



Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo

Phytoremediation: A proposal of soil decontamination

Maria Cristina Vasconcellos^[a], Débora Pagliuso^[b], Vanessa Santos Sotomaio^[c]

Resumo

A preocupação com o meio ambiente tornou-se mundial, de tal forma que a busca por alternativas de descontaminação de áreas tem sido frequente. A contaminação do solo com poluentes diversos (compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados), provenientes das atividades antrópicas, tem chamado atenção em virtude da degradação do solo e da água. A partir dessa perspectiva, emergiu o conceito de fitorremediação, que descreve a utilização de plantas para a extração/amenização do composto poluente. Embora a fitorremediação seja um conceito novo e que necessita mais estudos, observam-se respostas positivas na descontaminação de solos e água. Este trabalho visa informar sobre o campo da fitorremediação e seu uso no tratamento de metais pesados.

Palavras-chave: Compostos orgânicos. Fitorremediação. Meio ambiente. Metais pesados.

Abstract

The concern about the environment has become global, so alternatives for the decontamination of areas have been surveyed. Soil contamination with various pollutants (organic, inorganic and heavy metals) from human activities has drawn attention due to degradation of soil and water. From this view the concept of phytoremediation has emerged, according to which plants are used for the extraction/mitigation of the pollutant compound. Although phytoremediation is a new concept and needs further studies, it is observed positive responses in the decontamination of soil and water. This work aims to inform about the field of phytoremediation and its use in the treatment of heavy metals.

Keywords: Organic compounds. Phytoremediation. Environment. Heavy metals.



^[a] Mestre em Química Orgânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), professora adjunta de Biotecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR - Brasil e-mail: maria.vasconcellos@pucpr.br

^[b] Acadêmica do curso de Biotecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR - Brasil, e-mail: debbie_pagliuso@hotmail.com

^[c] Ph.D. em Biologia Celular e Molecular, professora titular do curso de Biotecnologia e docente do curso de Ciências Biológicas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Curitiba, PR - Brasil, e-mail: vanessa.sotomaio@pucpr.br

Recebido: 29/05/2012

Received: 05/29/2012

Aprovado: 18/07/2012

Approved: 07/18/2012

Introdução

A recuperação do meio ambiente tem sido uma grande preocupação nos dias atuais. Os solos e as águas contaminadas vêm assumindo proporções que comprometem a qualidade de vida no planeta (Pajevic, Borisev, Nikolic, Kristic, Pilipovic & Orlovic, 2009). As atividades antrópicas voltadas para a mineração, indústria metalúrgica, indústrias químicas, agricultura, dentre outras, têm causado distúrbios na biosfera, ao liberar rejeitos orgânicos como hidrocarbonetos, inorgânicos e os metais pesados presentes em grande parte dos rejeitos industriais (Bhargava, Carmona, Bhargava & Srivastava, 2012). A expressão *metais pesados* é aplicada ao grupo de metais e metaloides com densidade atômica maior que 4.000 kg m⁻³ ou cinco vezes maior que a da água, sendo componentes naturais da crosta terrestre (Hashim, Mukhopadhyay, Sahu & Sengupta, 2011). Várias técnicas de descontaminação de solos, águas e sedimentos contendo metais pesados têm sido utilizadas, dentre elas destacam-se precipitação, trocas iônicas, técnicas de alto impacto, como a lixiviação do solo com produtos químicos ou completa remoção e transferência para aterros (Nedelkoska & Doran, 2000). Conforme explicam Nedelkoska e Boran (2000), tais métodos apresentam sucesso em situações específicas, porém há dificuldades operacionais relacionadas ao tipo de solo, produção de metabólitos, destruição do local e um provável aumento do contaminante mobilizado que limitam o seu uso, além do alto custo de operação. O método convencional de remediação envolve solidificação, estabilização, vitrificação, escavação e remoção do contaminante do leito do solo, ou sua lavagem com ácidos fortes ou agentes quelantes (Bhargava, et al. 2012).

Uma série de descobertas científicas combinada à pesquisa interdisciplinar vem desenvolvendo alternativas promissoras para a remediação do solo, as quais são menos agressivas ao ambiente (ecologicamente corretas) e economicamente mais viáveis (Haque, Peralta-Videa, Jones, Gill & Gardea-Torresdey, 2008). A fitorremediação surge como uma dessas alternativas (Peuke & Rennenberg, 2005).

Fitorremediação

A fitorremediação (*fito* = planta e *remediação* = corrigir), conhecida desde 1991, é a tecnologia que utiliza

plantas para degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água. As pesquisas nessa área procuram compreender a interação da planta com o contaminante (EPA, 2000). Algumas espécies de gêneros como *Phragmites*, *Tamarix*, *Nicotiana*, *Helianthus*, *Salix*, *Typha*, *Arabis* são citadas para serem utilizadas na fitorremediação (Al-Taisan, 2009).

Baixo custo de investimento e de operação, sua aplicabilidade *in situ*, e geração mínima de degradação e desestabilização da área a ser descontaminada são algumas das vantagens da fitorremediação (Chaves, Mesquita, Araujo & França, 2010). Sua efetividade está limitada pela capacidade da planta em sorver os metais das superfícies das partículas do solo e da solubilidade desses metais. Todavia, os metais podem ser solubilizados pela adição de agentes complexantes, fazendo com que as plantas aumentem a sua captação (Doumett, Lamperi, Checchini, Azzarello, Mugnai, Mancuso, et al. 2008). Espécies dos gêneros *Thlaspi*, *Urtica*, *Chenopodium*, *Polygonumsachalase* e *Alyssum* têm apresentado habilidade de extrair, acumular e tolerar altos níveis de metais pesados (Rajkumar & Freitas, 2008).

Outras limitações da fitorremediação estão relacionadas ao clima, ao tipo de solo, à estação do ano, à concentração e profundidade do contaminante e à interferência do contaminante no crescimento da planta, o que muitas vezes leva a um crescimento lento, aumentando o tempo necessário para o processo de descontaminação (Cunningham & Ow, 1996; Pilon-Smits, 2005).

Os resultados da fitorremediação não são imediatos, podendo levar semanas, meses e até anos para que o efeito esperado seja alcançado. Assim, ela pode ser desaconselhada em áreas que precisam uma resposta rápida e que oferecem risco aos seres vivos (EPA, 2000). Uma estratégia para aumentar a captura dos contaminantes é o melhoramento genético das plantas com potencial fitorremediador (Gardea-Torresdey, Peralta-Videa, De La Rosa & Parsons, 2005).

Como ocorre a fitorremediação

Quase todas as plantas são capazes de absorver, sequestrar e/ou degradar contaminantes (Cunningham & Ow, 1996). Os metais de transição, como cobre, zinco, cádmio, ferro, manganês, molibdênio e níquel, são necessários para o crescimento normal da planta, desempenhando funções específicas no metabolismo

celular. A elevada concentração de metais pesados pode resultar na acumulação genotóxica de espécies de oxigênio reativo, levando à ocorrência de mutações (Macovei, Ventura, Dona, Fae, Balestrazzi & Carbonera, 2010; Rascio & Navari-Izzo, 2011).

Os contaminantes que podem ser alvos da fitorremediação compreendem compostos orgânicos (hidrocarbonetos derivados do petróleo, solventes clorados, pesticidas), compostos inorgânicos (nitratos, sulfatos, cianetos), explosivos, metais pesados, radionuclídeos e lixiviados de aterro sanitário, e que se encontram até 20 metros de profundidade (Susarla, Medina & McCutcheon, 2002).

Chang e Corapcioglu (1998) descreveram como as plantas conseguem reparar os locais contaminados por resíduos tóxicos e esses processos incluiriam: modificação das propriedades físicas e químicas do contaminante no solo e liberação de exsudatos pelas raízes. Esse segundo mecanismo pode levar a uma série de alterações do solo próximo às raízes, como aumento da matéria orgânica, da aeração e da porosidade. Outro fator que pode beneficiar a fitorremediação é a atuação microbiana que transforma as substâncias químicas persistentes nos solos, sejam elas os próprios contaminantes, favorecendo sua captura pelas plantas, ou atuando sobre os produtos já metabolizados pelas plantas como resultado da remediação.

Os mecanismos da fitorremediação para metais pesados estão fundamentados na solubilização do elemento, que pode ser auxiliada por agentes quelantes ou microrganismos. Uma vez que os metais encontram-se disponíveis, eles são extraídos ou desorvidos do solo (Schmidt, 2003). As plantas expostas à alta concentração de metal pesado apresentam um aumento na produção da ligação metal-proteínas, como as metalotioneínas, capazes de se ligar fisiologicamente a metais como cobre, zinco e metais pesados, pelo grupo tiol dos resíduos de cisteína (Macovei, et al. 2010) e as fitoquelatinas, que são sintetizadas pela glutatona e possuem a capacidade de se ligar ao metal pesado, formando um complexo transportado ao vacúolo (Heiss, Wachter, Bogs, Cobbett, & Rausch, 2003).

O sucesso no uso da fitorremediação para a descontaminação do solo contendo contaminantes orgânicos está relacionado à habilidade que o solo possui em absorvê-los e sequestrá-los, conforme a matriz do solo. Um solo com alto teor de matéria orgânica reduz a biodisponibilidade de pesticidas, por exemplo, e essa biodisponibilidade diminui com o tempo, sugerindo que o tratamento com a fitorremediação aconteça o mais

breve possível. A capacidade que as raízes das plantas apresentam em absorver os contaminantes orgânicos está diretamente relacionada ao caráter lipofílico do contaminante. Esses contaminantes, ao serem ligados aos tecidos das plantas, tornam-se indisponíveis, ou podem ser translocados e, subsequentemente, volatilizados pelas superfícies foliares (Cunningham & Ow, 1996). O Quadro 1 mostra algumas plantas utilizadas no processo de descontaminação de compostos orgânicos (Susarla, et al. 2002).

Uma planta boa remediadora deve ser capaz de crescer na presença do contaminante e sobreviver sem diminuir sua taxa de crescimento, apesar da captura do contaminante e do seu acúmulo (Pajevic, et al. 2009). As espécies apresentam capacidade de acumulação diversificada, ou seja, de vários contaminantes; ou específica, de um ou poucos contaminantes. Por essa razão, é importante estudar diferentes espécies analisar a acumulação e a tolerância para determinado composto contaminante (Hidayati, Juhaeti, & Syarif, 2009).

Plantas hiperacumuladoras

Destaque é dado para as plantas hiperacumuladoras (Quadro 2), isto é, aquelas que apresentam capacidade de absorver quantidades elevadas de metais pesados (Doumett, et al. 2008). Elas têm se mostrado muito mais acumuladoras e tolerantes a metais pesados em comparação às não hiperacumuladoras (Audet & Charest, 2007). Outra vantagem desse tipo de planta seria a capacidade de absorção de contaminantes distintos presentes no solo simultaneamente, isto é, um solo que apresenta mais de um metal pesado em sua composição pode tê-los absorvidos por um único tipo de vegetal (Lombi, Zhao & McGrath, 2001). Além disso, as hiperacumuladoras possuem maior concentração do metal pesado nas partes aéreas do que nas raízes, fato indicador de que as plantas hiperacumuladoras conseguem absorver e transportar metais pesados, que ficam estocados em suas partes aéreas (Haque, et al. 2008). O Quadro 3 mostra a concentração do metal extraído em peso seco da planta.

Técnicas de fitorremediação

As técnicas de fitorremediação disponíveis para aplicação estão subdivididas, segundo a Agência de Proteção do Meio Ambiente (U.S. Environmental

Quadro 1 - Espécies de plantas utilizadas na fitorremediação de compostos orgânicos

Espécies de plantas	Contaminante
Cevada (<i>Hodeum vulgare</i> L. Cv. Klages)	Hexaclorobenzeno, Bifenil policlorado (PCBs), pentaclorobenzeno, triclorobenzeno
Gramíneas forrageiras	Ácidos benzoicos clorados
Soja (<i>Glycine max</i> [L.] Merr. Cv. Fisk by v)	Bromoacil, nitrobenzeno, fenol
<i>Myriophyllum spicatum</i>	TNT
<i>Eichhornia crassipes</i>	Pentaclorofenol, tetracloroetano (PCE), tricloroetano (TCE)

Fonte: Adaptado de Susarla, Medina & McCutcheon, 2002.

Quadro 2 - Espécies de plantas hiperacumuladores

Metal	Espécie de planta hiperacumuladora	Família	Referência
Ni	<i>Berkheya coddii</i>	Asteraceae	Robinson, et al. (1997); Moradi, et al. (2010)
	<i>Alyssum serpyllifolium</i> , <i>A. bertolonii</i>	Brassicaceae	Becerra-Castro, et al. (2009); Barzanti, et al. (2011)
	<i>Sebertia acuminata</i>	Sapotaceae	Jaffre, et al. (1999); Perrier (2004)
	<i>Phidiasia lindavii</i>	Acanthaceae	Reeves, et al. (1999)
	<i>Bornmuellera kiyakii</i>	Brassicaceae	Reeves, et al. (2009)
Cu	<i>Ipomea alpina</i>	Convolvulaceae	Cunningham and Ow (1996)
	<i>Crassula helmsii</i>	Crassulaceae	Küpper, et al. (2009)
	<i>Commelina communis</i>	Commelinaceae	Wang and Zhong (2011)
Pb	<i>Sesbania drummondii</i>	Fabaceae	Sahi, et al. (2002); Sharma, et al. (2004)
	<i>Hemidesmus indicus</i>	Apocynaceae	Chandra Sekhar, et al. (2005)
	<i>Arabis paniculata</i>	Brassicaceae	Tang, et al. (2009)
	<i>Plantago orbignyana</i>	Plantaginaceae	Bech, et al. (2011)
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Brassicaceae	Basic, et al. (2006)
	<i>Arabidopsis halleri</i>	Brassicaceae	Dahmani-Muller, et al. (2000); Bert, et al. (2002)
	<i>Bidens pilosa</i>	Asteraceae	Sun, et al. (2009)

Fonte: Adaptado de Bhargava, Carmona, Bhargava & Srivastava, 2012.

Protection Agency – EPA, 2000), em: fitoextração, rizofiltração, fitoestabilização, rizodegradação, fitodegradação, fitovolatilização, fitomineração, controle hidráulico e cobertura vegetativa.

Fitoextração é a captação dos contaminantes pelas raízes e são translocados dentro da planta, sendo muito aplicada em contaminantes metálicos, como cádmio, níquel, cobre, zinco e chumbo, podendo também ser utilizada para compostos orgânicos, mas essa técnica se apresenta produtiva apenas se o contaminante é absorvido pelas raízes. Aplicada para Cd, Cr, Ni, Zn, radionuclídeos, benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno (BTEX) e outros compostos orgânicos (Susarla, et al. 2002).

Rizofiltração é uma técnica em que a adsorção ou precipitação ocorre nas raízes ou absorção de contaminantes que estão em solução aquosa, ao redor da zona de raízes, e a translocação na planta depende do contaminante. Aplicada a metais pesados, radionuclídeos, tais como, urânio, céσιο e estrôncio (EPA, 2000).

Fitoestabilização implica na imobilização do contaminante no solo, basicamente metais, através da absorção e acumulação pelas raízes, e no uso de plantas e suas raízes para prevenir a migração do contaminante. As raízes das plantas, por reduzirem a quantidade de água no solo, impedem o movimento dos metais, estabilizando-os e evitando a erosão. Aplicada a metais pesados em minas, fenóis e solventes clorados (Susarla, et al. 2002).

Quadro 3 - Concentração de metal, em peso seco de plantas hiperacumuladoras

Metal	Espécie de planta	Concentração, peso seco, de plantas que cresceram em solo contaminado (mg kg ⁻¹ em raízes)
Ni	<i>Psychotria douarrei</i>	47.500
Cu	<i>Ipomea alpine</i>	12.300
Pb	<i>Thlaspi rotundifolium</i>	8.200
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	1.800

Fonte: Adaptado de Cunningham & Ow, 1996.

Rizodegradação é a quebra de um contaminante orgânico no solo pela atividade microbiana, que é aumentada pela presença da zona radicial. Conhecida também por degradação de planta assistida, biorremediação de planta assistida, planta adicionada ao local da biodegradação e aumento da biodegradação da rizosfera. É utilizada para degradação de compostos orgânicos provenientes do petróleo, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, dentre outros compostos orgânicos.

Fitovolatilização consiste na captação e transpiração de um contaminante pela planta, com liberação do contaminante ou uma forma modificada do contaminante para a atmosfera. As vantagens dessa técnica seriam: o fato de como o mercúrio poderia ser transformado em formas menos tóxicas e os contaminantes lançados na atmosfera poderiam ser sujeitos a uma degradação natural mais rápida e efetiva, sendo mais aplicada a compostos orgânicos e inorgânicos. Dois exemplos seriam o Se e o Hg, que, pela associação com microrganismos, podem converter em forma metiladas, menos tóxicas ao meio ambiente.

Já no processo da fitoestimulação, ocorre a liberação de aminoácidos e polissacarídeos pela raiz, que caracteriza um estímulo para a atividade microbiana. Esses compostos produzidos ainda têm a capacidade de degradar outros componentes do solo, conferindo à planta, muitas vezes, uma aptidão rizosférica para a biorremediação, por apresentar grande concentração de microrganismos, considerada uma excelente área para a degradação de compostos orgânicos, tais como substâncias químicas aromáticas hidrofóbicas (PHAs, BTEX e compostos derivados dos fenóis).

Fitotransformação ou fitodegradação é uma técnica que também emprega o uso de raízes bem desenvolvi-

das, porém utiliza a absorção com subsequente volatilização ou, então, a degradação de forma parcial ou completa, transformando o composto em menos tóxico. A degradação implica na absorção direta do contaminante e numa degradação no interior das células vegetais por atividade enzimática específica, sendo aplicada para compostos orgânicos, como hidrocarbonetos.

O controle hidráulico ou fitohidráulico compreende a utilização de plantas para a absorção de água do subsolo para a captação e consumo, de tal sorte que os contaminantes permanecem retidos em uma área, podendo-se dizer, portanto, que o controle hidráulico controla a migração dos contaminantes. Essa técnica apresenta as vantagens de não precisar instalar um sistema de bombeamento, e o tratamento apresenta custos baixos. Além disso, as raízes das plantas apresentam uma maior capacidade de penetração e contato com maior volume de solo do que se utilizasse um sistema de bombeamento.

Cobertura vegetativa é um sistema de plantas em crescimento e/ou sobre materiais que apresentam risco ambiental. A presença de tal cobertura pode reduzir os riscos desses materiais para um nível aceitável e requer manutenções mínimas. Existem dois tipos de coberturas vegetais: as de evapotranspiração e as de fitorremediação. Em relação ao primeiro, a composição é de solo e plantas modificadas que visam à maximização de disponibilidade de armazenagem da capacidade do solo, níveis de evaporação e processos de transpiração de plantas que minimizam a infiltração de água no solo.

Conclusão

Verificou-se que a fitorremediação ainda demanda de estudos mais amplos sobre a variedade de plantas e suas propriedades remediadoras, além de estudos que viabilizem seu melhoramento genético e sua aplicação. O uso efetivo de plantas num tratamento de remoção de metais pesados e compostos orgânicos ainda depende da melhor compreensão dos mecanismos envolvidos, especialmente daqueles relativos a tempo e custos operacionais, para que sejam alcançados os resultados desejados.

Este artigo procurou apresentar uma proposta alternativa para o tratamento de áreas condenadas que podem ter a condição de uma recuperação usando um processo menos agressivo que os atualmente empregados.

Há três anos, na PUCPR, iniciaram-se estudos relativos ao uso da fitorremediação, visando avaliar a possibilidade de descontaminação de solos contendo contaminantes de cromo e níquel provenientes de indústrias galvânicas. Os testes realizados mostram a efetividade do processo, além do baixo custo, apesar de o tempo de cultivo ser longo. No Brasil, nos últimos dez anos, as pesquisas nessa área têm se intensificado, mas na procura por espécies fitorremediadoras.

Referências

- Al-Taisan, W. A. (2009). Suitability of using *Phragmites australis* and *Tamarix aphylla* as vegetation filters in industrial areas. *American Journal of Environmental Sciences*, 6, 740-747. doi:10.3844/ajessp.2009.740.747.
- Audet, P., & Charest, C. (2007). Heavy metal phyto-remediation from a meta-analytical perspective. *Environmental pollution*, 147, 231-237. doi:10.1016/j.envpol.2006.08.011.
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105, 103-120. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.002.
- Chang, Y., Corapcioglu, M. Y. (1998). Plant-enhanced subsurface bioremediation of nonvolatile hydrocarbons. *Journal of Environmental Engineering*, 112, 162-169.
- Chaves, L. H. G., Mesquita, E. F., Araujo, D. L., & França, C. P. (2010). Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. *Engenharia-Ambiental-Espirito Santo do Pinhal*, 7(3), 263-277.
- Cunningham, S. D., & Ow, D. W. (1996). Promises and prospects of Phytoremediation. *Plant Physiology*, 110, 715-719. PMID:12226213.
- Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S. et al. (2008). Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents. *Chemosphere*, 72, 1481-1490. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.04.083.
- EPA. (2000). Introduction of phytoremediation. EPA/600/R-99/107. Recuperado em 5 Maio 2012, de <http://nepis.epa.gov>.
- Gardea-Torresdey, J. L., Peralta-Videa, J. R., De La Rosa, G., & Parsons, J. G. (2005). Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, 249, 1797-1810. doi:10.1016/j.ccr.2005.01.001.
- Haque, N., Peralta-Videa, J. R., Jones, G. L., Gill, T. E., & Gardea-Torresdey, J. L. (2008). Screening the phytoremediation potential of desert broom (*Braccharis sorothroides* Gray) growing on mine tailings in Arizona, USA. *Environmental Pollution*, 153, 362-368. doi:10.1016/j.envpol.2007.08.024.
- Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of Environmental Management*, 92, 2355-2388. doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.009.
- Heiss, S., Wachter, A., Bogs, J., Cobbett, C., & Rausch, T. (2003). Phytochelatin synthase (PCS) protein is induced in *Brassica juncea* leaves after prolonged Cd exposure. *Journal of Experimental Botany*, 54(389), 1833-1839. doi:10.1093/jxb/erg205.
- Hidayati, N., Juhaeti, T., & Syarif, F. (2009). Mercury and cyanide contamination in gold mine environment and possible solution of cleaning up by using phytoextraction. *Journal of Biosciences*, 16(3), 88-94.
- Lombi, E., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (2001). Phytoremediation of heavy metal- contaminated soils: Natural hyperaccumulation versus chemistry enhanced phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 1919-1926. doi:10.2134/jeq2001.1919.
- Macovei, A., Ventura, L., Dona, M., Fae, M., Balestrazzi, A., & Carbonera, D. (2010). Effect of heavy metal treatments on metallothionein expression. Profiles in white poplar (*Populus alba* L.) cell suspension cultures. *Analele Universitatii din Oradea-Fascicula Biologie, Tom. XVII*, 2, 274-279.
- Nedelkoska, T. V., & Doran, P. M. (2000). Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. *Mineral Engineering*, 13(5), 549-561. doi:10.1016/S0892-6875(00)00035-2.
- Pajević, S., Borisev, M., Nikolic, N., Kristic, B., Pilipovic, A., & Orlovic, S. (2009). Phytoremediation capacity of poplar (*Populus* spp.) and willow (*Salix* spp.) clones in relation of photosynthesis. *Archives of Biological Science Belgrade*, 61(2), 239-247 doi: 10.2298/ABS0901239P.

- Peuke, A. D., & Rennenberg, H. (2005). *Phytoremediation, EMBO Reports*, 6(6), 497-501. doi:10.1038/sj.embor.7400445.
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39. doi:10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214.
- Rajkumar, M., & Freitas, H. (2008). Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. *Bioresource Technology*, 99, 3491-3498. doi:10.1016/j.biortech.2007.07.046.
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180, 169-181. doi:10.1016/j.plantsci.2010.08.016.
- Schmidt, U. (2003). Enhancing Phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *Journal of Environmental Quality*, 32, 1939-1954. doi:10.2134/jeq2003.1939.
- Susarla, S., Medina, V. F., & McCutcheon, S. C. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, 18, 647-658. doi:10.1016/S0925-8574(02)00026-5.