

## EVALUACIÓN DE LOS METALES PESADOS Cr, Mn, Fe, Cu, Zn Y Pb EN SOMBRERILLO DE AGUA (*Hydrocotyle ranunculoides*) DEL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, MÉXICO

Graciela ZARAZÚA<sup>1\*</sup>, Pedro ÁVILA-PÉREZ<sup>1</sup>, Samuel TEJEDA<sup>1</sup>, Myriam VALDIVIA-BARRIENTOS<sup>2</sup>, Carmen ZEPEDA-GÓMEZ<sup>3</sup> y Guadalupe MACEDO-MIRANDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Gerencia de Ciencias Ambientales, Apartado Postal 18-1027, México D.F., C.P. 11801, México

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Toluca

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México

\*Autora responsable: [graciela.zarazua@inin.gob.mx](mailto:graciela.zarazua@inin.gob.mx)

(Recibido junio 2012, aceptado junio 2013)

Palabras clave: metales pesados, bioacumulación, plantas acuáticas, río Lerma

### RESUMEN

El río Lerma es uno de los cuerpos de agua más contaminados de México y presenta baja biodiversidad, en éste se desarrollan plantas acuáticas resistentes a la contaminación. En este trabajo se evaluaron los factores de bioacumulación (FBA) de los metales Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en las partes aéreas y sumergidas del sombrerillo de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) del curso alto del río Lerma. Se tomaron muestras de agua y *H. ranunculoides* en seis sitios del río, se analizaron por la técnica de espectrometría de emisión óptica de plasma (ICP-OES). Los resultados muestran que el Zn y Fe presentaron los FBA más altos seguido del Cu, Mn, Cr y Pb. Con excepción del Zn, los FBA fueron más altos en las estructuras sumergidas de la planta, lo que demuestra una baja movilidad para los metales analizados. Como resultado de este estudio se puede considerar que *H. ranunculoides* es un buen indicador de contaminación por metales en cuerpos de agua.

Keys words: heavy metals, bioaccumulation, aquatic plants, Lerma river

### ABSTRACT

The Lerma river is one of the most polluted water bodies in Mexico, it presents low biodiversity and lets grow up aquatic plants resistant to the pollution. The aim of this work was to evaluate the concentration and bioaccumulation factors (BAF) of Cr, Mn, Fe, Cu, Zn and Pb in aerial and submerged structures of water pennywort (*Hydrocotyle ranunculoides*) from the upper course of the Lerma river (UCLR). Inductively coupled plasma –optical emission spectrometry was used to determine the concentration of heavy metals in water and *H. ranunculoides*. Results show that the BAF of Fe and Zn were higher than those of Cu, Mn, Cr and Pb; with the exception of Zn, BAF were higher in the submerged structures of the plant, which shows low mobility of analyzed metals. As a result of this study *H. ranunculoides* can be considered as good indicator of metal pollution in water bodies.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural que en las últimas décadas se ha sobreexplotado y utilizado como un medio rápido y barato para deshacerse de desechos ya que en los cuerpos de agua se vierte una gran cantidad de aguas residuales sin tratamiento. Los principales contaminantes que modifican la calidad natural de las corrientes de agua son: materia orgánica, que ocasiona la disminución del oxígeno disuelto, nutrientes, que provocan eutrofización, grasas y aceites, organismos patógenos, metales pesados, detergentes y plaguicidas entre otros, los cuales pueden afectar a la salud humana, y a la flora y fauna acuáticas (Ramos y Sepúlveda 2003).

El río Lerma es un cuerpo de agua que presenta una alta carga de contaminantes, incluyendo metales pesados como Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb, los cuales son considerados como los de mayor importancia ecológica y toxicológica (Zarazúa 2008). Debido a la contaminación que presenta su cauce desde la década de los años ochenta se declaró como zona inadecuada para la vida acuática y en la de los noventa se estimó que la contaminación en la zona había provocado la pérdida de plantas hidrófitas emergidas y sumergidas, así como de la vegetación microscópica y de la flotante (Gobierno del Estado de México 2000). Por lo anterior, la biodiversidad que presenta es baja, permaneciendo en él únicamente especies resistentes a la contaminación (Zarazúa 2008, Tejeda *et al.* 2010), tales como: *Berula erecta*, *Eichhornia crassipes*, *Hydrocotyle ranunculoides*, *Juncus effusus*, *Lemna gibba* y *Schoenoplectus validus*. Siendo la especie *H. ranunculoides* una de las más abundantes y representativas de la zona (Valdivia 2011).

Debido a la cantidad y a la variedad de contaminantes en las aguas residuales el manejo de éstas se torna problemático por las grandes inversiones que deben realizarse en plantas de tratamiento con el fin de depurar esta agua antes de ser revertida a un cuerpo de agua. Ante esta problemática, ha surgido la necesidad de investigar técnicas innovadoras para el tratamiento de estos desechos, tales como los sistemas que combinan procesos físicos, químicos y biológicos (Celis *et al.* 2005). Dentro de los sistemas biológicos, el uso de vegetales acuáticos, se ha propuesto como tratamiento alternativo secundario o terciario de aguas residuales, ya que se ha demostrado que las macrófitas acuáticas son efectivas para reducir nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, metales, etc., ya que pueden desarrollarse en un rango de pH entre 4 y 10, toleran

temperaturas entre 5 y 30 °C (Mota 2008, Warriery Saroja 2008). Además, son bien conocidas por su capacidad para acumular metales por lo que son ampliamente utilizadas como bioindicadores de la calidad del agua y en estrategias de fitorremediación (Singh *et al.* 2003, Miretzky *et al.* 2004, Valitutto *et al.* 2006).

*Hydrocotyle ranunculoides* L.f. de nombre común sombrerillo de agua, es un vegetal acuático perenne de la familia Apiaceae, pertenece a la categoría de las hidrófitas enraizadas emergentes; crece en aguas poco profundas tanto lénticas como lólicas, es resistente a la alta contaminación de la cual es un útil indicador, ya que se desarrolla mejor en cuerpos de agua con elevada concentración de materia orgánica, nitratos y fosfatos (Wang *et al.* 1997, Hussner y Lösh 2007).

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar los factores de bioacumulación para los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en sombrerillo de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) del curso alto del río Lerma.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestreo

El presente estudio se llevó a cabo en el curso alto del río Lerma (CARL), el cual se ubica abarcando desde la laguna de Almoloya hasta 9 km aguas abajo de la presa José Antonio Alzate (**Fig. 1**) (Gobierno del Estado de México 2000).

Las muestras se tomaron en mayo de 2010 (estiaje) en seis sitios del CARL, donde la presencia del *H. ranunculoides* era abundante (**Fig. 1**) (**Cuadro I**). Los vegetales se extrajeron desde la raíz, se colocaron en bolsas de polietileno y se transportaron al laboratorio para su procesamiento. A su vez en cada sitio se obtuvieron 20 litros de muestras compuestas de agua superficial, las cuales fueron colectadas con un muestreador tipo *Grab*, de las que se tomó un litro para la determinación de metales totales, que es la suma de las concentración de metales en ambas fracciones de una muestra de agua, disueltos y suspendidos, y otro para la determinación de metales disueltos o solubles, que son aquellos que se encuentran en disolución en muestras no acidificadas o en estado coloidal que pasan a través de una membrana de poro de 0.45 micras (SCFI 2001), los cuales se colocaron en frascos de polietileno previamente acondicionado (Zarazúa 2008). Todas las muestras se conservaron a 4 °C hasta su procesamiento. Los parámetros físico-químicos de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica del agua se determinaron *in situ* con un equipo portátil Hach.

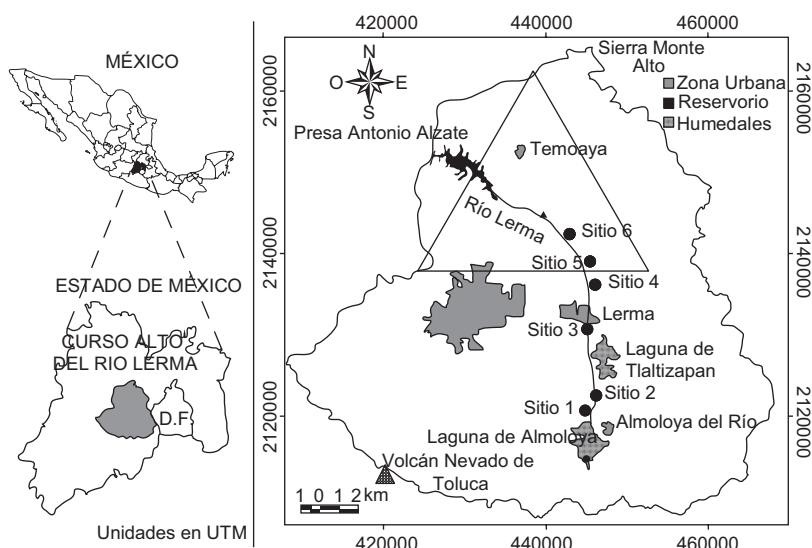


Fig. 1. Ubicación del Curso Alto del Río Lerma y distribución de los sitios de muestreo de *Hydrocotyle ranunculoides*

CUADRO I. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO DE *Hydrocotyle ranunculoides* EN EL CARL

Número	Sitio	Latitud Norte	Longitud Oeste
1 <sup>(R)</sup>	Tenango	19° 10' 43"	99° 31' 01"
2 <sup>(R)</sup>	Mezapa	19° 11' 11"	99° 30' 51"
3 <sup>(R)</sup>	Tultepec	19° 19' 06"	99° 31' 11"
4 <sup>(T)</sup>	Ameyalco	19° 19' 05"	99° 31' 16"
5 <sup>(T)</sup>	Atarasquillo	19° 21' 41"	99° 32' 12"
6 <sup>(T)</sup>	Xonacatlán	19° 22' 28"	99° 32' 36"

<sup>(R)</sup>Sobre el río

<sup>(T)</sup>Tributario al río

**Preparación de las muestras**

*Agua*

Para la determinación de metales totales las muestras sin filtrar se preservaron con ácido nítrico ultra puro, hasta llevarlas a un pH ≤ 2 y se sometieron a un proceso de digestión acelerada por microondas en un horno de microondas CEM® modelo MarsX. Las muestras en solución se aforaron a 50 mL con agua desmineralizada y se analizaron por la técnica de espectrometría de emisión óptica de plasma (ICP-OES). Con el objeto de determinar los metales solubles, se procedió a separar la fracción soluble de la particulada, para lo cual un volumen de 500 mL se filtró a través de un filtro Millipore de 0.45 µm, el filtrado que corresponde a la fracción soluble se fijó con ácido nítrico ultra puro y se procesó de igual manera que para los metales totales.

*Hydrocotyle ranunculoides*

Las muestras de sombrerillo de agua se lavaron

con agua potable hasta la eliminación completa de residuos y se separaron en dos partes, aérea y sumergida, a las dos se les realizó un segundo lavado con agua desmineralizada y se secaron por liofilización. Posteriormente se molieron, homogeneizaron y una submuestra de 500 mg se sometió a un proceso de digestión ácida acelerada por microondas. Las muestras en solución se aforaron a 25 mL con agua desmineralizada y se analizaron por la técnica de ICP-OES.

**Análisis de muestras**

Con el propósito de determinar la concentración de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, y Pb en las fracciones total y soluble del agua, así como en las estructuras aéreas y sumergidas de la planta acuática *H. ranunculoides* las muestras se analizaron por triplicado empleando equipo marca Thermo Jarrell Ash modelo Atomscan Advantage, con plasma tipo axial y un fototubo multiplicador, con condiciones de operación de 1350 KW de potencia, 30 psi de presión, 100 rpm y un flujo de inyección de 1.85 mL/min. La cuantificación de los metales se efectuó con curvas de calibración.

Aplicando el programa Statgraphics® V. 5 Plus los datos obtenidos se procesaron para obtener la media, desviación estándar, varianza y tipo de distribución de los datos obtenidos (normal o no normal). Con el fin de establecer si existían o no diferencias significativas espaciales en la concentración de los metales en estudio se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) Los análisis de varianza se realizaron con un nivel de confianza del 95 % (α=0.05).

**CUADRO II.** VALORES MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO DE Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn Y Pb PRESENTES EN LA FRACCIÓN TOTAL EN EL AGUA DEL CARL. CONCENTRACIONES DADAS EN µg/L

	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Valor mínimo	< 9	540	1050	9	41	< 40
Valor máximo	25	1420	8920	30	157	193
Valor promedio	14	1410	4500	15	97	70
LMPva (SEDUE 1989)	50	NR	1000	50	20	30
Valor máximo / LMPva	0.50	NA	8.92	0.60	7.85	6.4
Valor promedio / LMPva	0.28		1.05	0.30	2.05	1.43

NR: No reportado; NA: No aplica

### Cálculo de los factores de bioacumulación

El factor de bioacumulación (FBA) se obtuvo al dividir la concentración del metal presente en *H. ranunculoides* entre la concentración del metal presente en el medio, según la ecuación 1 (Cordes et al. 2000, Wei et al. 2008).

$$FBA = A / B \quad (1)$$

Donde: A= Concentración total del metal (sumergido y aéreo) en *H. ranunculoides* (mg/Kg); B= Concentración total del metal en agua (mg/L).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Parámetros fisicoquímicos

El pH del agua varió entre 5.9 y 7.1, la temperatura entre 11 y 21 °C, la conductividad eléctrica entre 562 y 820 µS/cm y el oxígeno disuelto entre 0.30 y 0.75 mg/L. Estos resultados concuerdan con los reportados por Hinojosa (2006), Carreño (2008), Zarazúa (2008), Tejeda (2011) y Valdivia (2011), quienes concluyen que el CARL es un cuerpo de agua en condiciones de avanzada eutrofización debido a las condiciones anóxicas ( $OD \leq 1$ ), la elevada concentración de sólidos (alta turbidez y poca transparencia) y las altas cargas de materia orgánica que recibe (350 946 toneladas/año), lo que ocasiona la presencia de plantas acuáticas consideradas como indicadoras de eutrofización, entre ellas, *Eichhornia crassipes*, *Lemna gibba*, *Hydrocotyle ranunculoides*, etc. (Tejeda et al. 2010, Tejeda 2011).

El desarrollo de *H. ranunculoides* bajo estas condiciones concuerda con lo mencionado por Ramírez et al. (1982), Deng et al. (2004) y Husser y Lösh (2007) quienes documentaron que esta especie es capaz de desarrollarse en cuerpos de agua con altas concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y de materia orgánica y a diferencia del lirio acuático

(*Eichhornia crassipes*) es resistente a las heladas, lo cual fue observado en las visitas de campo.

### Calidad analítica de los resultados

Como testigo de calidad interno se analizaron los siguientes materiales de referencia: para agua, "IAEA-CU-2009-002", International Agency Energy Atomic (IAEA) y para *H. ranunculoides* BCR-60: "Trace elements in an aquatic plant (*Lagorisiphon major*)" Community Bureau of reference (BCR). Los porcentajes de recuperación fueron mayores al 95 %, lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados analíticos obtenidos.

### Concentración de metales en agua

Los cuadros II y III muestran las concentraciones mínimas, las máximas y el promedio obtenidos para los metales Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb en la fracción total y soluble del agua, así como los límites máximos permisibles establecidos en los Criterios Ecológicos para la protección de la vida acuática (SEDUE 1989). La concentración promedio de metales totales en el agua del CARL presentó la siguiente tendencia:

$$Fe > Mn > Zn > Pb > Cr > Cu$$

Como se puede observar en el cuadro II en la fracción total, el Fe rebasa casi en nueve veces el LMP para la protección de la vida acuática, el Zn en casi ocho veces y el Pb en seis veces.

**CUADRO III.** VALORES MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO DE Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn Y Pb PRESENTES EN LA FRACCIÓN SOLUBLE EN EL AGUA DEL CARL. CONCENTRACIONES DADAS EN µg/L

Valores	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Mínimo	< 9	320	110	< 4	20	< 40
Máximo	< 9	1370	320	< 4	58	< 40
Promedio	< 9	810	200	< 4	36	< 40

**CUADRO IV.** VALORES MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO DE Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn Y Pb PRESENTES EN LAS ESTRUCTURAS AÉREAS Y SUMERGIDAS DE *H. ranunculoides* DEL CARL. CONCENTRACIONES DADAS EN mg/kg

	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Valores	Estructuras aéreas					
Mínimo	0.73	456	266	2.73	67	< 1.1
Máximo	2.57	657	1957	15.80	160	< 1.1
Promedio	1.18	541	816	7.36	103	< 1.1
Valores	Estructuras sumergidas					
Mínimo	6.44	997	2282	12.03	91	3.29
Máximo	15.76	4324	20268	30.37	172	7.70
Promedio	12.08	1752	8929	21.53	126	5.27
% Acumulado en las estructuras sumergidas	91	76	91	74	55	70

En la fracción soluble los metales están más biodisponibles para incorporarse a cadenas tróficas. Las condiciones anóxicas en un cuerpo de agua como las del CARL favorecen su forma soluble y por lo tanto la biodisponible de algunos metales como es el caso del manganeso (Zarazúa 2008), el cual presentó las concentraciones más altas en la fracción soluble (**Cuadro III**).

Los resultados del análisis de varianza para determinar las diferencias espaciales de los metales en agua muestran que en general para los metales en la fracción soluble sólo hay diferencia temporal para el Fe y Mn, mientras que en el agua total en general la concentración de metales es estadísticamente diferente en todos los sitios de muestreo ( $\alpha \leq 0.05$ )

#### Concentración de metales en *H. ranunculoides*

En el **cuadro IV** se muestran las concentraciones mínima, máxima y promedio para las estructuras áreas y sumergidas de *H. ranunculoides*. La concentración promedio de los metales en ambas partes (aérea y sumergida) presentó la siguiente tendencia:

Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Pb

Como se puede observar en el **cuadro IV**, los metales en estudio, a excepción del Zn, se concentraron en mayor proporción en las estructuras sumergidas ( $\geq 70\%$ ), lo cual se debe a que las macrófitas acuáticas como *H. ranunculoides* presentan en sus raíces un sistema fibroso con una gran área de contacto que les permite acumular grandes cantidades de metales. De esta manera pueden actuar como una primera barrera y adsorber y retener metales considerados como no esenciales o tóxicos así como algunos micronutrientes (Mejare y Bülow 2001, Lu *et al.* 2004, Hasan *et al.* 2007, Olivares *et al.* 2007); estos resultados indican

que *H. ranunculoides* puede ser un buen indicador de contaminación por metales en cuerpos de agua.

Los ejemplares de *H. ranunculoides* colectados en los sitios de Xonacatlán y Tenango presentaron la mayor concentración de metales y fueron estadísticamente diferentes a los de los demás sitios ( $\alpha \leq 0.05$ ). De acuerdo con los resultados reportados por Valdivia (2011) estos sitios son los que presentaron una mayor concentración de materia orgánica, medida como DBO5 y DQO y pH ligeramente ácido (5.9 - 6.3) lo cual puede favorecer la incorporación de metales. Por otro lado fueron los sitios con la columna de agua más baja (<40 cm), observándose que las raíces del sombrerillo prácticamente estaban en contacto con el sedimento, que es la principal fuente de nitrógeno, fósforo y de algunos metales como el hierro (Wang *et al.* 1997, Zayed *et al.* 1998).

El análisis estadístico mostró que en general la concentración de los metales analizados en el sombrerillo de agua fue estadísticamente diferente entre los sitios de muestreo ( $\alpha \leq 0.05$ ).

#### Factores de bioacumulación

Como se puede observar en el **cuadro V**, los FBA en relación al Cr, Cu y Pb en la fracción soluble no se determinaron ya que la concentración en ésta fue menor al límite de detección, en cuanto a los otros metales la tendencia fue: Fe > Zn > Mn tanto en las estructuras aéreas como las sumergidas. Los FBA calculados en relación al metal total en el agua, presentaron la siguiente tendencia:

Estructuras aéreas:

Zn > Cu > Mn > Fe > Cr > Pb

Estructuras sumergidas:

Fe > Cu > Mn > Zn > Cr > Pb

**CUADRO V.** FACTORES DE BIOACUMULACIÓN PARA LAS ESTRUCTURAS AÉREAS Y SUMERGIDAS DE *H. ranunculoides* CON RELACIÓN A LA CONCENTRACIÓN DE METALES SOLUBLES Y TOTALES DEL AGUA DEL CARL

Metal	Estructura	Metales solubles en agua			Metales totales en agua		
		Valor mínimo	Valor máximo	Valor medio	Valor medio	Valor mínimo	Valor máximo
Cr	Aérea	ND	ND	ND	105	29	214
	Sumergida	ND	ND	ND	962	509	1 500
Mn	Aérea	391	1 841	829	514	189	1 091
	Sumergida	942	6 756	2 736	1 546	456	3 045
Fe	Aérea	1 267	17 791	5 275	274	35	534
	Sumergida	10 867	184 255	56 616	3 018	297	6 177
Cu	Aérea	ND	ND	ND	665	170	1 756
	Sumergida	ND	ND	ND	1 843	547	3 378
Zn	Aérea	1 489	4 900	3 136	1 226	541	1 854
	Sumergida	2 111	6 000	3 863	1 493	764	2 220
Pb	Aérea	ND	ND	ND	21	6	26
	Sumergida	ND	ND	ND	97	37	179

ND: No determinado

De manera general, los FBA muestran que el sombrerillo de agua acumula en mayor proporción los metales esenciales (Mn, Fe, Cu y Zn) y en menor a los no esenciales (Cr y Pb), lo cual es un reflejo de las necesidades metabólicas de la planta (Wang *et al.* 1997).

A excepción del Zn los metales analizados se acumularon principalmente en las estructuras sumergidas, lo que concuerda con los resultados encontrados por varios autores como Vesik *et al.* (1999) y Lu *et al.* (2004), quienes notaron que el Zn es uno de los metales más móviles, posiblemente porque forma parte de las bioenzimas del crecimiento; el Cu es otro metal metabólicamente importante, que forma parte de las enzimas para el transporte de electrones, pero las macrófitas acuáticas presentan una fuerte barrera de exclusión para él, por lo que se acumula principalmente en el sistema fibroso de las raíces (Wang *et al.* 1997).

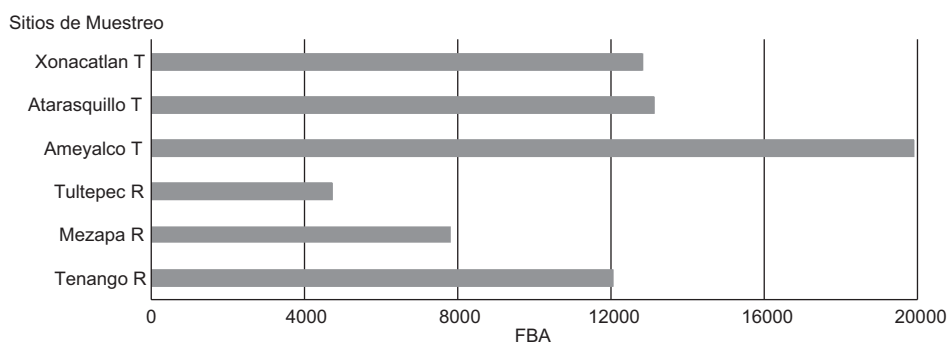
Los resultados de los FBA calculados en relación con la fracción soluble mostraron valores más altos que los de la fracción total. Esto se debe a que los metales se encuentran en solución en la fracción soluble, por lo que se favorece su biomagnificación (Wang *et al.* 1997) y se muestra que el sombrerillo de agua puede ser considerado como opción altamente competitiva en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para extraer estos metales.

Existe una gran variedad de plantas acuáticas que se consideran acumuladoras y por tanto con potencial

de fitorremediación cuando presentan tolerancia hacia los metales. Esta tolerancia se puede evaluar mediante el factor de bioacumulación (Baker y Walker 1990). Existen diferentes criterios para considerar si un vegetal acuático es acumulador de metales, en el presente trabajo se consideró el criterio propuesto por Zayed *et al.* (1988) y Zhu *et al.* (1999), que indica que una planta acuática puede ser considerada hiperacumuladora si el FBA es  $\geq 1000$ . Considerando este criterio los resultados muestran que *H. ranunculoides* puede ser considerada como una planta hiperacumuladora excepto para el Pb, con FBA general  $< 100$  (**Cuadro V**).

Al analizar los resultados obtenidos de los FBA por sitio de muestro se observa que existen diferencias espaciales siendo el *H. ranunculoides* del sitio de Ameyalco el que en general más metal acumula seguido de Atarasquillo > Xonacatlán > Tenango > Mezapa > Tultepec (**Fig. 2**).

Estas diferencias espaciales indican que *H. ranunculoides* es un organismo que puede ser utilizado como indicador de contaminación por metales en cuerpos de agua ya que se detectaron diferencias entre los sitios analizados, lo cual concuerda con lo reportado para Zarazúa (2008) y Tejeda (2011), quienes encontraron que el CARL recibe aportes de diferente origen, natural, industrial y urbano y que la concentración de metales y la calidad del agua presentan diferencias estadísticas a lo largo del curso.



R: Sobre el río T: Tributario al río

Fig. 2. Suma del factor de bioacumulación de cada metal por sitio de muestreo de *Hydrocotyle ranunculoides* del CARL

## CONCLUSIONES

En el agua del CARL la concentración de Fe, Zn y Pb rebasa el LMP para la protección de la vida acuática. Así mismo, el agua presentó condiciones de anoxia, de hipertrofia y de eutrofización, sin embargo lo anterior no fue un factor limitante para el crecimiento de *H. ranunculoides*, considerándose así una especie capaz de desarrollarse en cuerpos de agua con problemas de contaminación.

En general *H. ranunculoides* tiene la capacidad de concentrar ( $\geq 70\%$ ) y bioacumular metales pesados principalmente en las estructuras sumergidas.

El Zn puede considerarse como el metal más móvil, ya que se bioacumula tanto en las estructuras sumergidas como en las aéreas.

*H. ranunculoides* presentó los FBA más altos para los metales esenciales, Fe, Zn, Cu y Mn y fue menor para los no esenciales, Cr y Pb.

*H. ranunculoides*, se clasificó como una planta hiperacumuladora al presentar  $FBA > 1000$ , por lo que podría ser utilizado con fines de fitorremediación.

Por lo anterior *H. ranunculoides* puede ser considerado como una buena alternativa para ser utilizado como indicador de contaminación por metales en cuerpos de agua.

## REFERENCIAS

Baker A.J. y Walker P.L. (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. En: *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects* (A.J. Shaw, Ed.). CRC, Boca Raton, USA, pp. 155-177.

Carreño C. (2008). Presencia y distribución de los compuestos orgánicos persistentes en agua y sedimento del Curso Alto del Río Lerma. Tesis de Doctorado.

Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México

Celis J., Junod J. y Sandoval M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Teoría, Ciencia, Arte y Humanidades* 14, 17-25.

Cordes K.B., Mehra A., Farago M.E. y Banerjee D.K. (2000). Uptake of Cd, Cu, Ni and Zn by the water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms from pulverized fuel ash (PFA) leachates and slurries. *Environ. Geochem. Health* 22, 297-316.

Deng, H., Yea Z.H. y Wong M.H. (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environ. Pollut.* 132, 29-40.

Gobierno del Estado de México (2000). Atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma. Tomo V: Industrial. Gobierno del Estado de México, Toluca, México. 353 pp.

Hasan S., Talat M. y Rai S. (2007). Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Bioresour. Technol.* 98, 918-928.

Hinojosa-Peña A. (2006). Diseño de una red estratégica de monitoreo para el Curso Alto del Río Lerma y su utilización en el estudio espacial y temporal de los parámetros físico-químicos. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Hussner A. y Lösch R. (2007). Growth and photosynthesis of *Hydrocotyle ranunculoides* L. fill in Central Europe. *Flora* 202, 653-660.

Lu X., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. y Homyok K. (2004). Removal of cadmium and zinc by water hyacinth. *Sci. Asia* 30, 93-103.

Mejare M. y Bülow L. (2001). Metal-binding proteins and peptides in bioremediation and phytoremediation of heavy metals. *Trends Biotech.* 19, 67-73.

- Miretzky P., Saralegui A. y Fernández A. (2004). Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals. *Chemosphere* 57, 997-1005.
- Olivares S., Lima L., De la Rosa D. y Graham D.W. (2007). Water hyacinths (*Eichhornia crassipes*) as indicator of heavy metal impact of a large landfill on the Almendares River near Havana, Cuba. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 79, 583-587.
- Ramírez C., Godoy R., Contreras D. y Stegmaier E. (1982). Guía de plantas acuáticas y palustres valdivianas. Facultad de Ciencias. Universidad Austral de Chile. Los Ríos, Chile. 72p.
- Ramos R., Sepúlveda R. y Villalobos F. (2003). El agua en el medio ambiente. Muestro y análisis. Plaza y Valdés. Baja California, México. 212 p.
- SEDUE (1989). CE-CCA-001/89. Criterios ecológicos de la calidad del agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación. México, 2 de Diciembre 2 de 1989.
- SCFI (2001). Norma Mexicana. NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-051-1981). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. México, 13 de Agosto de 2001.
- Singh V., Labana S., Pandey G., Budhiraja R. y Jain R. (2003). Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil. *App. Microbiol. Biotech.* 61, 405-412.
- Tejeda S., Zarazúa G., Ávila-Pérez P., Carapia-Morales L. y Martínez T. (2010). Total reflection X-ray fluorescence spectrometric determination of elements in water hyacinth from the Lerma River. *Spec. Acta Part B.* 65, 483-488.
- Tejeda S. (2011). Balance de masa de contaminantes inorgánicos y orgánicos en el Curso Alto del Río Lerma. Tesis de Doctorado. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- Valdivia M. (2011). Evaluación de la capacidad fitorremediadora a metales pesados de una especie vegetal del Curso Alto del Río Lerma. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- Valitutto R., Sella S., Silva-Filho E., Guimaraes R. y Miekeley N. (2006). Accumulation of metals in macrophytes from water reservoirs of a power supply plant, Rio de Janeiro State, Brazil. *Water Air Soil Pollut.* 178, 89-102.
- Vesk P., Nockolds C., Allaway W. (1999). Metal localization in water hyacinths roots from an urban wetland. *Plant Cell Environ.* 22, 149-158.
- Wang W., Gorsuch W. y Huges J. (1997). Plants for environmental studies. Lewis Publishers. New York, EUA. 563p.
- Wei S., Zhou Q. y Saha Q. (2008). Hiperaccumulative characteristics of weed species to heavy metals. *Water Air Soil Pollut.* 192, 173-181.
- Zarazúa G. (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 Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Zayed A., Gowthaman S. y Terry N. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I Duckweed. *J. Environ. Qual.* 27, 715-721.
- Zhu Y., Zayed A., Quan J., Souza M. y Terry N. (1999). Phytoremediation of trace elements by wetland plants: II Water hyacinth. *J. Environ. Qual.* 28, 339-344.