

Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de una empresa minera usando humedales artificiales

Cadmium and zinc removal from a mining reprocessing aqueous stream using artificial wetlands

Vianey Ruiz-López^{1*}, María del Refugio González-Sandoval¹, José Antonio Barrera-Godínez², Gabriela Moeller-Chávez³, Esperanza Ramírez-Camperos³, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa¹

¹Laboratorios 301, 302, 303, Conjunto E de la Facultad de Química, UNAM. Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Departamento de Ingeniería Química. Paseo de la Investigación Científica s/n. 04510 México, D.F. México. Teléfono: +52-55-5622-53-00 al 02, Fax: 5622-5303. *Correo-e (e-mail): vianeyruiz@gmail.com

²Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM

³Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México

RESUMEN

Los metales provenientes de diferentes procesos industriales presentes en efluentes pueden contaminar el medio ambiente causando daños como la muerte de flora y fauna, y/o enfermedades en los seres humanos. En la actualidad, varias investigaciones se han enfocado a encontrar un tratamiento eficiente para este tipo de contaminantes, sin embargo, sigue sin solucionarse el problema. Entre las opciones estudiadas se mencionan los humedales artificiales, los cuales se ha comprobado que son eficientes en la remoción de metales y otros contaminantes presentes en las aguas residuales de diversas industrias. Por ello, esta investigación se centró en probar la eficiencia de remoción de Cd y Zn contenidos en un agua residual de una industria minera, utilizando sistemas a escala de laboratorio que simulan un humedal artificial. Se utilizaron ocho reactores de PVC empacados con escoria volcánica (*tezontle*). Se adaptaron plantas acuáticas o hidrofítas (*Typha latifolia*) a las condiciones de laboratorio y se realizó el seguimiento analítico del proceso de remoción de metales, cuantificando las concentraciones de cadmio y zinc en los efluentes, así como también realizando la medición de pH y DQO_{soluble}. Los resultados obtenidos muestran valores de remoción del orden del 90% en los sistemas con plantas y del 40% en los sistemas sin plantas, para ambos metales. Además, se encontró que esta especie vegetal puede soportar las condiciones de acidez, características de este tipo de aguas residuales, y se comprobó que es una especie acumuladora de metales, ya que las concentraciones de metales acumuladas en la parte aérea fueron mayores en comparación con las encontradas en la zona radicular.

Palabras clave: Humedales artificiales, remoción, metales, aguas residuales, industria minera

Keywords: Constructed wetlands, removal, metals, wastewater, mining industry

*Autora a quien debe dirigirse la correspondencia
(Recibido: Febrero 25, 2010,
Aceptado: Junio 02, 2010)

ABSTRACT

Metals in different kind of industrial process effluents can pollute the environment causing damages, such as the death of flora and fauna, and/or diseases in humans. Currently, several investigations have focused on finding an effective treatment for these contaminants; however, the problem remains without solution. Among the different options studied, constructed wetlands have shown to be efficient in the removal of metals and other kind of contaminants present in wastewater from different industries. Therefore, this research focused on testing the removal efficiency of Cd and Zn, which are contained in a wastewater from a mining industry, using laboratory-scale systems that simulate a constructed wetland. Eight reactors of PVC, packed with volcanic scoria (*tezontle*) were used. Aquatic plants or hydrophytes (*Typha latifolia*) were adapted at the laboratory conditions and analytical monitoring was performed quantifying the cadmium and zinc concentrations in the effluents, as well as the pH and COD. The results show removal values of 90% in systems with plants and 40% in systems without plants for both metals. In addition, it was found that this plant species can withstand the acidic conditions characteristic of this kind of wastewater, and it was possible to demonstrate that it is a metal-accumulating plant species, because the concentrations of metals accumulated in the shoot were higher in comparison than those found in the root zone.

INTRODUCCIÓN

La creciente presencia de metales en formas químicas biodisponibles en el ambiente y su efecto negativo sobre los seres vivos genera la necesidad de encontrar tecnologías adecuadas que permitan su estabilización. Este es el caso de la industria minera, en la cual se generan efluentes muy ácidos con elevadas concentraciones de metales, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Cuando esta agua contaminada alcanza los cuerpos de agua aledaños,

pueden ocurrir alteraciones o daños en los ecosistemas presentes, ocasionando la muerte de flora y fauna y la contaminación de los recursos hídricos, los cuales pueden tornarse dañinos para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales concomitantes (Gamonal-Pajares, 2007; Sánchez, 1995). Entre las alternativas estudiadas para dar tratamiento a estos efluentes se encuentran los sistemas de humedales artificiales, los cuales están siendo utilizados en diferentes países para el tratamiento de aguas residuales conteniendo distintos metales, debido a las ventajas que presentan con respecto a otros métodos de tratamiento. Entre ellas se encuentran: sus bajos costos de operación y mantenimiento, su buena eficiencia de remoción de contaminantes, su tolerancia a cambios en cargas hidráulicas y biológicas y, los beneficios ecológicos que producen (Lara-B., 1999). La remoción o estabilización de los metales dependerá de la interacción entre los procesos de sedimentación, adsorción, intercambio catiónico, reacciones químicas o bioquímicas, que realicen los microorganismos y la planta junto con el medio de soporte, los cuales permitirán la formación de sulfuros metálicos y su precipitación y co-precipitación y la acumulación que se presente en los tejidos de las plantas y los microorganismos (Sheoran, 2006). De esta manera, el proceso completo se vuelve un tanto complejo y difícil de estudiar, por lo que se requiere de mayor investigación para conocer el efecto que tiene cada uno de los componentes del sistema en la remoción, no sólo de los metales biodisponibles, sino de todos los contaminantes presentes en las aguas residuales. Así pues, tomando en cuenta todas las ventajas que presentan los sistemas de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales, esta investigación tuvo como objetivo estudiar la eficiencia de remoción de cadmio y zinc que se puede obtener al someter a tratamiento el agua de reproceso de una empresa minera cooperante, ubicada en el Estado de México, en un sistema de laboratorio en condiciones relativamente controladas.

METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo de investigación, se construyeron ocho reactores de PVC de 15 cm de diámetro por 40 cm de alto, empacados con escoria volcánica (*tezontle*) con un tamaño de partícula promedio de 12-16 mm. En cuatro de estos reactores se sembraron 3 brotes de *Typha latifolia* (espadaña o tule) en cada uno, tratando de que tuvieran características similares para contar con unidades homogéneas. Los

sistemas construidos se muestran en la Figura 1. En los cuatro reactores restantes, únicamente se colocó el medio de soporte (*tezontle*), sin ningún tipo de vegetación, con la finalidad de observar el efecto de la planta o hidrofita en la remoción de los metales bajo estudio. A su vez, cuatro reactores (dos con planta y dos sin planta) se dosificaron de forma intermitente con una solución nutritiva de tipo mineral preparada con macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Zheng y col., 2005). Los cuatro reactores restantes se dosificaron con agua residual proveniente de una empresa minera ubicada en el Estado de México (Figura 2), conocida como agua de reproceso. En un principio el agua residual se diluyó con agua de la llave a una concentración del 50% durante dos semanas de experimentación, posteriormente se incrementó el volumen de agua residual utilizada para tener una concentración del 75% durante otras dos semanas más hasta, finalmente, aumentar la concentración al 100% durante otras dos semanas. Por lo tanto, se tuvo un tiempo total de experimentación de 6 semanas. El tiempo de residencia hidráulico que se utilizó fue de 48 horas, con una dosificación intermitente que adicionaba 2.5 L por reactor a un régimen de flujo vertical subsuperficial. Los reactores se ubicaron en un laboratorio cerrado a temperatura ambiente, relativamente constante ($22\pm 2^\circ\text{C}$), y sujetos a un periodo de iluminación-oscuridad de 16 h:8 h, empleando 14 lámparas fluorescentes de 15 Watts.

Se tomaron muestras tanto del influente como del efluente de los reactores para, posteriormente, hacer la medición de pH, $\text{DQO}_{\text{soluble}}$ y cuantificar las concentraciones de los metales solubles. Las mediciones de pH se realizaron de acuerdo con la normativa mexicana NMX-AA-25-1984 (DOF, 1984) utilizando un equipo de campo marca Corning Checkmate II. Para la determinación de la $\text{DQO}_{\text{soluble}}$ se utilizó el método a reflujo cerrado o método espectrofotométrico validado por la APHA-AWWA-WPCF (1992) y la norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001). Finalmente, la determinación del contenido de metales, tanto en el influente como en el efluente de los reactores, se realizó mediante espectrofotometría inducida con plasma, utilizando un equipo Perkin-Elmer Optima 4300DV Optical Emission Spectrometer con límites de detección de 0.001mg/L para cadmio y 0.003mg/L para zinc, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Previo al análisis, las muestras fueron filtradas a través de poros de 0.45 μm y acidificadas con HNO_3 concentrado. Todos los análisis se realizaron por triplicado. Una vez finalizada la experimentación, se extrajeron las hidrofitas para determinar el contenido



Figura 1. Sistemas de humedales artificiales utilizados



Figura 2. Punto de muestreo (presa de jales en la empresa minera cooperante)

de metales presentes en la parte aérea y en la raíz. Para ello, primeramente se lavaron perfectamente, se secaron y se convirtieron en cenizas. Posteriormente, estas cenizas fueron sometidas a una digestión con HCl 1N para la determinación de metales mediante espectrofotometría inducida de plasma. Los contenidos de metales de los microorganismos adheridos a las raíces y el material de empaque se consideraron despreciables en esta investigación debido a que únicamente se quería conocer el efecto del soporte y las plantas en la remoción de los metales. Los resultados experimentales

obtenidos fueron analizados mediante el paquete de computación Statgraphics Plus Versión 5.1, para corroborar la significancia de los valores obtenidos así como la correlación de los mismos con el tratamiento dado a cada reactor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del agua residual y solución nutritiva

En la Tabla 1 se presenta la caracterización del agua de reproceso proveniente de la mina cooperante y en la Tabla 2 se muestra la caracterización de la solución nutritiva que se utilizó durante esta experimentación. Los parámetros de mayor importancia en el agua de reproceso de la mina son el pH de 5.9, su alta concentración de sulfatos de 5730 mg/L y las altas concentraciones de metales que son característicos de aguas residuales y drenajes ácidos de minas. Además, se observa que las concentraciones de cadmio y zinc se encuentran por arriba de los límites máximos permitidos por la norma NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996), que en el caso del Cd estos límites van de 0.1 mg/L cuando se destina a uso público hasta 0.4 mg/L cuando se trata de uso en riego agrícola. Para el Zn los límites permisibles van de 10 a 20 mg/L. Por ello es importante realizar un tratamiento en el agua de reproceso de la empresa minera cooperante con la finalidad de evitar

posibles afectaciones al medio ambiente circundante, además de disminuir los problemas que se originan en el proceso de flotación utilizado para concentrar el cobre, plomo y zinc, debido a las altas concentraciones de metales que lleva el agua de reproceso (Pacheco-Gutiérrez, 2006).

Tabla 1
Caracterización del agua de reproceso de la empresa minera cooperante

Parámetro	Valor medido
Valor de pH	5.9
Temperatura (°C)	25.9
Conductividad eléctrica (µS/cm)	6150
Sulfatos (mg/L)	5730
DQO soluble (mg/L)	197
Sólidos totales (mg/L)	16790
Sólidos disueltos totales (mg/L)	9460
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	7330
Otros metales	Variable
Cd _{soluble} (mg/L)	0.309
Cd _{total} (mg/L)	0.188
Zn _{soluble} (mg/L)	23.60
Zn _{total} (mg/L)	19.98

Tabla 2
Concentraciones de macro y micronutrientes contenidos en la solución nutritiva mineral

Nutriente	mM	mg/L	mg metal de interés/L
NH ₄ H ₂ PO ₄	0.2	23.62	
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.4	98.79	
KNO ₃	3.0	303.60	
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.0002	0.050	0.069±0.019
H ₃ BO ₃	0.003	0.19	
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.0004	0.12	0.34±0.11
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0005	0.10	
CaCl ₂	1.0	115.61	
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·H ₂ O	0.001	1.52	
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.02	5.61	0.031±0.004

En cuanto a la solución nutritiva utilizada durante esta experimentación, ésta fue de tipo mineral conteniendo los principales macro y micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. Es importante mencionar que en ella no se adicionó cadmio lo cual pudo corroborarse con los análisis realizados.

Medición de pH

Dado que esta variable influye de manera crucial en los procesos de estabilización de los metales se llevó a cabo el seguimiento de ella a lo largo de la fase experimental. Se debe tener cuidado de que el pH varíe de 4 a 10, ya que éste es el rango de tolerancia de la vegetación utilizada en el desarrollo de la presente investigación. Por otro lado, el comportamiento de los metales pesados en los sistemas de humedales artificiales, así como su posible remoción, dependen de la biodisponibilidad (especiación) del metal que se desea remover y de la concentración en la solución. La reactividad de los metales y, por consecuencia, su biodisponibilidad, es mayor cuando el pH del sistema es bajo.

Esto se debe a la competencia existente entre los protones y los cationes metálicos por los ligandos orgánicos, lo que reduce su estabilidad (Schnoor, 1996). Por tal motivo, es necesario que se mantengan condiciones ácidas en los sistemas para poder tener la mayoría de estos metales de manera biodisponible para su remoción por medio de las plantas y microorganismos que forman parte del humedal artificial, cuidando que estas condiciones no lleguen a dañarlos.

En el caso de los reactores dosificados con solución nutritiva, los valores de pH del influente oscilaron entre 7.5 y 7.8, mientras que en el efluente hubo una disminución de este parámetro alcanzándose valores mínimos de 5.5 y máximos de 7.3. Para los reactores dosificados con agua de reproceso se observó que el pH se vuelve cada vez más ácido al aumentar la concentración en el influente, debido a que al final de la experimentación se trató el agua residual de la empresa minera sin diluir y a las condiciones bajo las cuales se almacenó el agua, las cuales no evitaron que se siguieran llevando a cabo algunas reacciones de oxidación en la misma. En las muestras tomadas de los efluentes de los reactores se midieron valores de pH mínimos de 3.5 y máximos de 6.2 (Figura 3).

La especie de vegetación utilizada (*Typha latifolia*) resiste condiciones de acidez mínimas de 4.0, tal como se mencionó en el párrafo anterior. En este caso se sobrepasaron estos límites y por ello se observaron algunos daños en los brotes que se sometieron a estas condiciones, sin llegar a ocasionarse la muerte de las plantas. No se encontraron diferencias significativas en cuanto a los sistemas de tratamiento con plantas y sin ellas (*pValue*: 0.9827, para un intervalo de confianza del 95%), lo cual indica que la planta y/o los microorganismos no ayudan a neutralizar el medio.

Determinación de DQO_{soluble}

Los resultados obtenidos de la medición de este parámetro permitieron constatar que el agua residual de la empresa minera contiene concentraciones muy altas de materia oxidable en comparación con la solución nutritiva, probablemente proveniente de los agentes espumantes adicionados a lo largo del proceso de separación (Pacheco-Gutiérrez, 2006). Para los reactores con solución nutritiva, el influente tenía una concentración de 60 mg DQO_{soluble}/L, obteniéndose concentraciones en el efluente de los reactores sin planta de alrededor de 20 a 40 mg/L y en los reactores con planta de 10 a 20 mg/L, indicando con ello que las plantas ayudan a la remoción de materia oxidante (en un 50% con respecto de los microorganismos que proliferan en ambos sistemas), debido a que las hidrofitas la utilizan como nutriente. De esta manera, los porcentajes de remoción promedio fueron de un 80% en los reactores con planta y de alrededor del 40% en promedio en los reactores sin planta, con diferencias significativas entre ambos tratamientos, tal y como se mencionó con anterioridad (*pValue*: 0.000, para un intervalo de confianza del 95%).

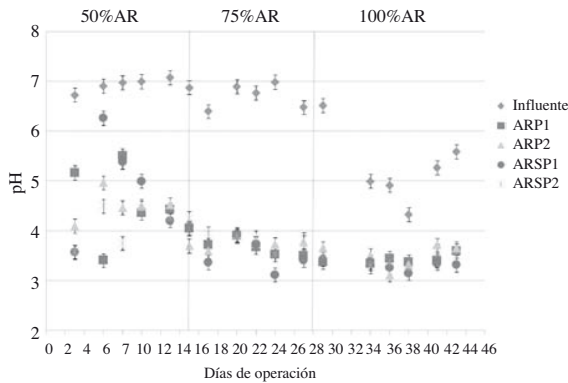


Figura 3. Valores de pH del influente y efluentes de los reactores dosificados con agua residual, AR, de la empresa minera (donde: ARP1 y ARP2 son los reactores con planta y ARSP1 y ARSP2 son los reactores sin planta)

En el caso de los reactores con agua residual de la empresa minera, la DQO_{soluble} aumentó conforme la concentración del influente fue en aumento, tal y como se esperaba (Figura 4).

Al igual que en el caso de los reactores con solución nutritiva, se observaron concentraciones menores

de este parámetro en los reactores con planta, en comparación con lo reactores sin planta. Los porcentajes de remoción fueron, en el primer caso, del 60% y, para el segundo caso, del 30%, con diferencias significativas entre ambos tratamientos (*pValue*: 0.000, intervalo de confianza del 95%), indicando nuevamente que las hidrofitas son responsables del 50% de la remoción.

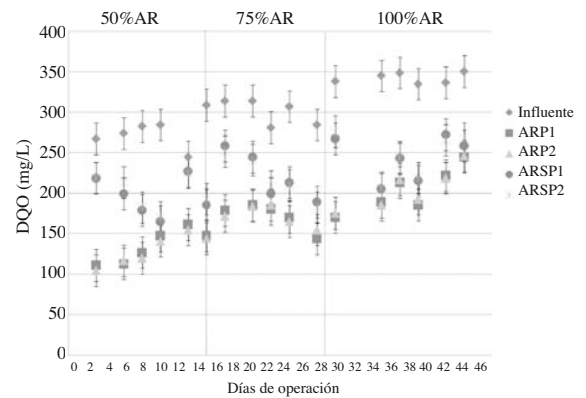


Figura 4. Valores de DQO_{soluble} medida en el influente y efluentes de los reactores dosificados con agua residual de la empresa minera (donde: ARP1 y ARP2 son los reactores con planta y ARSP1 y ARSP2 son los reactores sin planta)

Mediciones de Cd_{soluble} y de Zn_{soluble}

Debido a que la solución nutritiva no contenía cadmio, únicamente se muestran los resultados que se obtuvieron en el caso de los reactores con agua residual de la mina. En la Figura 5 se observan las concentraciones presentes en el influente y efluentes a lo largo de la experimentación. En el caso del cadmio y el zinc, ambos son metales que presentan altas solubilidades a valores de pH bajos cuando se encuentran en forma de hidróxidos o sulfuros (por ejemplo, el ZnS presenta una solubilidad de 0.001 mg/L a pH de 5 y el CdS tiene una solubilidad de 0.0008 mg/L a este mismo valor de pH) (EPA, 1985). Para poder identificar las posibles especies químicas de los metales presentes en los humedales artificiales, es necesario realizar un análisis detallado de todas las posibles reacciones que pueden estar ocurriendo en las diferentes partes que conforman estos sistemas, lo cual es sumamente complejo; por ello,

este aspecto no se contempló como parte de los alcances de la presente investigación.

Se obtuvieron concentraciones de $Cd_{soluble}$ de alrededor de 0.1 mg/L en el efluente cuando se alimentó el agua de reproceso al 50%, aumentando conforme se incrementó la concentración del agua residual hasta un valor de 0.35 mg/L en los reactores sin planta (esto debido a que la concentración del influente también aumentó).

Para los reactores con planta las concentraciones de los efluentes se mantuvieron aproximadamente constantes y con un valor de 0.03 mg/L. Los porcentajes de remoción fueron significativamente mayores en el caso de los reactores con planta con un valor promedio del 90% en comparación con los reactores sin planta en los que se obtuvo una remoción promedio del 40% (*pValue*: 0.000, al 95% de confianza). Esto podría indicar que las plantas y microorganismos en conjunto ayudan a remover y estabilizar las condiciones presentes en los sistemas experimentales en un 50% del total removido, lo cual puede ayudar a corroborar la aseveración encontrada en la literatura de que la especie *Typha latifolia* es acumuladora de Cd (Novotny y Olem, 1994).

En general se obtuvieron mejores porcentajes de remoción de metales en los sistemas con plantas en comparación con los sistemas sin plantas, ya que la vegetación de tipo emergente contribuye en los procesos de tratamiento de los humedales en formas variadas, tales como el hecho de que favorecen la sedimentación de sólidos suspendidos, pueden funcionar como soporte para los microorganismos, permiten la difusión de oxígeno de la parte aérea a la zona radicular ayudando a la aeración de los sistemas, generan un ambiente propicio en su rizosfera para el crecimiento y desarrollo de microorganismos y promueven la generación de una serie de reacciones químicas y bioquímicas que permiten la retención de los metales por el sedimento (Brix, 1994; Kadlec, 2000).

Para el caso del $Zn_{soluble}$, los reactores con solución nutritiva presentaron concentraciones muy bajas de este metal (de 0.2 mg/L a 1.2 mg/L), debido a que únicamente se incluye como uno de los micronutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales. Las concentraciones en los efluentes de los reactores son bajas al inicio del experimento, pero conforme transcurre el tiempo van en aumento (de 0.1 mg/L a 1 mg/L), lo que indica que el sistema tiene una capacidad limitada para estabilizar este metal y va acumulándose. Los porcentajes de remoción que se obtuvieron fueron de alrededor del 70% para los reactores con planta y del 50% para los reactores sin

planta, observándose diferencias significativas en ambos tratamientos (*pValue*: 0.000, al 95% de confianza).

Para los sistemas con agua residual, las concentraciones comenzaron siendo de alrededor de 13 mg/L cuando la concentración dosificada fue del 50%, aumentando a 15 mg/L al 75% y finalizando en 35 mg/L al 100%. Al igual que con el Cd, las concentraciones en los efluentes de los reactores con planta fueron menores que en los reactores sin planta, siendo de alrededor de 5 mg/L en el primer caso y 10 mg/L en el segundo. Además, se observó que, en los reactores sin planta, hubo un ligero aumento en la concentración de los efluentes al finalizar las 6 semanas de tratamiento, lo cual permite especular que existe una saturación del sistema por lo que ya no se remueve mayor cantidad del metal. Sin embargo, en los reactores con planta las concentraciones de los efluentes se mantuvieron aproximadamente constantes durante todo el tiempo de tratamiento (Figura 6). En este caso, el porcentaje de remoción en los reactores con planta fue del 80%, mientras que en los sistemas sin planta fue del 40%, en promedio, con diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p < 0.05$).

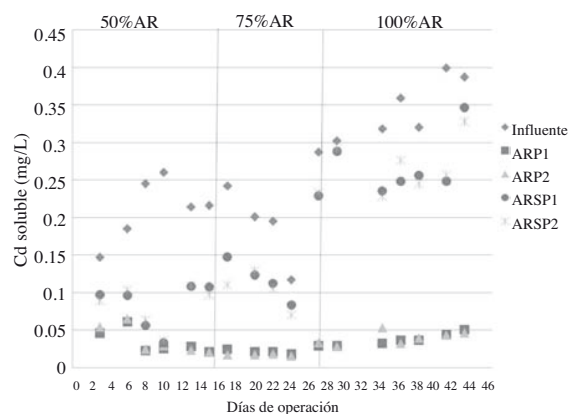


Figura 5. Concentraciones de $Cd_{soluble}$ en el influente y efluentes de los reactores dosificados con agua residual de la empresa minera (donde: ARP1 y ARP2 son los reactores con planta y ARSP1 y ARSP2 son los reactores sin planta)

Contenido de metales en las plantas

Una vez finalizada la experimentación se cuantificó la cantidad de metal contenida en la parte aérea y en la zona radicular de las plantas. Las concentraciones de metales acumuladas en la parte aérea de la especie vegetal fueron mayores en comparación con las encontradas en la zona

radicular (Tablas 3 y 4). De acuerdo con la literatura, las especies de vegetación emergente absorben el metal por medio de las raíces y posteriormente por un proceso de traslocación lo transportan a la parte aérea acumulándose en esta zona (Baker y Walker, 1990). Para que una especie se considere acumuladora de metales la relación entre la concentración de metal en su parte aérea y la concentración de metal en su zona radicular debe ser mayor a 1. En este caso, los cocientes dieron un valor de 1.39 en los sistemas con solución nutritiva y 8.54 en los sistemas con agua residual para el Zn, mientras que para el Cd el cociente fue de 2.44. Por lo tanto, la hidrofita *Typha latifolia* puede considerarse como una especie acumuladora de Cd y Zn, en las condiciones de estudio, lo cual ha sido demostrado en diversos trabajos de investigación (McNaughton y col., 1974; Taylor y Crowder, 1984).

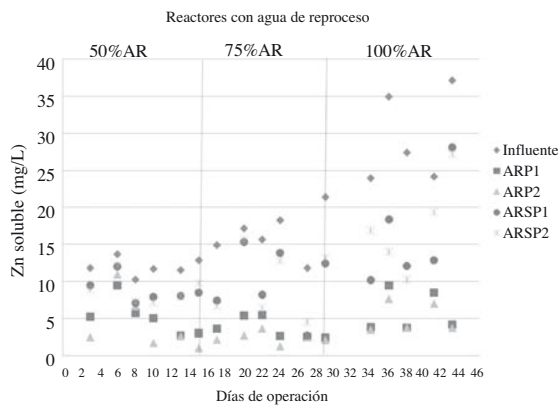


Figura 6. Concentraciones de Zn_{soluble} en el influente y efluentes de los reactores dosificados con agua residual de la empresa minera (donde: ARP1 y ARP2 son los reactores con planta y ARSP1 y ARSP2 son los reactores sin planta)

Tabla 3
Concentraciones de Cd y Zn acumuladas en la parte aérea de las hidrofítas

Muestra	Zn (mg/g b.s.)	% Zn	Cd (mg/g b.s.)	%Cd
SMP1	0.1229	0.012	0	0
SMP2	0.2604	0.026	0	0
ARP1	0.7583	0.076	0.0058	0.00058
ARP2	0.3484	0.035	0.0027	0.00027

Donde: SMP1 y SMP2: reactores con planta y solución nutritiva; ARP1 y ARP2: reactores con planta y agua residual de la empresa minera; b.s. base seca.

Tabla 4
Concentraciones de Cd y Zn acumuladas en la zona radicular de las hidrofítas

Muestra	Zn (mg/g b.s.)	% Zn	Cd (mg/g b.s.)	%Cd
SMP1	0.0456	0.005	0	0
SMP2	0.2307	0.023	0	0
ARP1	0.0597	0.006	0.00096	9.55E-05
ARP2	0.07	0.007	0.00251	0.00025

Donde: SMP1 y SMP2: reactores con planta y solución nutritiva; ARP1 y ARP2: reactores con planta y agua residual de la empresa minera; b.s. base seca

CONCLUSIONES

En la presente investigación se comprobó que los humedales artificiales pueden considerarse como una buena alternativa para la estabilización de aguas residuales con metales. Los porcentajes de remoción obtenidos fueron muy buenos, con concentraciones de cadmio y zinc en los efluentes de los reactores menores a los límites máximos permitidos por la normativa mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996). En el caso del cadmio se obtuvieron remociones del 90% en los sistemas con plantas y en los sistemas sin plantas del 40%.

Para el Zn las remociones alcanzadas fueron del 90% en los sistemas con planta mientras que en los sistemas sin planta se alcanzó un porcentaje de remoción del 50%, lo cual indica que la presencia de las plantas ayuda a aumentar la eficiencia de remoción del metal. Realizando los análisis de metales en las plantas, se encontró que éstas son acumuladores de metales, ya que la concentración de ambos metales fue mayor en la parte aérea en comparación con la concentración en la zona radicular, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura, siendo relevante en esta investigación el hecho de haber demostrado que este tipo de vegetación puede ser utilizado para tratar el agua de reproceso de esta empresa minera en particular. Durante el tiempo de experimentación (6 semanas), esta especie resistió las condiciones a las que fue sometida, presentando algunos daños por toxicidad (amarilleamiento de las hojas y tallo).

Será importante realizar experimentos a largo plazo para evaluar el desempeño de los sistemas, deseablemente en una planta piloto en la propia

empresa minera cooperante, con objeto de no tener que transportar el agua residual hasta la Ciudad de México. Las características de esta planta piloto dependerán del caudal a tratar, el terreno disponible, las condiciones climáticas del sitio, las especies de vegetación endémicas y tipo de humedal artificial que se desee instalar.

Si los resultados son exitosos a nivel piloto, se podrá recomendar esta ecotecnología para su uso en el tratamiento de aguas residuales con metales. La biomasa cosechada puede secarse al sol y aprovecharse su contenido calorífico para generar energía con su combustión y recuperar los metales en las cenizas.

NOMENCLATURA

ARP	Reactores con planta y agua residual de la empresa minera
ARSP	Reactores sin planta y agua residual de la empresa minera
b.s.	Base seca
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México
DGAPA-PAPIIT	Dirección General de Asuntos del Personal Académico-Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación e Investigación Tecnológica de la UNAM
DQO	Demanda química de oxígeno
FQ	Facultad de Química
pH	Potencial de hidrógeno
PVC	Cloruro de polivinilo, por sus siglas en inglés
SMP	Reactores con planta y solución nutritiva de metales
SMSP	Reactores sin planta y solución nutritiva de metales
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca de maestría recibida para la realización de este proyecto. Esta investigación fue financiada parcialmente con los Proyectos Clave IN-103403 y 105407 del Programa PAPIIT de la DGAPA de la UNAM y con el apoyo en la realización de los análisis de metales del Cand. Dr. Ciro Márquez de la FQ de la UNAM y de otros análisis por parte del Centro de Investigación de la empresa cooperante, así como de la transportación a y de la mina, tanto de las personas como del agua de reproceso.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA-AWWA-WPCF. 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation. Ediciones Díaz Santos, S.A. 17ª Ed. Madrid, España.
- Baker, A.J.M., Walker, P.L. 1990. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. En: *Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects*. Shaw, A.J., ed. CRC Press, 155-157. Boca Raton, FL, EEUU.
- Brix, H. 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.* 29:71-78.
- DOF. 2001. Norma Oficial Mexicana *NMX-AA-030-SCFI-2001*. Análisis de Agua- Determinación de la demanda química de oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México, D.F. México.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana *NOM-001-ECOL-1996*. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México, D.F. México.
- DOF. 1984. Norma Mexicana *NMX-AA-25-1984*. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación del pH, Método Potenciométrico. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México, D.F. México.
- EPA. 1985. *United States Environmental Protection Agency Handbook: Remedial action at waste disposal sites*. Washington, DC. EEUU.
- Gamonal-Pajares, P. 2007. *Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos*. Ecoamérica [Fecha de consulta: Mayo 2007]. Dirección electrónica: <http://www.ecoamerica.cl>.
- Kadlec, R.H. 2000. The inadequacy of first-order treatment wetland models. *Ecol. Eng.* 15:105-119.
- Lara-B., J.A. 1999. *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*. Dirección electrónica (redes internacionales): <http://www.geocities.com/jalarab>
- McNaughton, S.J., Folsom, T.C., Lee, T., Park, F., Price, C., Roeder, D., Schmitz, J., Stockwell, C. 1974. Heavy metal tolerance in *Typha latifolia* without the evolution of tolerant races. *Ecology*. 55:1163-1165.
- Novotny, V., Olem, H. 1994. *Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution*. Van Nostrand Reinhold, 1054 pp. Nueva York, NY. EEUU.
- Pacheco-Gutiérrez, L.A. 2006. Propuesta de reaprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando sistemas biológicos anaerobios. *Tesis de Maestría en Ingeniería Química (Procesos)*. UNAM, Facultad de Química. México, D.F. México.
- Sánchez, L.E. 1995. *Aspectos geológicos de protección ambiental*. UNESCO, Volumen I. Viena, Austria.
- Schnoor, D.M. 1996. Water quality variability in a Central Florida wetland receiving highway runoff. En *Water: Laws and Management*. Davis, F.E., ed. American Water Research Association. Pp. 7A-1-7A-11. Bethesda, MD. EEUU.
- Sheoran, A.S. 2006. Performance of three aquatic plant species in bench-scale acid mine drainage wetland test cells. *Mine Water and the Environment*. 25:23-36.
- Taylor, G.J., Crowder, A.A. 1984. Copper and nickel tolerance in *Typha latifolia* clones from contaminated and uncontaminated environments. *Canadian Journal of Botany*. 62:1304-1308.
- Zheng, J.S., Yang, J.L., Feng He, Y., Hui Yu, X., Zhang L., Feng You, J., Shen, R.F., Matsumoto, H. 2005. Immobilization of aluminium with phosphorus in roots is associated with high aluminium resistance in buckwheat. *Plant Physiology*. 138:297-303.