

# Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones



La fitorremediación representa una tecnología alternativa, sustentable y de bajo costo para la restauración de ambientes y efluentes contaminados. En México es necesario crear recursos humanos y financieros en este campo emergente.

**Roberto Aurelio Núñez López, Yunny Meas Vong,  
Raúl Ortega Borges y Eugenia J. Olguín**

## INTRODUCCIÓN

**E**l término *fitorremediación* hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos, e incluso aire. Es un término relativamente nuevo, acuñado en 1991. Se compone de dos palabras, *fito*, *ta*, que en griego significa planta o vegetal, y *remediar* (del latín *remediare*), que significa poner remedio al daño, o corregir o enmendar algo. Fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales.

De manera más completa, la fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir *in situ* la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes.

En los últimos años se ha generado una terminología nueva basada en el papel que tienen las plantas durante el proceso de remediación, así como de los principales mecanismos involucrados, de forma que se han definido las siguientes estrategias de fitorremediación:

*Fitodegradación* o *fitotransformación*: se basa en el uso de plantas para degradar o transformar en sustancias menos tóxicas diversos tipos de contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes). A través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo plantas y microorganismos en la *rizósfera*, es decir, la zona del suelo estrechamente asociada con las raíces de las plantas, dichos contaminantes son parcial o completamente degrada-

dos o transformados. De esta manera son asimilados por las plantas y secuestrados en sus vacuolas o fijados a estructuras celulares insolubles, como la lignina.

*Fitoestimulación:* en este caso, los exudados de las raíces de las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos. Como parte de sus actividades metabólicas y fisiológicas, las plantas liberan azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno, y los transportan desde sus partes superiores hasta sus raíces, favoreciendo el desarrollo de comunidades microbianas en el suelo circundante; particularmente hongos y bacterias, cuyas actividades metabólicas causan la mineralización de los contaminantes.

*Fitovolatilización:* algunas plantas son capaces de volatilizar ciertos contaminantes, como mercurio y selenio, contenidos en suelos, sedimentos o agua. Tales contaminantes son absorbidos, metabolizados, transportados desde su raíz a sus partes superiores y liberados a la atmósfera en formas volátiles, menos tóxicas o relativamente menos peligrosas en comparación con sus formas oxidadas. La transforma-

ción de dichos elementos se efectúa básicamente en la raíz, y su liberación se lleva a cabo durante la transpiración.

*Fitoestabilización:* este tipo de estrategia utiliza plantas que desarrollan un denso sistema de raíz, para reducir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación. Las plantas ejercen un control hidráulico en el área contaminada, es decir actúan como una bomba solar que succiona humedad de los suelos debido a sus altas tasas de evapotranspiración. Puesto que este proceso mantiene también una humedad constante en la zona de la rizósfera, se presentan las condiciones adecuadas para la inmovilización de los metales. Esto ocurre a través de reacciones químicas como la precipitación o formación de complejos insolubles o por mecanismos físicos, como la adsorción. En esta zona, los metales se fijan fuertemente en las raíces de las plantas o en la materia orgánica de los suelos, limitando así su biodisponibilidad y su migración vertical hacia los mantos freáticos.

*Fitoextracción o fitoacumulación:* en esta estrategia se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser fácilmente cosechadas. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. Generalmente los sistemas de fitoextracción se implementan para extraer metales de suelos contaminados, por medio de plantas conocidas como metalofitas, es decir acumuladoras de metales; sin embargo, también pueden implementarse para tratar aguas residuales.

*Rizofiltración:* se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

Como puede apreciarse, las estrategias de fitorremediación hacen referencia a los mecanismos predominantes realizados por las propias plantas, pero también, en algunos casos, indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación. Así, se hace evidente que la fitorremediación es un proceso complejo que involucra la participación de la comunidad microbiana asociada a su sistema de raíz.

Cada una de las estrategias tiene condiciones particulares, determinadas principalmente por el tipo de contaminante y el sustrato a tratar: suelos, sedimentos o agua. En forma general,



las medidas correctivas para contaminantes orgánicos incluyen la fitodegradación (o fitotransformación) y la fitoestimulación, mientras que para los metales pesados, incluidos los metaloides, radionúclidos y ciertos tipos de contaminantes orgánicos, se aplican la fitovolatilización, la fitoestabilización, la fitoextracción y la rizofiltración.

### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

El cuadro 1 muestra las principales ventajas que ofrece la fitorremediación, en comparación con otras tecnologías convencionales.



Foto 1. Raíz de lirio acuático en tratamiento con Pb (Rizofiltración).

### FITORREMEDIACIÓN ACUÁTICA

Tradicionalmente, las plantas vasculares acuáticas han sido consideradas como una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Su rápida proliferación puede dificultar la navegación y amenazar el balance de la biota en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, en la actualidad se considera que estas plantas

### CUADRO 1.

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una tecnología sustentable</li> <li>• Es eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes <i>in situ</i></li> <li>• Es aplicable a ambientes con concentraciones de contaminantes de bajas a moderadas</li> <li>• Es de bajo costo, no requiere personal especializado para su manejo ni consumo de energía</li> <li>• Es poco perjudicial para el ambiente</li> <li>• No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho</li> <li>• Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable</li> <li>• Evita la excavación y el tráfico pesado</li> <li>• Tiene una versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos</li> <li>• Se pueden reciclar recursos (agua, biomasa, metales)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un proceso relativamente lento (cuando las especies son de vida larga, como árboles o arbustos)</li> <li>• Es dependiente de las estaciones</li> <li>• El crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental</li> <li>• Los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante el otoño (especies perennes)</li> <li>• Los contaminantes pueden acumularse en maderas para combustión</li> <li>• No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras</li> <li>• La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes</li> <li>• Se requieren áreas relativamente grandes</li> <li>• Pudiera favorecer el desarrollo de mosquitos (en sistemas acuáticos)</li> </ul>

Fuente: (Polprasert, 1996; Brooks, 1998; Raskin y Ensley, 2000).

también pueden ser manejadas adecuadamente y volverse útiles, debido a su capacidad para remover y acumular diversos tipos de contaminantes. Además, su biomasa puede ser aprovechada como fuente de energía, forraje y fibra.

Los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas se implementaron en los países europeos a principios de 1960, utilizando juncos o carrizos. Desde entonces, los sistemas de fitorremediación acuática se han perfeccionado y diversificado, y su aceptación y aplicación cada vez es mayor. La fitorremediación acuática tiene la ventaja de que se pueden remover, *in situ*, diferentes tipos de metales que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua.



**Foto 2.** Tratamiento del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) con diferentes dosis de Pb.

## SISTEMAS DE FITORREMIACIÓN ACUÁTICA

Los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

*Humedales construidos*: se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y subemergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio.

*Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes*: pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.

*Sistema de tratamiento integral*: es una combinación de los dos sistemas anteriores.

*Sistema de rizofiltración*, ya mencionado anteriormente.

Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias: lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia.

## TIPOS DE PLANTAS ACUÁTICAS

Con base en sus formas de vida, las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática se clasifican en tres grupos:

*Emergentes*: la raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie de agua. Sus estructuras reproductoras están en la porción aérea de la planta. Ejemplos: carrizo (*Phragmites communis*), platanillo (*Sagittaria latifolia*) y tule (*Thypha dominguensis*).

*Flotantes*: se subdividen en dos grupos:

a) *Plantas de libre flotación (no fijas)*: sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijadas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes. Ejemplos: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), lenteja de agua (*Lemna* spp. y *Salvinia minima*).

b) *Plantas de hoja flotante (fijas)*: tienen sus hojas flotando sobre la superficie del agua, pero sus raíces están fijadas en los sedimentos. Ejemplo: nenúfares (*Nymphaea elegans* y *Nymphaoides fallax*).

c) *Sumergidas*: se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emerger o quedar por encima de la superficie de agua. Ejemplos: bejuquillo (*Ceratophyllum demer-*

sum), hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y pastos (*Phyllospadix torreyi*).

### CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PLANTAS PARA LA FITORREMEDIACIÓN

La eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de las plantas, su estacionalidad y el tipo de metal a remover. Por lo mismo, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características:

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales.
- Ser acumuladoras de metales.
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Ser especies locales, representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables.

### FUNCIONES DE LAS PLANTAS EN LOS SISTEMAS DE FITORREMEDIACIÓN ACUÁTICA

En general, los mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes de aguas residuales son de tres tipos: físicos (sedimentación, filtración, adsorción, volatilización), químicos (precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas) y biológicos (resultado del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas, de procesos de bioabsorción).

Uno de los principales procesos que ocurren en el tratamiento de aguas residuales, es la degradación de la materia orgánica que llevan a cabo los microorganismos que viven sobre y alrededor de las raíces de las plantas. Los productos de degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales. A su vez, los microorganismos usan como fuente alimenticia parte o todos los metabolitos desechados por las plantas a través de su raíz. Otro fenómeno importante es el relacionado con la atracción electrostática entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con las cargas opuestas de partículas coloidales suspendidas, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz y posteriormente son absorbidas y asimiladas por las plantas y los microorganismos. Además, las plantas tienen la capacidad de transferir oxígeno desde sus partes superiores hasta su raíz, produciendo una zona aeróbica

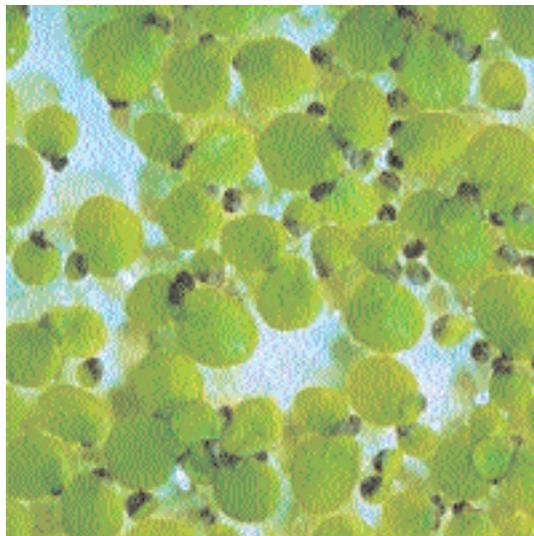


Foto 3. *Spirodela polyrhiza*, conocida comúnmente como "flor de agua", "lagrimilla" o "lenteja de agua".



Foto 4. Fronda de *Salvinia minima*.

**CUADRO 2.**

Función de las plantas acuáticas en los sistemas de tratamiento

La *exclusión* involucra un sistema de reflujo o liberación de metales desde el interior de la planta hasta el exterior

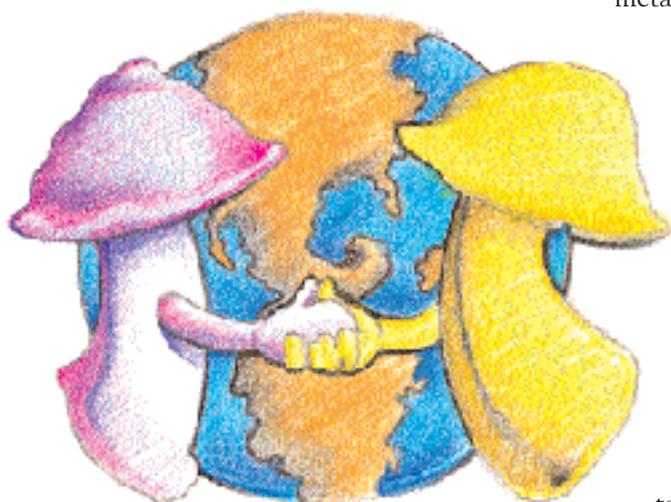
Parte de la planta	Función
Raíces o tallos sumergidos	Sustrato para el crecimiento bacteriano Medio para la filtración y adsorción de sólidos Bioabsorción y acumulación de contaminantes
Tallos u hojas emergentes	Atenúan la luz del sol y así pueden evitar el crecimiento de algas suspendidas Reducen los efectos del viento sobre el agua Reducen la transferencia de gases y calor entre la atmósfera y el agua Transfieren oxígeno desde las hojas a la raíz Transfieren y acumulan contaminantes

Fuente: Reddy y Smith, 1987; Polprasert, 1996.

en sus alrededores que favorece los distintos procesos que ocurren durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

En el cuadro 2 se resume la función de las plantas acuáticas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Como se ha mencionado, las raíces de las plantas sirven primeramente como sustrato para la comunidad microbiana, cuya actividad reduce significativamente el contenido de sólidos suspendidos, los niveles de nitrógeno y el consumo de oxígeno. Posteriormente, las propias plantas, a través de sus actividades metabólicas, se encargan de asimilar, transformar y acumular los diferentes tipos de contaminantes.



**MECANISMOS DE TOLERANCIA A METALES PESADOS**

Los mecanismos de tolerancia que han desarrollado las plantas para resistir y sobrevivir a la exposición a metales pesados involucran estrategias de exclusión, mineralización, reducción, solubilización, quelación, redistribución y acumulación.

La *exclusión* involucra un sistema de reflujo o liberación de metales desde el interior de la planta hasta el exterior, para evitar o minimizar la acumulación en

sus tejidos. La *mineralización* reduce la biodisponibilidad de los metales, que por tanto no pueden ser absorbidos. La *solubilización* está relacionada con la transformación del metal insoluble a una forma soluble, es decir, su transformación de una forma no asimilable a una asimilable. La *reducción* implica la transformación de especies químicas altamente tóxicas a especies menos tóxicas (por ejemplo cromo VI a cromo III), las cuales pueden entonces ser asimiladas y metabolizadas por las plantas. Una vez dentro del organismo, las especies metálicas individuales experimentan una biotransformación al ser *acomplejadas* o “secuestradas” por un ligante existente o sintetizado. Esta estrategia, conocida como *quelación*, es uno de los mecanismos de destoxificación recurrentes en las plantas. La palabra quelación (del griego *chelé*, “pinza” o “garfio”) describe la formación de un complejo entre el metal y el ligante, en donde este último, en este caso una molécula orgánica, tiene varios sitios de unión que le permiten sujetar fuertemente un átomo central único –en este caso el metal–, formando un complejo muy estable que puede ser transferido y acumulado en las vacuolas de la planta. De esta manera, el metal se encuentra “secuestrado” y no está disponible para ejercer su toxicidad. En general, los mecanismos de tolerancia son diferentes entre las distintas especies de plantas y estarán determinados por el tipo de metal. En la figura 1 se ilustra el proceso de destoxificación de cromo efectuado por el lirio acuático, de acuerdo con los resultados de Lytle y colaboradores (1998).

La *reducción* implica la transformación de especies químicas altamente tóxicas a especies menos tóxicas, las cuales pueden entonces ser asimiladas y metabolizadas por las plantas

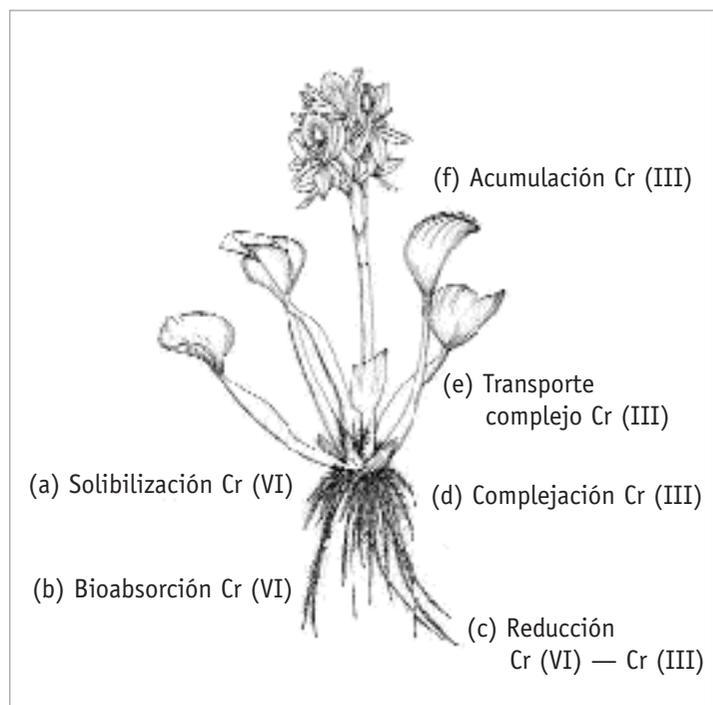
Figura 1. Mecanismo de destoxificación de cromo, llevado a cabo por el lirio acuático.

### Complejos organometálicos

Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos, particularmente citrato, oxalato y malato; algunos aminoácidos, principalmente histidina; y metalotioneínas y fitoquelatinas. Los dos últimos son los más importantes.

### Metalotioneínas

Son polipéptidos ricos en cisteína, codificados genéticamente. Se conocen también como proteínas de bajo peso molecular, y tienen una marcada afinidad por las formas iónicas de cinc, cadmio, mercurio y cobre. Estas proteínas contienen largas fracciones de residuos de cisteína y muestran alto contenido metálico con iones coordinados en grupos metal-tiolato.



No se puede establecer aún con claridad cuál es papel de las fitoquelatinas

Aún no se ha determinado con precisión cuál es la función biológica de las metalotioneínas en las plantas. Sin embargo, parece que están involucradas en el metabolismo y la homeostasis de los metales esenciales, más que en la detoxificación de metales pesados.

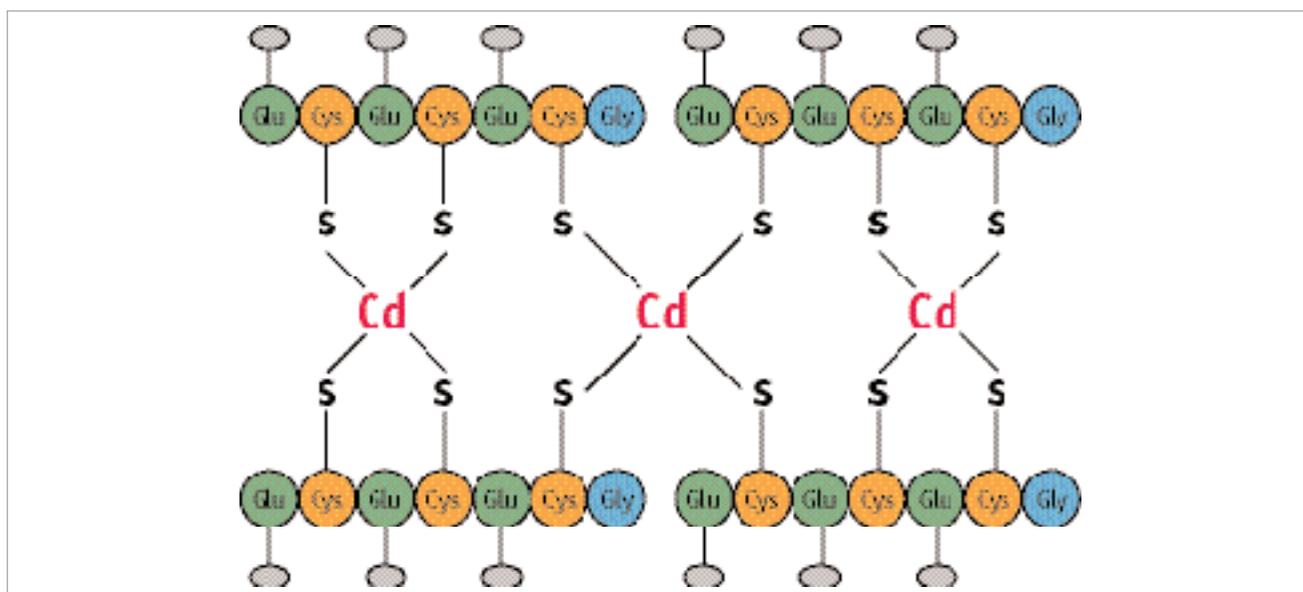
### Fitoquelatinas

Son péptidos ricos en cisteína sintetizados enzimáticamente. Se derivan del glutatión y consisten de sólo tres aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina.

A pesar de que en los últimos años se ha incrementado el número de estudios, no se puede establecer aún con claridad cuál es papel de las fitoquelatinas. Sin embargo, se asume que su principal función tiene que ver con la detoxificación de metales no esenciales y metaloides con marcada afinidad por el azufre. Igualmente, las evidencias sugieren que las fitoquelatinas también están involucradas en la homeostasis de los metales esenciales (micronutrientes), particularmente de hierro, cobre y cinc.

Se sabe que una amplia variedad de metales pueden inducir la formación de fitoquelatinas, entre ellos el cadmio, níquel, cobalto, plomo, plata, cinc, cobre, aluminio, arsénico, selenio y mercurio. Sin embargo, la quelación de metales por fitoquelatinas sólo ha sido verificada para unos cuantos elementos y en un número reducido de plantas. En la figura 2 se representa esquemáticamente el complejo fitoquelatina-cadmio, que involucra cuatro fitoquelatinas con tres cadenas de dipéptidos, en

**Figura 2.** Representación esquemática del complejo fitoquelatina-cadmio. (Fuente; <http://lcbie.univ-pau.fr/Gcabi/compounds/phytochelatins.htm>).



donde se puede apreciar que los residuos de cisteína se unen a los iones de cadmio.

El mecanismo de destoxificación de metales es más complejo que una simple quelación. El ión puede activar la enzima fitoquelatina sintetasa, iniciando la formación de las fitoquelatinas, las cuales lo acomplejarán y entonces presumiblemente será transportado a las vacuolas, donde posiblemente formará una agregación más compleja con sulfuros o ácidos orgánicos. Si las plantas no fabrican las fitoquelatinas, los metales inhibirán su crecimiento y consecuentemente morirán.

La secuencia de eventos en el proceso de destoxificación, así como el quelante involucrado, estará determinada tanto por el tipo de metal como por la especie de planta. Así, las plantas de *Arabidopsis*, una de las más estudiadas, responden de manera diferente cuando son expuestas a cinc y níquel; el primero es acomplejado por las metalotioneínas, y el segundo por las histidinas, demostrando que una misma planta puede desplegar mecanismos alternos de destoxificación, dependiendo del metal.

La mayoría de los estudios sobre fitoquelatinas y metalotioneínas se han concentrado en plantas terrestres hiperacumuladoras de metales y en plantas cultivables de importancia económica. Sin embargo, a pesar de ser las más estudiadas, aún quedan muchas interrogantes por resolver sobre sus mecanismos de tolerancia y destoxificación. Cobbett (2000) señala que aún falta por responder el papel de la fitoquelatina sintetasa y de las fitoquelatinas en diferentes especies, y que el conocimiento de las bases moleculares de la biosíntesis de fitoquelatinas será útil para optimizar el proceso de la fitorremediación.

Respecto a las plantas acuáticas, hasta la fecha sólo se ha demostrado la síntesis de fitoquelatinas en algas marinas y de agua dulce. Aun cuando se han realizado numerosos estudios con el lirio (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna* spp), plantas comúnmente empleadas en los sistemas de fitorremediación acuáticos, poco se conoce sobre sus mecanismos fisiológicos involucrados en el proceso de destoxificación de metales pesados, debido a que la mayoría de las investigaciones se han limitado a determinar la capacidad de bioabsorción, acumulación y tolerancia.

## LA FITORREMEDIACIÓN EN MÉXICO

Comparado con otros países donde se han realizado investigaciones exhaustivas desde principios de los sesenta, que han conducido a la implementación y optimización de sistemas de

fitorremediación tanto terrestre como acuática, en nuestro país prácticamente estamos comenzando.

En el cuadro 3 se presenta una relación de proyectos y líneas de investigación desarrollados en el campo de la fitorremediación que son o han sido financiados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) a través de sus programas regionales o por programas institucionales internos. En forma general, los proyectos sobre fitorremediación acuática en su mayoría se han enfocado a metales pesados, mientras que los relacionados con fitorremediación de suelos se han centrado en los hidrocarburos del petróleo.

Si las plantas no fabrican  
las fitoquelatinas,  
los metales inhibirán  
su crecimiento  
y consecuentemente  
morirán

### CUADRO 3.

Líneas de investigación registradas en diversas instituciones y proyectos de fitorremediación en México financiados por el Conacyt o por programas de apoyo institucional local

Línea de investigación y proyectos en desarrollo	Contaminante	Medio	Institución	Estado	Año
Fitorremediación de aguas residuales de granjas porcinas y de procesamiento del café	Materia orgánica y nutrientes	Agua	Inecol	Veracruz	1994
Bioabsorción de plomo, cadmio y arsénico empleando dos plantas acuáticas flotantes tropicales ( <i>Spirodela polyrrhiza</i> y <i>Salvinia minima</i> ) en lagunas de flujo tapón	Metales pesados				2001-
Desarrollo de un bioadsorbente a partir de la biomasa de <i>Spirulina</i> sp					2001-
Remoción de arsénico de efluentes mineros y aguas subterráneas por plantas nativas acumuladoras mediante la implementación, a escala piloto, de humedales construidos	Metales pesados	Agua	Cimav	Chihuahua	2001-
Remoción electroquímica de metales de la biomasa de plantas o bioadsorbentes	Metales pesados	Agua	Cideteq	Querétaro	2001-
Uso del lirio acuático ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) para la remoción de metales pesados de aguas contaminadas.					
Producción de fitoquelatinas por <i>Salvinia minima</i> expuesta a plomo y arsénico	Metales pesados	Agua	CICY	Yucatán	2001-
Mejoramiento de la capacidad de remoción de plomo y arsénico por plantas acuáticas					
Remoción de contaminantes y patógenos de aguas residuales por el método vertical de raíces, utilizando plantas de la región	Materia orgánica y patógenos	Agua	UADY	Yucatán	98-02
Fitorremediación de metales pesados en el tanque Tenorio y su impacto ambiental	Metales pesados	Agua	UASLP	San Luis Potosí	2002-

**CUADRO 3.** (continúa)

Línea de investigación y proyectos en desarrollo	Contaminante	Medio	Institución	Estado	Año
Proceso de fitorremediación por especies halófilas (manglares)	No especificado	Sistema estuarino	UANL	Nuevo León	1998-
Fitorremediación de un suelo agrícola contaminado con cadmio	Metales pesados	Suelo			1999
Asimilación de contaminantes ambientales por especies vegetales en el proceso de fitorremediación					2000-
Ciclos biogeoquímicos de cadmio y plomo. Adición de nitrógeno al suelo y su efecto de la absorción y acumulación de metales pesados en <i>Ricinus communis</i>					2002-
Fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	IMP	México, D.F.	1996-
Microorganismos simbióticos de la rizósfera de plantas para la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	CP (Irenat)	Estado de México	1997-
Fitorremediación de suelos tropicales pantanosos contaminados con hidrocarburos	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	UAM-I	México, D.F.	2002-
Fitoextracción de cadmio y cinc de suelos	Metales pesados	Suelo	UAM-A		2002-
Caracterización de genes vegetales con uso potencial en la fitorremediación	Hidrocarburos del petróleo	Suelo	UAEM (CEIB)	Morelos	2002-
Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados	Metales pesados				
Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados (plomo y cadmio)	Metales pesados	Suelo	UDLAP (CIQB)	Puebla	2002-

El Instituto de Ecología (Inecol) inició estudios sobre fitorremediación acuática hace 14 años. Desde entonces a la fecha han establecido dos líneas de investigación usando plantas acuáticas flotantes para la remoción de nutrientes de aguas residuales y la remoción de metales pesados de aguas residuales industriales. En el primer caso, se desarrollaron dos sistemas integrales, uno para el tratamiento de aguas residuales de granjas porcinas, denominado “bioespirulinema”, que combina la di-

gestión anaerobia con la fitorremediación (remediación con algas) y la fitorremediación, y otro para el tratamiento de aguas residuales generadas durante el procesamiento de café. Además de producir agua con los niveles permisibles de descarga según la normatividad vigente, dichos sistemas permiten la recuperación de productos como biogás y biomasa



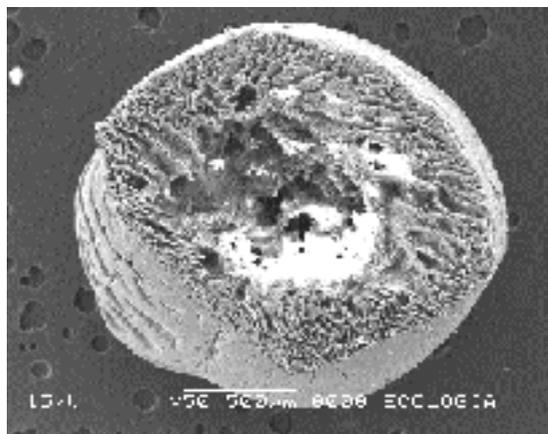
**Foto 5.** Planta emergente: *Typha* sp.

tanto de *Spirulina* como de lemnáceas, ricas en proteínas, que pueden ser utilizadas como alimento para peces y aves, respectivamente. La viabilidad económica, técnica y ambiental de ambos sistemas es muy alta. Respecto a la segunda línea de investigación, la atención se ha centrado en *Salvinia minima*, un helecho acuático tropical que ha demostrado ser muy eficiente para la remoción de plomo y cadmio.

Actualmente, el Instituto de Ecología, localizado en Xalapa, Veracruz, en colaboración con el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav) de Chihuahua, el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (Cideteq) de Querétaro desarrollan un proyecto multidisciplinario titulado “Fitorremediación y bioabsorción para el uso sustentable del agua”, financiado por el Conacyt. Sus líneas y proyectos de investigación se presentan en el cuadro 3.

Cabe mencionar también que en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y en el Centro de Investigaciones Avanzadas (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional, recientemente se han realizado investigaciones relacionadas con el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas y de rastos, demostrando que estos sistemas pueden ser una opción viable y eficaz para el tratamiento de tales aguas. Considerando precisamente la capacidad que tienen los sistemas de humedales naturales para purificar aguas contaminadas, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) recientemente incursiona en la fitorremediación acuática de metales pesados (cuadro 3).

En cuanto a la fitorremediación de suelos, también se han desarrollado dos líneas de investigación: una relacionada con la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo y otra con la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. La primera tiene sus orígenes en 1996, con un trabajo que sigue vigente y en el que participan la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I), y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Los trabajos de fitorremediación de suelos con metales pesados son más recientes, como se aprecia en el cuadro 3. Otras instituciones que actualmente realizan investigación en este campo son el Centro de Investigación en Biotecnología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), el Centro de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad de las Américas de Puebla (UDLAP), el Instituto de Recursos Naturales (Irenat) del Colegio de Posgraduados, y la Universidad Autónoma de Nuevo



**Foto 6.** Encapsulado a base de *Spirulina* para la bioabsorción de metales (Fitorremediación).

León (UANL). Sus proyectos y líneas de investigación se presentan en el cuadro 3.

## CONCLUSIONES

La fitorremediación representa una tecnología alternativa para la restauración de ambientes y efluentes contaminados. Es una tecnología de bajo costo, puesto que no requiere de infraestructura sofisticada. Puede implementarse *in situ* para remediar grandes extensiones de áreas contaminadas o para tratar grandes volúmenes de aguas diluidas, es decir, con bajas concentraciones de contaminantes. En general, es una tecnología barata, simple, sustentable, compatible con el ambiente y estéticamente más agradable que las tecnologías convencionales. Ofrece más ventajas que desventajas y, por lo mismo, en los países desarrollados ha dejado de ser una opción potencial de tratamiento para convertirse en una tecnología aplicable, eficiente para remover, transformar o degradar diversos tipos de contaminantes. Particularmente la fitoextracción y rizofiltración son las estrategias de fitorremediación más desarrolladas, tanto que actualmente son comercializadas por algunas compañías de remediación ambiental en Europa y Estados Unidos.

El proceso de fitorremediación puede ser optimizado de diferentes maneras, lo cual dependerá del contaminante a tratar. En el caso de metales pesados, la fitorremediación puede ser más eficiente cuando se incrementa la biodisponibilidad del metal por la adición de agentes quelantes o extractantes, que forman complejos solubles fácilmente asimilados por las plantas. Asimismo, el uso de plantas genéticamente modificadas, con mayor tolerancia y mayor capacidad de acumulación, puede representar otra opción viable para aumentar la eficiencia de la fitorremediación.

Los mecanismos de fitorremediación de metales pesados han sido más estudiados en plantas terrestres que en acuáticas, sobre todo en especies acumuladoras conocidas como metalofitas y otras de importancia económica. Así, se conoce que los mecanismos de tolerancia son diferentes entre las diferentes especies de plantas y están determinados por el tipo de metal. Como parte de sus estrategias de resistencia o de destoxificación, las plantas pueden excluir, mineralizar, reducir, solubilizar, quelar o acomplejar, redistribuir y acumular metales. Los quelantes más importantes que producen son las fitoquelatinas y metalotioneínas, que tienen un papel fundamental en la homeostasis y destoxificación de metales. Sin embargo, aún falta mucho por discernir sobre el papel específico de cada una de

Como parte  
de sus estrategias  
de resistencia  
o de destoxificación,  
las plantas pueden excluir,  
mineralizar, reducir, solubilizar,  
quelar o acomplejar,  
redistribuir y acumular  
metales

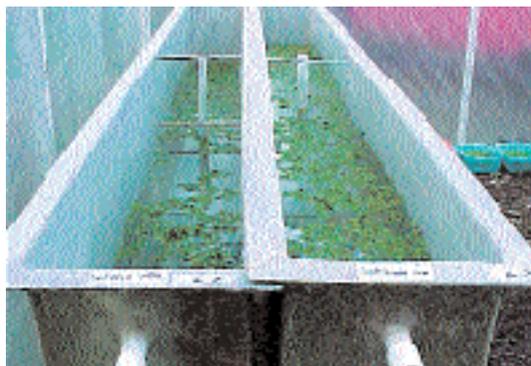


Foto 7. Laguna de flujo tapón con *Salvinia minima*.

ellas en el proceso de tolerancia de las diversas especies de plantas.

La fitorremediación es una tecnología ambiental de gran potencial para México. Sin embargo, son contadas las instituciones que realizan investigación para implementar sistemas de fitorremediación, debido a la carencia de personal especializado, al desconocimiento de esta tecnología por parte de autoridades e industriales, y a la falta de presupuesto. Así, resulta evidente la necesidad de formación de recursos humanos y una mayor asignación de recursos financieros para la investigación en este campo emergente.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de Conacyt a través del proyecto Z-039; "Fitorremediación y bioadsorción para el uso sustentable del agua".

#### Bibliografía

- Brooks R. R. (editor) (1998), "Plants that hyperaccumulate heavy metals", *CAB International*, Cambridge, USA.
- Cobbett C. S. (2000), "Phytochelatin and their roles in heavy metal detoxification", *Plant Physiology* 123:825-832.
- Raskin I. y B. D. Ensley (editores) (2000), *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*, Wiley y Sons.
- EPA (2000), *Introduction to Phytoremediation*, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. EPA/600/R-99/107. 72 p.
- Lytle C. M., F. W. Lytle, N. Yang, J. H. Qian, D. Hansen, A. Sayed, y N. Terry (1998), "Reduction of Cr(VI) to Cr(III) by wetland plants; potential for *In situ* metal detoxification", *Environmental Science and Technology*, 32: 3087-3093.
- Olguín, E. J., Hernández, E. y Ramos, I. (2002), "The effect of both different light conditions and the pH value on the capacity of *Salvinia minima* baker for removing cadmium, lead and chromium", *Acta Biotechnol.* 22 1-2: 121-131.
- Polprasert C. (1996), *Organic waste recycling, technology and management*, 2a edición, Wiley. Ontario, Canadá, 412 pp.
- Reed S. C., R. W. Crites y E. J. Middlebrooks. (1995), *Natural systems for waste management and treatment*, 2a edición, Nueva York, Mac Graw-Hill, USA, 433 pp.
- Salt D. E., M. Blaylock, N. P. B. A. Kumar, V. Dushenkov, B. D. Ensley, LL. Chet y LL. Raskin. (1995), "Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants", *Biotechnology*, 13:468-364.
- Reddy K. R. y W. H. Smith (editores) (1987), *Aquatic plants for water treatment and resource recovery*, Orlando, Magnolia Publishing.

---

**Roberto Aurelio Núñez López** estudió Biología en la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Se especializó en el área de la Ficología, realizando sus estudios de Maestría en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, en la Paz, Baja California Sur. Actualmente realiza su doctorado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, donde lleva a cabo su investigación relacionada con la fitorremediación de metales pesados por el lirio acuático y el aprovechamiento de la biomasa de plantas acuáticas empleadas en la fitorremediación de metales. [rnunez@cideteq.mx](mailto:rnunez@cideteq.mx)

**Yunny Meas Vong** es doctor ingeniero en Electroquímica por el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia. Ha realizado trabajos de investigación y desarrollo tecnológico en varias áreas de la electroquímica relacionadas con electrolitos sólidos, semiconductores, acabados superficiales, corrosión, electrocatalisis y tratamiento de aguas, algunos de los cuales han recibido varios reconocimientos a nivel nacional. En los últimos años ha llevado a cabo un proyecto interinstitucional para el control del lirio acuático y está participando en el proyecto de sustentabilidad del sistema de agua en el estado de Querétaro. Ha sido presidente fundador de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y director fundador del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y del Sistema Nacional de Investigadores. [yunnymeas@cideteq.mx](mailto:yunnymeas@cideteq.mx)

**Raúl Ortega Borges** es doctor en Química por la Universidad Pierre y Marie Curie (París 6). En 1994 se incorpora al Departamento de Electroquímica del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, donde actualmente es director general. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y a diversas asociaciones tanto internacionales como nacionales relacionadas con la electroquímica y el desarrollo tecnológico. Sus líneas de investigación son el tratamiento de efluentes y residuos por técnicas electroquímicas y el tratamiento químico y electroquímico de superficies; ha participado y dirigido proyectos de investigación básica, aplicada y tecnológica. [rortega@cideteq.mx](mailto:rortega@cideteq.mx)

**Eugenia J. Olguín Palacios** obtuvo el doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Bioquímica en la Universidad de Birmingham, Reino Unido. Desde 1989 es investigadora del Instituto de Ecología (Inecol), y jefa del Departamento de Biotecnología Ambiental. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores y es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Actualmente, es presidenta de la Sociedad Internacional de Biotecnología Ambiental. En 1999 recibió el Premio Nacional María Lavalle Urbina en el área de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. Sus principales líneas de investigación son la fitorremediación, la fitorremediación y los bioprocesos más limpios para el desarrollo sustentable del agua. [eugenia@ecologia.edu.mx](mailto:eugenia@ecologia.edu.mx)

