

## Estudio preliminar de la fitoremediación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua)

Guillermo Torres<sup>1</sup>, Abel E. Navarro<sup>2\*</sup>, Jaime Languasco<sup>1</sup>,  
Karol Campos<sup>1</sup> y Norma A. Cuizano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de Química Universidad Peruana Cayetano Heredia, Urb. Ingeniería, Lima, Perú.

<sup>2</sup>Chemistry Department, Graduate School of Arts and Science, New York University, New York, NY, US

Recibido 25 Noviembre 2006, revisado 16 Febrero 2007, aceptado 17 Febrero 2007

---

*Preliminary studies of divalent copper phytoremediation by Pistia stratioides (water lettuce)*

### Abstract

*Pistia stratioides* demonstrated that is able to decontaminate copper-containing residual-mining waters, removing up to 70% of Cu from aqueous solutions within 6 hours. The optimal conditions such as: hydroponics nutrients, pH, initial metal concentration and kinetics, at which the process is maximized; were determined. It is concluded that, heavy metal selectivity is due to their superior Lewis acidity compared to the small divalent cations (calcium, magnesium, etc.), which allows them to be easily inserted in plant's enzymatic and cellular systems.

**Keywords:** Phytoremediation, *Pistia stratioides*, Lewis acidity, copper, kinetics.

### Resumen

Se demuestra que *Pistia stratioides* es capaz de descontaminar aguas residuales conteniendo cobre (II), eliminándolo hasta un 70% de soluciones acuosas en un tiempo de 6 horas. Se determinaron las condiciones óptimas como: nutrientes hidropónicos, pH y solubilidad de metales. También se determinó la concentración inicial del metal y la cinética de eliminación a la que se maximiza el proceso. Se concluye que la selectividad por metales pesados se debe a su superior acidez de Lewis comparada con la de pequeños cationes divalentes (calcio, magnesio, etc.), la cual le permite fácilmente insertarse en sistemas celulares y enzimáticos de la planta.

**Palabras clave:** Fitoremediación, *Pistia stratioides*, acidez de Lewis, cobre, cinética.

---

### Introducción

Durante siglos el hombre ha explotado metales como oro, plata, cobre, cinc, cadmio, entre otros, que se extraen y refinan en más de 7000 compañías mineras y refinadoras del mundo entero. Por este mismo motivo, el agua es considerada con mucha razón la víctima más común del mal manejo de los residuos tóxicos generados por dicha industria (Nriagu et al.,

2004). Las diferentes propuestas tecnológicas han sido planteadas para corregir este tipo de contaminación (Navarro et al., 2004, Blanco et al. 2005), entre las más innovadoras resalta la fitoremediación (Garbisu et al., 2002, Salt et al., 1995).

El cobre es usado comercialmente para diversos fines, entre ellos la minería y la industria metal-mecánica. El cobre es un irritante del tracto gastrointestinal, pero

---

\* Autor para correspondencia

E-mail: aen234@nyu.edu ; Tel +011 646 2862082

generalmente no es peligroso para los humanos a concentraciones menores de 3mg/l. Sin embargo hay individuos que tienen un desorden en el metabolismo a causa del cobre llamado enfermedad de Wilson, los cuales pueden ser afectados a estas concentraciones. La restricción a 1mg/l de cobre en el agua potable ayuda a evitar estos problemas y también previene el sabor del cobre que se percibe a niveles más altos (Pankit y Bhavé, 2002). En aguas superficiales, el cobre es tóxico para las plantas acuáticas a concentraciones algunas veces más bajas que 1mg/l y con frecuencia ha sido usado como la sal de sulfato para controlar el crecimiento de las algas en los estanques de abastecimiento de agua. Las concentraciones que se aproximan a 1mg/l pueden ser tóxicas para algunos peces, en consecuencia, el cobre tiende a ser un peligro ambiental más para la salud humana (Brooks et al., 1981).

El término fitoremediación fue acuñado por el ruso Ilya Raskin y definido como el conjunto de tecnologías que ayudan a la recuperación de suelos y aguas contaminados mediante biomasa vegetal viviente (Raskin et al., 1994, Salt et al., 1994). Comprende el uso de plantas verdes, incluidas especies leñosas, para contener, eliminar o neutralizar compuestos orgánicos, elementos traza (Odjegba y Fasidi, 2004) o radio-nucleidos (Mkandawire et al., 2004) que pueden ser tóxicos en suelos o aguas por su rápida inserción en la cadena alimenticia humana. Fitoremediación incluye cualquier proceso biológico, químico o físico inducido por las plantas que promueve la absorción, secuestro, degradación y metabolismo de los contaminantes, ya sea por las mismas plantas o por microorganismos que se desarrollan en la rizosfera (Salt et al., 1995).

La absorción de elementos por medio de las raíces es la ruta más importante para el ingreso de los elementos trazas en las plantas, sin embargo se ha observado que otros tejidos también pueden absorber metales. Las primeras teorías sobre la nutrición de las plantas explicaban la absorción de las sales inorgánicas como un proceso de transporte pasivo al interior de la planta, el cual iba de la mano con la absorción del agua. Estas teorías fueron catalogadas como incompletas porque no explicaban claramente las diferencias entre el contenido de las sales de los tejidos de la planta y el medio en el cual crecían. Actualmente la teoría que se acepta considera la

absorción de sales como un proceso predominantemente activo y no pasivo. Una vez que las sales disueltas en solución han entrado en contacto con el sistema radicular, se inicia el proceso de adsorción. A este punto, el tamaño del ión metálico posee un factor preponderante en este proceso ya que a mayor tamaño, se presenta una mayor dificultad en atravesar las membranas celulares (Dushenkov y Raskin, 2000).

La capacidad de acumular metales no es característica común en la mayoría de las plantas, por el contrario es fruto de una respuesta evolutiva, ya que la ocurrencia en forma natural de niveles altos de metales en la biosfera es esporádica. Particularmente entre las plantas acumuladoras de metales, se han encontrado especies que poseen la capacidad de acumular cantidades extraordinarias que se elevan notablemente sobre los índices considerados como tóxicos para el reino vegetal (Shiny et al., 2004). A este tipo de plantas se le ha denominado hiperacumuladoras de metales, por ejemplo una planta será hiperacumuladora de cobre cuando sea >0.1% de cobre en materia seca de la hoja.

La necesidad y la capacidad de tolerancia de las distintas especies vegetales es variada, ocasionando que por cada especie se pueda establecer un rango de valores sobre los cuales comienzan a darse signos de toxicidad y la posibilidad que estos varíen con el desarrollo de la planta, su nutrición, las características de su entorno, etc. Es por ello que cuando se trata de indicar valores de concentraciones de metales tóxicos para las plantas, cada autor cita valores diferentes, pero por lo general cercanos.

El primer efecto directo de los metales cuando alcanzan las concentraciones tóxicas en la planta es un cambio en el balance iónico de la célula. Este desbalance se puede dar en la superficie celular al reemplazar el ión tóxico por otro ión de la célula o también puede suceder que el ión ingrese dentro de la célula y reemplace otros iones que son normalmente cofactores de enzimas u otros componentes de organelas celulares. Ante la posibilidad de estos desórdenes fisiológicos, todas las plantas han desarrollado una serie de respuestas para tolerar y por tanto sobrevivir hasta un cierto umbral de concentración de metal. El conjunto de las respuestas visibles forman lo que denominamos síntomas de estrés. Los síntomas causados por el exceso de

metales en las plantas son muchas veces comunes a los diversos metales. Los síntomas más comunes son una reducción del crecimiento y amarillamiento de las hojas.

En el presente trabajo se usó *Pistia stratioides* (Fig.1) que se encuentra presente en la Zona Reservada de los Pantanos de Villa y en los ríos y estanques de la Amazonía peruana causando molestias en la navegación y es conocida como maleza de mayor impacto económico en el mundo. Ante el peligro latente por la presencia de metales pesados en aguas residuales, se plantea el uso de *Pistia stratioides*, conocida como lechuga de agua, como fitoremediadora de sistemas acuáticos contaminados con cobre, determinando las condiciones óptimas para el metal y tolerancia de la planta como pH, cuyo efecto en la eliminación de metales ha sido ampliamente estudiada por Navarro et al. (2006A); concentración del metal y de nutrientes; en la cual se maximiza la capacidad de eliminación y la cinética del proceso de absorción del metal, con fines de rentabilidad y aplicabilidad a grandes escalas (Navarro et al., 2006B). El uso de sistemas naturales para la eliminación de contaminantes constituye un valioso aporte biotecnológico de bajo costo y de fácil aplicabilidad.

## Material y métodos

### Muestreo de campo

*Pistia stratioides*, conocida como lechuga de agua, crece y se conserva en forma silvestre en la Zona Reservada de los Pantanos de Villa en Lima, Perú durante todo el año. Se tomaron muestras de la planta en 20 puntos estratégicamente ubicados a diferentes distancias de la zona con la ayuda de guantes y reservorios de plástico. Se identificaron y seleccionaron plantas de similar tamaño y peso, las cuales fueron lavadas con agua potable para eliminar partículas sólidas y se trasladaron al laboratorio conservándose a temperatura ambiente en la misma agua de los Humedales de los Pantanos de Villa hasta su uso.

### Reactivos y Soluciones

Todas las sales y reactivos usados en el experimento fueron de grado analítico (J.T. Baker) y el reactivo cuVer fue adquirido de HACH. Las soluciones fueron preparadas con agua tipo I purificada por ósmosis reversa mediante el equipo Barnstead/Thermolyne (Dubuque IA) D2714, el cual proporciona agua con una conductividad de 18 mΩ. El pH de las soluciones fue ajustado usando



Fig. 1. Lechuga de agua (*Pistia stratioides*)

Tabla 1. Dosis óptima de nutrientes que maximiza el tiempo de vida de *Pistia stratioides* (Solución A: 300 g de superfosfato de calcio triple, 1070 g de nitrato de potasio y 700 g de nitrato de amonio en 10 l de solución; Solución B: 100 g de sulfato de magnesio, 30 g de fertilom combi y 3 g de ácido bórico en 5 l de solución).

SOLUCIÓN A <sup>1</sup>	SOLUCIÓN B <sup>1</sup>	SUPERVIVENCIA
5.0	2.0	1 día
2.5	1.0	2 días
2.0	1.0	2 días
1.5	1.0	2 días
1.0	0.5	23 días

<sup>1</sup> ml de solución por cada litro de agua

soluciones 1M de ácido nítrico o hidróxido de sodio, controlado por un pH metro Chem-Cadet 5986-25 Cole-Parmer.

#### *Estudios de Tolerancia y Fitoremediación*

Los estudios se realizaron por triplicado en piscinas de vidrio con 36 l de capacidad bajo agitación magnética a temperatura ambiente (23±1°C).

La concentración residual de cobre fue determinada por espectrometría visible mediante la formación de un complejo coloreado con el reactivo cuVer1 (bicinchoninato) con una máxima absorbancia a  $\lambda=560$  nm, en el intervalo lineal de 0 - 4 mg/l, medido con un espectrofotómetro HACH DR/2000.

#### *Determinación de la Dosis Óptima de nutrientes*

La planta se cultivó mediante la técnica hidropónica, por lo que se necesitaron soluciones nutritivas, constituidas por macro y micro nutrientes que la planta requiere para sobrevivir. Estas soluciones contienen 12 elementos esenciales: nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, azufre, magnesio, hierro, manganeso, boro, cinc, cloro y molibdeno. Se preparó la solución A (300g de superfosfato de calcio triple, 1070g de nitrato de potasio y 700g de nitrato de amonio) en 10 l de solución y la solución B (100g de sulfato de magnesio, 30g de fertilom combi y 3 de ácido bórico) en 5 l de solución.

Se diluyeron las soluciones A y B en diferente proporción en las piscinas de vidrio y se enrasaron con agua tipo I a 36 l, luego se colocó una planta de similar peso para la prueba de máxima tolerancia de nutrientes por cada piscina. Se determinó la

dosis óptima en función a si la planta lo toleraba o moría en función al tiempo. Se consideró muerte al fraccionamiento de la raíz del resto de la planta.

#### *Efecto del pH sobre la viabilidad de la planta y la solubilidad del metal*

Se colocó 1 planta en cada piscina conteniendo las soluciones de nutrientes calculadas anteriormente y se varió el pH de la solución resultante de 1 a 7 para estudiar el efecto del pH sobre la viabilidad de la planta

Para evaluar el efecto de la solubilidad del metal, se preparó soluciones con 1 mg/l de iones cobre (II) conteniendo las soluciones de nutrientes calculadas previamente y se varió el pH de 1 a 7 en intervalos de una unidad de pH. Se determinó el tiempo al cual se visualiza la presencia de precipitado en la solución.

#### *Determinación de la Concentración Óptima del Metal*

Se colocó una planta en cada piscina, conteniendo las soluciones nutritivas calculadas al pH óptimo variando la concentración de cobre (II) desde 1 a 9 mg/l. Se determinó la máxima tolerancia de la planta frente al metal, en función al fraccionamiento de la raíz.

#### *Cinética de Eliminación del Metal*

Se colocó una planta en cada piscina conteniendo la solución nutritiva al pH y concentración óptimos. Se agitó y se tomaron muestras de 3mL, las cuales fueron diluidas y cuantificadas. El pH fue medido durante cada toma de muestra.

## Resultados y discusión

### *Dosis Óptima de Nutrientes*

En la Tabla 1 se puede observar que la adición excesiva de nutrientes conlleva a un daño en el metabolismo de la planta, en completo acuerdo con Mkandawire et al. (2004) que sustentan que el exceso de nutrientes causa sobredosis de macro y micro elementos. De los resultados se puede observar que bajo las condiciones experimentales evaluadas, el último tratamiento es el que permite un mayor tiempo de vida media de la planta

### *Efecto del pH sobre la viabilidad de la planta y la solubilidad del metal*

La influencia del pH en la asimilación de los diversos elementos es bastante conocida para el caso de los macro y micro nutrientes, habiéndose determinado rangos de pH entre los cuales la solubilidad aumenta o disminuye; en cambio para el caso de los elementos tóxicos los estudios no han sido detallados. Es de suma importancia resaltar que el efecto del pH parece ser el más importante sobre la absorción de metales.

La Tabla 2 resume el efecto del pH en la fitoremediación de cobre. A bajos valores de pH el cobre es bastante soluble incluso en presencia de los nutrientes, desafortunadamente, pH menor de 4 es nocivo para la planta, provocando el fraccionamiento de la raíz en menos de 2 días. Por otro lado, el ion cobre empieza a precipitar como hidróxido en presencia de los nutrientes alrededor de pH 6. Combinando ambos aspectos, se dedujo que pH 5 es el valor óptimo porque mantiene viva a la planta por más de 2 días y el ion cobre se

mantiene estable en solución acuosa por el mismo periodo de tiempo.

Blanco et al. (2005) y Navarro et al. (2006A) determinaron el rol del pH en un proceso similar, encontrando que el pH ejerce un fuerte efecto (i) en la formación de iones complejos del metal en solución acuosa, los cuales presentan diferentes ligandos que modifican la acidez y morfología del metal en solución y (ii) en el estado químico de los centros activos de los adsorbentes. Esta última propiedad no ha sido observada sólo en adsorbentes cuyos centros activos son iónicos; Ramos et al. (2004) determinaron que la capacidad adsorbente del hongo comestible *Lentinus edodes* se debe a proteínas y principalmente a polisacáridos, como lentinano, y también se encuentra condicionada al pH. Asimismo debemos tener en cuenta que esta solubilidad del cobre también es afectada por la presencia de diversos aniones quelantes provenientes de las soluciones nutrientes (i.e. fosfatos, nitratos y sulfatos), tornando más complejo aún este fenómeno.

El efecto del pH afecta la viabilidad de la planta, debido a que las enzimas que forman parte de la planta no toleran pHs bajos, ya que los mecanismos celulares de vital importancia se ven afectados por altas concentraciones de iones hidronio (Pankit y Bhave, 2002, Shiny et al., 2004).

### *Efecto de la concentración de cobre sobre la viabilidad de la planta*

Se determinó la concentración de cobre a la cual la planta presenta fitotoxicidad. Como se aprecia en la Tabla 3, existe una relación indirectamente proporcional entre la concentración del metal y el

Tabla 2. Optimización del pH en función de la toxicidad de *Pistia stratioides* y solubilidad del metal, para una concentración de iones cobre de 1ppm.

pH	SUPERVIVENCIA	PRECIPITACIÓN
1	1 h	NO
2	2 hs	NO
3	24 hs	NO
4	48 hs	NO
5	> 48 hs	NO
6	> 48 hs	SI
7	> 48 hs	SI

Tabla 3. Concentración de Cu (II) en mg/l que maximiza el tiempo de vida de *Pistia stratioides*, para un pH de 5.

CONCENTRACIÓN	SUPERVIVENCIA
9	1 h
6	1 h
3	10 hs.
2	24 hs.
1.5	48 hs
1	120 hs

tiempo de vida de la planta. A una concentración de 1mg/l, la planta permanece viva por tiempo suficiente para cumplir su tarea detoxificante. No todas las plantas son capaces de resistir altas concentraciones de metales pesados, *Pistia stratioides*, es una de las pocas especies capaces de acumular metales tóxicos, hasta ciertos límites, sin alterar su metabolismo.

Se piensa que el reemplazo de cationes divalentes como magnesio y calcio intracelular por metales pesados isovalentes como cobre, plomo y cadmio causa desequilibrio en los sistemas vivos al insertarse en los sistemas enzimáticos de forma irreversible (Salt et al. 1995). Este mismo comportamiento ha sido encontrado en sistemas inertes que también son capaces de eliminar contaminantes de soluciones acuosas. Blanco et al (2005) sustentan que el pre-tratamiento de *Lessonia trabeculata* con cloruro de calcio, promueve el

entrecruzamiento de cadenas algínicas mediante la formación de geles y en consecuencia, aumenta la capacidad de adsorción de cadmio divalente. Se piensa que el ion cadmio posee mayor afinidad a grupos funcionales con alta densidad electrónica debido a su alta relación masa-carga y acidez de Lewis, desplazando fácilmente a pequeños cationes divalentes (Navarro et al., 2006A). De lo expuesto se podría concluir que los metales pesados son absorbidos en mayor proporción y con mayor velocidad que otros iones divalentes por la misma razón, absorbiéndose en sitios activos de enzimas y sistemas celulares.

#### Cinética de Eliminación

La absorción de iones cobre por la planta *Pistia stratioides* fue cuantificada mediante el parámetro Porcentaje de Eliminación (%R) definida como:

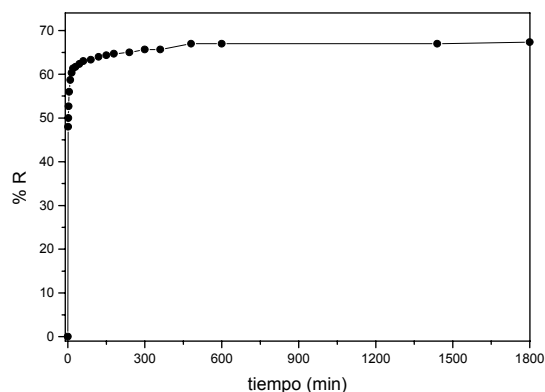


Fig. 2. Cinética de Eliminación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua). Condiciones iniciales: 23°C, concentración inicial 1 mg/l iones cobre (II), pH 5.0.

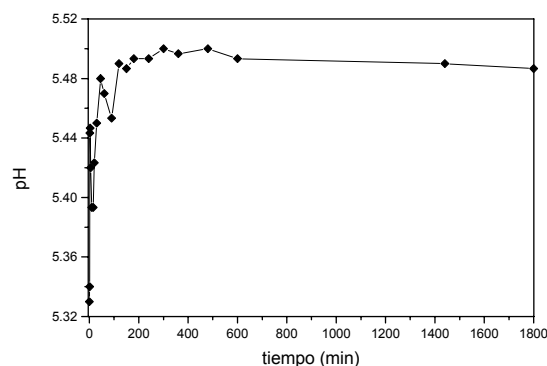


Fig. 3. Variación del pH durante la cinética de eliminación de Cu (II) por *Pistia stratioides*. Condiciones iniciales: 23°C, concentración inicial de 1 mg/l iones cobre (II).

$$\% R = (C_0 - C_i) * 100 / C_0$$

donde,  $C_0$  y  $C_i$  son las concentraciones inicial y en el tiempo  $i$  de iones cobre, respectivamente, expresado en mg/l.

De la Figura 2 se observa que 6 horas son suficientes para alcanzar la máxima eliminación de iones cobre, extrayendo el 70% del metal de la solución. Asimismo la Figura 3 muestra la variación del pH durante el proceso de absorción. Se observa un ligero incremento del pH conforme se elimina el cobre de la solución. Esto verifica nuestra hipótesis anterior sobre la superior acidez de los metales pesados frente a pequeños cationes divalentes. La absorción de cobre disminuye la acidez de la solución, por lo que el pH aumenta, en compensación, iones espectadores como sodio, potasio, calcio y magnesio pueden ser descargados, sin causar efectos en el pH durante el proceso, debido a su baja acidez de Lewis.

### Conclusiones

La fitoremediación constituye una nueva arma contra la contaminación por metales pesados, entre sus principales ventajas destaca que es agradable a la vista, la única energía que necesita proviene del

sol, es una tecnología barata comparada con otras metodologías modernas como ósmosis reversa, filtración, precipitación, etc. En el presente estudio se demostró que *Pistia stratioides* (Lechuga de agua) es una planta con alto potencial para la eliminación de iones cobre de soluciones acuosas a concentraciones de hasta 1mg/l a pH 5, al cual el metal es estable en solución acuosa y la planta sobrevive por más de 2 días. La planta es capaz de absorber hasta un 70% del cobre disuelto, el cual es alcanzado luego de 6 horas de estar en contacto con la solución, experimentando un ligero incremento en el pH. La selectividad de *Pistia stratioides* frente a otros iones presentes en solución, se debe a la acidez de Lewis presente en los metales pesados por encima de los pequeños cationes divalentes, insertándose rápidamente en sistemas celulares y enzimáticos. El pH es considerado como el principal efecto en la absorción del metal, influyendo principalmente en la especiación química del ion cobre en solución acuosa, los cuales condiciones su acidez y su química de coordinación. De lo expuesto se plantea que *Pistia stratioides* es una planta detoxificante, apropiada para eliminar cobre divalente a condiciones ambientales.

## Agradecimientos

Los autores deseamos agradecer encarecidamente al Departamento Académico de Química de la Facultad de Ciencias y Filosofía de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Asimismo agradecemos a Sabino Márquez y Úrsula Reyes por su ayuda durante la elaboración de este trabajo y a Anne Young por sus importantes comentarios. También agradecemos a la Zona Reservada de los Pantanos de Villa por la identificación taxonómica de la planta.

## Bibliografía

- Blanco D., Llanos B., Cuizano NA., Maldonado H y Navarro AE. 2005. Optimización de la Adsorción de Cadmio divalente en *Lessonia trabeculata* mediante reticulación de CaCl<sub>2</sub>. Revista de la Sociedad Química del Perú, 71: 237-245.
- Brooks RR., Morrison RS., Reeves RD. y Malaisse F. 1978. Cooper and Cobalt in african species of *Aeolanthus* Mart. (Plectranthinae, Labiatae). Plant and Soil, 50: 503-507.
- Dushenkov V. y Raskin I. 2000. Phytoremediation: Green revolution in Ecology. Agro XXI, 9:19-20.
- Garbisu C., Hernandez-Allica J., Barrutia O., Alkorta I. y Becerril JM. 2002. Phytoremediation: a technology using green plants to remove contaminants from polluted areas. Reviews on Environmental Health, 17, 3: 173-188.
- Mkandawire M., Taubert B., Dudel EG. 2004. Capacity of *Lemna gibba* L. (duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters. International Journal of Phytoremediation, 6, 4: 347-362.
- Navarro AE., Blanco D. Llanos B., Flores J. y Maldonado H. 2004. Bioremediación de Cadmio (II) por desechos de algas marinas. Optimización del Equilibrio y Propuesta de Mecanismo. Revista de la Sociedad Química del Perú, 70: 147-157.
- Navarro AE., Ramos KP., Campos K. y Maldonado H. 2006A. Elucidación del Efecto del pH en la Adsorción de Metales pesados mediante Biopolimeros naturales: Cationes Divalentes y Superficies Activas. Revista Iberoamericana de Polimeros, 7, 2: 115-128.
- Navarro AE., Ramos KP., Agapito R. y Cuizano NA. 2006B. Propiedades ácido-básicas de *Lentinus edodes* y cinética de biosorción de cadmio (II). Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 2: 45-52.
- Nriagu J. 1996. A History of Global Metal Pollution. Science, 272: 222-225.
- Odjegba VJ. y Fasidi IO. 2004. Accumulation of Trace Elements by *Pistia stratiotes*: Implications for phytoremediation. Ecotoxicology, 13: 637-646.
- Pankit AN., Bhave SA. 2002. Cooper metabolic defects and liver disease: Environmental aspects. Journal of Gastroenterology and Hepatology, 17, 3:S403-S407.
- Ramos KP., Navarro AE, Chang L., Maldonado H. 2004. Evaluación de nuevos biosorbentes para la remoción de cadmio (II): Estructura vs Capacidad de adsorción. Revista de la Sociedad Química del Perú. 70: 137-146.
- Raskin I., Kumar N., Dushenkov V. and Salt DE. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. Current Opinion in Biotechnology, 5: 285-290.
- Salt DE., Kumar N., Dushenkov V. and Raskin I. 1994. Phytoremediation: A new technology for the environmental cleanup of toxic metals. In: Resource Conservation and Environmental Technologies in Metallurgical Industries. Proceedings of the International Symposium on Resource Conservation and Environmental Technologies in Metallurgical Industries. P. Mahant, C. Pickles and W.-K. Lu (eds.) Canadian Institute of Mining: 381-384.
- Salt DE., Blaylock M., Kumar N., Dushenkov, V., Ensley BD., Chet I. and Raskin I. 1995. Phytoremediation: A novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants. Biotechnology, 13: 468-474.
- Shiny KJ., Remani KN., Jalaja TK. y Sasidharan VK. 2004. Removal of Chromium by two aquatic pteridophytes. Journal of Environmental Science and Engineering, 46, 3: 249-251.