

Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados

Phytoremediation: a sustainable alternative for recovering soil contaminated by heavy metals

Sarah Amado¹ e Jales Teixeira Chaves Filho²

1. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Saúde, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Avenida Universitária 1.140, Setor Universitário, Goiânia, GO, Brasil. CEP: 74605-010, Fone: (62) 3946-1000/ 3946-1005/ 8120-4577. 2. Professor Titular da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

*Autor para correspondência: sarahamado@hotmail.com

Resumo O presente estudo busca levantar informações acerca da origem e dos danos ocasionados pela liberação de metais pesados no meio ambiente, assim como, conhecer sobre a tecnologia da fitorremediação e sobre os ensaios que se destinam à identificação de espécies capazes de fitorremediar locais contaminados por determinados metais. A mineração e siderurgia são fontes de emissão de metais pesados. As altas concentrações e o volume de metais pesados liberados no ambiente, fazem com que o solo perca a capacidade de retenção. Corpos d'água tornam-se então seus receptores, com posterior difusão da contaminação e comprometimento da cadeia trófica. Todas as formas de vida podem ser afetadas pela presença de metais pesados dependendo da dose e constituição química. No entanto, existem espécies de plantas que desenvolveram mecanismos de tolerância associada a capacidade de degradar, extrair, conter ou imobilizar íons metálicos, podendo ser utilizadas como fitorremediadoras. Dentre as vantagens da fitorremediação, destacam-se: baixo custo, melhoria das propriedades do solo e reestabelecimento da estética ambiental. Algumas espécies com potencial fitorremediador são: *Enterolobium contortisiliquum*, *Salix humboldtiana*, *Eucalyptus maculata*, *Canavalia ensiformis*, *Nicotiana tabacum*, *Cedrela fissilis* e *Jatropha curcas*. Por meio dos estudos existentes, constata-se necessidade de realização de novas pesquisas com a finalidade de enriquecer a diversidade de plantas empregadas na remediação de áreas contaminadas por metais pesados.

Palavras-chave: metais pesados, solo, contaminação, saúde, tolerância.

Abstract This study aims to gather information on the origin and damages caused by the liberation of heavy metals in the environment, and also to know the phytoremediation technology and tests that seek to identify species capable to phytoremediate sites contaminated by particular metals. Mining and steel works activities are the primary sources of heavy metal emissions. The high concentration and the volume of these heavy metals that are released in the environment cause the soil to lose its capacity to retain these metals. Water bodies become receptors and disseminators of these contaminants which will, in turn, compromise the food chain. Every form of life can be affected by the presence of heavy metals depending on dose and chemical composition. However, some plant species have developed tolerance mechanisms associated to the ability to degrade, extract, contain or immobilize metal ions and can, therefore, be used for phytoremediation. Among the advantages of using this method for soil recovery, the following are especially noteworthy: it is a low cost measure, improves soil properties and reestablishes environmental aesthetics. Some plant species with phytoremediation potential are: *Enterolobium contortisiliquum*, *Salix humboldtiana*, *Eucalyptus maculata*, *Canavalia ensiformis*, *Nicotiana tabacum*, *Cedrela fissilis* and *Jatropha curcas*. Existing studies have established the need for further research aimed at increasing the number of plants used to recover areas contaminated by heavy metals.

Keywords: heavy metals, soil, contamination, health, tolerance.

Introdução

Os metais pesados passam a representar fonte de contaminação, pelo fato de indústrias, mineradoras, siderurgias, poder público e população os liberar em excesso no ambiente natural sem pré-tratamento e sem posterior remediação da área afetada.

A ausência de intervenção adequada, faz com que os íons metálicos persistam no solo por formar complexos estáveis com biomoléculas, afetando sua qualidade e a capacidade produtiva (Santos e Rodella 2007, Macêdo e Morril 2008, Bertolazi *et al.* 2010).

Outro aspecto preocupante está na mobilidade dos metais no solo, que pode ser afetada por fatores como: teores e tipos de argila, pH, capacidade de troca de cátions e teor de matéria orgânica (Oliveira e Mattiazzo 2001). Assim, de acordo com as condições em que o solo se encontra, ocasionarão o aumento da solubilidade e disponibilidade dos metais para as raízes, elevando a probabilidade de toxidez não somente em plantas, como em animais e seres humanos.

A resposta das plantas à toxidez envolve alterações estruturais, fisiológicas e bioquímicas que dependem do tipo, concentração e tempo de exposição ao metal pesado (Macêdo e Morril 2008). Tempo este, que desenvolveu em algumas espécies tolerância e capacidade de bioacumulá-lo.

A partir da descoberta de plantas resistentes a metais pesados, surge a técnica de tratamento *in situ*, denominada fitorremediação. Feita no próprio local da contaminação, tornou-se um processo atrativo e economicamente viável (Andrade *et al.* 2010).

Rejeitos de mineração e suas consequências

Os metais pesados apresentam-se como uma das bases para o desenvolvimento da sociedade, sendo utilizados como matéria-prima de fertilizantes agrícolas e em diversas indústrias de bens de consumo (Silva *et al.* 2004).

A exploração de metais concentra-se nas atividades de mineração e siderurgia, tornando-se fonte primordial de poluição e um sério problema ambiental (Oliveira *et al.* 2009). Os danos frequentes presentes nos terrenos de mineração são: supressão e/ou impedimento de regeneração da vegetação; remoção do solo superficial; alteração da qualidade das águas dos rios, reservatórios da mesma bacia e águas subterrâneas; poluição do ar por particulados suspensos pela atividade de lavra; ruídos e vibrações no solo associados à operação de equipamentos e explosões (Mechi e Sanches 2010).

O conjunto de operações realizadas visando à retirada de minério, é chamado lavra. O minério bruto não se encontra adequado para ser incorporado a processos metalúrgicos ou para a utilização industrial, por isso, é submetido a um tratamento que o divide em duas frações: concentrado e rejeito (Muniz e Oliveira Filho 2006).

Os rejeitos são uma das principais formas de contaminação do solo e da água por metais pesados, onde somados ao volume e tipo de mineração, promoverão diferentes níveis de degradação e erosão do solo (Muniz e Oliveira Filho 2006).

Outras fontes antropogênicas de metais pesados estão ligadas ao processo de urbanização, que gera resíduos como: compostos de lixo, lodo de esgoto, águas residuais e combustão de combustíveis fósseis (Zeitouni 2003).

A proporção de contaminantes descartada acaba prejudicando a área que os recebe, assim como as áreas circundantes. O resultado, é um total desequilíbrio dos ecossistemas, ocasionado pela destruição de habitats e morte de espécies da fauna e flora.

Ao longo dos anos o bem-estar e saúde humana também estão sendo afetados com o processo de contaminação dos ambientes terrestres, tornando-se especialmente nas últimas décadas, assunto de interesse público que afeta tanto os países desenvolvidos como países em desenvolvimento (Lamego e Vidal 2007).

Metais pesados: de micronutrientes a contaminantes tóxicos

Metal pesado é um termo geral aplicado a um grupo de elementos químicos com peso específico maior que 5 g/cm³ ou com número atômico maior que 20 (Malavolta *et al.* 2006). Outras formas de designar metais pesados são: metais tóxicos, elementos potencialmente tóxicos ou elementos-traço (Zeitouni 2003).

Estão presentes naturalmente no solo em baixas concentrações, como resultado do intemperismo e de outros processos pedogenéticos (Kede *et al.* 2008). Por esta razão, constituem um conjunto de nutrientes essenciais para várias funções fisiológicas dos seres vivos (Zeitouni 2003), especialmente para as plantas.

Muitos metais são micronutrientes, ou seja, elementos exigidos em quantidades menores se comparados aos macronutrientes e que são elementares para a sobrevivência das plantas, sendo que alguns exemplos são: cobalto (Co), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn) (Malavolta *et al.* 2006). Contudo, concentrações excessivas desses metais resultam em fitotoxicidade (Paiva *et al.* 2004).

Em geral, o excedente de metais no solo é de origem antrópica. As atividades realizadas pelo ser humano geram poluição, e a remoção dos compostos potencialmente tóxicos

torna-se complicada devido ao número de classes e tipos produzidos (Lamego e Vidal 2007).

Para Zeitouni (2003), poluição está relacionada a introdução de compostos poluentes que gera efeitos danosos aparentes, como a degradação do solo e do ambiente. Segundo o mesmo autor, contaminação é um conceito distinto, onde uma substância química perigosa é introduzida ou está presente no ambiente, sem causar qualquer dano visível.

Uma área é considerada contaminada se a concentração da substância de interesse estiver acima de um dado limite, denominado valor de intervenção, indicando risco de efeito deletério sobre a saúde humana por ter a chance de danificar qualquer atividade biológica existente no organismo e gerar tantos tipos de resposta quantas forem as atividades (Moreira e Moreira 2004, Borges Júnior *et al.* 2008).

No Brasil, os níveis de referência para investigação dos teores de metal pesado e de outras substâncias químicas em solos e águas subterrâneas são definidos na Resolução CONAMA nº 420 (Brasil 2009), o que facilita a avaliação de contaminação e a criação de indicadores que controlem e cuidem das áreas expostas a metais e dos seres vivos existentes nela.

Todas as formas de vida podem ser afetadas pela presença de metais pesados dependendo da dose e constituição química (Oliveira *et al.* 2009). Outro fator-chave a ser considerado é o grau de exposição que está diretamente relacionado a quantidade biodisponível no ambiente, pois os íons livres do metal podem estar ligados a matéria orgânica, reduzindo a biodisponibilidade (Muniz e Oliveira Filho 2006).

Exposição humana a metais pesados pode gerar sintomas de difícil diagnóstico

Os metais pesados depositam-se em diferentes partes da planta e percorrem as cadeias tróficas, passando aos herbívoros e carnívoros, inclusive os humanos (Corrêa 2006). No organismo humano, serão assimilados através da ingestão crônica ou aguda de alimentos e água contaminados, sendo caracterizada respectivamente pelo: consumo de pequenas doses durante um longo período ou pelo consumo de altas dosagens durante um intervalo de até 24 horas (Jardim e Caldas 2009).

Entretanto, a exposição mais frequente aos metais é a funcional, principalmente quando se trata de trabalhadores no setor da mineração e industrial que se contaminam por via digestiva, inalatória ou por absorção cutânea (Mardones 2007).

A grande preocupação de diagnóstico por contaminação, é que os sintomas são difíceis de serem distinguidos e perdem a especificidade ao serem provocados pela interação de vários agentes químicos (Oliveira *et al.* 2009).

Também é importante considerar que todos os sistemas enzimáticos são potencialmente susceptíveis aos metais pesados

(Moreira e Moreira 2004), podendo desencadear uma gama de doenças e até mesmo câncer.

Para impossibilitar a piora de quadros clínicos e o surgimento de novos casos, há a possibilidade de avaliação dos riscos à saúde feita através de mensuração da concentração de substâncias químicas presentes no ambiente (monitoramento ambiental) e/ou no organismo (monitoramento biológico), sendo que este último consiste na medida e quantificação de um metal em vários meios biológicos, tais como sangue, urina, fezes, cabelo ou leite materno (Moreira e Moreira 2004).

Existem maneiras conjuntas de identificação e caracterização de danos ao homem causados por substâncias químicas, que são realizadas por meio de estudos com animais de laboratório e de estudos epidemiológicos observacionais (Jardim e Caldas 2009).

A difusão dos metais pesados no meio ambiente: contaminação do solo e corpos d'água

O aumento da população mundial é uma preocupação atual, pois a demanda está ultrapassando a capacidade de serviço do ambiente (Moore *et al.* 2003), inclusive a capacidade do solo em reter contaminantes.

Os solos tendem a ser um depósito de poluentes, agindo como filtro para proteger a água subterrânea e biorreator, para decompor poluentes orgânicos (Zeitouni 2003).

Embora seja uma barreira natural de proteção aos aquíferos, os fatores que governam a capacidade do solo de reter metais pesados são complexos, dificultando previsões acerca do comportamento desses elementos a longo prazo (Oliveira e Mattiazzo 2001). O que se sabe é a respeito da mobilidade, pois pode ser determinada pelos: teores e tipos de argila, pH, capacidade de troca de cátions e teor de matéria orgânica (Oliveira e Mattiazzo 2001).

Quanto as vias de contaminação dos corpos d'água por metais pesados e difusão da poluição no ambiente, observa-se que as duas predominantes são: arraste direto para rios e lagos por processos erosivos e percolação no perfil do solo (lixiviação), contaminando as águas subterrâneas (Barros *et al.* 2011).

A investigação das áreas anômalas, suspeitas de terem passado por alguma via de contaminação, avalia a extensão do problema e busca pistas sobre a origem da emissão de metais, para posterior gerenciamento (Borges Júnior *et al.* 2008).

A determinação da qualidade ambiental de uma área, é realizada por exemplo, pela biota presente na camada superficial do solo (0 a 5 cm) (Barros *et al.* 2010). Desse modo, um conjunto de microorganismos indica através da diminuição e alteração da atividade, que houve aumento de um determinado poluente.

Fitorremediação como alternativa para manutenção da qualidade ambiental

A estimativa mundial para os gastos anuais com a despoluição ambiental gira em torno de 25 a 30 bilhões de dólares (Mazzuco 2008). Um mercado que tende a crescer no Brasil uma vez que os investimentos para tratamento dos rejeitos humanos, agrícola e industrial crescem à medida que aumentam as exigências da sociedade e leis mais rígidas são adotadas (Mazzuco 2008).

Todavia, a remediação de ambientes contaminados por compostos potencialmente tóxicos torna-se complicada, devido à variedade de classes e tipos produzidos (Lamego e Vidal 2007). Sem contar que o processo envolve demanda por tecnologias efetivas e econômicas, que sejam específicas para a forma do contaminante e para o local onde serão aplicadas (Zeitouni 2003, Almeida *et al.* 2008).

A remediação consiste na execução de diferentes medidas de contenção e tratamento do material contaminado para saneamento de uma determinada área (Santos e Novak 2013).

Métodos convencionais de remediação de áreas contaminadas envolvem: escavação, incineração, extração com solvente e oxidação (Oliveira *et al.* 2009). Mas tem-se tornado preocupantes devido ao fato de causarem riscos de contaminação secundária e aumentarem ainda mais os custos com um segundo tratamento (Oliveira *et al.* 2009).

Uma alternativa, está presente nos métodos de imobilização *in situ* ou estabilização química, por serem economicamente viáveis e não interferirem na paisagem, na hidrologia e no ecossistema natural da região em comparação com as técnicas convencionais (Fungaro *et al.* 2004).

A fitorremediação encaixa-se como estratégia promissora de remediação *in situ*, onde há a introdução de maciços florestais e seus associados (microbiota) para “limpeza” de ambientes contaminados por metais pesados, exigindo que possuam capacidade de degradá-los, extraí-los, contê-los ou imobilizá-los no solo (Soares *et al.* 2001, Lamego e Vidal 2007, Vasconcellos *et al.* 2012).

Determinados tipos de plantas possuem potencial para extrair vários metais do solo, outras são mais específicas (Zeitouni *et al.* 2007). Porém, todas essas devem apresentar uma aptidão em comum: serem tolerantes a sua presença, inclusive os de origem antropogênica.

A tolerância a metais pesados associa-se a um ou mais mecanismos biológicos de fitorremediação, sendo eles conceituados por Lamego e Vidal (2007) (Tabela 1).

Ao conhecer a fisiologia vegetal voltada para a remoção de metais pesados no solo, torna-se possível sua melhoria tendo em vista especialmente a manutenção da qualidade ambiental. Tema de interesse atual, que necessita de mais pesquisas relacionadas a seleção de plantas e microssimbiontes tolerantes, que possibilitem revegetação destes solos (Trannin *et al.* 2001).

Parte significativa do reino vegetal não é tolerante a metais pesados, constituindo grande obstáculo à revegetação (Paim *et al.* 2006). Para evitar erros durante a escolha de espécies fitorremediadoras de áreas contaminadas, há requisitos de seleção fundamentais, sendo eles: sistema radicular profundo e denso, alta taxa de crescimento e produção de biomassa, capacidade transpiratória elevada, taxa de exsudação radicular elevada, resistência a pragas e doenças, adaptabilidade ao local a ser remediado (clima e solo), fixação biológica de nitrogênio atmosférico, alta associação com fungos micorrízicos, fácil controle ou erradicação posterior, fácil aquisição ou multiplicação de propágulos, ocorrência natural em áreas contaminadas (Procópio *et al.* 2009).

Plantas tolerantes e fitorremediadoras também podem desenvolver mecanismo de aumento da concentração de íons metálicos na solução do solo, ao acidificar o meio com extrusão de H^+ pelas raízes (Zeitouni 2003). A capacidade do solo em reter metais diminui em pH ácido, favorecendo a solubilização, mobilidade e posterior absorção destes elementos pelo sistema radicular (Zeitouni 2003).

Tantos artifícios, fazem dos vegetais excelentes colaboradores da minimização da erosão e a lixiviação dos metais pesados, protegendo o lençol freático e águas superficiais (Caires *et al.* 2011).

Outros benefícios da fitorremediação englobam: o menor custo em relação às técnicas tradicionais; utilização de energia solar para realizar os processos de descontaminação; degradação de xenobióticos a compostos não tóxicos feita internamente nas plantas ou no ambiente rizosférico; melhoria das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo; reestabelecimento da estética do ambiente (Procópio *et al.* 2009).

Em contrapartida, as desvantagens são: o tempo requerido é longo em decorrência do ciclo de crescimento e desenvolvimento da planta; há a possibilidade de contaminação da cadeia alimentar; há necessidade de retirada das plantas da área contaminada se, o composto tóxico for fitodegradado a um composto ainda mais tóxico; é preciso estudar os níveis de poluentes que as espécies de plantas suportam (Lamego e Vidal 2007, Procópio *et al.* 2009).

No entanto, os estudos aprofundados e a exploração comercial de plantas fitoextratoras restringe-se a países desenvolvidos e com políticas ambientais bem definidas (Zeitouni 2007). No Brasil, as plantas em questão ainda são pouco exploradas comercialmente devido à falta de capacitação técnica, desconhecimento do mercado e pelo fato de as espécies hiperacumuladoras conhecidas serem, em sua maioria, de clima temperado (Pereira 2005).

Para reverter a situação, é fundamental o investimento em pesquisas focadas na hiperacumulação de metais pesados com espécies florestais de clima tropical, que podem ser encontradas com facilidade no bioma Cerrado pois costumam crescer em

terrenos naturalmente ácidos e ricos em metais (Oliveira *et al.* 2009).

Flora pesquisada: estudos de caso

Em ambiente experimental, a aplicação de metais pesados sob o substrato pode ocasionar efeitos fitotóxicos na planta. Um

dos mais observados, é a clorose desencadeada pela deficiência de ferro (Fe) (Tabela 2). Nas espécies *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla*, por exemplo, doses crescentes de Zn não afetaram a absorção do Fe, mas sua translocação para a parte aérea, o que corroborou com os sintomas de clorose internerval observados por Soares (2001).

Tabela 1 Classificação dos tipos de fitorremediação realizados por plantas adaptadas a presença de metais pesados.

Classificação	Descrição
Fitoestabilização	Plantas são usadas com o propósito de estabilizar os poluentes no solo, prevenindo perdas por erosão ou lixiviação.
Fitovolatilização	Plantas que absorvem ou incorporam poluentes em seu tecido, para posteriormente, serem liberados sob a forma gasosa.
Fitodegradação	Plantas que degradam poluentes orgânicos com suas próprias atividades enzimáticas, transformando-os em compostos inorgânicos (CO ₂ , H ₂ O, Cl ₂) ou degradando-os a compostos intermediários estáveis que serão armazenados no próprio tecido vegetal.
Fitoextração	Plantas que extraem poluentes do solo e os acumulam em níveis até cem vezes maiores que outras espécies crescendo sob as mesmas condições.
Fitoestimulação	Plantas que degradam poluentes orgânicos por meio de microrganismos da rizosfera.

Tabela 2 Exemplos de espécies testadas para fitorremediação

Autor (es)	Nome científico	Metal	Concentrações	Sintomas
Trannin <i>et al.</i> 2001	<i>Acacia mangium</i> Willd.,	PSC	0, 15, 30, 45 e 60%	Crescimento reduzido, clorose em folhas novas, raízes com diminuição da ramificação.
Trannin <i>et al.</i> 2001	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	PSC	0, 15, 30, 45 e 60%	Crescimento reduzido, clorose em folhas novas, raízes com diminuição da ramificação.
Trannin <i>et al.</i> 2001	<i>Sesbânia virgata</i> (Cav.)	PSC	0, 15, 30, 45 e 60%	Crescimento reduzido, clorose em folhas novas, raízes com diminuição da ramificação.
Gomes <i>et al.</i> 2011	<i>Salix humboldtiana</i> Willd.	PSC	0%, 15%, 30%	Crescimento reduzido, clorose nas folhas, raízes com redução do crescimento, escurecimento e lesões necróticas.
Soares 2001	<i>Eucalyptus maculata</i> Hook.	ZnSO ₄	0, 400, 800, 1200, 1600 µm	Crescimento reduzido, clorose em folhas novas, raízes escurecidas e pouco desenvolvidas.
Soares 2001	<i>Eucalyptus urophylla</i> S.T.Blake	ZnSO ₄	0, 400, 800, 1200, 1600 µm	Crescimento reduzido, clorose em folhas novas, raízes escurecidas e pouco desenvolvidas.
Almeida <i>et al.</i> 2008	<i>Canavalia ensiformes</i> L. ([DC])	Pb(CH ₃ COO) ₂	0, 250, 500, 1000 µmol L	Atrofia e escurecimento das raízes.
Caires 2011	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Cu(NO ₃) ₂	0, 60, 80, 100 e 500 mg kg	Crescimento reduzido (nas duas maiores doses) e clorose nas folhas.

PSC = Proporções crescentes de solo contaminado por metais pesados; ZnSO₄ = Sulfato de zinco; Pb(CH₃COO)₂ = Acetato de chumbo; Cu(NO₃)₂ = Nitrato de cobre.

Em *Cedrela fissilis*, a clorose evoluiu para queda foliar nos primeiros 10 dias de cultivo (Caires 2011). Mas aos 20 dias, todas as plantas começaram a se recuperar por apresentar gemas de brotação, mostrando que inicialmente o sistema vegetal pode sofrer impacto evidente e apresentar subsequente reestabelecimento. Uma reação, não verificada em testes com *Sesbania virgata* submetida a diferentes proporções de solo contaminado [PSC por Zn, Cd, Pb e Cu em 0, 15, 30, 45 e 60% (v/v)], pois apesar de ter apresentado crescimento inicial mais vigoroso que em *Acacia mangium* e *Enterolobium*

contortisiliquum, tornou-se posteriormente mais sensível e não conseguiu se recompor a partir de PSC 15%, por acumular os metais rapidamente em seus tecidos (Trannin *et al.* 2001)

Além da diminuição do crescimento, outro sintoma de fitotoxicidade habitual é a degeneração das estruturas externas da raiz. Circunstância que pode não corresponder a inatividade do órgão ou a sua incapacidade de tolerar metais pesados.

Gomes *et al.* (2011), ao investigar os efeitos de misturas de solo contaminado por metais pesados [Zn, Cd, Cu e Pb nas proporções de 0%, 15% e 30% (v/v)] sobre *Salix humboldtiana*,

constatou que após 60 dias de exposição, houve nas raízes a redução do crescimento, escurecimento e formação de lesões necróticas. Simultaneamente, no tratamento com 30% de contaminação, as raízes desenvolveram paredes mais espessas na epiderme, exoderme e endoderme, o que demonstra que houve ajuste da anatomia às condições do meio, sugerindo plasticidade fenotípica voltada para o aumento da tolerância a metais pesados (Gomes *et al.* 2011).

Outro mecanismo de tolerância refere-se ao baixo índice de translocação do metal pesado das raízes para a parte aérea, como constatado por Almeida *et al.* (2008) em *Canavalia ensiformes*. Esta espécie, ao impedir a mobilidade do Pb para a parte aérea, protegeu-se dos sintomas de fitotoxicidade (murchamento, clorose, necrose e queda) e da inibição do crescimento (Almeida *et al.* 2008).

A medida que a planta adquire defesas para tolerar substâncias potencialmente tóxicas, pode conjuntamente, criar sistemas de acúmulo tanto nas raízes, quanto nas folhas e caule (Chaves *et al.* 2010, Caires 2011). E em diversas situações, o acúmulo passa a ser proporcional ao aumento das dosagens aplicadas.

Portanto, caso a espécie testada para fitorremediação consiga sobreviver a fase de muda (fase altamente susceptível a fitotoxicidade) e apresente capacidade de acumular determinado tipo de metal pesado, principalmente em concentrações elevadas, passa a ser promissora para o tratamento de solos contaminados.

Considerações Finais

A alta concentração e persistência de metais pesados nos solos, gera desequilíbrios ecossistêmicos de difícil reversão que refletem diretamente na saúde e qualidade de vida dos seres vivos.

Com o propósito de interromper o efeito em cascata da contaminação por metais pesados, recentemente foi criada a técnica de fitorremediação. Inúmeras plantas estão sendo testadas com a finalidade fitorremediadora, e o que se tem verificado com as pesquisas realizadas é que geralmente concentrações elevadas e/ou interação de mais de um tipo de íon metálico tem provocado alteração fisiológica que reflete diretamente na morfologia da planta, causando modificação do ritmo de crescimento e desenvolvimento das estruturas vegetativas.

Apesar dos sintomas iniciais de fitotoxicidade, há espécies que pelo processo de aclimação, estão conseguindo sobreviver e acumular quantidades expressivas de metais pesados. Contudo, a biodiversidade aplicada na fitorremediação ainda é restrita e novos estudos precisam ser realizados com outras espécies, sobretudo as de clima tropical.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPEG (bolsa de Mestrado de S.A.).

Referências

- Almeida EL, Marcos FCC, Schiavinato MA, Lagôa AMMA, Abreu MF (2008) Crescimento de feijão-de-porco na presença de chumbo. **Bragantia** 67: 569-576.
- Andrade JA, Augusto F, Jardim ICSF (2010) Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química** 35: 17-43.
- Barros Y J, Melo VF, Dionísio JÁ, Oliveira EB, Caron L, Kummer L, Azevedo JCR, Souza, LCP (2010) Indicadores de qualidade de solos em área de mineração e metalurgia de chumbo. I – microrganismos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34: 1397-1411.
- Barros YJ, Melo VF, Kummer L, Souza LCP, Azevedo JC (2011) Indicadores físicos e químicos de qualidade de solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. **Semina: Ciências Agrárias** 32: 1385-1404.
- Bertolazi AA, Canton GC, Azevedo IG, Cruz ZMA, Soares DNES, Conceição GC, Santos WO, Ramos AC (2010) O papel das ectomicorrizas na biorremediação dos metais pesados no solo. **Natureza Online** 8 (1): 24-31.
- Borges Júnior M, Mello JWV, Schaefer CEGR, Dussin TM; Abrahão, WAP (2008) Valores de referência local e avaliação da contaminação por zinco em solos adjacentes a áreas mineradas no município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 2883-2893.
- Brasil (2009) Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União** 249: 81-84.
- Caires SM, Fontes MPF, Fernandes RBA, Neves JCL, Fontes RLF (2011) Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. **Revista Árvore** 35: 1181-1188.
- Chaves LHG, Mesquita EF, Araujo DL, França CP (2010) Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica** 41: 167-176.
- Corrêa TL (2006) **Bioacumulação de metais pesados em plantas nativas a partir de suas disponibilidades em rochas e sedimentos: o efeito na cadeia trófica**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG.
- Fungaro DA, Flues MSM, Celebron AP (2004) Estabilização de solo contaminado com zinco usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão. **Química Nova** 27: 582-585.
- Gaiavizzo LHB (2001) **Fracionamento e mobilidade de metais pesados em solo com descarte de lodo industrial**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo,

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.
- Gomes MP, Marques TCLLSM, Nogueira MOG, Silva GH, Castro EM, Soares AM (2011) Efeitos dos rejeitos da indústria de zinco na anatomia e crescimento de plantas jovens de *Salix humboldtiana* Willd. (salgueiro). **Hoehnea** 38: 135-142.
- Jardim ANO, Caldas ED (2009) Exposição humana a substâncias químicas potencialmente tóxicas na dieta e os riscos para saúde. **Química Nova** 32: 1898-1909.
- Kede MLFM, Moreira JC, Mavropoulos E, Rossi AM, Bertolino LC, Perez DV, Rocha NCC (2008) Estudo do comportamento do chumbo em latossolos brasileiros tratados com fosfatos: contribuições para a remediação de sítios contaminados. **Química Nova** 31: 579-584.
- Lamego FP, Vidal RA (2007) Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição?. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente** 17: 9-18.
- Macêdo LS, Morrill WBB (2008) Origem e comportamento dos metais fitotóxicos: revisão da literatura. **Tecnologia e Ciência Agropecuária** 2: 29-38.
- Malavolta E, Moraes MF, Lavres Júnior J, Malavolta M (2006) Micronutrientes e metais pesados – essencialidade e toxidez. In: PATERNIANI, Ernesto (Org.). **Ciência, agricultura e sociedade**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, pp 117-154.
- Mardones CG (2007) O Trabalhador e o Princípio da Dignidade Humana: a utilização de metais pesados nas indústrias brasileiras e a ausência de legislação brasileira efetivamente protetora. **Cadernos de Direito** 7: 25-40.
- Mazzuco KTM (2008) **Uso da *Canavalia ensiformis* como fitorremediador de solos contaminados por chumbo**. Tese de Doutorado. Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC.
- Mechi A, Saches LD (2010) Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. **Estudos Avançados** 24: 209-220.
- Moreira FR, Moreira J (2004) A importância da análise de especiação do chumbo em plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Revista Química Nova** 27: 251-260.
- Morre M, Gould P, Keary BS (2003) Global urbanization and impact on health. **International Journal Hygiene Environmental Health** 206: 269-278.
- Muniz DHF, Oliveira-Filho EC (2006) Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde** 4: 83-100.
- Oliveira DL, Rocha C, Moreira PC, Moreira SOL (2009) Plantas nativas do Cerrado: uma alternativa para fitorremediação. **Estudos** 36: 1141-1159.
- Oliveira FC, Mattiazzo ME (2001) Mobilidade de metais pesados em um latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola** 58: 807-812.
- Paim LA, Carvalho R, Abreu CMP, Guerreiro MC (2006) Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. **Química Nova** 29: 28-33.
- Paiva HN, Carvalho JG, Siqueira JO, Miranda RP, Fernandes AR (2004) Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) em solução nutritiva contaminada por cádmio. **Revista Árvore** 28: 189-197.
- Pereira BFF (2005) **Potencial fitorremediador das culturas de feijão-de-porco, girassol e milho cultivadas em latossolo vermelho contaminado com chumbo**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo (IAC), Campinas, SP.
- Procópio SO, Pires FR, Santos J B, Silva AA. **Fitorremediação de Solos com Resíduos de Herbicidas**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracajú, 2009.
- Santos CF, Novak E (2013) Plantas nativas do Cerrado e possibilidade de fitorremediação. **Revista de Ciências Ambientais** 7: 67-77.
- Santos GCG, Rodella AA (2007) Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn e Pb no cultivo de *Brassica juncea*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31: 793-804.
- Silva SR, Procópio SO, Queiroz TFN, Dias LE (2004) Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28: 189-196.
- Soares CRFS, Graziotti PH, Siqueira JO, Carvalho JG, Moreira FMS (2001) Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesquisa agropecuária brasileira** 36: 339-348.
- Trannin ICB, Moreira FMS, Siquera JO (2001) Crescimento e nodulação de *Acacia mangium*, *Enterolobium contortisiliquum* e *Sesbania virgata* em solo contaminado com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25: 743-753.
- Vasconcellos MC, Pagliuso D, Sotomaior VS (2012) Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. **Estudos de Biologia Ambiente e Diversidade** 34: 261-267.
- Zeitouni CF, Berton RS, Abreu CA (2007) Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia** 66: 649-657.
- Zeitouni CF (2003) **Eficiência de espécies vegetais como fitoextratoras de cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco de um latossolo vermelho amarelo distrófico**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Gestão de Recursos Agroambientais, Instituto Agrônomo (IAC), Campinas, SP.