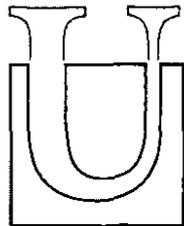


Luz Nerio Quintana*
Jesús Olivero Verbel**

Fitorremediación

Una alternativa para mitigar los procesos de contaminación ambiental



no de los retos de la humanidad en el presente siglo consiste en lograr un desarrollo sostenible equilibrando el crecimiento poblacional con la preservación y conservación de los recursos naturales. Para ello, no sólo es necesario frenar la destrucción de los ecosistemas y la generación de residuos, sino garantizar procesos de remediación o limpieza de zonas contaminadas para hacerlas parte del área productiva del planeta. En este sentido, la búsqueda de herramientas tecnológicas para rescatar y reactivar ambientalmente ecosistemas hídricos, suelos e inclusive aire contaminado, ha posicionado a la fitorremediación como una alternativa económica que promete la depuración eficaz de sitios con altas concentraciones de metales, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos, pesticidas, explosivos, y elementos radioactivos, entre otros (Flathman y Lanza, 1998; Raskin and Ensley, 2000).

La fitorremediación es el nombre dado al uso de plantas para reducir, remover, degradar o inmovilizar agentes contaminantes, empleando la capacidad que tienen éstas de tomar sus nutrientes a través de las raíces o gases desde las hojas; permitiendo así extraer sustancias tóxicas del suelo, agua o del aire. La diversidad en sus aplicaciones, hace de la fitorremediación una propuesta que puede ser aprovechada dependiendo de las necesidades de remediación, las plantas disponibles y las condiciones ambientales existentes (Pilon-Smits, 2005; Peer *et ál.* 2006). En términos generales, la fitorremediación es una herramienta ampliamente utilizada en la recuperación de ecosistemas mediante el empleo de diferentes tecnologías, siendo las de mayor difusión las siguientes (ITRC, 2001; EPA, 2000):

Fitoextracción o Fitoacumulación. Es aplicada en fitorremediación de metales como: plata, cadmio, cobalto, cromo, mercurio, manganeso, molibdeno, plomo, zinc, al igual que con elementos radioactivos como estroncio, cesio, plutonio y uranio. Ciertas plantas llamadas *hiperacumuladoras* absorben grandes cantidades de metales, algunas inclusive más de un Igramo de metal por kilogramo (en peso seco) de biomasa, de esta manera, los contaminantes son extraídos a través de sus raíces y posteriormente desplazados al interior de la planta. Es utilizada principalmente en el tratamiento de suelos, sedimentos y lodos (Salt *et ál.*, 1998; Garbisu y Alkorta, 2001).

Rizofiltración. Ocurre cuando existen procesos de adsorción o absorción en las raíces de las plantas, permitiendo que el contaminante sea inmovilizado o acumulado en la misma. Es ideal para remediación de aguas subterráneas, superficiales y residuales debido a que el contaminante debe encontrarse en solución y en contacto con la raíz, por consiguiente no es muy eficiente en matrices sólidas. Con frecuencia es empleada en la remoción de metales pesados y elementos radioactivos (Schnoor, 1997).

Fitoestabilización. Es definida como la inmovilización de un contaminante en el suelo. Puede ocurrir en la planta a través de tres formas: absorción y acumulación dentro de las raíces, adsorción sobre las mismas, o por la precipitación en la zona radicular. Esta técnica es útil para estabilizar sitios contaminados creando una cubierta vegetativa sobre las áreas que carecen de vegetación natural debido a las altas concentraciones del contaminante, las especies tolerantes al contaminante pueden restaurar la flora en los sitios, disminuyendo así la migración potencial de los agentes contaminantes por



la erosión del viento sobre el suelo, la salida hacia aguas superficiales, y la contaminación hacia las aguas subterráneas. Suele aplicarse en suelos, sedimentos y lodos contaminados con arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y zinc, no es recomendable para agentes orgánicos (Morikawa y Erkin, 2003).

Rizodegradación. También llamada "Fitoestimulación", es la degradación del contaminante debido a la *bioactividad* existente en la rizosfera, la cual tiene su origen en la actividad de enzimas secretadas por la planta o por parte de los microorganismos que crecen en esta zona. Esta tecnología es aplicable a compuestos orgánicos como hidrocarburos derivados del petróleo, compuestos aromáticos, pesticidas y surfactantes, entre otros. Estas moléculas pueden ser metabolizadas por enzimas conduciendo a su degradación o mineralización; además, muchos de estos contaminantes pueden degradarse a sustancias poco tóxicas o convertirse en alimento y fuente de energía para la planta y los organismos del suelo (McCutcheon y Schnoor, 2003).

Fitovolatilización. Consiste en la captación y modificación metabólica de contaminantes hasta moléculas gaseosas que pueden ser liberadas hacia la atmósfera a través de la transpiración de la planta. Una vez que son volatilizados, muchos compuestos orgánicos pueden ser degradados por fotólisis. La fitovolatilización

es utilizada en la recuperación de aguas subterráneas, suelos, sedimentos y lodos contaminados con compuestos orgánicos tales como solventes clorados y elementos inorgánicos como selenio, arsénico y mercurio (Morikawa y Erkin, 2003).

Fitodegradación o Fitotransformación. Tiene por objeto la destrucción de los contaminantes a través de procesos metabólicos que ocurren dentro o fuera de la planta, en este último caso, empleando enzimas generadas por la misma y que actúan en su exterior. Los contaminantes degradados son utilizados como nutrientes e incorporados a los tejidos del vegetal; en algunos casos dependiendo de la especie del contaminante y de la planta, los productos metabólicos son nuevamente excretados al ambiente. Esta técnica es empleada en la limpieza de suelos, sedimentos y lodos contaminados con compuestos orgánicos, solventes clorados, fenoles y herbicidas, entre otros (Pilon-Smits, 2005).

La clasificación anterior es una prueba fehaciente de la versatilidad de la fitorremediación. Entre sus numerosas ventajas está el poder ser realizada *in situ*, por lo que no es necesario transportar el sustrato contaminado. Pueden tratarse lugares contaminados con más de un tipo de agente, permite su aplicación a todo tipo de matrices, y sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales, actuando positivamente sobre el suelo y mejorando sus propiedades físicas y químicas a través de la formación de una cubierta vegetal, haciendo estos lugares visualmente agradables (Cunningham y Ow, 1996; Pilon-Smits, 2005). En términos económicos, ha sido estimado que las fitotecnologías son 40% menos costosas que otras utilizadas *in situ*, y en comparación con otras técnicas *ex situ*, el costo es en promedio 10 veces menor (Glass, 1998; Pilon-Smits, 2005).

No obstante lo anterior, la fitorremediación también presenta una serie de limitaciones, dentro de las cuales podemos mencionar la necesidad de que el contaminante se encuentre en contacto con la zona radicular de la planta, óptimas condiciones físicas y químicas del suelo (pH, salinidad, disponibilidad de nutrientes) y una concentración del contaminante dentro de los límites tolerables por el vegetal. Estos dos últimos factores pueden limitar el crecimiento de la planta lo que aumenta el tiempo estimado para remediar un sitio contaminado (Carpena y Bernal, 2007; EPA, 2000); de hecho, el éxito de la fitorremediación depende en gran parte de la actividad fotosintética y el índice de crecimiento de las plantas (Xia y Ma, 2006).



Aunque se conoce poco acerca de las partes de la planta y la microbiota asociada con la remoción de contaminantes en aire, ha sido demostrado que la filósfera es colonizada por diversas comunidades de microorganismos; aunque esta zona posee un ambiente relativamente áspero, carece de nutrientes y presenta grandes flujos de humedad. Ha sido sugerido que la presencia de las bacterias no sólo estaría determinada por las condiciones de la planta, sino también por la acción de otros compuestos específicos, como por ejemplo los contaminantes atmosféricos que pueden influenciar su supervivencia. Estudios realizados a escala de laboratorio confirman que algunas especies son capaces de limpiar aire contaminado con tolueno, benceno, tricloroetileno, p-cresol, y dióxido de nitrógeno entre otros (Kempeneer *et ál.* 2004; Cornejo *et ál.* 1999; Beattie y Seibel, 2006; Morikawa y Erkin, 2003).

Las plantas denominadas fitorremediadoras de metales deben poseer como atributos ideales, la capacidad para acumularlos, preferiblemente en la parte superior de la planta, ser tolerantes a la concentración del mismo en el suelo, presentar rápido crecimiento, y generar una elevada producción de biomasa, lo cual facilita su cosecha, y por último, producir sustancias que impiden que los herbívoros las consuman para prevenir la transferencia de metales pesados a la cadena alimenticia (Garbisu y Alkorta, 2001; Gisbert *et ál.* 2003; McIntyre, 2003).

En el planeta han sido reportadas al menos 400 especies vegetales capaces de acumular selectivamente algún contaminante, estas son en su mayoría conocidas, e incluye plantas como el girasol *Helianthus annuus* (Boonyapookana *et ál.* 2005), alfalfa *Medicago sativa* (Chekol y Vough, 2001), calabaza *Cucurbita pepo* y pepino *Cucumis sativus* (Wang *et ál.* 2004), entre otras.

El conocimiento de la bioquímica y la fisicoquímica tras los procesos de fitorremediación ha llevado al desarrollo de plantas transgénicas, con lo cual se ha incrementado la selectividad y eficiencia de extracción de contaminantes. Ha sido demostrado que algunas plantas transgénicas pueden acumular 2 y 3 veces más metales que las especies no modificadas; sin embargo, los nutrientes y el pH cumplen una función importante en el método y sitio de acumulación de estos en las plantas (Pilon-Smits y Pilon, 2002; Skinner *et ál.* 2007).

Uno de los casos de gran importancia en los cuales la fitorremediación ha jugado un papel relevante es el de Chernobyl, Ucrania, donde aconteció el desastre nuclear más grave de la historia; en este sitio, empleando girasoles (*Helianthus annuus*) modificados genéticamente, ha sido posible limpiar humedales altamente contaminados con cesio y estroncio, obteniéndose altas capacidades de remoción para estos elementos (Dushenkov *et ál.* 1999; EPA, 2000). Esta



especie, también ha sido utilizada en Ashtabula (Ohio, USA), donde existió un centro de investigación y producción de armas atómicas. Allí, el 95% del uranio presente en desechos radiactivos fue removido por rizofiltración (Schnoor, 1997).

El pasto “vetiver” (*Vetiveria zizanioides*), ha sido reconocido por algunos como una herramienta importante de fitorremediación. Está siendo utilizado para la conservación y estabilización del suelo debido a su sistema radicular masivo, complejo y su alto índice de crecimiento bajo condiciones adversas. En estudios recientes ha sido prometedor su alta capacidad acumuladora de estroncio, cesio (Singh *et ál.* 2006), trinitrotolueno (Makris *et ál.* 2007), plomo (Rotkittikhun *et ál.*, 2006), arsénico, zinc, cobre (Chiu *et ál.* 2005) e hidrocarburos derivados del petróleo (Brandt *et ál.* 2006).

Otra de las especies más representativas en fitorremediación es el “Buchón de agua” (*Eichhornia crassipes*), macrófita acuática flotante originaria de Sur América que se ha extendido en todos los climas tropicales, debido a su rápido crecimiento, gran producción de biomasa y biogas, alta tolerancia a la contaminación, y alta capacidad de absorción de nutrientes así como de metales pesados; presenta alto potencial para la limpieza de aguas residuales (Xia y Ma, 2006; Ebel *et ál.* 2007). En Colombia, esta especie es una de las macrófitas más abundantes en las cuencas de los ríos, en particular el Magdalena y el Cauca. Diversos reportes han mostrado su aplicabilidad en la remoción de aluminio (Jayaweera *et ál.* 2007), pesticidas (Xia y Ma, 2006), cromo (Faisal y Hasnai, 2003), cianuro (Ebel *et ál.* 2006), plomo, zinc, mercurio (Skinner *et ál.*, 2006), entre otros. Para el mercurio, otras plantas como la “lechuga de agua” (*Pistia stratiotes*), han presentado altas eficiencias de acumulación del metal pesado (Skinner *et ál.* 2006).

El acelerado uso de los recursos naturales como medio para la disposición de sustancias tóxicas, constituye uno de los problemas ambientales de mayor cuidado en las zonas urbanas y rurales, lo que en la mayoría de los casos trae enormes consecuencias para la salud de las personas y el ambiente. La fitorremediación surge como una técnica viable y de bajo costo para aminorar las secuelas producidas por dicha contaminación, y en países como Colombia, en donde abundan los “cementorios” clandestinos de plaguicidas y otros tóxicos, la fitorremediación constituye una opción importante a considerar.

BIBLIOGRAFÍA

BEATTIE, G. y Seibel, J. *Uptake and localization of gaseous phenol and p-cresol in plant leaves.* Chemosphere. 68(3): 528-536. 2007.

BOONYAPOOKANA, B., Parkpian, P., Techapinyawat, S., Delaune, R. y Jugsujinda, A. *Phytoaccumulation of Lead by Sunflower (Helianthus annuus), Tobacco (Nicotiana tabacum), and Vetiver (Vetiveria zizanioides).* J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng. 40(1): 117-137. 2005.

BRANDT, R. Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C. y Broll, G. *Potential of vetiver (vetiveria zizanioides (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela.* Int J Phytoremediation. 8(4): 273-84. 2006.

CARPENA, R. y Bernal, P. *Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos.* Revista Ecosistemas. 2007.
(http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=490&Id_Categoria=9&tipo=portada)

CHIU, K., Ye, Z. y Wong, M. *Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by Vetiveria zizanioides and Zea mays using chelating agents.* Chemosphere 60(10): 1365-75. 2005.

CHEKOL, T. y Vough, L. *A Study of the Use of Alfalfa (Medicago sativa L.) for the Phytoremediation of Organic Contaminants in Soil.* Remediation Journal. 11: 89-101. 2001.

CHUNNINGHAM, S. y Ow, D. *Promises and Prospects of Phytoremediation.* Plant Physiol. 110: 715-719. 1996.

DUSHENKOV, S., Mikheev, A., Prokhnevsky, A., Ruchko, M. y Sorochinsky, B. *Phytoremediation of Radiocesium-Contaminated Soil in the Vicinity of Chernobyl, Ukraine.* Environ. Sci. Technol. 33(3): 469-475. 1999.

EBEL, M., Evangelou, M. y Schaeffer, A. *Cyanide phytoremediation by water hyacinths (Eichhornia crassipes).* Chemosphere. 66: 816823. 2007.

EPA. *Introduction to Phytoremediation.* Ohio: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency. 2000.

FAISAL, M. y Hasnain, S. *Synergistic Removal of Cr (VI) by Eichhornia crassipes in Conjunction with Bacterial Strains.* Pakistan Journal of Biological Sciences. 6: 264-268. 2003.

FLATHMAN, P. y Lanza G. *Phytoremediation: Current Views on an Emerging Green Technology.* Journal of Soil Contamination. 7(4): 415-431. 1998.

GARBISU, C. y Alkorta I. *Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment.* Bioresour Technol. 77(3), 229-36; 2001.

GISBERT, C., Ros, R. De Haro, A., Walker, D. Bernal P. Serrano, R. Navarro-Aviñó *A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation.* Biochem Biophys Res Commun. 303(2):440-5. 2003.

GLASS, D. *The 1998 United States Market for Phytoremediation.* D. Glass Associates, Inc., Needham, MA. 1998.

ITRC, Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group, Phytotechnologies Work Team. *Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document.* 2001.

JAYAWEERA, M., Kasturiarachchi, J., Kularatne, R. y Wijeyekoon, S. *Removal of aluminium by constructed wetlands with water hyacinth (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) grown under different nutritional conditions.* Journal of Environmental Science and Health Part A. 42: 185193. 2007.

KEMPENEER, L., Sercu, B., Vanbradant, W., Van Langenhove, H. y Verstraete, W. *Bioaugmentation of the phyllosphere for the removal of toluene from indoor air.* Appl Microbiol Biotechnol. 64: 284288. 2004.

MAKRIS, K. Shakya, K. Datta, R. Sarkar, D. y Pachanoor, D. *High uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by vetiver grass potential for phytoremediation?* Environ Pollut. 146 (1): 1-4. 2007.

MORIKAWA, H. y Erkin, O. *Basic processes in hytoremediation and some applications to air pollution control.* Chemosphere. 52: 1553-1558. 2003.

MCCUTCHEON, S. y Schnoor, J. *Overview of phytotransformation and control of wastes.* En *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*, ed. SC McCutcheon, JL Schnoor, pp. 358. New York: Wiley. 2003.

MCINTYRE, T. *Phytoremediation of heavy metals from soils.* Adv Biochem Eng Biotechnol. 78: 97-123. 2003.

PEER, W., Baxter, I., Richards, E., Freeman, J. y Murphy, A. *Phytoremediation and hyperaccumulator plants, Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification.* 14: 299-340. 2006.

PILON-SMITS, E. *Phytoremediation.* Annu. Rev. Plant Biol. 56, 15-39; 2005.

PILON-SMITS, E. y Pilon, M. *Phytoremediation of Metals Using Transgenic Plants.* Critical Reviews in Plant Sciences. 21(5): 439-456; 2002.

RASKIN, I. y Ensley, B. *Phytoremediation of toxic metals. Using plants to clean up the environment.* John Wiley & Sons, Inc. 2000.

ROTKITTIKHUN, P., Chaiyarat, R. Kruatrachue, M. Pokethitiyook, P. y Baker, A. *Growth and lead accumulation by the grasses Vetiveria zizanioides and Thysanolaena maxima in lead-contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: a glasshouse study.* Chemosphere. 66 (1): 45-53; 2007.

SALT, D., Smith, R. y Raskin, I. *Phytoremediation.* Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49: 643-68. 1998.

SCHNOOR, J. *Phytoremediation.* Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. Iowa, 1997.

SINGH, S., Eapen, S., Thorat, V., Kaushik, C., Raj, K. y D'Souza, S. *Phytoremediation of cesium and strontium from solutions and low-level nuclear waste by Vetiveria zizanioides.* Ecotoxicology and Environmental Safety. 69: 306-311. 2008.

SKINNER, K., Wright, N. y Porter-Goff, E. *Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants.* Environ Pollution. 145: 234-237. 2007.

WANG, X., White, J., Gent, M., Iannucci-Berger, W., Eitzer, B. y Mattina, M. *Phytoextraction of weathered p,p'-DDE by zucchini (Cucurbita pepo) and cucumber (Cucumis sativus) under different cultivation conditions.* Int J Phytoremediation. 6(4): 363-85; 2004.

XIA, H. y Ma, X. *Phytoremediation of ethion by water hyacinth (Eichhornia crassipes) from water*. *Bioresource Technology*. 97: 10501054; 2006.

***Luz Nerio Quintana**

*Grupo de Química Ambiental y Computacional
Facultad de Ciencias Farmacéuticas
Universidad de Cartagena
Cartagena, Colombia.*

****Jesús Olivero Verbel**

*Grupo de Química Ambiental y Computacional
Facultad de Ciencias Farmacéuticas
Universidad de Cartagena
Cartagena, Colombia
joliverov@unicartagena.edu.co
Http://www.reactivos.com*