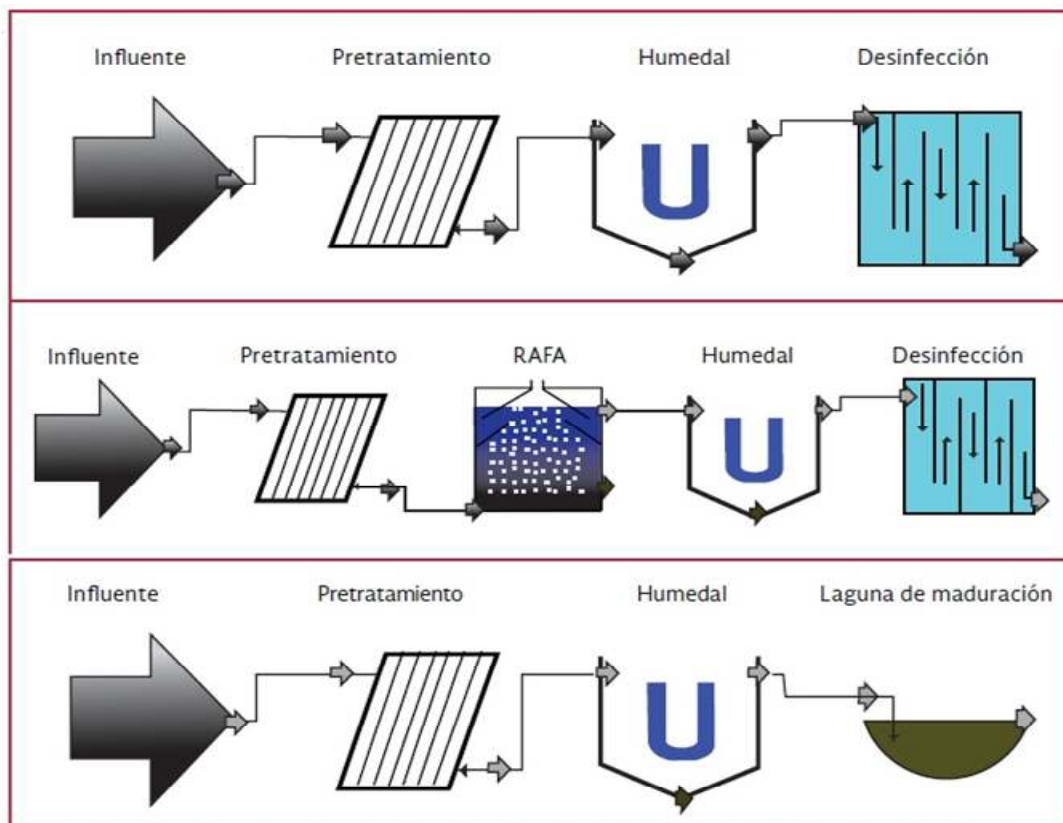


Figura 7. Opciones de reactor anaerobio como pretratamiento más humedal y una operación de pulimento (desinfección o laguna de maduración) para comunidades de 2500 personas

La siguiente opción a considerar es la de remoción asistida por microorganismos: Utilización de microorganismos autóctonos para reducir los tiempos de adaptación de los HT o mejora de la remoción de contaminantes (Salgado-Bernal, 2012, 2025).

Rol de las rizobacterias autóctonas en la remoción de contaminantes de aguas residuales empleando humedales artificiales

El empleo de microorganismos para la remoción de los contaminantes es una alternativa que se sustenta en el concepto de biorremediación, que se ha definido como la utilización de sistemas biológicos para la remoción o disminución de sustancias contaminantes del ambiente (Labra-Cardón et al., 2012). En esta tecnología se incluyen la fitorremediación y la biosorción. En el primer caso se utilizan las plantas para la eliminación o recuperación de contaminantes y en el segundo caso se utilizan microorganismos, estos últimos representan una alternativa potencial (Pellón et al., 2003).

Los métodos biológicos ostentan amplias ventajas sobre los procedimientos físicos y químicos, ya que estos últimos pueden ser ineficaces cuando algunos contaminantes, como los metales, se encuentran en bajas concentraciones en la solución tratada (Kapoor y Viraraghavan, 1998). Con los métodos biológicos la recuperación de los organismos participantes no es costosa y su eliminación tampoco representa un problema (Nakajima, 2003) y ofrecen una alta especificidad en la remoción de los contaminantes de interés, con flexibilidad operacional, tanto en sistemas *in situ* como *ex situ* (Gupta, 2000). Son considerados, de manera general, menos costosos y más amigables con el ambiente (Hosokawa et al., 2009).

Las bacterias se destacan entre los agentes biológicos empleados en la biorremediación, debido a su habilidad de utilizar diversos constituyentes de las aguas residuales para obtener la energía para su metabolismo (Akpoy y Muchie, 2010) y a la diversidad de mecanismos que pueden presentar en la captura de contaminantes, como los metales pesados (Harish et al., 2011). Entre los diferentes representantes bacterianos, las bacterias rizosféricas pueden tener amplias potencialidades para la remoción de contaminantes, pues ellas presentan la capacidad de mantenerse y desarrollarse en el sistema de raíces de las plantas, compiten por los nutrientes exudados por el vegetal, sobreviven en número suficiente y colonizan satisfactoriamente las raíces, lo cual puede ser reflejo del éxito y versatilidad en la utilización e interacción con los compuestos presentes en el suelo (Salgado et al., 2018). Dentro de este grupo, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (*PGPR*, por sus siglas en inglés) han tenido una atención especial (Labra-Cardón et al., 2012). Actualmente, aunque en menor medida, el manejo biológico que implica el uso de plantas y de su microbiota rizosférica asociada ha generado también gran interés para remediar y secuestrar sustancias peligrosas del ambiente (Zaidi et al., 2006) y se ha utilizado como una herramienta más para tratar sitios contaminados, en particular, con metales pesados (Wu et al., 2006). Las asociaciones entre plantas y microorganismos tolerantes a metales pesados merecen una atención particular; ya que éstos pueden poseer el potencial para remover estos elementos de ambientes contaminados o favorecer su movilización e inmovilización que, en consecuencia, incrementan la absorción de éstos y favorecen el crecimiento de las plantas, lo que contribuye a la desintoxicación de ambientes con metales (Ma et al., 2011). Este principio también es aplicable a la remoción de otros compuestos contaminantes.

Teniendo en cuenta las características de las bacterias como agentes biorremediadores, la búsqueda y estudio de cepas bacterianas se encuentra en desarrollo constante, junto con el estudio de sistemas como los consorcios microbianos, que podrían incrementar los rendimientos en la remoción de mezclas de contaminantes (Bréant et al., 2002). En los procesos de biorremediación un gran número de microorganismos muestran la capacidad de eliminar compuestos contaminantes del ambiente (Abalos et al., 2004); sin embargo, no siempre un simple microorganismo posee toda la capacidad metabólica, fisiológica y estructural necesaria para disminuir la carga contaminante; una estrategia que ofrece soluciones adecuadas es el empleo de poblaciones mixtas o consorcios microbianos. Estos sistemas son más competentes para accionar sobre una amplia variedad de compuestos (Mallick,

2003) y aportan ventajas selectivas en un ambiente determinado, de acuerdo con las diferentes capacidades estructurales, metabólicas y genéticas que pueden exhibir (Haferburg y Kothe, 2007). Es conocido que varias poblaciones bacterianas degradan más eficientemente los contaminantes que una sola cepa, debido a la presencia de otras bacterias que usan varios intermediarios de la vía de degradación con mayor eficiencia. Un consorcio de bacterias, cada una involucrada en diferentes partes de una ruta catabólica, que involucra la degradación de un compuesto determinado, a veces se observa que presenta mejores resultados que una cepa simple que realice la vía completa (Kuiper et al., 2004).

En el caso particular de los humedales construidos, actualmente se plantean nuevas estrategias para el mejoramiento de la eficiencia de los procesos de biorremediación en estos sistemas (Ijoma et al., 2024), entre las que se incluyen la bioaumentación. La bioaumentación o "siembra" consiste en la adición de poblaciones microbianas altamente concentradas y especializadas, de cepas simples o consorcios, a un determinado sitio contaminado (Muter et al., 2023). Esta técnica se considera adecuada para sitios que no posean células microbianas suficientes o en los cuales la población nativa no presente las capacidades metabólicas y características necesarias para la interacción con los compuestos en estudio (Tyagi et al., 2011). Las opciones más comúnmente empleadas para acometer esta estrategia son: La adición de cepas bacterianas puras pre - adaptadas, la adición de consorcios pre - adaptados, la introducción de bacterias modificadas genéticamente y la incorporación de grupos de genes relevantes en la interacción con el contaminante, mediante un vector, para ser transferidos a los microorganismos indígenas (El-Fantroussi y Agathos, 2005).

Los inoculantes microbianos son suspensiones homogéneas de células, producidas bajo condiciones óptimas y a menudo sufren estrés cuando se ponen en contacto con la complejidad de los hábitats naturales. En los casos reales, la población introducida comienza a decrecer después de ser añadida, debido a múltiples factores abióticos y bióticos (Chettri et al., 2024), entre los que destacan la competencia por los nutrientes con los microorganismos autóctonos (El-Fantroussi y Agathos, 2005), el pH, que puede inhibir los procesos de degradación y remoción, la temperatura, que influye en el crecimiento microbiano y en el potencial de degradación y remoción. Por este motivo la bioaumentación por sí sola no es suficiente; generalmente, debe estar acompañada por alteraciones físicas y ambientales del área tratada (Tyagi et al., 2011). Para incrementar la probabilidad de establecimiento inicial y eficacia a largo término de un inóculo se deben proveer condiciones adicionales que garanticen la protección frente a las circunstancias adversas del ambiente; se emplean algunas técnicas como la encapsulación y la inmovilización, las cuales facilitan una interacción más eficiente y rápida con los contaminantes respecto a las células libres (Tyagi et al., 2011) y ventajas como la formación de biofilmes (El Fantroussi y Agathos, 2005).

A pesar del gran número de elementos a considerar y de algunos resultados contradictorios de diferentes grupos de investigación, la bioaumentación representa una de las alternativas más promisorias para mejorar la eficiencia de la biorremediación (Tyagi et al., 2011), debido a que la selectividad y especialización de los microorganismos inoculantes define, principalmente, la eficacia de un proceso de remediación con agentes biológicos (Hamdi et al., 2007). Por este motivo, la búsqueda de microorganismos competentes para la aplicación en cada sitio o componente contaminado, es probablemente una de las mejores soluciones en la actualidad (Tyagi et al., 2011).

Finalmente, para cerrar esta contribución se presenta el análisis de una publicación reciente sobre (Brisson et al., 2024):

- La planificación de un experimento exitoso a pequeña escala para abordar una cuestión científica en la ciencia de las aguas residuales implica la adopción de varias decisiones clave para alcanzar el objetivo del proyecto.
- Los experimentos a pequeña escala son esenciales para investigar los mecanismos en los humedales de tratamiento. Sin embargo, Debido a limitaciones financieras, de espacio o de

recursos, es fundamental en la etapa de planificación determinar cuidadosamente un compromiso adecuado entre el tamaño de la unidad, la cantidad de unidades, la cantidad de tratamientos (tanto en términos de cantidad de variables como de cantidad de niveles dentro de cada variable) y la replicación.

- La producción, el almacenamiento adecuado y la distribución rigurosa del mismo volumen o caudal de aguas residuales a cada unidad es a menudo el aspecto más desafiante y que requiere más tiempo de un experimento de aguas residuales a pequeña escala.
- Se deben tener en cuenta los posibles sesgos antes de poder aplicar los resultados a sistemas a gran escala.

Glosario

Siglas y términos	Significado
Artículo 115, CPEEUUMM	Título Quinto de los Estados de la Federación y de la Ciudad de México Denominación del Título (reformada DOF 25-10-1993, 29-01-2016). Artículo 115. Los estados adoptarán, para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, democrático, laico y popular, teniendo como base de su división territorial y de su organización política y administrativa, el municipio libre, conforme a las bases siguientes... (Párrafo reformado DOF 10-02-2014). P. 122 (DOF, 2025)
Artículo 88, LGEEPA	III. Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes (Párrafo reformado DOF 23-12-1999): a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales; Inciso reformado DOF 23-12-1999. Pp. 122, 123 (DOF, 2025) TÍTULO TERCERO Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales. Denominación del Título reformada DOF 13-12-1996. CAPÍTULO I Aprovechamiento Sustentable del Agua y los Ecosistemas Acuáticos. Denominación del Capítulo reformada DOF 13-12-1996. ARTÍCULO 88.- Para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios Párrafo reformado DOF 13-12-1996: I. Corresponde al Estado y a la sociedad la protección de los ecosistemas acuáticos y del equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico; II.- El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que comprenden los ecosistemas acuáticos deben realizarse de manera que no se afecte su equilibrio ecológico; Fracción reformada DOF 13-12-1996. III.- Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos, y Fracción reformada DOF 13-12-1996. IV.- La preservación y el aprovechamiento sustentable del agua, así como de los ecosistemas acuáticos es responsabilidad de sus usuarios, así como de quienes realicen obras o actividades que afecten dichos recursos. Fracción adicionada DOF 13-12-1996. (Pp. 52-53, DOF, 2016)
Artículo 89, LGEEPA	ARTÍCULO 89.- Los criterios para el aprovechamiento sustentable del agua y de los ecosistemas acuáticos, serán considerados en: Párrafo reformado DOF 13-12-1996 I. La formulación e integración del Programa Nacional Hidráulico; II. El otorgamiento de concesiones, permisos, y en general toda clase de autorizaciones para el aprovechamiento de recursos naturales o la realización de actividades que afecten o puedan afectar el ciclo hidrológico; III. El otorgamiento de autorizaciones para la desviación, extracción o

Siglas y términos	Significado
Artículo 90, LGEEPA	derivación de aguas de propiedad nacional; IV.- El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva; Fracción reformada DOF 13-12-1996 V.- Las suspensiones o revocaciones de permisos, autorizaciones, concesiones o asignaciones otorgados conforme a las disposiciones previstas en la Ley de Aguas Nacionales, en aquellos casos de obras o actividades que dañen los recursos hidráulicos nacionales o que afecten el equilibrio ecológico; Fracción reformada DOF 13-12-1996 VI.- La operación y administración de los sistemas de agua potable y alcantarillado que sirven a los centros de población e industrias; Fracción reformada DOF 13-12-1996 VII.- Las previsiones contenidas en el programa director para el desarrollo urbano del Distrito Federal respecto de la política de 'reuso'¹³ de aguas; Fracción reformada DOF 13-12-1996 VIII.- Las políticas y programas para la protección de especies acuáticas endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial; Fracción reformada DOF 13-12-1996 IX.- Las concesiones para la realización de actividades de acuicultura, en términos de lo previsto en la Ley de Pesca, y Fracción reformada DOF 13-12-1996 X.- La creación y administración de áreas o zonas de protección pesquera. Fracción reformada DOF 13-12-1996 XI.- Todas aquellas prácticas de diferentes sectores productivos que afecten la calidad del agua superficial y subterránea. Fracción derogada DOF 13-12-1996. Adicionada DOF 19-06-2007 XII.- Se deroga. Fracción derogada DOF 13-12-1996 (P. 53, DOF, 2016) ARTÍCULO 90.- La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud, expedirán las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y manejo de zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones e industrias, y promoverá el establecimiento de reservas de agua para consumo humano. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (Pp. 53-54, DOF, 2016)
Artículo 91, LGEEPA	ARTÍCULO 91.- El otorgamiento de las autorizaciones para afectar el curso o cauce de las corrientes de agua, se sujetará a los criterios ecológicos contenidos en la presente Ley. (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 92, LGEEPA	ARTÍCULO 92.- Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reuso. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 93, LGEEPA	ARTÍCULO 93.- La Secretaría, realizará las acciones necesarias para evitar, y en su caso controlar procesos de eutroficación, salinización y cualquier otro proceso de contaminación en las aguas nacionales. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 94, LGEEPA	ARTÍCULO 94.- La exploración, explotación, aprovechamiento y administración de los recursos acuáticos vivos y no vivos, se sujetará a lo que establecen esta Ley, la Ley de Pesca, las normas oficiales mexicanas y las demás disposiciones aplicables. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 95, LGEEPA	ARTÍCULO 95.- La Secretaría deberá solicitar a los interesados, en los términos señalados en esta Ley, la realización de estudios de impacto ambiental previo al otorgamiento de concesiones, permisos y en general,

¹³ En todo caso 'reúso' para romper el diptongo o mejor sustituir por reutilización [Nota de las(os) editores(as)]

Siglas y términos	Significado
Artículo 96, LGEEPA	autorizaciones para la realización de actividades pesqueras, cuando el aprovechamiento de las especies ponga en peligro su preservación o pueda causar desequilibrio ecológico. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016) ARTÍCULO 96.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para la protección de los ecosistemas acuáticos y promoverá la concertación de acciones de preservación y restauración de los ecosistemas acuáticos con los sectores productivos y las comunidades. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 97, LGEEPA	ARTÍCULO 97.- La Secretaría establecerá viveros, criaderos y reservas de especies de flora y fauna acuáticas. Artículo reformado DOF 13-12-1996 (P. 54, DOF, 2016)
Artículo 117, LGEEPA	CAPÍTULO III. Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos. Denominación del Capítulo reformada DOF 13-12-1996 (se recorre, antes Capítulo II). ARTÍCULO 117.- Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios: I. La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país; II. Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo; III. El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas; ... (P. 61 de 128, DOF, 2016)
Artículo 124, LGEEPA	ARTÍCULO 124.- Cuando las aguas residuales afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua, la Secretaría lo comunicará a la Secretaría de Salud y negará el permiso o autorización correspondiente, o revocará, y en su caso, ordenará la suspensión del suministro. Artículo reformado DOF 13-12-1996... (P. 64 de 128, DOF, 2016)
Artículo 134, LGEEPA	CAPÍTULO IV Prevención y Control de la Contaminación del Suelo. Denominación del Capítulo reformada DOF 13-12-1996 (se recorre, antes Capítulo III). ARTÍCULO 134.- Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios: I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo; II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos; III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su 'reuso'¹⁴ y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes; Fracción reformada DOF 13-12-1996 IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar, y Fracción reformada DOF 13-12-1996. V.- En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que

14 En todo caso 'reuso' para romper el diptongo o mejor sustituir por reutilización [Nota de las(os) editores(as)]

Siglas y términos	Significado
	resulte aplicable. Fracción adicionada DOF 13-12-1996 (P. 65 de 128, DOF, 2016)
CPEEUUMM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF, 2025)
DOF	Diario Oficial de la Federación de México
HT	Humedales de tratamiento o construidos o artificiales
LAN	Ley de Aguas Nacionales de México (DOF, 2023)
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de México (DOF, 2016)
PGPR	Siglas en inglés para rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (<i>plant growth-promoting rhizobacteria</i>)
RA	Reactores anaerobios o biodigestores
SFL	Sistemas de flujo libre
SSFH	Sistema subsuperficial de flujo horizontal
SSVFA	Sistema subsuperficial vertical de flujo ascendente
SSVFD	Sistema subsuperficial vertical de flujo descendente

Referencias bibliográficas

- Abalos, A., Viñas, M., Sabaté, M.A., Manresa, A., Solanas, A.M. 2004. Enhanced biodegradation of Casablanca crude oil by a microbial consortium on presence of a rhamnolipid produced by *Pseudomonas aeruginosa* AT10. *Biodegradation*. 15:249-260.
- Akpor, O.B., Muchie, M. 2010. Bioremediation of polluted wastewater influent: Phosphorus and nitrogen removal. *Scientific Research and Essays*. 5 (21):3222-3230.
- Bréant, D., Jézéquel, K., Lebeau, T. 2002. Optimization of the cell release from immobilized cells of *Bacillus simplex* cultivated in culture media enriched with Cd^{2+} : influence of Cd^{2+} , inoculum's size, culture medium and alginate beads characteristics. *Biotechnology Letters*. 24:1237-1241.
- Brisson, J., Carvalho, P., Stein, O., Weber, K., Brix, H., Zhao, Y., Zurita, F. 2024. Small-scale experiments: Using mesocosms and microcosms for testing hypotheses in treatment wetland research. *Ecological Engineering*. 208: 107378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107378>
- Celis-García, M.d.L.B. 2000. Efecto del sulfato en la biodegradación anaerobia de acetato. Tesis de Maestría en Ciencias Bioquímicas. Facultad de Química. UNAM. Defensa: Julio 7, 2000. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/pd2000/279432/Index.html
- Chettri, D., Verma, A.K., Verma, A.K. 2024. Bioaugmentation: An approach to biological treatment of pollutants. *Biodegradation*, 35(2), 117–135. <https://doi.org/10.1007/s10532-023-10050-5>
- DOF. 2025. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Constitución publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de febrero de 1917. Texto vigente. Última reforma publicada en el DOF del 17-01-2025. 393 páginas. www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf
- DOF. 2023. Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de mayo de 2023. 118 páginas. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan.htm>
- DOF. 2022. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación del
- DOF. 2016. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de mayo de 2016. 128 páginas. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131861/41_LEY_GENERAL_DEL_EQULIBRIO_ECOL_GICO_Y_LA_PROTECCION_AL_AMBIENTE.pdf
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002: Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
- Durán-de-Bazúa, C. 1992. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso. Material para un curso extracurricular de 40 horas). 4ª edición. Pub. Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. Octubre 5-9, 1992. Cuernavaca, Morelos, México.
- Durán-de-Bazúa, C., Guido-Zárate, A., Huanosta, T., Padrón-López, R.M., Rodríguez-Monroy, J. 2008. Artificial wetlands performance: Nitrogen removal. En 8th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems, 2nd Specialised Conference on Decentralised Water and Wastewater International Network. Febrero 6-9, 2008. Coimbatore, India.
- El Fantroussi, S., Agathos, S.N. 2005. Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation?. *Current Opinion in Microbiology*. 8:268–275.
- Fenoglio-Limón, F.E. 2003. Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en

-
- Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). UNAM. Defensa: Junio 5, 2003. Ciudad de México, México. 132.248.9.195/ppt2002/0317543/Index.html
- Gupta, R., Ahuja, P., Khan, S., Saxena, R.K., Mohaptra, H. 2000. Microbial biosorbents: meeting the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Current Science*. 78:967-973.
- Haferburg, G., Kothe, E. 2007. Microbes and metals: Interactions in the environment. *Journal of Basic Microbiology*. 47:453-467.
- Hamdi, H., Benzarti, S., Manusadzianas, L., Aoyama I., Jedidi N. 2007. Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions. *Soil Biol. Biochem.* 39:1926-1935.
- Harish, R., Jastin, S., Mishra, R., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A. 2011. Bio-reduction of Cr(VI) by exopolysaccharides (EPS) from indigenous bacterial species of Sukinda chromite mine, India. *Biodegradation*. DOI: 10.1007/s10532-011-9527-4.
- Hosokawa, R., Motonori, N., Morikawa, M., Okuyama, H. 2009. Autochthonous bioaugmentation and its possible application to oil spills. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 25:1519-1528.
- Ijoma, G.N., Lopes, T., Mannie, T., Mhlongo, T.N. 2024. Exploring macrophytes' microbial populations dynamics to enhance bioremediation in constructed wetlands for industrial pollutants removal in sustainable wastewater treatment. *Symbiosis*. 92(3):323-354. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-00981-9>
- Kapoor, A., Viraraghavan, T. 1998. Removal of heavy metals from aqueous solutions using immobilized fungal biomass in continuous mode. *Water Research*. 32:1968-1977.
- Kuiper, I., Ellen, L., Legendijk, G., Bloemberg, V., Lugtenberg, B.J.J. 2004. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 17(1):6-15.
- Labra-Cardón, D., Guerrero-Zúñiga, L.A., Rodríguez-Tovar, A.V., Montes-Villafán, S., Pérez-Jiménez, S., Rodríguez-Dorantes, A. 2012. Respuesta de crecimiento y tolerancia a metales pesados de *Cyperus elegans* y *Echinochloa polystachya* inoculadas con una rizobacteria aislada de un suelo contaminado con hidrocarburos derivados del petróleo. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28(1):7-16.
- Ma, Y., Prasad, M.N.V., Rajkumar, M., Freitas, H. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnol. Adv.* 29:248-258.
- Mallick, N. 2003. Biotechnological potential of *Chlorella vulgaris* for accumulation of Cu and Ni from single and metal solutions. *World Journals of Microbiology and Biotechnology*. 19:695-701.
- Muter, O. 2023. Current Trends in Bioaugmentation Tools for Bioremediation: A critical review of advances and knowledge gaps. *Microorganisms*. 11(3):710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>
- Nakajima, A. 2003. Accumulation of gold by microorganisms. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 19:369-374.
- Pellón, A., Benítez, F., Frades, J., García, L., Cerpa, A., Alguacil, F.J. 2003. Empleo de microalga *Scenedesmus obliquus* en la eliminación de cromo presente en aguas residuales galvánicas. *Rev. Metal. Madrid*. 39:9-16.
- Rivera, F.A., Calderón, A.V. 1993. Biotratamiento de aguas negras. *Inf. Cienc. Tecnol.* 15(203): 29-31.
- Rivera, F., Rodríguez, S., Warren, A., Bonilla, P., Ramírez, E., Calderón, A., Ortiz, R. 1993. An investigation of the pathogenic and non-pathogenic free-living amoebae from the root zone method of wastewater treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 69: 93-98.
- Rivera, F., Warren, A., Ramírez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderón, A., Sánchez, J.T. 1995. Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Water Science and Technology*. 42(3):211-218. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00622-2](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00622-2)
- Salgado-Bernal, I. (2012) Remoción de contaminantes de aguas residuales por rizobacterias autóctonas con aplicación de humedales artificiales. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Departamento de Microbiología y Virología, Facultad de Biología, Universidad de La Habana. Defensa: Diciembre 15, 2012. La Habana, Cuba.
- Salgado, I., Cárcamo, H., Carballo, M.E., Cruz, M., del Carmen Durán, M. 2018. Domestic wastewater treatment by constructed wetlands enhanced with bioremediating rhizobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(21):20391-20398. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9505-4>
- Tyagi, M., Da Fonseca, M., De Carvalho, C. 2011. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*. 22:231-241.
- Wu, S.C., Cheung, K.C., Luo, Y.M., Wong, M.H. 2006. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. *Environ. Pollut.* 140:124-135.
- Zaidi, S., Usmami, S., Singh, B.R., Musarrat, J. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant grown promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere*. 64:991-997.
-