

Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre?

M. Llugany, R. Tolrà, C. Poschnrieder, J. Barceló

Unidad de Fisiología Vegetal. Facultad de Biociencias. Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Bellaterra.

Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? La hiperacumulación es la capacidad que tienen algunas plantas para concentrar metales en sus tejidos a niveles muy por encima de los normales sin presentar síntomas de toxicidad. Estas plantas hiperacumuladoras han desarrollado mecanismos internos de tolerancia a la toxicidad por metales. Esta peculiaridad las hace útiles para el hombre como herramienta en las nuevas tecnologías de fitoremediación. Sin embargo, ¿cual es el beneficio de esta hiperacumulación de metales para la propia planta? Se han propuesto distintas hipótesis entre las que destaca la ventaja adaptativa de estas plantas frente al estrés biótico. Esta propuesta es una de las más atractivas para explicar la "razón de ser" de estas especies hiperacumuladoras. En este artículo se plantean dos aspectos esenciales: los mecanismos de acumulación y tolerancia de las plantas a la toxicidad por metales y si para la planta la hiperacumulación es realmente una ventaja adaptativa.

Palabras clave: fitoremediación, toxicidad, estrés biótico, tolerancia, ventaja adaptativa.

Metal hyperaccumulation: advantage for both the plant and the human being? Metal hyperaccumulation is the ability of some plants to accumulate metals in their tissues to levels above normal concentrations without any toxicity symptoms. Hyperaccumulating plants have evolved internal tolerance mechanisms to metal toxicity. This peculiarity makes them very useful for us as a tool for new phytoremediation technologies. Nevertheless, which is the benefit of metal hyperaccumulation for the plant itself? Different hypothesis have been proposed but the most remarkable is an adaptive advantage of these plants against biotic stress. This proposal is one of the most attractive to account for the "reason to be" of these metal hyperaccumulating species. In this paper two essential aspects are pointed out: the tolerance mechanisms of metal accumulation in these plants and whether metal hyperaccumulation is really an adaptive advantage.

Key words: phytoremediation, toxicity, biotic stress, tolerance, adaptive advantage.

Introducción

En los últimos años ha crecido espectacularmente el interés en las plantas que pueden acumular y tolerar cantidades inusualmente altas de metales en los tejidos de su parte aérea. Las investigaciones con estas plantas llamadas hiperacumuladoras de metales se han multiplicado por su potencial utilidad para el hombre como herramienta en la limpieza de suelos contaminados. La fitoextracción es una técnica "in situ" dentro de la fitoremediación basada en el uso de plantas y sus microorganismos asociados para disminuir la concentración de elementos químicos inorgánicos en suelos contaminados. La reducción del contenido de metales pesados hasta niveles óptimos permitiría la reutilización del suelo tratado con un fin agrícola, forestal, hortícola o lúdico, evitando la transferencia de éstos a aguas subterráneas o zonas cercanas por acción del viento y/o erosión del agua. Sin embargo, hay todavía muchas cuestiones sin resolver en relación a la evolución de estas características tan inusuales que presentan estas plantas (Baker *et al.*, 2000; Schat *et al.*, 2000; Macnair, 2003). Por una parte, las plantas hiperacumuladoras han de tener mecanismos de absorción y de tolerancia para poder resistir los elevados niveles de metales acumulados en sus tejidos que serían extremadamente tóxicos para otros organismos. Por otra, la hiperacumulación es un proceso activo que parece estar implicado en la protección de la planta contra patógenos y herbívoros, confiriéndole una posible ventaja adaptativa que aún no está firmemente establecida (Behmer *et al.*, 2005; Poschenrieder *et al.*, 2006; Salt, 2006). Finalmente hemos de considerar que la aplicación de la fitoextracción no elimina el metal del medio, sino que lo transfiere a un organismo, quedando por resolver de forma efectiva qué hacer con las plantas una vez acumulado el metal en ellas. Este metal puede, como hemos dicho, no ser tóxico para la propia planta pero sí para cualquier organismo vivo que se alimente de ella. Se debería controlar en qué situaciones es favorable el uso de esta técnica y hasta qué punto las plantas hiperacumuladoras son una buena herramienta en fitoremediación.

Las plantas frente a los metales pesados

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker, 1981; Barceló *et al.*, 2003). Unas basan su resistencia a los metales con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras prefieren acumular el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, mientras que la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados o metalíferos.

De acuerdo con la estrategia de acumulación de Baker (1981) las plantas hiperacumuladoras pueden superar en 100 ó más veces los valores normales de metales acumulados. Estas plantas son especies muy tolerantes a uno o más metales pesados y a menudo su distribución está restringida a suelos ricos en un amplio rango de concentraciones de metales, pues no son competitivas en zonas no contaminadas. La hiperacumulación ha evolucionado en más de 400 especies de plantas repartidas en 45 familias botánicas, siendo la familia *Brassicaceae* una de las que cuenta con más géneros de este tipo. Se encuentran distribuidas por todo el mundo, predominando en Nueva Caledonia, Cuba y la región Mediterránea, entre otros lugares (Baker *et al.*, 2000).

Esta capacidad de sobrevivir y crecer en suelos contaminados, acumulando gran cantidad de metales convierte a las hiperacumuladoras en organismos muy indicados para la fitoextracción. La hiperacumulación implica la existencia de mecanismos internos de detoxificación de los iones metálicos libres para evitar que puedan causar daño oxidativo a las células. La planta puede protegerse formando complejos metálicos estables menos tóxicos con quelantes (como fitoquelatinas, ácidos orgánicos, aminoácidos o fenoles de tipo flavonoides) y/o secuestrando los metales desde zonas con un metabolismo activo (citoplasma) hacia el interior de vacuolas o en la pared celular, dónde no puedan ocasionar efectos adversos (Krämer *et al.*, 1996; Tolrà *et al.*, 1996; Barceló *et al.*, 2002; Schat *et al.*, 2002; Vázquez *et al.*, 2006). Parece ser que la tolerancia en estas plantas no viene determinada por la acción de un solo mecanismo interno, sino de varios, que actuarían conjuntamente. En general, las hiperacumuladoras presentan una tasa de crecimiento baja, poca producción de biomasa y un sistema radicular pobre, posiblemente debido al coste energético que supone acumular niveles de metales en su interior que pueden exceder valores tan altos como el 1% del peso seco de la planta. Si el coste energético de esta protección interna es tan elevado, nos preguntamos si esta hiperacumulación es, en realidad, una ventaja adaptativa para estas plantas.

Hipótesis sobre la ventaja adaptativa de la hiperacumulación para la planta

Existen varias hipótesis sobre el valor adaptativo de la hiperacumulación, pero la más actual es su función en la protección de la planta contra el estrés biótico causado por patógenos y herbívoros. Esta propuesta es muy atractiva para explicar la razón de ser de las plantas hiperacumuladoras, y difiere de la defensa química natural existente en todas las plantas, basada en la síntesis de productos orgánicos procedentes del metabolismo secundario (Martens *et al.*, 1994). Este tipo de protección requiere ciertas condiciones: la primera es que el metal sea más tóxico para el patógeno o herbívoro que para la planta; la segunda, que el metal impida la virulencia del patógeno o herbívoro, y finalmente, la tercera, que el metal incremente la resistencia de la planta frente al factor causante del estrés biótico.

Para que el ataque o la agresión del patógeno o herbívoro progrese, es necesaria una interacción a tres bandas: huésped, patógeno y entorno (**Fig. 1**). A parte de la virulencia del patógeno y la susceptibilidad del huésped, los factores ambientales más relevantes que determinan la intensidad del ataque son el clima, las propiedades del suelo, la competencia y la actividad humana. El nivel de metales en el suelo puede tener una influencia positiva o negativa en la virulencia del patógeno y la susceptibilidad de la planta. La deficiencia de elementos esenciales amenaza el buen desarrollo de ambos organismos mientras que la resistencia a la toxicidad por metales determinará el tipo de interacción huésped-patógeno.

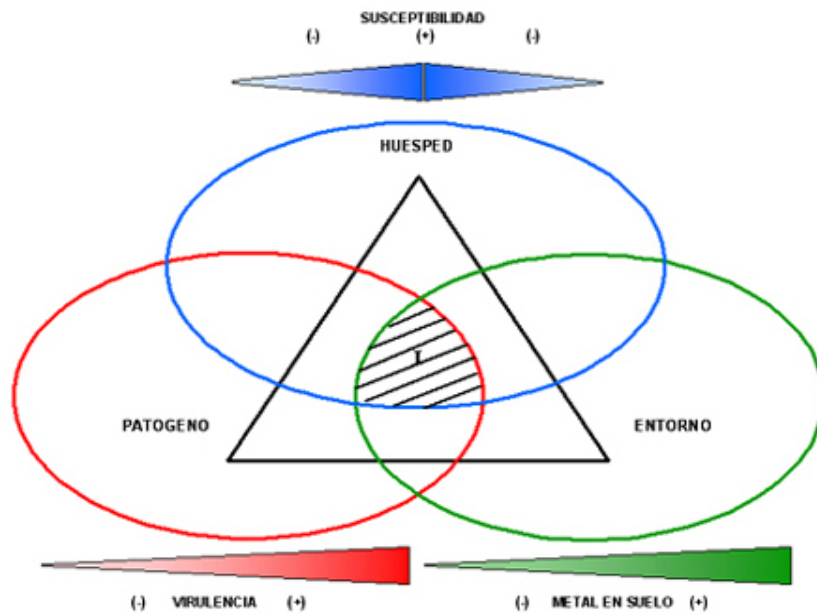


Figura 1. Interacción (I) entre los tres factores que determinan la intensidad de un ataque biótico: la susceptibilidad del huésped, la virulencia del patógeno y el entorno.

Hay muy poca información de la influencia de un exceso de metales en la relación planta-patógeno. En algunos estudios se ha observado que los herbívoros que consumen plantas con altos contenidos en metal responden a su presencia viéndose afectados por su toxicidad (efecto plaguicida) o con una aversión posterior a la planta debido a su palatabilidad disuasiva (receptores del sabor) o por indigestión (**Fig. 2**). Este aprendizaje asociativo reduce consecuentemente la intensidad del ataque. En otros trabajos realizados con caracoles (Noret *et al.*, 2005), la reacción de aversión no se observó hacia plantas con un alto contenido en Zn, sino a elevados niveles de glucosinolatos, moléculas relacionadas con el contenido del metal (Tolrà *et al.*, 2001). La disponibilidad de una elevada concentración de metales tóxicos puede tener, por lo tanto, un impacto positivo, negativo o nulo en el desarrollo del estrés biótico.



Figura 2. Respuestas de patógenos y herbívoros frente a la presencia excesiva de metales (modificado de Poschenrieder *et al.*, 2006).

Ventaja de la hiperacumulación para el hombre

Los metales pesados están presentes de forma natural en los suelos, pero en los últimos años las actividades industriales y la deposición de residuos tóxicos de todo tipo han contribuido a la acumulación de estos elementos en los suelos. A menudo la contaminación por metales pesados está directamente causada por la actividad industrial y minera, pero los casos más graves se han dado de forma accidental (Ej. Minas de Aznalcóllar). Metales como el Pb, Hg, Cd, As, Se y Cr son muy dañinos para la salud humana y para la de la mayoría de organismos vivos. Son elementos no degradables, ni química ni biológicamente, con lo que acaban acumulándose en los suelos. Si además se filtran a las aguas subterráneas, su control se hace muy difícil y acaban entrando en la cadena alimenticia, sea a través del agua de bebida o a través de los cultivos en suelos agrícolas contaminados, suponiendo un riesgo potencial para la salud.

En 1993 se realizaron los primeros experimentos utilizando plantas hiperacumuladoras para extraer metales de lugares contaminados (McGrath *et al.*, 1993 y 2006), y desde entonces se han descubierto muchas plantas con esta capacidad, que acumulan distintos metales (*Alyssum sp.*-Ni, *Thlaspi caerulescens*-Zn/Cd, *Melastoma malabanthricum*-Al, etc.). La capacidad de absorción por parte de la planta varía según el tipo de contaminante, tipo de suelo y pH del mismo, por lo que aparece la posibilidad de adaptar la elección del cultivo al nivel y tipo de contaminación (generalmente hojas > semillas).

Una ventaja del uso de plantas hiperacumuladoras es que pueden ser tolerantes a más de un metal y, por lo tanto, tienen una gran flexibilidad, es decir, una gran habilidad para adaptarse a ellos en los lugares de contaminación. La extracción de los metales del suelo por parte de las plantas no supone ningún daño para la zona tratada a diferencia de otras técnicas ya existentes y más caras (vitrificación, eliminación y reposición, etc.) que eliminan los organismos vivos asociados al suelo o alteran su estructura; todo lo contrario, el sistema radicular de las plantas tampona el suelo químicamente y lo estabiliza frente a la erosión y la presencia de vegetación es estéticamente placentera (Meagher *et al.*, 2000; Chaney *et al.*, 2000; Barceló *et al.*, 2003).

Pero para que esta técnica sea efectiva, se requiere una planta con gran producción de biomasa aérea, para acumular mayor cantidad de metal y para facilitar su recogida con técnicas agrícolas tradicionales, y de un sistema radicular bien desarrollado que explore y limpie extensas áreas de suelo. También es conveniente que presente una tasa de crecimiento elevada. Sin embargo, estas características no siempre conviven en las plantas hiperacumuladoras (Meagher *et al.*, 2000; Barceló *et al.*, 2001 y 2003).

La selección y el cultivo convencional de variedades con una combinación de las propiedades más útiles serían una solución a este problema, así como la transferencia por ingeniería de los genes responsables de la hiperacumulación (absorción, transporte a la parte aérea y acumulación) a plantas con mayor tolerancia, capacidad de acumular o degradar diversos contaminantes, y una mayor producción de biomasa (Martínez *et al.*, 2006). Este objetivo no está todavía logrado, pero empiezan a conocerse algunos genes responsables de un mayor transporte de metales (Zn) hacia la parte aérea en comparación con la raíz en la hiperacumuladora *Thlaspi caerulescens* (Lasat *et al.*, 2000; Assunção *et al.*, 2001). Sin embargo, estas soluciones crean una preocupación general, bien por el uso de plantas transgénicas, como por la bioacumulación de estos metales en las plantas que pueden pasar a niveles superiores de la cadena trófica.

Algunos metales pesados son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano (Zn, Se, Cu). Sin embargo, a concentraciones más altas pueden conducir a toxicidad. Otros, en cambio (Cd, Hg, Pb) son extremadamente tóxicos, incluso en muy bajas cantidades (Chaney *et al.*, 2004). La creciente concentración de metales pesados en la cadena alimenticia puede provocar daños en la salud (cancerígenos o mutagénicos) aunque se sabe poco de su efecto crónico por consumo de pequeñas dosis durante largos periodos (Birley *et al.*, 1999). Se han sugerido varias medidas de prevención, como definir las normas referentes a los niveles y tipos de contaminación para agua y suelos destinados a uso agrícola, establecer unas distancias mínimas de los cultivos a las rutas principales de comunicación por carretera, tratamiento del suelo para inmovilizar los metales pesados, lavado y procesado del gran volumen de vegetación contaminada, para reducir el contenido de metales pesados de forma efectiva.

Conclusiones

En los últimos años la fitoremediación ha ido ganando aceptación como tecnología, y ha supuesto un notable incremento del conocimiento de los mecanismos de absorción, transporte y detoxificación por plantas. La fitoremediación ofrece efectividad para un amplio rango de contaminantes orgánicos e inorgánicos, pero está todavía limitada por el poco conocimiento de algunos procesos básicos de las plantas, como la degradación mediante mecanismos orgánicos, los mecanismos de transporte y quelación mediante mecanismos inorgánicos, o las interacciones planta-microorganismos (Pilon-Smits, 2005). Es fundamental avanzar en el estudio de estos procesos para conseguir el desarrollo de estas técnicas al cien por cien, y limpiar la contaminación causada por el hombre al mismo tiempo que protegemos la salud pública.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MEC (DGICYT: BFU2004-02237-CO2-01) y Grup de Recerca de la Generalitat de Catalunya, 2005GR 0078.

Referencias

- Assunção, A.G.L., Da Costa Martins, P., De Folter, S., Vooijs, R., Schat, H. y Aarts, M.G.M. 2001. Elevated expression of metal transporter genes in three accessions of the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Cell Environ.* 24: 217-226.
- Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutrition* 3:643-654.
- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D. y Smith, J.A.C. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. En: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (eds. Terry, N. y Bañuelos, G.), pp. 85-107, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Barceló, J., Poschenrieder, C., Lombini, A., Llugany, M., Bech, J. y Dinelli, E. 2001. Mediterranean plant species for phytoremediation. En: Abstracts Cost Action 837 WG2 workshop on Phytoremediation of Trace Elements in Contaminated Soils and Waters with Special Emphasis on Zn, Cd, Pb and As. Ed. Universidad Complutense Madrid, Faculty of Chemistry, Madrid pp.23 Disponible en: <http://lbewww.epfl.ch/COST837>.
- Barceló, J. Poschenrieder, C. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environ. Exp. Bot.* 48: 75-92.
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. 2003. *Phytoremediation: principles and perspectives*. Contributions to Science 2(3): 333-344. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.
- Behemer, S.T., Lloyd, C.M., Raubenheimer, D., Stewart-Clark, J., Knight, J., Leighton, R.S., Harper, F.A. y Smith, J.A.C. 2005. Metal hyperaccumulation in plants: mechanisms of defence against insect herbivores. *Functional Ecology* 19: 55-66.
- Birley, N.H. y Lock, K. 1999. Health and peri-urban natural resource production. *Environment and Urbanisation* 10(1): 89-106.
- Chaney, R.L., Li, Y.M., Brown, S.L., Homer, F.A., Malik, M., Scott Angle, J., Baker, A.J.M., Reeves, R.D. y Mel Chin. 2000. Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems: approaches and progress. En: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (eds. Terry, N. y Bañuelos, G.), pp. 129-158, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- Chaney, R.L., Reeves, P.G., Ryan, J.A., Simmons, R.W., Welch, R.M. y Scott Angle, J. 2004. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks. *BioMetals* 17: 549-553.
- Krämer, U., Cotter-Howells, J.D., Charnock, J.M., Baker, A.J.M. y Smith, J.A.C. 1996. Free histidina as a metal chelator in plants that accumulate nickel. *Nature* 379: 635-638.
- Lasat, M.M., Pence, N.S., Garvin, D.F., Ebbs, S.D. y Kochian, L.V. 2000. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J. Exp. Botany* 51: 71-79.
- Macnair, M.R. 2003. The hyperaccumulation of metals by plants. *Advances in Botanical Research* 40: 63-105.
- Martens, S.N. y Boyd, R.S. 1994. The ecological significance of nickel hyperaccumulation-a plant chemical defense. *Oecologia* 98: 379-384.
- Martínez, M., Bernal, P., Almela, C., Vélez, D., García-Agustín, P., Serrano, R. y Navarro-Aviñó, J. 2006. An engineered plant that accumulates higher levels of heavy metals than *Thlaspi caerulescens*, with yields of 100 times more biomass in mine soils. *Chemosphere* 64(3): 478-485.
- McGrath, SP., Sidoli, C.M.D., Baker, A.J.M. y Reeves, R.D. 1993. *The potential for the use of metal-accumulating plants for*

the in situ decontamination of metal-polluted soils. En: Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for proper Protection, (eds. Eijsackers, H.J.P. y Hamers, T.), pp. 673-676, Kluwer Academic Publishers.

McGrath, SP., Lombi, E., Gray, CW., Caille, N., Dunham, SJ. y Zhao, F.J. 2006. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators Thlaspi caerulescens and Arabidopsis halleri. *Environmental Pollution* 141 (1): 115-125.

Meagher, R.B., Rugh, C.L., Kandasamy, M.K., Gragson, G. y Wang, N.J. 2000. Engineered phytoremediation of mercury pollution in soil and water using bacterial genes. En: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (eds. Terry, N. y Bañuelos, G.), pp. 201-220, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.

Noret, N., Tolrà, R., Poschenrieder, C., Barceló, J. 2005. Palatability of Thlaspi caerulescens for snails: influence of zinc and glucosinolates. *New Phytol.* 165: 763-772.

Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. *Annual Review Plant Biology* 56: 15-39.

Poschenrieder, C., Tolrà, R. y Barceló, J. 2006. Can metals defend plants against biotic stress? *Trends in Plant Science* 11: 288-295.

Salt, D.E. 2006. An extreme Plant Lifestyle: Metal Hyperaccumulation. En: *Plant Physiology Online*. Chapter 26. Essay 26.2. Disponible en: <http://4e.plantphys.net/article.php?ch=&id=356>

Schat, H., Llugany, M. y Bernhard, R. 2000. Metal-specific patterns of tolerance, uptake and transport of heavy metals in hyperaccumulating and nonhyperaccumulating metallophytes. En: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (eds. Terry, N. y Bañuelos, G.), pp. 171-200, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.

Schat, H., Llugany, M., Vooijs, R., Hartley-Whitaker, J. y Bleeker, PM. 2002. The role of phytochelatin in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *J. Exp. Bot.* 53: 2381-2392.

Tolrà, R., Poschenrieder, C. y Barceló, J. 1996. Zinc hyperaccumulation in Thlaspi caerulescens. II Influence of organic acids. *J. Plant Nutrition* 19: 1541-1550.

Tolrà, R., Poschenrieder, C., Alonso, R., Barceló, D. y Barceló, J. 2001. Influence of Zinc hyperaccumulation on glucosinolates in Thlaspi caerulescens. *New Phytologist* 151: 621-626.

Vázquez, S., Goldsbrough, P. y Carpena, R.O. 2006. Assessing the relative contributions of phytochelatin and the cell wall to cadmium resistance in white lupin. *Physiologia Plantarum* 128 (3): 487-495.