

Metodologia para Seleção de Técnica de Fitorremediação em Áreas Contaminadas

Methodology for selection of Phytoremediation technique in brownfields

RESUMO

A introdução de produtos nocivos no ambiente tem ocasionado situações de risco a saúde humana e ambiental. O presente artigo define as principais técnicas de fitorremediação e sua relação com a remediação de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Os mecanismos utilizados nestes processos utilizam as bases teóricas das técnicas biológicas *in-site*, que estão sendo amplamente estudadas devido à sua eficiência e baixo custo quando comparadas com as técnicas de remediação tradicionais. Pesquisas na área de fitorremediação têm sido direcionadas para remediação de contaminantes específicos e situações especiais onde as técnicas podem ser implantadas. Este estudo descreve as técnicas de fitorremediação e os contaminantes específicos para os quais são apropriadas. A fitodegradação, fitoestabilização, fitoextração, rizofiltração e a rizodegradação apresentam-se como novas alternativas estratégicas para a revitalização de áreas contaminadas, otimizando os custos de implantação e monitoramento e direcionando as técnicas de forma a amenizar alterações nas condições ambientais locais.

PALAVRAS-CHAVE: Fitorremediação; técnicas de fitorremediação; contaminantes

ABSTRACT

The introduction of noxious products in the environment has caused situations of risk to human and environmental health. This study defines techniques of phytoremediation and their links with the remediation of organic and inorganic contaminants. The Phytoremediation uses the background of biological *in-site* techniques, which are widely studied due to its efficiency and low cost when compared to traditional remediation techniques. Research on phytoremediation have been targeted for remediation of specific contaminants and special situations where the techniques can be implemented. This paper describes phytoremediation techniques and it is suitable for specific contaminants. The phytodegradation, phytostabilization, phytoextraction, rhizofiltration and the rhizodegradation are a new strategic alternatives for the revitalization of brownfields, optimizing costs of implanting and monitoring and targeting techniques in order to minimize changes in local environmental conditions.

KEYWORDS: Phytoremediation; techniques of phytoremediation; contaminants

Paulo Víctor Laguardia Mejía
Engenheiro Ambiental
Coordenador de Tecnologia e
Licenciamento da Haztec
Tecnologia e Planejamento
Ambiental S/A.
Nova Iguaçu, RJ, Brasil
paulo.laguardia.8@haztec.com.br

Fabiana De Nadai Andreoli
Eng. Civil, Mestre em Eng.
Ambiental pela UFES e Professora
do Curso de Engenharia Ambiental
da PUC-PR.
Curitiba, PR, Brasil
fabiana.andreoli@pucpr.br

Cleverson V. Andreoli
Eng. Agr., Doutor em Meio
Ambiente e Desenvolvimento pela
UFPR, Professor do Programa de
Mestrado em Governança e
Sustentabilidade do ISAE e Eng.
de Pesquisa da Companhia de
Saneamento do Paraná –
SANEPAR.
Curitiba, PR, Brasil
c.andreoli@sanepar.com.br

Beatriz Monte Serrat
Eng. Agr., Mestre em Ciência do
Solo e Dr. Professora do
departamento de solos da UFPR.
Curitiba, PR, Brasil
bmserrat@ufpr.br

INTRODUÇÃO

As áreas mais extensivamente contaminadas ao redor do mundo invariavelmente estão relacionadas a indústrias ou empreendimentos comerciais que produzem, armazenam ou descartam substâncias nocivas para o meio ambiente. É então necessário estruturar medidas preventivas e ações corretivas para tratar essas áreas e assim torná-las mais seguras para o ser humano e toda a vida animal e vegetal relacionada com o local contaminado (SAIER e TREVORS, 2008).

Ao considerar que as técnicas de remediação tradicionais mais comuns como a lavagem do solo, recuperação e tratamento de água subterrânea, remediação por processos químicos, etc. requerem investimentos iniciais elevados e podem causar uma série de impactos negativos no meio ambiente, o desenvolvimento de estudos relacionados a técnicas de remediação *in-site*, como os processos biológicos de biorremediação e fitorremediação, estabelece novas alternativas para o tratamento de áreas contaminadas por substâncias de origem orgânica e inorgânica (SCHIANETZ, 1999).

A fitorremediação é um processo biológico que utiliza as plantas como agentes remediadores, tendo por objetivos reduzir os teores de contaminantes a níveis considerados seguros para a saúde humana e qualidade ambiental e limitar a disseminação destes elementos no ambiente (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007; EPA, 2000).

A fitorremediação pode ser dividida em várias técnicas, cada uma com características diferenciadas, especializadas em determinado tipo de contaminante ou na remediação de meios específicos. Assim, neste trabalho, foram consideradas como técnicas de fitorremediação a fitoextração, fitodegradação, fitovolatilização, rizofiltração, fitoestabilização e a

rizodegradação. Desta forma, a fitorremediação oferece uma série de instrumentos flexíveis e menos ofensivos ao meio ambiente que permitem gerenciar a remediação de áreas contaminadas, visando reduzir custos e potencializar a reutilização da área afetada após a conclusão do processo remediativo realizado pelas plantas.

Fitorremediação

Estudos têm demonstrado que a biorremediação de solos contaminados pode apresentar-se limitada, já que em muitos casos esta técnica não prevê a migração do contaminante a áreas circunvizinhas ao local afetado (FERNET, 2008), além de não ser aplicável em solos contaminados em maiores profundidades (LEAHY e COLWELL, 1990).

A ausência de vegetação também pode limitar o desenvolvimento de microrganismos na área contaminada, fator este que interfere no processo para alcançar as metas de remediação traçadas (FERNET, 2008). A interação entre plantas e bactérias é importante para o sucesso da degradação de muitos contaminantes, como pesticidas, compostos clorados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, entre outros. A influência que a rizosfera exerce sobre a biodegradação faz com que existam mudanças na atividade dos microrganismos e a diversidade dos mesmos, possibilitando a realização da remediação de uma forma mais eficiente (CORGIÉ, BEGUIRISTAIN e LEYVAL, 2004, p. 3552). Assim, considerando a importante relação que existe entre a atividade microbiológica e fatores externos, como a presença de plantas, alguns autores (ARGENBIO, 2007), dividem a técnica de biorremediação considerando os processos utilizados e as interferências externas em: biorremediação por degradação enzimática, remediação microbiana e fitorremediação.

A fitorremediação é um instrumento da área da biotecnologia que utiliza plantas para efetuar os processos de degradação, extração, contenção ou imobilização de contaminantes no meio através da interação entre a planta e as substâncias de interesse (MOREIRA, 2006, EPA, 2000). Esta técnica baseia-se na tolerância e a capacidade que algumas espécies vegetais têm para sobreviver em condições extremas e atuar na remediação de áreas contaminadas (PROCÓPIO *et al.*, 2005). Assim, a remediação da área contaminada depende da espécie vegetal escolhida e sua habilidade para, através dos diferentes processos fitorremediadores, descontaminar e/ou estabilizar o meio (KIM, *et al.*, 2004).

Estudos complementares sobre a composição florística e as relações fitossociológicas das espécies que serão utilizadas em processos de fitorremediação, assim como a definição das características ambientais da área contaminada e seu histórico, são informações que também auxiliam no estabelecimento de relações entre as técnicas de fitorremediação e o tipo de contaminantes que se deseja remediar (NAPPO *et al.*, 2004).

O aprofundamento nas questões relacionadas à técnica de fitorremediação através de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias difundiu a utilização de espécies vegetais para a remediação de meios contaminados por uma ampla gama de compostos e elementos, os quais podem ser de natureza inorgânica ou orgânica. Os principais elementos contaminantes estudados são os metais pesados e alguns compostos químicos orgânicos de origem antropogênica (MORENO e CORSEUIL, 2001).

Os estudos sobre a remoção, bioacumulação, imobilização, biodegradação e destoxificação de compostos contaminantes por plantas tem demonstrado que, além de potencializar a fertilidade do solo, a

fitorremediação possui diversas vantagens sobre métodos convencionais de remediação (MORENO e CORSEUIL, 2001). O baixo custo da técnica, as vantagens sobre sua instalação, operação e manutenção, seu caráter menos invasivo na área, entre outros, têm feito da fitorremediação uma opção viável para projetos de remediação de locais contaminados (FUENTES, 2001).

O tempo requerido para o crescimento das plantas selecionadas para a fitorremediação, o risco de perdê-las por eventos de fogo, geadas ou outro tipo de acontecimento natural ou antrópico, o tempo requerido para alcançar resultados visíveis e a indisponibilidade da área para humanos e animais durante o processo de remediação são algumas das desvantagens da fitorremediação (SAIER e TREVORS, 2008).

Outras desvantagens da fitorremediação são a necessidade de que a concentração do contaminante esteja em intervalos de toxicidade que não ultrapassem os limites de tolerância da planta e o risco do contaminante entrar na cadeia alimentar através da ingestão das plantas utilizadas por parte de outros seres vivos (ANDRADE, TAVARES e MAHLER (2007, p. 52).

Considerando as desvantagens apresentadas anteriormente, a pesquisa sobre as técnicas de fitorremediação e sua relação com contaminantes específicos permitirá uma melhor compreensão sobre os processos que podem levar a atingir os resultados esperados (ALKORTA *et al.*, 2004; SAIR e TREVORS, 2008; SCHWITZGUÉBEL *et al.* 2002).

A fitorremediação pode ser dividida em diferentes técnicas, sendo as mais importantes: fitodegradação, fitoestabilização, fitoextração, rizofiltração, fitovolatização e rizodegradação. Cada uma destas técnicas possui características específicas que limitam ou potencializam sua

utilização dependendo das características do local que se deseja remediar e o contaminante específico presente na área (MCPHERSON, 2007). Estas técnicas não são exclusivas entre si, de fato, muitas delas ocorrem ou podem ocorrer simultaneamente, aumentando a eficácia da fitorremediação da área (ODJEGBA e FASIDI, 2007).

Fitodegradação

Define-se como fitodegradação à técnica de fitorremediação que utiliza o metabolismo da planta e microrganismos da rizosfera para conseguir a quebra de contaminantes (MCPHERSON, 2007; WENZEL, 2008). Estes mecanismos podem acontecer internamente, através de processos metabólicos, ou externamente, por enzimas produzidas pela própria planta no solo. As plantas também produzem compostos que ajudam no transporte, armazenamento e metabolismo dos contaminantes.

A fitodegradação é uma técnica comumente usada na remediação de contaminantes orgânicos, porém, também são conhecidos seus efeitos remediativos em alguns compostos inorgânicos que fazem parte do solo (FUENTES, 2001). Segundo LAMENGO e VIDAL (2007, p. 12) a técnica de fitodegradação é aplicável para contaminantes de origem orgânica já que estes são compostos móveis nas plantas. Assim, as enzimas interagem com os elementos contaminantes, mineralizando sua estrutura completamente ou degradando-os a compostos intermediários estáveis que podem ser transportados e armazenados na própria planta.

A biodisponibilidade de contaminantes para absorção e metabolização é um dos requisitos da fitodegradação, já que os contaminantes que resistem aos processos biológicos de degradação limitam a ação das plantas ou

associações entre plantas e sistemas microbiológicos atuando no solo contaminado (CUNNINGHAM, BERTI e HUANG, 1995).

Alguns dos contaminantes para os quais a técnica de fitodegradação foi comprovadamente aplicável são o TCE, Trinitrotuleno (TNT), DDT, HCB, PCP, PCBs, entre outros (EPA, 2000).

Fitoestabilização

A técnica de utilização de plantas para estabilizar ou imobilizar os poluentes no solo, prevenindo a migração do mesmo por perdas do solo via erosão ou lixiviação é chamada de fitoestabilização (LAMENGO e VIDAL, 2007; TERRY e BAÑUELOS, 2000).

Os processos de estabilização do contaminante dependem da incorporação do composto na lignina ou no húmus do solo e na precipitação do mesmo na rizosfera da planta por meio da humificação ou ligações covalentes irreversíveis (CUNNINGHAM, BERTI e HUANG, 1995; LAMENGO e VIDAL, 2007).

Autores como CUNNINGHAM, BERTI e HUANG (1995), EPA (2000), LAMENGO e VIDAL (2007) e SAIER e TREVORS (2008) explicam que a fitoestabilização é aplicável em solos, sedimentos e efluentes contaminados com metais, principalmente As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb e Zn. Nesse caso, a fitoestabilização busca utilizar plantas tolerantes aos metais pesados e que tendam a conter ou imobilizar contaminantes no meio. É importante ressaltar que esta técnica é efetiva se a concentração dos contaminantes é baixa ou moderada (TERRY e BAÑUELOS, 2000).

Pode-se deduzir a partir da avaliação das características da técnica de fitoestabilização, que o tempo de tratamento do contaminante pode ser reduzido pelo fato de que a planta não incorpora a substância nos seus

tecidos, somente os estabiliza no meio.

TERRY e BAÑUELOS (2000, p. 366) explicam que no processo de aplicação da técnica de fitoestabilização deve ser medido o risco real do local contaminado. Primeiramente devem ser realizados testes químicos que mostrem que a solubilidade, disponibilidade e potencial de lixiviação do contaminante foram reduzidos a valores abaixo do limite que ofereça risco à saúde humana. Em segunda instância, devem também ser consideradas análises do solo que identifiquem a concentração e possível evolução do contaminante. Por último, nas análises de risco do local onde foi aplicada a fitoestabilização, sugere-se estimar a biodisponibilidade do contaminante no solo através de ensaios biológicos, incluindo ensaios com plantas, microfauna associada ao solo ou estudos com alimentação animal.

A aplicação de técnicas de fitoestabilização é mais apropriada em áreas extensas e terá uma maior eficiência em solos com maior textura e com conteúdo de matéria orgânica elevado (CUNNINGHAM, BERTI e HUANG, 1995; EPA, 2000).

Esta técnica é atualmente utilizada e aprovada para a remediação de áreas de minas, não sendo recomendada em áreas urbanas e industriais (CUNNINGHAM, BERTI e HUANG, 1995; TERRY e BAÑUELOS, 2000).

Fitoextração

A fitoextração é um processo de remediação pelo qual algumas variedades de plantas acumulam nos seus tecidos os contaminantes extraídos do solo, sedimentos, água ou do ar, sem ocorrer nenhum tipo de degradação dos mesmos (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007). A fitoextração, também chamada de fitoacumulação (FUENTES, 2001), envolve a absorção de contaminantes através das raízes e

posterior translocação dos mesmos às folhas pelo xilema da planta.

Assim, o objetivo da fitoextração é a limpeza *in-site* do meio contaminado de forma a retirar o contaminante e, se possível, reaproveitar os elementos que tenham utilidade nos processos produtivos atuais (TERRY e BAÑUELOS, 2000).

De forma geral a técnica de fitoextração é apropriada e atualmente utilizada para a remediação de áreas contaminadas com metais, utilizando plantas com grande capacidade acumulativa, chamadas de plantas hiperacumuladoras (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007; TERRY e BAÑUELOS, 2000; EPA, 2000; WENZEL, 2008).

SCHWITZGUÉBEL *et al.* (2002) indicam que solos contaminados por Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn e os radionuclídeos Sr, Cs, Pu e U; podem ser remediados por técnicas de fitoextração.

Nesta técnica, após o processo acumulativo do contaminante na planta ter acabado, deve ser realizada uma colheita das plantas com o objetivo de evitar passivos ambientais decorrentes do retorno do contaminante ao solo ou eventual contato das partes contaminadas da planta com o ser humano e a biota. O destino do material coletado dependerá da possibilidade ou não de seu aproveitamento, o qual é limitado pela espécie de planta utilizada, sua capacidade de bioacumulação e o risco ambiental apresentado.

CUNNINGHAM, BERTI e HUANG (1995) explicam que a técnica de fitoextração deve ser planejada de maneira a significar em vantagens econômicas quando comparado com as técnicas tradicionais de remediação, especialmente quando os contaminantes extraídos, como os metais acumulados nos tecidos da planta, possam ser reutilizados e trazer algum benefício econômico.

Rizofiltração

Segundo ANDRADE, TAVARES e MAHLER (2007, p. 16), a fitoextração pode ser considerada como o principal mecanismo da rizofiltração. A diferença entre ambas reside em que a rizofiltração consiste em processos de acumulação de contaminantes apenas nas raízes e é geralmente aplicada em condições hidropônicas de crescimento para as plantas, já a fitoextração é utilizada diretamente no solo. FUENTES (2001, p. 41) acrescenta que a rizofiltração é uma técnica que combina a fitoextração e a fitoestabilização.

A rizofiltração consiste na adsorção e precipitação dos contaminantes nas raízes ou a absorção dos mesmos quando se encontram em solução. A rizofiltração é uma técnica apropriada para a separação de metais em águas através da retenção destes contaminantes, imobilizando-os ou acumulando-os nas raízes (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007; FUENTES, 2001; MORENO e CORSEUIL, 2001; LONE, 2007; TRAPP e KARLSON, 2001; WANG, 2004).

A rizofiltração é aplicada em condições de baixa concentração de contaminantes em água, sendo comumente usadas plantas hidropônicas de sistemas radiculares complexos com grande biomassa total que ajudem a aumentar a eficiência da técnica (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007; FUENTES, 2001).

Segundo estudos realizados pela EPA (2000), a rizofiltração é apropriada para a remoção de metais como o Pb, Cd, Cu, Ni, Zn e Cr, assim como alguns radionuclídeos como U, Cs e Sr.

Da mesma forma que a fitoextração, a precipitação dos metais e a adsorção ou absorção dos mesmos nas raízes pode levar à saturação da planta com contaminantes, sendo necessária a colheita e disposição correta de ditos materiais (ANDRADE, TAVARES

e MAHLER, 2007; FUENTES, 2001; PADMAVATHIAMMA e LI, 2007).

O tempo requerido para remediar a água contaminada pode ser reduzido pelo fato de que as condições para aplicar esta técnica geralmente são controladas, propiciando o contato do contaminante com as raízes das plantas sem sofrer de forma significativa com interferências externas como acontece em outras técnicas de fitorremediação.

Investimento na construção de sistemas de direcionamento de água, sistemas de pré-tratamento da água (ajuste de pH e remoção de particulados grosseiros), assim como em monitoramento, manutenção e manejo de resíduos da planta que estejam contaminados, serão necessários ao utilizar a técnica de rizofiltração (EPA, 2000).

Fitovolatilização

A fitovolatilização é definida como o movimento de um determinado contaminante fora do solo, sedimentos, lodo ou da água subterrânea e o transporte do mesmo para a atmosfera pela planta (MCPHERSON, 2007; LAMENGO e VIDAL, 2007; PADMAVATHIAMMA e LI, 2007; WANG, 2004).

Os processos da fitovolatilização utilizam a capacidade metabólica de algumas plantas em associação com microrganismos da rizosfera para transformar contaminantes em compostos voláteis (WENZEL, 2008). A volatilização destes compostos pode ocorrer via biodegradação na rizosfera ou pela ação direta da planta, sendo neste último liberado através da superfície das folhas (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007).

SANTOS (2006, p. 19) esclarece que os contaminantes liberados para a atmosfera no processo de fitovolatilização não sofrem nenhuma alteração química, motivo pelo qual, em concentrações elevadas, continuam sendo

perigosos para o meio ambiente e para a saúde e segurança humana.

Os contaminantes removidos através da fitovolatilização não podem ser rastreados e controlados como acontece em outras técnicas de fitorremediação, o que indica que estes podem migrar a outras áreas sem ser detectados (PADMAVATHIAMMA e LI, 2007). ANDRADE, TAVARES e MAHLER (2007, p. 55) acrescentam que alguns contaminantes ou metabólitos, além de apresentar periculosidade quando volatilizados, podem ser acumulados em várias partes da planta, como nas frutas e na madeira, aumentando o passivo ambiental.

A limpeza por fitovolatilização pode ser utilizada para a remoção de alguns compostos orgânicos voláteis como o tricloroetileno (TCE) e para alguns poucos compostos de natureza inorgânica que existem em forma volátil como o Se e Hg (LAMENGO e VIDAL, 2007). No caso dos inorgânicos, estes passam por transformações que os tornam misturáveis à atmosfera, porém, alguns autores afirmam que a utilização de plantas para a volatilização de Hg, por exemplo, é questionável, devido ao aumento do passivo ambiental na biologia molecular da planta (ANDRADE, TAVARES e MAHLER, 2007; MCPHERSON, 2007; WANG, 2007).

A volatilização de metais é considerada uma solução permanente, já que os constituintes inorgânicos desses elementos são removidos (PADMAVATHIAMMA e LI, 2007).

Rizodegradação

O método de rizodegradação ou biodegradação na rizosfera da planta precisa da presença de microrganismos que ativam a atividade biológica em torno das raízes da planta, acelerando assim a digestão de substâncias, especialmente as

orgânicas. Esse processo acontece na parte superior do solo e é considerado similar à biorremediação comum (FUENTES, 2001).

As raízes liberam compostos produzidos pela própria planta que tem o potencial de auxiliar na remediação pela atividade biológica existente na rizosfera. Entre esses compostos estão alguns ácidos orgânicos, esteróis, nucleotídeos e enzimas. Assim, a população microbiana nas raízes e a atividade que estas exercem para degradar o contaminante podem ser incrementadas pela presença destes compostos (EPA, 2000).

A EPA (2000, p. 23) acrescenta que a própria rizosfera pode incrementar a superfície da área onde existe atividade microbiológica, levando, junto com os compostos mencionados anteriormente, ao metabolismo dos contaminantes na zona de raízes e proximidades.

Outro fator importante a ser mencionado é a melhoria das condições do solo, como a aeração e a retenção de umidade, pela aplicação de técnicas de rizodegradação (FUENTES, 2001).

Esta técnica tem sido útil para a limpeza de ambientes contaminados por compostos orgânicos hidrofóbicos, os quais, por terem uma natureza que impede sua absorção pela planta, podem ser degradados por microrganismos. Entre os compostos mencionados anteriormente estão as PCBs, hidrocarbonetos de petróleo (BTEX, HPA, etc.), pesticidas, PCPs, entre outros (LAMENGO e VIDAL, 2007).

A rizodegradação é uma técnica que destrói o contaminante em processos *in-site*, com custos baixos de instalação e manutenção e sem limitações climáticas importantes (EPA, 2000).

OBJETIVOS

O presente trabalho objetivou expor estratégias que

permitam relacionar as técnicas de fitorremediação conhecidas com os principais contaminantes que afetam a saúde de populações humanas e o meio ambiente como um todo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da avaliação das informações sobre as diferentes técnicas de fitorremediação, especialmente do tipo de elementos e compostos para os quais cada uma dessas técnicas é mais apropriada, realizaram-se análises qualitativas baseando-se nas pesquisas exploratórias e descritivas das técnicas de fitorremediação para estabelecer, de forma clara e precisa, a relação entre as técnicas, suas características, os tipos de contaminação e os controles para apoiar os processos de seleção das técnicas.

A coleta e organização dos dados e o levantamento teórico deste tipo de remediação e as características dos principais contaminantes orgânicos e

inorgânicos, foram essenciais como primeiro passo da pesquisa. Considerando a imersão e a reflexão sobre o tema, foi possível então definir o problema e estabelecer as relações existentes entre as variáveis da contaminação e as técnicas de fitorremediação que poderiam ser utilizadas. A definição das variáveis constitui parte importante na metodologia de trabalho pelo fato de expressar o nível de detalhamento e relação na fundamentação teórica.

Assim, este artigo apresenta o levantamento teórico realizado com o objetivo de subsidiar o desenvolvimento de novas formas de relacionar a técnica com o contaminante e a interação de ambas no meio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a expor de forma sintética as informações das diversas pesquisas com fitorremediação consultadas e suas relações, estruturou-se uma tabela de afinidade entre as técnicas de

fitorremediação apresentadas e os contaminantes para os quais estas apresentam melhores resultados durante os processos de remediação. A Tabela 1 apresenta duas colunas, uma com as técnicas de fitorremediação e a outra com o tipo dos contaminantes relacionados e os exemplos mais representativos dos mesmos.

A Tabela 1 apresentado a continuação, resume as técnicas de fitorremediação e sua aplicação em áreas afetadas com diferentes tipos de contaminantes.

Considerando a fundamentação teórica sobre a fitorremediação e os principais contaminantes introduzidos pelo homem na natureza, foi possível elaborar um referencial adequado aos objetivos estabelecidos e com isto descrever as vantagens e desvantagens da utilização desta técnica de remediação em áreas contaminadas por substâncias orgânicas e inorgânicas.

A fitorremediação é uma das técnicas de remediação de áreas contaminadas que se apresenta como uma metodologia efetiva,

Tabela 1 - Relação técnicas de fitorremediação x contaminantes

Técnica de Fitorremediação	Contaminante	
	Tipo	Exemplos
Fitodegradação	Orgânicos	Hidrocarbonetos, PCP, TCE e PCBs
Fitoestabilização	Inorgânicos	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb e Zn)
Fitoextração	Inorgânicos	Metais (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb e Zn) e Radionuclídeos (Sr, Cs, Pu e U)
Rizofiltração	Inorgânicos	Metais (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn e Cr) e Radionuclídeos (U, Cs e Sr)
Fitovolatilização	Orgânicos	TCE
	Inorgânicos	Metais (Se e Hg)
Rizodegradação	Orgânicos	Hidrocarbonetos, nitroaromáticos, PCP, TCE, PCBs

pouco impactante no meio e com melhor relação custo-benefício quando comparada com as técnicas físico-químicas tradicionais utilizadas na atualidade. Essa técnica, a pesar de requerer longos períodos para obter resultados e apresentar alguns riscos durante sua utilização, é uma forma de remediação socialmente aceita pela população, órgãos ambientais e alguns pesquisadores da área (ALKORTA, 2004).

Com a Tabela de relação entre as técnicas de fitorremediação e os contaminantes específicos para os quais cada uma destas técnicas é mais apropriada pode ser apoiada a definição de novas formas de relação que permitam entender a fitorremediação e os mecanismos que esta utiliza para revitalizar ou facilitar a revitalização de ambientes contaminados.

A informação apresentada neste artigo, junto com estudos complementares sobre outras variáveis aplicadas, também poderão ser úteis para a construção de metodologias que facilitem a escolha de técnicas de fitorremediação para casos específicos, visando estabelecer o perfil aplicativos das técnicas e contribuir com expansão comercial da fitorremediação.

CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma descrição teórica das técnicas de fitorremediação e sua relação com os contaminantes orgânicos e inorgânicos mais conhecidos.

As técnicas de fitorremediação possuem características específicas relacionadas com a espécie fitorremediadora, as condições externas que afetam a remediação e principalmente a forma pela qual, relacionando os aspectos acima, o contaminante é extraído ou estabilizado no meio.

Muitas das técnicas descritas neste artigo são peças valiosas para as quais existe um

amplo campo de pesquisa. Os estudos relacionados com as técnicas de fitorremediação e os contaminantes devem ter por objetivo potencializar a fitorremediação como técnica para revitalizar áreas contaminadas, assim como esclarecer quais os fatores de risco que se apresentam ao utilizar estas técnicas de remediação.

A aplicação de alternativas estratégicas com grande potencial como a fitorremediação devem ser incentivadas de forma a concretizar novos métodos para realizar a limpeza de ambientes comprometidos ambientalmente pelas diversas atividades humanas e os produtos que estas lançam na natureza.

REFERÊNCIAS

ALKORTA, I. *et al.* Chelate-enhanced phytoremediation of soils polluted with heavy metals. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Holanda, n. 03, p. 55-70, 2004.

ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. R.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 176 p.

ARGENBIO. **Biorremediación: organismos que limpian el ambiente**. El Cuaderno de Por Qué Biotecnología, n. 36. Argentina: ArgenBio, 2007. Disponível em: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_36.asp?cuaderno=36>. Acesso em: 26 de abril de 2009.

CORGIÉ, S. C.; BEGUIRISTAIN, T.; LEYVAL, C. Spatial distribution of bacterial communities and phenanthrene degradation in the rhizosphere of *Lolium perenne* L. **Applied and Environmental Microbiology**, Estados Unidos de América, v. 70, n. 06, p. 3552-3557, 2004.

CUNNINGHAM, S. D.; BERTI, W. R.; HUANG, J. W. Phytoremediation of contaminated soils. **Elsevier Science**, v. 13, p. 393-397, 1995.

EPA. **Introduction to phytoremediation**. Cincinnati, Ohio, 2000. epa/600/R-99/107.

FERNET, J. L. **Plant bacterial inoculants to remediate hydrocarbon polluted soil**. 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – University of Saskatchewan, Saskatoon/Canadá, 2008.

FUENTES, H. D. **Studies in the use of plant growth regulators on phytoremediation**. 2001. 180 f. Tese (Doutorado) – University of Western Sydney, Sydney/Austrália, 2001.

KIM, Y. *et al.* Phytoremediation of anthracene contaminated soils by different plant species. **Journal of Plant Biology**, v. 47, n. 03, p. 174-178, 2004.

LAMENGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição?. **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**. Curitiba/Brasil, v. 17, p. 9-18, 2007.

LEAHY, J. G.; COLWELL, R. R. Microbial Degradation of Hydrocarbons in the Environment. **Microbiological Reviews**, Estados Unidos da América, v. 54, n. 03, p. 305-315, 1990.

LONE, M. I. *et al.* Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. **Journal of Zhejiang University Science B**, Hangzhou/China, v. 09, n. 03, p. 210-220, 2008.

MCPHERSON, A. **Monitoring phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils in a closed and controlled environment**. 2007. 206 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – University of Saskatchewan, Saskatoon/Canadá, 2007.

- MOREIRA, I. T. A. *et al.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2º, Aracajú-SE. **Resultados preliminares no desenvolvimento de cultivares da mamona na fitorremediação de solo contaminado por metais pesados.** Sergipe/Brasil: 2006. Sem paginação.
- MORENO, F. N.; CORSEUIL, H. X. Fitorremediação de aquíferos contaminados por gasolina. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental.** v. 06, n. 01-02, p. 01-07, 2001.
- NAPPO, M. E. *et al.* Dinâmica da estrutura fitossociológica da regeneração natural em sub-bosque de *Mimosa scabrella* em área minerada, em Poços de Caldas, MG. **Revista Árvore,** Viçosa-MG, v. 28, n. 06, p. 811-829, 2004.
- OBJEGBA, V. J.; FASIDI, I. O. Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia carassipes*. **The Environmentalist,** v. 27, p. 349-355, 2007.
- PADMAVATHIAMMA, P. K.; LI, L. Y. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. **Water, Air, and Soil Pollution: Focus,** v. 184, p. 105-126, 2007.
- PROCÓPIO, S. O. *et al.* Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha,** Viçosa-MG, v. 23, n. 01, p. 9-16, 2005.
- SAIER, M. H.; TREVORS, J. T. Phytoremediation. **Water, Air, and Soil Pollution: Focus,** sem paginação, 2008.
- SANTOS, G. O. **Crescimento, nutrição e estrutura do lenho juvenil de três espécies florestais com potencial de fitorremediação em solos contaminados com petróleo.** 2006. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Paraná/Brasil, 2006.
- SCHIANETZ, B. **Passivos ambientais:** levantamento histórico avaliação da periculosidade e ações de recuperação. Curitiba: SENAI, 1999. 205 p.
- SCHWITZGUÉBEL, J. P. *et al.* Phytoremediation: European and American Trends. **Journal of Soils & Sediments,** v. 02, n. 02, p. 91-99, 2002.
- TERRY, N.; BAÑUELOS, G. S. **Phytoremediation of contaminated soil and water.** Boca Raton: Lewis, 2000. 389 p.
- TRAPP, S.; KARLSON, U. Aspects of Phytoremediation of Organic Pollutants. **Journal of Soils & Sediments,** v. 01, n. 01, p. 37-43, 2001.
- WANG, Y. **Phytoremediation of mercury by terrestrial plants.** 2004. 41 f. Tese (Doutorado) – Stockholm University, Estocolmo/Suécia, 2004.
- WENZEL, W. W. Rhizosphere processes and Management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. **Journal of Plant Soil,** Austria, sem paginação, 2008.

Recebido em: fev/2014
Aprovado em: mar/2014