

AVANCES EN CIENCIA DEL AGUA

CHEIKH FALL
(Coordinador)



Primera edición: enero 2015

Este libro contó con el aval de revisores externos conforme a los criterios editoriales de la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados

El contenido de esta publicación es responsabilidad de los autores.

D. R. © Universidad Autónoma del Estado de México
Avenida Instituto Literario 100, Col. Centro
Toluca, Estado de México, C.P. 50000

ISBN: 978-607-422-568-6

Impreso y hecho en México

Printed and made in Mexico

La reproducción parcial o total de contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización por escrito del editor en términos de la Ley Federal de Derecho de Autor y en su caso de los tratados internacionales aplicables, viola derechos reservados.

ón percolación	205
superficial a escala	225
de temporal:	
(60-2009)	253
os	275
to:	293
	313
nto	339
	367
	387
caciones	405
	435
	455

Fitorremediación de contaminantes orgánicos	477
Fitorremediación de metales pesados	493
Programas de doctorado en ciencias del agua impartidos en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA)	511

Fitorremediación de metales pesados

M. C. Jiménez Moleón¹, A. Jacobo¹, A. Amaya², M. T. Mota¹, M. Islas Espinosa¹, A. Contreras¹

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

² Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

Resumen

Los metales pesados son contaminantes prioritarios en suelos y aguas debido a que representan un grave problema para el ambiente y la salud al ser altamente persistentes y presentar elevados niveles de bioacumulación. Su procedencia es muy variada, y en México, se asocian principalmente con vertidos ilegales, falta de plantas de tratamiento y corrosión de tuberías o depósitos.

La fitorremediación de aguas está tomando mucho auge en los últimos años ya que provee una solución económica, de fácil operación y ambientalmente amigable. Diversas plantas son capaces de reducir la concentración de metales en el medio, sin embargo la macrófita más citada es el lirio acuático, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, por su calidad de hiperacumulador de metales. Sin embargo, también ha sido considerada como la peor maleza acuática a nivel mundial, debido a su alta tasa de crecimiento y su rápida propagación, que ocasiona diversos problemas ambientales, económicos e, incluso, de salud.

En este capítulo, se muestra una revisión de la utilidad de esta planta tanto en sistemas de tratamiento como en medio natural para la eliminación de metales en medio acuático. Asimismo, se presentan los esfuerzos realizados dentro del Cuerpo Académico Tratamiento de Aguas y Control de la Contaminación del CIRA-UAEMEX, para evaluar su utilización y el reúso de la fitomasa contaminada, generando conocimiento nuevo que permita aprovechar los beneficios que provee, pero intentando aportar soluciones en la gestión de su uso, de manera que de residuo o plaga pueda pasar a ser una materia prima en campos tales como la enmienda de suelos o la nanotecnología.

Introducción

Existen varias tecnologías para remover los metales pesados de las aguas residuales, tales como precipitación química, adsorción sobre carbón activado, intercambio iónico y ósmosis inversa, pero tienen las desventajas de ser costosas y que los metales pesados son difíciles de extraer para utilización posterior; por el contrario, la fitorremediación es una tecnología alternativa que utiliza las plantas, y los microorganismos asociados a su rizosfera, para la descontaminación *in situ* de suelos y aguas con metales pesados y/o contaminantes orgánicos; que tiene como ventajas su relativo bajo costo, beneficios estéticos y su naturaleza no intrusiva.

Los mecanismos que las plantas utilizan para la depuración de contaminantes son (Akpor y Muchie, 2010:1807):

- **Fitoextracción o fitoacumulación**, consiste en la absorción de los contaminantes a través de las raíces, su traslocación y almacenamiento en los diferentes tejidos de la planta. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos, elementos e isótopos radiactivos.
- **Rizofiltración**, se basa exclusivamente en hacer crecer las plantas, en cultivos hidropónicos. Se escogen plantas con alta tasa de crecimiento y área superficial suficiente para adsorber, absorber, concentrar y precipitar contaminantes.
- **Fitodegradación o fitotransformación**, mecanismo por el cual las plantas degradan o transforman las sustancias tóxicas en compuestos menos tóxicos, de forma que los contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados, a través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo plantas mediante procesos metabólicos internos o externos.
- **Fitoestimulación**, en este mecanismo, los exudados de las raíces (azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno) estimulan el crecimiento de microorganismos, particularmente hongos y bacterias, capaces de degradar contaminantes orgánicos, causando la mineralización de los contaminantes.
- **Fitovolatilización**, algunas plantas son capaces de volatilizar ciertos contaminantes orgánicos e inorgánicos (como Hg y Se), contenidos en suelos, sedimentos o agua. Los contaminantes son absorbidos, metabolizados, transportados desde su raíz a sus partes superiores y liberados a la atmósfera a través de las hojas durante la transpiración.
- **Fitoestabilización**, este tipo de estrategia utiliza plantas que desarrollan un denso sistema de raíces, para reducir la biodisponibilidad de metales y otros

contaminantes en e
ficación o humifica

La eliminación de cont
mediante fitoextracción, ri

Desde el punto de vista bi
los considerados micronutrie
gica conocida. Los oligoele
trazas por parte de animales y
su ciclo vital, aunque si supe
están, entre otros, los eleme
metaloides como As, B, I, S
función biológica conocida s
cantidades mínimas, produce
pueden acumularse en los org

La presencia de metales e
degradan como los contamin
acuáticas flotantes son medio
lándolos en sus tejidos. Adem
que se encuentra en la planta
son menos restringidos, enco

Sin embargo, la exposició
variadas respuestas biológi
que se denomina biomarcad
como respuesta a la exposic
lipídica, variaciones en la rel
de ácido jasmónico (ácido c
glutación y otros tioles, apari
mento en la actividad o inhibi
Smeets *et al.*, 2005:437; De l

El lirio acuático- Su pa

De las plantas acuáticas flotan
tropicales, la más citada y la
aguas es el lirio acuático, *Eic*
tiene la habilidad de actuar cc
metales pesados y tóxicos or;

contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humificación.

La eliminación de contaminantes metálicos en fase acuosa ocurre principalmente mediante fitoextracción, rizofiltración y fitoestabilización.

Desde el punto de vista biológico, dentro de los metales se distinguen dos grandes grupos: los considerados micronutrientes (oligoelementos) y los que no presentan una función biológica conocida. Los oligoelementos son aquellos que se requieren en cantidades pequeñas o trazas por parte de animales y plantas, siendo necesarios para que los organismos completen su ciclo vital, aunque si superan ciertos valores, se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están, entre otros, los elementos metálicos Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn; y no metales o metaloides como As, B, I, Sb y Se, entre otros. Los elementos que no llevan a cabo una función biológica conocida son aquellos que si se encuentran en seres vivos y que, aún en cantidades mínimas, producen graves disfunciones orgánicas, resultan altamente tóxicos y pueden acumularse en los organismos. Estos son principalmente Sb, Bi, Cd, Hg y Pb.

La presencia de metales en agua representa un problema ambiental serio porque no se degradan como los contaminantes orgánicos. Sin embargo, se ha observado que las plantas acuáticas flotantes son medios efectivos en la eliminación de metales en disolución, acumulándolos en sus tejidos. Además, presentan la ventaja de que la concentración de los metales que se encuentra en la planta es mayor que la del agua, con lo que sus límites de detección son menos restringidos, encontrándose en los rangos medibles analíticamente.

Sin embargo, la exposición de las plantas a metales pesados trae como consecuencia variadas respuestas biológicas, a nivel bioquímico, celular y fisiológico, cambios a los que se denomina biomarcadores. Los principales biomarcadores reseñados en plantas como respuesta a la exposición a metales pesados son el aumento en la peroxidación lipídica, variaciones en la relación clorofila/carotenoides, aumento en la concentración de ácido jasmónico (ácido cis-2-pent-2-enil-3 oxoclopenteniácético), nicotianamina, glutatión y otros tioles, aparición de péptidos quelantes y fitoquelatinas, así como aumento en la actividad o inhibición de las enzimas antioxidantes (Weber *et al.*, 2004:269; Smeets *et al.*, 2005:437; De la Rosa *et al.*, 2005:491; Mendoza y Moreno, 2006:919).

El lirio acuático- Su papel en la fitorremediación

De las plantas acuáticas flotantes, la macrófita dominante a lo largo de muchas regiones tropicales, la más citada y la que tiene un gran potencial de uso en el tratamiento de aguas es el lirio acuático, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Fig. 23.1). Esta planta tiene la habilidad de actuar como un filtro biológico para nutrientes, materia orgánica, metales pesados y tóxicos orgánicos.

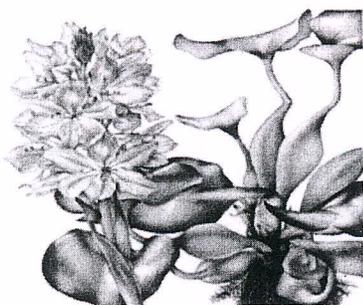
Se acepta que el lirio acuático es originario de la cuenca del Amazonas, donde su población se controla por enemigos naturales como insectos y microorganismos. Sin embargo, a partir de 1800, su población se extendió debido a que los turistas adquirían sus atractivas flores y las llevaban a sus lugares de procedencia como planta de ornato, llegándose a propagar rápidamente sobre todo en lugares con climas tropicales o subtropicales.

El lirio acuático es una macrófita libre flotadora, que puede enraizarse en pantanos poco profundos. En la Fig. 23.1, se muestra un esquema del lirio acuático, donde se pueden distinguir sus diferentes componentes.

El lirio acuático puede reproducirse vegetativa o sexualmente. La reproducción vegetativa es la más importante, toma lugar desde finales de primavera hasta el otoño, originándose a partir de una pequeña hoja (el estolón), que permanece junto a la madre hasta que se desprende por acción del viento u otros factores físicos, creándose así las denominadas “plantas hijas” que son capaces de generar más estolones.

La reproducción sexual se lleva a cabo a través de semillas cuyo número es muy variable, desde 3 hasta 450. Una baja producción de semillas se obtiene cuando la planta está expuesta a altas temperaturas y baja humedad, mientras que su rango óptimo de generación se encuentra bajo una humedad del 90% y temperaturas entre 22.5 y 35.0 °C (Fritrioff *et al.*, 2005:265). La germinación ocurre principalmente a mediados de verano y principios de otoño. Las semillas son liberadas en el agua y se hunden pudiendo permanecer inactivas en los sedimentos por más de 20 años, sin afectar su viabilidad.

Fig. 23.1 Lirio acuático



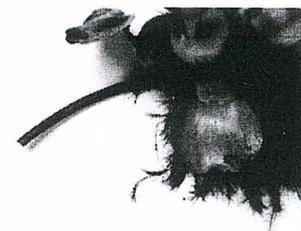
a). Partes aéreas:

Pecíolo: con un ensanchamiento inferior de tejido aerénquima que ayuda a su flotación, que cuando la colonia es densa no se hincha.

Lámina: es la parte superior de la hoja (verde brillante y cerosa, de forma ovalada).

Tallo: parte que sostiene las flores.

Flores: zigomórficas, de color azul-púrpura/lila (franjitas amarillas), forman espigas: 4-25 flores.



Fuente:

Además, su tasa de crecida, señalándose rangos de (2004:27), dato especialmente tiene un promedio de hume

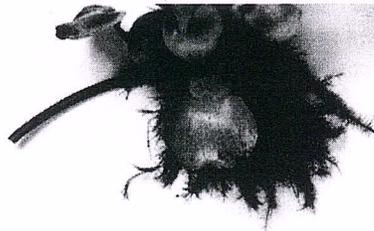
Por todo lo anterior, el las plantas más dañinas a r siona: dificultad para la rec canales y ríos (propiciand sistemas de abastecimiento hábitats, reducción de la bi al propiciar la atracción de de enfermedades como mal tran entre los mayores prob clima tropical.

El lirio acuático ha lleg oeste y sur); Asia (sur y sur Suramérica), por lo que ha s así, sigue siendo extensame

Las plantas hiperacumu altos que el promedio, para (Agumbiade *et al.*, 2009:45

Tener la propiedad de bioa Alcanzar una concentració Tener una buena traslocaci debe ser mayor que la

FITORREMIACIÓN DE METALES PESADOS



b) Partes acuáticas:

Raíces: llegan a ser el 50% de la biomasa, contienen pigmentos solubles (antocianinas) que las protege de los herbívoros.

Rizoma: tallo horizontal que une dos conjuntos de hojas.

Fuente:

Además, su tasa de crecimiento es una de las mayores de cualquier planta conocida, señalándose rangos de productividad de 38-64 g p.s./m²·d (Sooknah y Wilkie, 2004:27), dato especialmente significativo si además se considera que el lirio acuático tiene un promedio de humedad del 93%.

Por todo lo anterior, el lirio acuático está reconocido actualmente como una de las plantas más dañinas a nivel mundial debido a los múltiples problemas que ocasiona: dificultad para la recreación, impedimento del transporte marino, bloqueo de canales y ríos (propiciando las inundaciones), obstrucción de tomas de irrigación y sistemas de abastecimiento, pérdidas de calidad y cantidad de agua, destrucción de hábitats, reducción de la biodiversidad y riesgos para la salud de humanos y ganado, al propiciar la atracción de mosquitos y otros vectores, favoreciendo la proliferación de enfermedades como malaria, esquistosomiasis y filariasis linfática, que se encuentran entre los mayores problemas de salud pública en países en vías de desarrollo de clima tropical.

El lirio acuático ha llegado a representar un conflicto en Australia, África (este, oeste y sur); Asia (sur y sureste) y, en América (en el sur de Estados Unidos, México y Suramérica), por lo que ha sido declarada la peor maleza acuática a nivel mundial. Aún así, sigue siendo extensamente estudiado al ser un hiperacumulador de metales.

Las plantas hiperacumuladoras son capaces de absorber niveles de metales más altos que el promedio, para lo que deben de cumplir con las siguientes características (Agumbiade *et al.*, 2009:4521):

Tener la propiedad de bioacumulación (relación de las concentraciones planta/hábitat > 1)

Alcanzar una concentración total mayor o igual a 1000 mg/kg de masa seca.

Tener una buena traslocación, la concentración de metales en las partes aéreas de la planta debe ser mayor que la de las raíces.

Además, debido a los efectos que los metales tienen sobre las plantas, los hiperacumuladores deben de ser capaces de concentrar altos niveles de metales en sus tejidos, y esto se debe a que pueden detoxificarlos y resistir la entrada de los metales pesados en las células, aunque el proceso puede dañarlas. Esta detoxificación varía dependiendo del metal, de manera que la tolerancia de la planta al metal está relacionada posiblemente con la unión de este en la pared celular, la tolerancia de la membrana al metal, el mecanismo de transporte a través de la membrana, el flujo activo de metales para las células de las plantas, la tolerancia de las enzimas al metal, la acumulación de metales en vacuolas, la quelación de metales con ligandos orgánicos e inorgánicos y la precipitación de compuestos del metal con baja solubilidad (Kvesitadze *et al.*, 2006:1).

En el caso del lirio acuático, los elementos almacenados en las raíces pueden ser traslocados a otros tejidos de la planta donde quedan inmóviles en las paredes celulares o se detoxifican por quelación con proteínas y péptidos. Sin embargo, cuando las concentraciones de los metales en lirio le son perjudiciales aparecen signos de estrés que se pueden observar a simple vista, como palidez y manifestación de coloración amarilla o café, sobre todo en las hojas (clorosis). Además, se pueden presentar efectos como bajas tasas de transpiración y/o de crecimiento, disminución de la elongación de las raíces o inhibición de la síntesis de la clorofila y de la fotosíntesis, entre otros (Wang *et al.*, 2007:82; Pernía *et al.*, 2008:112; Hadad *et al.*, 2009:504).

Factores que afectan la acumulación de metales por lirio acuático

La fitorremediación de metales depende de factores como:

- Grado de contaminación del sitio.
- Capacidad de planta para interceptar, absorber y acumular metales.
- Disponibilidad del metal para la captación en las raíces, regida por su solubilidad en fase acuosa.
- Interacción entre hábitat, metales y planta (controlada por las condiciones climáticas).
- Traslocación de los metales desde la raíz a los brotes de la planta.

Experimentos de laboratorio realizados con lirio acuático han demostrado que tiene una habilidad asombrosa para acumular metales (Cordes *et al.*, 2000:297; Costa *et al.*, 2003:283; Soltan y Rashed, 2003:321; Lima *et al.*, 2005:115; Rosano *et al.*, 2007:51; Tiwari *et al.*, 2007:253; Jiménez-Moleón *et al.*, 2008a, 2008b, 2010a:243, 2010b:243; Agumbiade *et al.*, 2009:4521), sobre todo en la parte de las raíces.

La capacidad de purificar depende de su crecimiento, que depende de la disponibilidad de nutrientes de biomasa ante determinadas condiciones. La acumulación de metal por una planta de biomasa mayor, aunque resiste a altas concentraciones de metal (Fritrioff *et al.*, 2000).

El lirio obtiene del agua todo N, P, junto con los iones de los más importantes. A diferencia de otros, se ha establecido una relación más sensible al abastecimiento de nutrientes. Puede establecerse y sobrevivir a altas concentraciones de nitratos como de fosfatos (Marschner, 2002). Es indispensable, una vez que se obtiene agua destilada durante varias horas (Jiménez-Moleón *et al.*, 2008a; 2008b; 2010a).

Las temperaturas mínima y máxima son de 5°C y 30°C (7°C el rango óptimo de 25 a 30°C) que influye claramente sobre la acumulación de metales. La absorción, probablemente por el por tanto, el área de sorción; proteínas, lo que puede resultar en la ruptura de las membranas (Marschner, 2002).

En cuanto a los niveles de metal en las plantas como para el incremento de la biomasa en un rango de pH de 3 a 10. El pH adecuado para la movilidad de dichos metales depende de la disponibilidad. Por otro lado, el lirio acuático es capaz de volver a crecer y producir biomasa en 24 horas, siendo generalmente más aquellos más cercanos a la raíz.

La capacidad de purificar aguas contaminadas que posee el lirio acuático depende de su crecimiento, que está en función principalmente de la temperatura y la disponibilidad de nutrientes (Costa *et al.*, 2003:283). Al exponer una cantidad baja de biomasa ante determinada concentración de metal en agua, es de esperarse que la acumulación de metal por unidad de biomasa sea comparativamente alta. De esta manera, una planta de biomasa relativamente alta tiene una capacidad de captación de metal mayor, aunque resulte en una concentración de metal más baja por unidad de masa (Fritrioff *et al.*, 2005:265).

El lirio obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo siendo N, P, junto con los iones K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , los más importantes. A diferencia de las plantas terrestres, en las plantas acuáticas no se ha establecido una relación N:P:K óptima, aunque sí se conoce que su crecimiento es más sensible al abastecimiento de P, que al de N. Sin embargo, el lirio acuático puede establecerse y sobrevivir en cuerpos de agua con niveles muy bajos tanto de nitratos como de fosfatos (Moran, 2006:109). Aunque, el abastecimiento de nutrientes es indispensable, una vez que el lirio los acumula, es capaz de sobrevivir incluso en agua destilada durante varias semanas (Soltan y Rashed, 2003:321; Jiménez-Moleón *et al.*, 2008a; 2008b; 2010a 2010b).

Las temperaturas mínima y máxima de crecimiento del lirio acuático son 12 y 35°C, siendo el rango óptimo de 25 a 30°C (Tiwari *et al.*, 2007:253). Además, este es un factor que influye claramente sobre la acumulación, de manera que al elevarla, mejora su capacidad de sorción, probablemente porque al aumentar la temperatura prospera su biomasa y, por tanto, el área de sorción; asimismo, se incrementa el metabolismo y la síntesis de proteínas, lo que puede resultar en la presencia de sitios adicionales de captación en las membranas (Marschner, 2011:1).

En cuanto a los niveles de pH, el rango óptimo para su crecimiento es 6 - 8 (Malik, 2007:122). Este parámetro es importante tanto para el proceso de generación de nuevas plantas como para el incremento de la biomasa. Se sabe que el lirio puede sobrevivir en un rango de pH de 3 a 10, aunque el valor óptimo para su crecimiento es 7. En cuanto al pH adecuado para la sorción de metales, en general, se ve influido por la movilidad de dichos metales a esos valores de pH, es decir, a su solubilidad y bio-disponibilidad. Por otro lado, también diversos autores han reportado que el lirio acuático es capaz de volver prácticamente neutro el medio donde vive (Cordes *et al.*, 2000:297; Jiménez-Moleón *et al.*, 2008b, 2010a:243, 2010b:243), en las primeras 72 horas, siendo generalmente menor su capacidad de neutralización a pH extremos que aquellos más cercanos a la neutralidad.

Por último, la salinidad es una limitación importante en el crecimiento de *Eichhornia crassipes*. Por lo que, en las regiones costeras, niveles de salinidad de 6-8‰ le son letales (Olivares y Colonnello, 2000:242; Fritrioff *et al.*, 2005:265).

El lirio acuático como bioindicador ambiental

Un bioindicador es un organismo vivo que permite cuantificar y calificar el nivel y evolución de la contaminación presente en un sistema acuático determinado en virtud de su sensibilidad diferencial a diversas sustancias tóxicas. Tratándose de corrientes de agua, los indicadores biológicos casi siempre son referidos por grupos de organismos que responden fisiológica o conductualmente a un amplio espectro de sustancias o concentraciones tóxicas, sean estas de origen orgánico o inorgánico; natural o de influencia humana. En dichos organismos, o las poblaciones de éstos, se puede conocer y observar los efectos acumulativos a lo largo del tiempo, ya que miden directamente los parámetros requeridos en un momento dado y ofrecen resultados altamente confiables.

Son muchas las especies que desde hace siglos se han identificado y utilizado para detectar la existencia de sustancias tóxicas y, consecuentemente, inferir sobre la calidad y condiciones de un ambiente contaminado. Así, las plantas, como organismos sedentarios, base de las cadenas alimenticias, sensibles a las variaciones ambientales, reaccionan más rápido ante la presencia de contaminantes que otros organismos, lo que las convierte en elementos idóneos para el monitoreo de la contaminación (Ferrari *et al.*, 2003:187; Gianazza *et al.*, 2007:179; Pernía *et al.*, 2008:112).

De manera que, al aplicar esto a los ecosistemas acuáticos, se vuelve de vital importancia el estudio de la acumulación de los metales pesados en las macrófitas. Las plantas acuáticas condicionan las propiedades fisicoquímicas del agua y la estructura de otras comunidades bióticas (por ej. zooplancton y peces), mediante la regulación de los intercambios entre los ecosistemas terrestres y acuáticos.

En cuanto a la captación de metales, las plantas acuáticas son primordialmente importantes para el análisis de contaminación, ya que la concentración de estas sustancias en su interior es más alta que en el medio. Además, los metales son utilizados como indicadores de contaminación ambiental, ya que, su presencia en algas, moluscos o peces, se usa para establecer el grado de contaminación del ambiente acuático. En especial, los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica de todo flujo de agua debido a su toxicidad y especialmente a su comportamiento bioacumulativo.

Así, el lirio acuático es un organismo que está que son relativamente sencillos con equipamientos sencillos; tienen un ciclo de vida corto por las condiciones de la contaminación; forman distintas comunidades muy particulares; son fáciles de manejar en los experimentos sobre sus métodos de cultivo; el lirio como indicador tiene ventajas respecto a la perspectiva de referencia para el análisis de las características morfológicas y la toxicidad como las características ambientales del agua donde se encuentran.

Son mucho más escasos los estudios en laboratorio, sin embargo, Ferrat (2005:115) evaluaron la acumulación de metales pesados obteniendo que la acumulación de metales pesados a la hallada en los sedimentos. Ferrat (2007:253) determinaron la acumulación de metales pesados en las plantas acuáticas, sedimentos y E. crassipes que mostraron una mayor acumulación de metales pesados en la presa Valsequillo (México) en el orden: $Mn > Fe > Zn$. Ferrat (2007:253) concentró en raíz, significativamente en los canales secundarios de Xocoma que la presencia o ausencia de metales pesados, pH, oxígeno disuelto y temperatura (conductividad, CO_3^{2-} , HCO_3^-) Ferrat *et al.* (2009:4521) evaluaron dieciocho especies de raíces y hojas de lirio en una zona de contaminación y las concentraciones de los metales pesados correspondientes concentraciones de metales pesados a 1, por lo que consideraron a E. crassipes como un bioindicador de agua.

A pesar de su buen funcionamiento como bioindicador acuático, al igual que cualquier otro organismo acuático,

el crecimiento de *Eichhornia* (mortalidad de 6-8% le son letales).

antificar y calificar el nivel de contaminación acuática determinado en áreas tóxicas. Tratándose de áreas que son referidos por grupos de contaminación a un amplio espectro de contaminación orgánica o inorgánica; las poblaciones de éstos, se ven afectadas con el tiempo, ya que miden el grado de contaminación y ofrecen resultados

identificado y utilizado para determinar, inferir sobre la causa de las plantas, como organismos que causan las variaciones ambientales, así como otros organismos, lo que ayuda a la contaminación (Ferrari *et al.*, 2008:112).

En ambientes acuáticos, se vuelve de vital importancia el estudio de los macrófitos. Las plantas acuáticas del agua y la estructura de los ecosistemas acuáticos, mediante la regulación de los nutrientes.

Las plantas acuáticas son primordialmente utilizadas para la concentración de estas sustancias, los metales son utilizados para determinar la presencia en algas, moluscos y crustáceos del ambiente acuático. Así como indicadores de la contaminación y especialmente a su

Así, el lirio acuático es considerado un bioindicador por varias razones, entre ellas, está que son relativamente abundantes, tienen el tamaño suficiente para ser observados con equipamientos sencillos sin necesidad de microscopios; son muy sensibles a perturbaciones; tienen un ciclo de vida lo suficientemente largo como para ser afectados por las condiciones de la calidad del agua; están relativamente inmóviles; tienden a formar distintas comunidades que están asociadas con condiciones físicas y químicas muy particulares; son fáciles de recolectar y existen relativamente amplios conocimientos sobre sus métodos de evaluación y taxonomía. El biomonitoreo utilizando al lirio como indicador tiene diferentes niveles de intensidad, cubriendo diferentes rangos respecto a la perspectiva temporal y espacial. Ya que se puede tomar como referencia para el análisis el crecimiento de la planta, la observación de las características morfológicas y la traslocación de los metales, que dependen de factores tales como las características ambientales y los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua donde se encuentran (Rodríguez y Jenssen, 2005:275).

Son mucho más escasos los estudios en medio natural que los llevados a cabo en laboratorio, sin embargo, a continuación, se mencionan alguno de ellos. Lima *et al.* (2005:115) evaluaron la relación lirio-agua-sedimento en el río Almendares (Cuba), obteniendo que la acumulación de Pb, Zn, Cu y Cd en la raíz de la planta era similar a la hallada en los sedimentos del río. En el Lago de Bhopal (India), Tiwari *et al.* (2007:253) determinaron las concentraciones de Pb, Cr, Zn, Mn y Cu en aguas superficiales, sedimentos y *E. crassipes*, obteniendo que Pb, Zn y Mn fueron los metales que mostraron una mayor afinidad hacia la bioacumulación. Rosano *et al.* (2007:51) determinaron la acumulación de diferentes metales traza en lirio acuático presente en la presa Valsequillo (México), encontrando que el factor de bioacumulación decrecía en el orden: Mn > Fe > Zn > Cr > Ni > Cu y que esta capacidad de acumulación se concentró en raíz, significando el 42.54% del total. En un estudio realizado en los canales secundarios de Xochimilco (México), Quiroz *et al.* (2008:127) determinaron que la presencia o ausencia de lirio acuático afectó significativamente los valores de pH, oxígeno disuelto y temperatura; no teniendo influencia en los demás parámetros (conductividad, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_2^- y NO_3^-). Por último, Agumbiade *et al.* (2009:4521) evaluaron diez metales (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V y Zn) en agua, raíces y hojas de lirio en una zona costera del estado de Ondo (Nigeria), encontrando que las concentraciones de los metales en los tejidos de la planta fueron mucho más altas que sus correspondientes concentraciones en el agua con factores de bioacumulación mucho mayores a 1, por lo que consideraron a *Eichhornia crassipes* una buena fitorremediadora en cuerpos de agua.

A pesar de su buen funcionamiento como acumulador de metales pesados, el lirio acuático, al igual que cualquier otro organismo que se utilice en la fitorremediación

de agua, tiene un grave problema, debido a que la contaminación cambia de lugar, pasa a concentrarse en la planta y esta, al morir y degradarse, vuelve a incorporar el metal al ecosistema o al sistema de tratamiento. Por lo que es necesario encontrar una forma efectiva de reúso o disposición de la biomasa vegetal contaminada.

Investigaciones realizadas en CIRA

Por todo lo anteriormente expuesto, un Grupo de Investigadores del CIRA, dentro del Cuerpo Académico "Tratamiento de aguas y control de la contaminación" decidió comenzar a desarrollar una Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) sobre Fitorremediación de metales pesados. Hasta el momento, se ha trabajado con lirio acuático y se ha contado con la colaboración de diferentes investigadores en otros Centros, como en el Instituto de Física de la UNAM, campus Cuernavaca; el Instituto de Ecología de Veracruz y la Facultad de Química de la propia UAEM.

Las investigaciones se realizaron en el marco de proyectos financiados por CONACYT, la FESE o por la UAEM, así como por recursos propios de los investigadores involucrados. Todo lo anterior, orquestado alrededor de la formación de Recursos Humanos especializados dentro de los posgrados en Ciencias del Agua, a través de las siguientes tesis de grado de Maestría y Doctorado:

- Título de la tesis: Absorción de Fe^{2+} y Mn^{2+} a través del Lirio acuático *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.
- Alumna: María Teresa Mota González
- Posgrado: Maestría en Ciencias del Agua
- Dirección: Dra. María del Carmen Jiménez Moleón y Dr. Jorge Antonio Ascencio Gutiérrez
- Justificación: Los metales con mayor presencia en las aguas superficiales y subterráneas del Valle de Toluca son Fe y Mn (Jiménez-Moleón *et al.*, 2007a y b:882), de tal suerte que incluso limitan su uso para consumo humano (Jiménez-Moleón *et al.*, 2007 a y b:882). El uso de la fitorremediación podría dar una solución eficiente, económica y ambientalmente amigable. Por otro lado, la posibilidad de encontrar nanopartículas metálicas en el tejido de las plantas (así como establecer la influencia de las condiciones fisicoquímicas) daría una solución a la disposición de la fitomasa contaminada y contribuiría a cambiar el apelativo del lirio acuático desde plaga a materia prima.
- Estado: Terminada, graduación en octubre de 2008.
- Resultados:

- Jiménez-Moleón y Ascencio. 2008a. Memorias del Regional de Ciencias del Agua.
- Jiménez-Moleón y Ascencio. 2008b. Memorias del VII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.
- Jiménez-Moleón y Ascencio. 2008c. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.
- Jiménez-Moleón y Ascencio. 2008d. Memorias del IX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.
- Jiménez-Moleón y Ascencio. 2008e. Memorias del X Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.

- Título de la tesis: Aprovechamiento de la biomasa de *Eichhornia crassipes* de cuerpos de agua contaminados.
- Alumna: Araceli Cordero
- Posgrado: Maestría en Ciencias del Agua
- Dirección: Dra. María del Carmen Jiménez Moleón y Dr. Ascencio Gutiérrez
- Justificación: La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas de las más contaminadas por las actividades industriales que desechan residuos que reciben alta carga orgánica y plagas de fertilizantes y plagas de insecticidas porta el Río Lerma (Jiménez-Moleón y Ascencio, 2008:1); y buena parte de la contaminación de las aguas con lirio acuático, que genera focos de contaminación en los parámetros de calidad de agua. Asimismo, ahondando en el uso de las plantas acuáticas, se han desarrollado celdas metálicas en el tratamiento de aguas con el eficiente puente creado por el lirio acuático (Yatón y Tatón, 2000:626) que permite la disposición del lirio acuático, a través de la biomasa, de manera natural.
- Estado: Terminada, graduación en octubre de 2008.
- Título de la tesis: Fitorremediación de aguas contaminadas con metales pesados.

minación cambia de lugar, se vuelve a incorporar el es necesario encontrar una al contaminada.

adores del CIRA, dentro del ontaminación” decidió co- del Conocimiento (LGAC) nento, se ha trabajado con ites investigadores en otros us Cuernavaca; el Instituto ropia UAEM.

ectos financiados por CO- opios de los investigadores la formación de Recursos ncias del Agua, a través de

ivés del Lirio acuático Ei-

ón y Dr. Jorge Antonio As-

n las aguas superficiales y nénez-Moleón *et al.*, 2007a so para consumo humano e la fitorremediación podría almente amigable. Por otro etálicas en el tejido de las ondiciones fisicoquímicas) contaminada y contribuiría ga a materia prima.

18.

- Jiménez-Moleón M. C., Mota-González M. T., Vázquez-Mejía G. y Fonseca-Montes de Oca G. 2008a. Absorción de Fe por lirio acuático: Influencia de la concentración inicial. Memorias del VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional y III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Chihuahua, México (en CD).
- Jiménez-Moleón M. C., Mota-González M. T., Vázquez-Mejía G. y Fonseca-Montes de Oca G. 2008b. Absorción de Fe por lirio acuático: Influencia del pH inicial. Memorias del VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional y III Congreso Regional de Ciencias Ambientales. Chihuahua, México (en CD).
- Jiménez-Moleón M. C., Mota-González M. T. y Ascencio-Gutiérrez J. A. 2010a. Manganese absorption by water hyacinth and its study as a raw material in nanotechnology. *Water pollution X*, 135, 243-252.
- Jiménez-Moleón M. C., Mota-González M. T. y Ascencio-Gutiérrez J. A. 2010b. Manganese absorption by water hyacinth and its study as a raw material in nanotechnology. *Transactions on Ecology and the Environment*, 135, 243-252.

- Título de la tesis: Acumulación de Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, Ni en *Eichhornia crassipes* de cuerpos de agua en el curso alto del Río Lerma
- Alumna: Araceli Contreras Ponce
- Posgrado: Maestría en Ciencias del Agua
- Dirección: Dra. María del Carmen Jiménez Moleón y Dr. Jorge Antonio Ascencio Gutiérrez (asesor Nanotecnología)
- Justificación: La cuenca del Alto Lerma, desde 1990, es considerada como una de las más contaminadas del Estado de México y del país. Son numerosas las industrias que descargan sus aguas residuales en el Río Lerma, que también recibe alta carga orgánica por los aportes de aguas municipales y residuos de fertilizantes y plaguicidas. Dentro de los desechos antropogénicos que transporta el Río Lerma están los metales pesados (Barceló *et al.* 2004; Zarazúa, 2008:1); y buena parte de los cuerpos de agua de la cuenca están infestados con lirio acuático, por lo que se quiso utilizar esta planta como bioindicador de contaminación e intentar correlacionar los resultados de acumulación con los parámetros de calidad de agua del cuerpo de agua infestado. Asimismo, ahondar en la posibilidad de que el lirio acuático genere nanopartículas metálicas en su interior de manera natural, profundizando en el muy reciente puente creado entre Ciencias del Agua/biología-nanotecnología (Mirkin y Taton, 2000:626), aumentando significativamente el valor socioeconómico del lirio acuático, al posibilitar su explotación incluso en lugares donde crece de manera natural.
- Estado: Terminada, graduación en noviembre de 2010.
- Título de la tesis: Fitorremediación de Cd y Ni por medio de lirio acuático.

- Alumna: Adriana Jacobo López
- Posgrado: Maestría en Ciencias del Agua
- Dirección: Dra. María del Carmen Jiménez Moleón y Dra. Araceli Amaya Chávez (asesora Fitotoxicidad)
- Justificación: De todos los metales pesados interesantes por su efecto sobre el ambiente, se trabajó con Cd y Ni, al ser unos metales muy frecuentes en los efluentes industriales y causar fuertes problemas de salud. De hecho, la legislación europea (Lessmann, 2009) los recoge como contaminantes de interés a tener en cuenta, es decir, aquellos que hay que monitorear en corrientes y corrientes de agua naturales. Dicha legislación divide los contaminantes en tres categorías: (a) Sustancias peligrosas prioritarias. Donde se incluye un único metal: Cd; (b) Sustancias a ser examinadas como peligrosas prioritarias. Donde no aparece ningún metal y (c) Sustancias prioritarias. Donde se incluye un único metal: Ni. Asimismo, fue la primera vez que se trabajó con biomarcadores de fitotoxicidad
- Estado: Terminada, graduación en diciembre 2010.
En la actualidad, el Grupo de Investigación está explorando nuevas alternativas de utilización de la gran biomasa proveniente de la eliminación física del lirio acuático de los cuerpos de agua infestados o el utilizado en sistemas de tratamiento de aguas residuales, por medio de la composta y vermicomposta de este material vegetal. Cabe hacer mención que, en México y en el mundo, este tema es absolutamente prioritario por el volumen actual del problema, la rapidez de su propagación y la dificultad de su solución. De hecho, por el difícil manejo de este problema ambiental, diversos investigadores han llegado a la conclusión que no es un asunto de erradicar la plaga del lirio acuático en medio natural, si no de gestionarlo.
Por tanto, en el marco de los Proyectos 3120/2011, financiados por la FESE y la UAEM, se están desarrollando las siguientes tesis:
- Título de la tesis: Efecto de la proporción adicionada y la presentación de lirio acuático (seco y libre de ácidos grasos volátiles) sobre la composta de lodo residual municipal
- Alumna: Patricia Peña Pichardo
- Posgrado: Maestría en Ciencias del Agua
- Estado: Protocolo registrado en julio 2011, fase experimental en desarrollo.
- Título de la tesis: Compostaje-lombricompostaje de lirio acuático y lodo residual: efecto de la proporción y la presentación de la planta (fresca, seca y parcialmente digerida).

- Alumna: Adriana I
- Posgrado: Doctora
- Estado: Protocolo llo.
- Título de la tesis: l ción superficie/vol acuático seco y loc
- Alumno: José Cab
- Posgrado: Doctora
- Estado: Protocolo en desarrollo.
Cabe hacer mención unir al intento de re en los cuerpos de a lodos residuales m una opción de gesti en la actualidad en desarrollo con clin

Agradecimientos

Las investigaciones aquí r miento otorgado por el CO y la UAEM (Proyectos 3120

- Alumna: Adriana Fabiola Tello Andrade
- Posgrado: Doctorado en Ciencias del Agua- antecedentes de licenciatura
- Estado: Protocolo registrado en agosto 2011, fase experimental en desarrollo.
- Título de la tesis: Estudio de los efectos de la densidad de lombriz y la relación superficie/volumen en un vermirreactor de alta tasa alimentado con lirio acuático seco y lodo residual precomposteados
- Alumno: José Caballero Viñas
- Posgrado: Doctorado en Ciencias del Agua- antecedentes de maestría
- Estado: Protocolo enviado a registro en diciembre 2011, fase experimental en desarrollo.

Cabe hacer mención que, en esta etapa, el Grupo de Investigación propuso unir al intento de reutilización de la gran cantidad de fitomasa que se produce en los cuerpos de agua infestados con lirio acuático, otro tema prioritario: los lodos residuales municipales. Intentando, con el esfuerzo conjunto, aportar una opción de gestión viable a estos dos problemas ambientales tan relevantes en la actualidad en México y el mundo, con especial énfasis en los países en desarrollo con climas templados.

Agradecimientos

Las investigaciones aquí referidas no se podrían haber llevado a cabo sin el financiamiento otorgado por el CONACyT (Proyecto 91184), la FESE (Proyecto 3379/2013E) y la UAEM (Proyectos 3120/2011 y 3449/2013CHT).

Bibliografía

- Agumbiade Foluso O., Bamidele I Olu-Owolabi y Kayode O. Adebowale (2009) "Phytoremediation potential of *Eichornia crassipes* in metal-contaminated coastal water" en *Bioresource Technology*, 100, 4521-4526.
- Akpor O.B. y M. Muchie (2010) "Remediation of heavy metals in drinking water and wastewater treatment systems: Processes and applications" en *International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1807-1817.
- Barceló Icela D.; Anne L.S. Bussy; Hugo E. Solís; Pedro Ávila y Edgar López-Galván (2004) "Clasificación de especies químicas del cadmio y cobre en afluentes de la presa J.A. Alzate en el estado de México, México" en XXIX Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). San Juan, Puerto Rico, USA (en CD, sin número de página).
- Cordes Kevin, Aradhana Mehra, Margaret Farago y Dipak K. Banerjee (2000) "Uptake of Cd, Cu, Ni and Zn by the water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms from pulverized fuel ash (PFA) leachates and slurries" en *Environmental Geochemistry and Health* 22, 297-316.
- Costa R.H.; C.T. Zanotelli; D.M. Hoffmann; P. Belli-Filho; C.C. Perdomo y M. Rafikov (2003) "Optimization of the treatment of piggery wastes in water hyacinth ponds" en *Water Science and Technology* 48(2), 283-289
- De la Rosa Guadalupe, Alejandro Martínez-Martínez, Helvia Pelayo, José R. Peralta-Videa, Blanca Sánchez-Salcido y Jorge L. Gardea-Torresdey (2005) "Production of low-molecular weight thiols as a response to cadmium uptake by tumbleweed (*Salsola kali*)" en *Plant Physiology and Biochemistry*, 43, 491-498.
- Ferrat L., C. Pergent-Martini y M. Roméo (2003) "Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to seagrasses" en *Aquatic Toxicology*, 65, 187-204.
- Fritioff A.; L. Kautsky y M. Greger (2005) "Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submerged plants" en *Environmental Pollution*, 133, 265-274
- Gianazza Elisabetta, Robin Wait, Andrea Sozzi, Simona Regondi, Dolores Saco, Massimo Labra y Elisabetta Agradi (2007) "Growth and protein profile changes in *Lepidium sativum* L. plantlets exposed to cadmium" en *Environmental and Experimental Botany*, 59, 179-187.
- Hadad H.R., M.A. Maine, M. Pincirolí y M.M. Mufarrege (2009) "Nickel and phosphorous sorption efficiencies, tissue accumulation kinetics and morphological effects on *Eichornia crassipes*" en *Ecotoxicology*, 18, 504-513.
- Jiménez-Moleón María Rivas (2007a) "Potable water of the XII National Congress" en XII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, XII Congreso Internacional, XII Congreso ANCA2007/MEM
- Jiménez-Moleón María Rivas (2007b) "Potable water of the VII International Congress of Environmental Sciences" en VII Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, XII Congreso Internacional, XIII Congreso Internacional, XIII Congreso Internacionales. Cd. Obregón
- Jiménez-Moleón María Ascencio (2010a) "Nanotechnology material in nanotechnology" en XII Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, XIII Congreso Internacional, XIII Congreso Internacionales. Cd. Obregón
- Jiménez-Moleón María Ascencio (2010b) "Raw material in nanotechnology" en XII Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, XIII Congreso Internacional, XIII Congreso Internacionales. Cd. Obregón
- Kvesitadze George, Gikashvili "Biochemical mechanism of heavy metal detoxification", Springer, 1998
- Lessmann Dieter. Cursos de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México.
- Lima Lázaro, Susana C. (2005) "Niveles de contaminación por metales pesados en la Bahía de Habana, Cuba" en *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 115-124.
- Malik Anushree (2007) "Phytoremediation of heavy metals in water hyacinth" en *International Journal of the Physical Sciences*, 2, 1807-1817.

- le O. Adebawale (2009) "Metal-contaminated coastal metals in drinking water locations" en *International*
- la y Edgar López-Galván y cobre en afluentes de la XXIX Congreso Internacional Juan, Puerto Rico, USA
- K. Banerjee (2000) "Up-ironormia crassipes (Mart.) irries" en *Environmental*
- ; C.C. Perdomo y M. Rawastes in water hyacinth '9
- a Pelayo, José R. Peralta- sdey (2005) "Production m uptake by tumbleweed 3, 491-498.
- ment of the use of biomar- tal quality: application to
- temperature and salinity onmental Pollution, 133,
- Regondi, Dolores Saco, d protein profile changes r" en *Environmental and*
- (2009) "Nickel and phos- etics and morphological 504-513.
- Jiménez-Moleón María del Carmen, Lucía García-Cervantes y Rosa María Fuentes-Rivas (2007a) "Presencia de metales pesados en fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de Toluca" en *Memorias del VI Congreso Internacional, XII Congreso Nacional*. Chihuahua, México (en CD, sin número de página).
- Jiménez-Moleón María del Carmen, Lucía García-Cervantes y Rosa María Fuentes-Rivas (2007b) "Presencia de metales pesados en fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de Toluca" en *Memorias en extenso del VI Congreso Internacional, XII Congreso Nacional*, 882-887 (on line). http://www.fz.uach.mx/ANCA2007/MEMORIAS_PDF/MEMORIAS%20de%20163-169.pdf
- Jiménez-Moleón María del Carmen, María Teresa Mota-González, Guadalupe Vázquez-Mejía y Reyna María Guadalupe Fonseca-Montes de Oca (2008a) "Absorción de Fe por lirio acuático: Influencia de la concentración inicial" en *Memorias del VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional y III Congreso Regional de Ciencias Ambientales*. Cd. Obregón, México (en CD, sin número de página).
- Jiménez-Moleón María del Carmen, María Teresa Mota-González, Guadalupe Vázquez-Mejía y Reyna María Guadalupe Fonseca-Montes de Oca (2008b) "Absorción de Fe por lirio acuático: Influencia del pH inicial" en *Memorias del VII Congreso Internacional, XIII Congreso Nacional y III Congreso Regional de Ciencias Ambientales*. Cd. Obregón, México (en CD, sin número de página).
- Jiménez-Moleón María del Carmen, María Teresa Mota-González y Jorge Antonio Ascencio (2010a) "Manganese absorption by water hyacinth and its study as a raw material in nanotechnology" en *Water pollution X*, 135, 243-252.
- Jiménez-Moleón María del Carmen, María Teresa Mota-González y Jorge Antonio Ascencio (2010b) "Manganese absorption by water hyacinth and its study as a raw material in nanotechnology" en *Transactions on Ecology and Environment*, 135, 243-252.
- Kvesitadze George, Gia Khatishashvili, Tinatin Sadunishvili, Jeremy J. Ramsden (2006) "Biochemical mechanisms of detoxification in higher plants: Basis of phytoremediation", Springer, USA.
- Lessmann Dieter. Curso "Freshwater Restoration Ecology" (23 al 27 febrero 2009) Salazar, México.
- Lima Lázaro, Susana Olivares, Isaida Columbie, Daniel De la Rosa y Reinaldo Gil (2005) "Niveles de plomo, zinc, cadmio y cobre en el río Almendares, Ciudad Habana, Cuba" en *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(3), 115-124.
- Malik Anushree (2007) "Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth" en *Environment International*, 33, 122-138.

- Marschner Petra (2011) "Marschner's Mineral nutrition of higher plants".3rd ed. Academic Press, USA.
- Mendoza D. G. y R. Moreno (2006) "Control of glutathione and phytochelatin synthesis under cadmium stress. Pathway modeling for plants" en *Journal of Theoretical Biology*, 238, 919-936
- Mirkin Chad A. y T. Andrew Taton (2000) "Materials chemistry: semiconductors meet biology" en *Nature*, 405, 626-627
- Moran, P. (2006) "Water nutrients, plant nutrients on indicators of biological control on water hyacinth at Texas field sites" en *Journal of Aquatic Plant Management*, 44, 109-114.
- Olivares Elizabeth y Giussepe Colonnello (2000) "Salinity gradient in the Mánamo River, a dammed tributary of the Orinoco Delta, and its influence on the presence of *Eichhornia crassipes* and *Paspalum repens*" en *Interciencia*, 25, 242-248.
- Pernía Beatriz, Andrea de Sousa, Rosa Reyes y Marisol Castrillo (2008) "Biomarcadores de contaminación por cadmio" en *Interciencia*, 33(2), 112-119.
- Quiroz Agustín, María Guadalupe Miranda y Antonio Lot (2008) "Estudio comparativo de algunas variables fisicoquímicas del agua en canales secundarios de Xochimilco con y sin *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms Laubach" en *A*, 25, 127-133.
- Rodríguez C y P.D. Jansen (2005) "The effect of water hyacinths for wastewater treatment under Cuban climatic conditions" en *Water Science and Technology*, 51(12), 275-282.
- Rosano Genoveva, Pedro Ávila, Guadalupe Zavala, Patricia Santiago, Gerardo Canizal y Jorge A. Ascencio (2007) "Inorganic nanoparticles induced naturally in water hyacinth: structural y chemical study" en *Journal of Bionanoscience*, 1, 51-59.
- Smeets Karen, Ann Cuypers, Ann Lambrechts, Brahim Semane, Peter Hoet, André Van Laere y Jaco Vangronsveld (2005) "Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application" en *Plant Physiology and Biochemistry*, 43, 437-444.
- Soltan M. E. y M.N. Rashed (2003) "Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations" en *Advances in Environmental Research*, 7, 321-334.
- Sooknah Reeta D. y Ann N. Wilkie (2004) "Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater" en *Ecological Engineering*, 22, 27-42.
- Tiwari Suchi, Savita Dixit, y Neelam Verma (2007) "An effective means of biofiltration of heavy metal contaminate water bodies using aquatic weed *Eichhornia crassipes*" en *Environmental Monitoring and Assessment*, 129, 253-256.

Wang Min, Jinhua Zou
mium accumulator
Bioresource Technolog
Weber Michael, Emik
Stephan Clemens (2
and Arabidopsis hal
and other genes as
37, 269-281.

Zarazúa Graciela (2008)
metales pesados Cr, Ni
Curso Alto del Río Le

of higher plants".3rd ed.

and phytochelatin synthe-
 en Journal of Theoretical

try: semiconductors meet

tors of biological control
 atic Plant Management,

gradient in the Mánamo
 influence on the presence
 iencia, 25, 242–248.

trillo (2008) "Biomarca-
 (2), 112-119.

(2008) "Estudio compa-
 canales secundarios de
 olms Laubach" en A, 25,

yacinths for wastewater
 science and Technology,

antiago, Gerardo Canizal
 duced naturally in water
 nanoscience, 1, 51–59.

ie, Peter Hoet, André Van
 e stress and antioxidative
 en Plant Physiology and

ie survival of water hya-
 ations" en Advances in

oval by floating aquatic
 airy manure wastewater"

ffective means of biofil-
 quatic weed *Eichhornia*
 nt, 129, 253–256.

Wang Min, Jinhua Zou, Xuchuan Duan, Wusheng Jiang y Donghua Liu (2007) "Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.)" en *Bioresource Technology*, 98, 82-88.

Weber Michael, Emiko Harada, Christoph Vess, Edda von Roepenack-Lahaye y Stephan Clemens (2004) "Comparative microarray analysis of *Arabidopsis thaliana* and *Arabidopsis halleri* roots identifies nicotianamine synthase, a ZIP transporter and other genes as potential metal hyperaccumulation factors" en *Plant Journal*, 37, 269-281.

Zarazúa Graciela (2008) "Evaluación de las contribuciones naturales y antropogénicas de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb y su distribución en el agua y sedimento en el Curso Alto del Río Lerma". Tesis de Doctorado. CIRA-UAEM, México.

Avances en ciencia del agua de Cheikh Fall, se terminó de imprimir en Enero de 2015, en los talleres de Editorial CIGOME, S. A. de C. V., Vialidad Alfredo del Mazó núm. 1524, ex. Hacienda La Magdalena, C. P. 50010, Toluca, México.

El tiraje consta de 300 ejemplares