

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Fitorremediação: o estado da arte

DÉBORA MONTEIRO DE OLIVEIRA
DIEGO VALENTIM CRESCENTE CARA
PRISCILA GONÇALVES XAVIER
MARIANA SILVA DE PAULA
LUIS GONZAGA DOS SANTOS SOBRAL
RENATA DE BARROS LIMA
ALEXANDRE LOUREIRO

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Fitorremediação: o estado da arte

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

José Alencar Gomes da Silva

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sérgio Rezende

Ministro da Ciência e Tecnologia

Luís Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Avílio Franco

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Adão Benvindo da Luz

Diretor do CETEM

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

Zuleica Carmen Castilhos

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

João Alves Sampaio

Coordenador de Processos Minerais

Antônio Rodrigues de Campos

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

José da Silva Pessanha

Coordenador de Administração

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374 ISBN 978-85-61121-11-2

STA-39

Fitorremediação: o estado da arte

Débora Monteiro de Oliveira

Bióloga, CETEM/MCT, mestranda na EQ/UFRJ

Diego Valentim Crescente Cara

Biólogo, CETEM/MCT, mestrando na EQ/UFRJ

Priscila Gonçalves Xavier

Bióloga, Bolsista PCI, CETEM/MCT, mestranda na EQ/UFRJ

Mariana Silva de Paula

Bióloga, CETEM/MCT

Luis Gonzaga Santos Sobral

Eng. Químico, Ph.D. em Hidrometalurgia, Pesquisador Titular do
CETEM/MCT

Renata de Barros Lima

Bacharel em Química, M.Sc, Bolsista PCI, CETEM/MCT, doutoranda na
EQ/UFRJ

Alexandre Loureiro

Biólogo, Botânico, M.Sc. em Ciências Biológicas com ênfase em
Botânica /UFRJ

CETEM/MCT

2006

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio Moreira Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Silvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos Augusto da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanon Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minero-metalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenação editorial

Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas

Revisão de provas

Maria Helena Hatschbach

Revisão

Ana Sofia Mariz

Capa, projeto gráfico e diagramação

Fitorremediação: O estado da arte /

Debora M. Oliveira et al. — Rio de Janeiro: CETEM/MCT,
2007.

49p. (Série Tecnologia Ambiental, 39)

1. Fitorremediação 2. Tratamento de solos. 3. Meio ambiente. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Oliveira, Débora M. III. Série.

CDD – 628.4

SUMÁRIO

RESUMO | ABSTRACT ▶ 7

1 | INTRODUÇÃO ▶ 9

2 | PRÉ-REQUISITOS, POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FITORREMEDIAÇÃO ▶ 12

2.1 | Pré-requisitos ▶ 12

2.2 | Potencialidades e Limitações ▶ 13

3 | NUTRIÇÃO VEGETAL ▶ 16

3.1 | Macronutrientes ▶ 17

3.2 | Micronutrientes ▶ 20

3.3 | Elementos benéficos ▶ 21

4 | ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES ▶ 23

5 | PLANTAS HIPERACUMULADORAS ▶ 24

6 | TÉCNICAS DE FITORREMEDIAÇÃO ▶ 26

6.1 | Fitoextração ▶ 26

6.2 | Fitoestimulação ▶ 30

6.3 | Fitotransformação ▶ 33

6.4 | Fitoestabilização ▶ 34

6.5 | Rizofiltração ▶ 35

7 | FITOMINERAÇÃO ▶ 39

8 | CONCLUSÕES ▶ 42

9 | REFERÊNCIAS ▶ 43

RESUMO

A fitorremediação é uma tecnologia que utiliza sistemas vegetais como agente de descontaminação, a fim de remediar água e solos contaminados por poluentes de origem orgânica (hidrocarbonetos, pesticidas, compostos clorados, nitrogenados, e explosivos) e inorgânica (metais e elementos radioativos).

Esta técnica é uma alternativa aos tratamentos convencionais de remoção física da camada contaminada do solo, ou do bombeamento e tratamento de águas. Suas principais vantagens são o baixo custo, podendo ser aplicada em grandes áreas contaminadas, e a possibilidade de realizar o tratamento *in situ*, sendo essa menos agressiva ao meio ambiente. Além disso, após o vegetal absorver o contaminante do solo a planta pode ser armazenada para tratamento subsequente, podendo ser metabolizado ou, então, o contaminante é transformado em produtos não tóxicos ou menos tóxicos.

O tipo de poluente, a concentração e a presença de toxinas no solo ou na água devem estar dentro dos limites de tolerância da planta. Portanto, é fundamental conhecer o metabolismo do sistema vegetal a ser empregado e os fatores determinantes da técnica para posterior avaliação de sua eficiência.

A fitorremediação se mostra bastante atraente no que tange à recuperação de

ABSTRACT

The phytoremediation is a technology that uses vegetable systems as decontamination agent, in order to remediate water and polluted soils for organic (hydrocarbons, pesticides, chlorinated and nitrogenous compounds, and explosives) and inorganic (metals and radioactive elements) pollutants.

This technique is an alternative to the conventional treatments of physical removal of polluted layer of soil, or the pumping and treatment of waters. Its main advantages are the low cost, could be applied in great extension of polluted areas and the possibility of accomplishing *in situ* treatment, which is less aggressive to the environment. Besides, after the vegetable to absorb the soil pollutant the plant can be stored for subsequent treatment, could be metabolized or, even, being the pollutant transformed in no poisonous or less poisonous products.

The type of pollutant, the concentration and the presence of toxins in the soil or water should be within the tolerance limits of the plant. Therefore, it is fundamental to know the metabolism of the vegetable system to be used and the decisive factors of the technique for subsequent evaluation of its efficiency.

The phytoremediation is being seen quite attractive with respect to the recovery of noble metals from mineral de-

metais nobres a partir de depósitos minerais com a utilização de plantas hiperacumuladoras. Elas possuem capacidade de reter metais numa concentração até 100 vezes maior quando comparadas a outros vegetais. Dessa forma, a fitominação surge como proposta promissora não somente para remediação de áreas contaminadas com um baixo teor (< 1%), mas, também, para a exploração economicamente viável de minérios com concentrações inferiores a 1%.

Palavras-chave: Fitorremediação, recuperação de solo, fitominação.

posits with the use of hyper-accumulator plants. They possess capacity to uptake metals in a concentration up to 100 times higher when compared to other vegetables. Therefore, the phytoremediation appears as promising proposal not only for remediating areas with low pollutant content (< 1%), but also for economically exploiting ores with metal content less than 1%.

Keywords: Phytoremediation, soil restoration, phytomining.

1 | INTRODUÇÃO

O mundo em que vivemos vem sendo constantemente modificado por ações antropogênicas, por vezes agressivas aos seres vivos que compartilham com o homem da superfície terrestre. Vários são os caminhos que os metais pesados podem percorrer até chegar aos ambientes naturais, devido às atividades industriais, agrícolas ou descarte inadequado de resíduos domésticos.

Dos 2,9 milhões de toneladas de resíduos industriais perigosos, gerados anualmente no Brasil, somente 850 mil toneladas recebem tratamento adequado, conforme estimativa da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento, Recuperação e Disposição de Resíduos Especiais (ABETRE). Os 72% restantes são depositados indevidamente em lixões ou descartados em cursos d'água sem qualquer tipo de tratamento (FURTADO, 2003).

Os resíduos contendo cádmio, cromo, manganês e níquel possuem alto poder de contaminação e, com facilidade, atingem os lençóis freáticos ou mesmo reservatórios e rios, que são as fontes de abastecimento de água das cidades. O contato com a pele pode causar dermatite alérgica e, mais raramente, provocar ulcerações na pele formando cicatrizes, perfurações do septo nasal, câncer, distúrbios afetivos, irritação neuromuscular, cefaléia, náuseas e desmaios. Há também suspeitas de que possam afetar o sistema imunológico de seres humanos (SALGADO, 2003). Outra problemática associada com os metais pesados é o fato desses elementos apresentarem a capacidade de se acumular nos tecidos vivos e serem transferidos para níveis tróficos superiores, sendo esse fenômeno denominado bioacumulação.

Segundo Machado (2002), a bioacumulação de metais pesados em peixes é evidente, mesmo quando esses contaminantes se encontram na água em concentrações quase não detectáveis. No caso de moluscos bivalves, sendo esses organismos filtradores (que se alimentam através de um processo de filtração da água e retenção das partículas em suspensão, principalmente plâncton e microrganismos presentes na água), sofrem de maneira intensa a bioacumu-

lação desses contaminantes, tornando-se, muitas vezes, impróprios para o consumo humano. No mesmo trabalho, o autor se refere às concentrações de cádmio, cobre, zinco, chumbo e mercúrio em *Crassostrea brasiliana*, como mostrado na Tabela 01.

TABELA 01: Avaliação estatística dos resultados obtidos na determinação de Cd, Pb, Hg, Cu e Zn em ostras de mangue (*Crassostrea brasiliana*), em mg/kg, na base úmida.

Parâmetro	Cádmio	Chumbo	Mercúrio	Cobre	Zinco
Média	0,11	0,08	0,02	2,8	402
Desvio Padrão	0,036	0,026	0,006	0,96	188
Mediana	0,11	0,08	0,02	2,6	383
Valor Mínimo	0,02	0,04	ND*	1,5	145
Valor Máximo	0,22	0,17	0,03	7,7	844

N° de amostras – 69. * ND – não detectado. Retirado de Machado, 2002.

Para minimizar impactos negativos causados ao meio ambiente, oriundos da contaminação com metais pesados, rotas tecnológicas são aplicadas baseadas, principalmente, em metodologias físicas, químicas e físico-químicas, como por exemplo, a queima para volatilização do contaminante, lixiviação ácida/alcalina, lavagem do solo com surfatantes, precipitação de metais, membranas de troca iônica, adsorção em carvão ativado etc. Porém, esses tratamentos são de custos elevados e para a maioria dos poluentes não existem tecnologias fáceis de implementação. Os sistemas vegetais se mostram eficientes na absorção e concentração de alguns contaminantes, recebendo atenção como sistema de baixo custo para a descontaminação de áreas e efluentes poluídos, associados ao fato de serem recuperados economicamente (NERBITT, 1994). Como ilustrado na Figura 01, as plantas podem remediar solos contaminados por metais pesados através de alguns mecanismos.

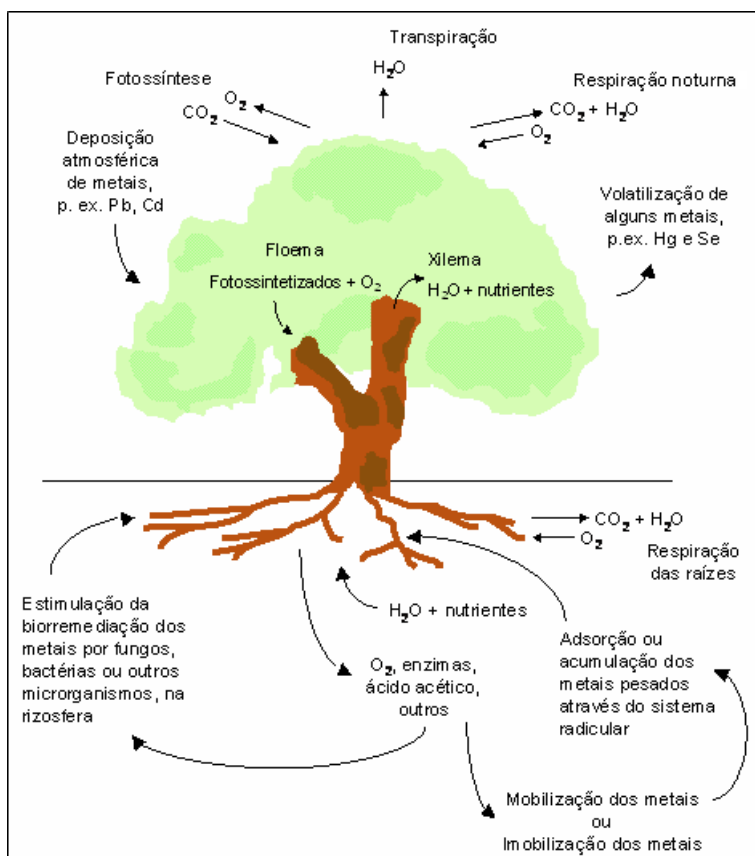


FIGURA 01: Mecanismo de Fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. Adaptado de Schnoor, 2002.

2 | PRÉ-REQUISITOS, POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES PARA A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FITORREMEDIAÇÃO

2.1 | Pré-Requisitos

Segundo Providenti (1993), antes da implantação das diversas técnicas de fitorremediação, com o objetivo de remediar água e solos contaminados, é fundamental que se conheça as características físico-químicas do solo, dos contaminantes, bem como sua distribuição na área impactada.

Para que se tenha alta eficiência no processo, é preciso identificar possíveis fatores que possam intervir negativamente no processo de remediação, a fim de que esses sejam controlados e minimizados.

Com base na análise apresentada por diversos autores (FERRO *et al.*, 1994; PERKOVICH *et al.*, 1996; CUNNINGHAM *et al.*, 1996; NEWMAN *et al.*, 1998; ACCIOLY & SIQUEIRA, 2004; VOSE *et al.*, 2000), os vegetais que serão empregados na recuperação de áreas contaminadas devem apresentar características específicas, conforme descrito na Tabela 02.

TABELA 02: Pré-requisitos da fitorremediação.

Pré-requisitos para aplicação da fitorremediação	
Alta taxa de crescimento e produção de biomassa	Fácil aquisição ou multiplicação de propágulos
Capacidade de absorção, concentração e/ou metabolização e tolerância ao contaminante	Capacidade de desenvolver-se bem em ambientes diferenciados
Retenção do contaminante nas raízes, no caso da fitoestabilização, como oposto à transferência para a parte aérea, evitando sua manipulação e disposição	Ocorrência natural em áreas poluídas (importante na identificação, porém não é pré-requisito)
Sistema radicular profundo e denso	Fácil controle ou erradicação

Pré-requisitos para aplicação da fitorremediação	
Elevada taxa de exsudação radicular	Resistência a pragas e doenças
Fácil colheita, quando necessário a remoção da planta da área contaminada	Capacidade transpiratória elevada, especialmente em árvores e plantas perenes

Adaptado de Pires, 2003.

São diversas as características a serem observadas no sistema vegetal antes de aplicá-lo como um fitorremediador. Portanto, dificilmente é possível reunir todas as características desejáveis; porém, a que for selecionada deve apresentar o maior número delas. Várias espécies também podem ser utilizadas em um mesmo local, ou ao mesmo tempo, para remover mais de um contaminante.

2.2 | Potencialidades e Limitações

A fitorremediação apresenta elevado potencial de utilização, devido às vantagens em relação às técnicas convencionais de remediação de contaminantes do solo; entretanto, ainda existe uma série de gargalos, como mostra a Tabela 03, a seguir.

TABELA 03: Potencialidade e limitação da Fitorremediação

Potencialidades	Limitações
Técnica economicamente viável, quando comparada às técnicas convencionais de tratamento envolvendo a remoção do solo contaminado para tratamento <i>ex situ</i>	Dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação, principalmente em relação à descontaminação de herbicidas de amplo espectro de ação ou em misturas no solo
Equipamentos e suprimentos empregados no programa de fitorremediação são, na maioria dos casos, os mesmos utilizados na agricultura. Logo, quando a fitorremediação é implantada em áreas agrícolas, o custo deve ser ainda menor	Contaminante, deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular. Tratamento adequado a solos cuja contaminação está localizada à superfície (< 5m)
Compostos orgânicos podem ser degradados a CO ₂ e H ₂ O, removendo toda a fonte de contaminação, não havendo, nessa situação, a necessidade de retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada. Esta situação não é válida para metais pesados	Melhoria nas condições do solo pode ser requerida, incluindo a quebração do contaminante para facilitar sua absorção pelas plantas, devido à quebra de pontes de ligação com partículas do solo
Maior facilidade durante o monitoramento de plantas, quando comparado aos microorganismos	Potencial de contaminação da cadeia alimentar, caso as plantas fitorremediadoras sejam ingeridas por animais
Propriedades biológicas e físicas do solo são mantidas e, em alguns casos, podem até ser melhoradas	Condições climáticas e ambientais podem restringir o crescimento de plantas fitorremediadoras
Incorporação de matéria orgânica ao solo, quando não há necessidade de retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada	Elevados níveis do contaminante no solo podem impedir a introdução de plantas no sítio contaminado
Fixação de nitrogênio atmosférico, no caso de leguminosas	Possibilidade de a planta fitorremediadora tornar-se planta daninha

Potencialidades	Limitações
Plantas auxiliam no controle do processo erosivo, eólico e hídrico. Nesse último caso, evitam o carreamento de contaminantes com a água e com o solo e reduzem a contaminação de lagos e rios	Tempo requerido para obtenção de uma despoluição satisfatória pode ser longo (usualmente mais de uma estação de crescimento)
Pode-se considerar, também, que a planta reduz o movimento descendente de água contaminada de camadas superficiais do solo para o lençol freático	Necessidade de disposição da biomassa vegetal, quando ocorre a fitoextração de poluentes não-metabolizáveis ou metabolizados a compostos também tóxicos
Utiliza energia solar para realizar os processos (fotossíntese)	Plantas selecionam o metal que irão remediar, embora possam ocasionalmente, remediar mais de um metal
Alta probabilidade de aceitação pública	Tecnologia em desenvolvimento
A planta pode ser valorizada economicamente, no caso de recuperação de áreas contaminadas por metais pesados, existe a possibilidade de reciclar este metal	Pouco conhecimento sobre o cultivo, a genética, a reprodução e as doenças que podem ser causadas pelas plantas fitorremediadoras
Útil em locais com elevada quantidade de solo a descontaminar	Plantas fitoextratoras colhidas ainda não são comercializadas

Adaptado de Pires, 2003.

Apesar de existirem limitações, os benefícios apresentados pela fitorremediação a tornam uma técnica promissora. Contudo, ela requer ação conjunta de profissionais de diversas áreas, no intuito de identificar espécies capazes de atuar na descontaminação de solos, principalmente em condições edafoclimáticas brasileiras.

3 | NUTRIÇÃO VEGETAL

Os vegetais necessitam, além de carbono, oxigênio e hidrogênio, de outros elementos, alguns metais, que podem aparecer em distintas concentrações. Os que aparecem em maior concentração são denominados macronutrientes, e aqueles que ocorrem em diminutas quantidades são conhecidos como micronutrientes. A maioria dos micronutrientes é constituinte de regiões muito específicas de enzimas (como o centro de reação), tornando-se essencial em baixas concentrações; já os macronutrientes são constituintes estruturais de proteínas – e, assim, de todas as enzimas, de ácidos nucleicos e de outras macromoléculas – ou atuam como agentes osmóticos, sendo necessários em maiores quantidades.

Nitrogênio (N), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Fósforo (P) e Enxofre (S) são elementos minerais que aparecem em maiores concentrações e podem atingir até 5% do peso seco, o que é muito, considerando-se que o corpo do vegetal pode ter aproximadamente 90% de água. Os micronutrientes são encontrados em quantidades reduzidas dentro do corpo do vegetal (menos de 0,01%); são principalmente cofatores ou ativadores enzimáticos. A Tabela 04 mostra as quantidades relativas de cada um dos macro e micronutrientes na biomassa vegetal seca (EPSTEIN, 1975).

TABELA 04: Concentração de macro e micronutrientes em peso seco de biomassa. Comparação com a quantidade de átomos de molibdênio

Elemento	Concentração na matéria seca (% ou ppm)	Número relativo de átomos em relação ao Molibdênio (Mo)
Macronutrientes		
Nitrogênio	1,50%	1000000
Potássio	1,00%	250
Cálcio	0,50%	125
Magnésio	0,20%	80
Fósforo	0,20%	60
Enxofre	0,10%	30

Micronutrientes		
Cloro	100 ppm	3
Ferro	100 ppm	2
Boro	20 ppm	1
Manganês	50 ppm	400
Zinco	20 ppm	100
Cobre	6 ppm	2
Níquel	0,1 ppm	1
Molibdênio	0,1 ppm	

Adaptado de Epstein, 1975.

3.1 | Macronutrientes

3.1.1 NITROGÊNIO (N)

O nitrogênio está presente na estrutura de todos os aminoácidos e, conseqüentemente, em todas as proteínas, sejam elas estruturais (proteínas de membrana, regulatórias etc.) ou catalíticas (enzimas). Os animais retiram o nitrogênio de sua dieta, enquanto as plantas podem absorvê-lo da solução do solo nas formas iônicas (nítrica ou amoniacal), ou orgânicas (amidas e aminas) e assim incorporá-lo em outras moléculas. As principais formas de nitrogênio, utilizadas pela maioria das plantas, são as nítricas e amoniacal (EPSTEIN, 1975).

3.1.2 POTÁSSIO (K)

O potássio é considerado o principal ativador enzimático em vegetais, atuando em diversos tipos de reação de fosforilação, na síntese de ATP, na síntese de carboidratos, na migração de fotoassimilados, na respiração e na síntese de proteínas. O potássio é, também, considerado o principal íon de regulação osmótica, ou osmoregulação, especialmente importante no mecanismo de abertura e fechamento estomático (MELO, 1995).

3.1.3 CÁLCIO (CA)

Diferente dos outros macroelementos, normalmente a maior pro-

porção de cálcio nas células é encontrada na parede celular e na lamela média, fazendo ligações entre os radicais dos ácidos poligarcaturônicos (pectinas) da parede celular e auxiliando, assim, na sua estabilização. Essa função estabilizadora também é exercida no sistema de membrana das células, garantindo seu funcionamento e a seletividade, pela ligação a grupos fosfato e carboxilato dos fosfolípídeos de membrana. A quantidade de cálcio livre no citoplasma costuma ser baixa (0,1 a 0,2 μM), mas ele é considerado um dos principais responsáveis pelo mecanismo de sinalização celular ou transdução de sinal em plantas, funcionando como segundo mensageiro. Sinais externos podem ativar canais de cálcio, aumentando o influxo e a quantidade de cálcio livre na célula, como ocorre durante a infecção de patógenos, na resposta a estímulos luminosos, ou na resposta hormonal, como no caso do ácido abscísico (EPSTEIN, 1975; MELO, 1995).

3.1.4 MAGNÉSIO (Mg)

O magnésio tem uma função estrutural importantíssima nos vegetais, pois é o átomo central da molécula de clorofila. Como já foi visto, a síntese de clorofila e a de hemoglobina tem etapas iniciais comuns, e o grupo heme é preenchido com um átomo de Ferro para o caso da síntese de hemoglobina ou com um átomo de magnésio, para a síntese de clorofila. Outra função relevante do Magnésio é sua participação como co-fator enzimático, no caso dos processos de interconversão de energia. É sabido que a síntese de ATP e de outros compostos intermediários de alta energia requerem o acoplamento da molécula de ADP à enzima ATPase, para que ocorra, então, a ligação do terceiro P e o acoplamento seja garantido pelo Mg (ADP~Mg~P). De forma análoga, o Mg auxilia na agregação e configuração dos ribossomos e também na ativação dos aminoácidos, durante a transformação acil t-RNA na cadeia peptídica, sendo assim imprescindível à síntese de proteínas (EPSTEIN, 1975).

3.1.5 FÓSFORO (P)

O fósforo está presente em 0,1 a 0,5% da matéria seca do vegetal. Sua principal função é a transferência de energia, pois ele se en-

contra nos compostos ricos em energia de todos os eucariotos, como: ATP – Adenosina trifosfato; GTP – Guanina trifosfato; UTP – Uridina trifosfato e PPI – Pirofosfato (EPSTEIN, 1975).

Outra função metabólica do fósforo é estrutural nos ácidos nucleicos, fazendo a ligação da base nitrogenada ao açúcar. Muitas proteínas regulatórias possuem sítios de fosforilação e defosforilação bastante específicos, que determinam os próprios níveis de atividade, como quinases e fosfatases. Elas participam das diferentes rotas de sinalização celular ou transdução de sinal, que informam à célula quais rotas metabólicas devem ser ligadas ou desligadas, em resposta a um determinado tipo de sinal (EPSTEIN, 1975).

3.1.6 ENXOFRE (S)

O enxofre é componente estrutural dos aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina. Como já se sabe, esses aminoácidos estão, normalmente, presentes nos centros de reação das enzimas e/ou são fundamentais à manutenção de suas estruturas secundárias, terciárias e quaternárias – os grupamentos SH. Dessa forma, o enxofre, assim como o N, está presente em todas as proteínas e enzimas. A fixação biológica de N_2 também depende de enxofre, visto que o enxofre é constituinte da ferredoxina e da nitrogenase. Esses aminoácidos são, também, precursores de outros compostos que contêm enxofre, como coenzimas (succinil coenzima A) e produtos do metabolismo especial ou secundário, além das fitoquelatinas, que são ótimos ligantes de metais pesados como Cd, Zn e Cu. Essa capacidade de ligação das fitoquelatinas confere uma capacidade de detoxificação ao sistema radicular, evitando que níveis tóxicos desses elementos atinjam as células do vegetal. Outro composto que contém enxofre é a glutatona, um dos mais eficientes antioxidantes conhecidos, especialmente importante nos cloroplastos. Ele promove a detoxificação de radicais de oxigênio e peróxido de hidrogênio produzidos na fotossíntese, além de ser o precursor das fitoquelatinas. Essa função de remover radicais livres é importantíssima tanto para animais como para vegetais (EPSTEIN, 1975).

3.2 | Micronutrientes

3.2.1 CLORO (CL)

O cloro é considerado um co-fator da fotossíntese, pois atua na evolução do O_2 , além de ser um ativador das ATPases do tonoplasto. Exerce também papel fundamental no mecanismo de regulação do funcionamento dos estômatos e, assim, como o potássio, auxilia nos processos de osmorregulação (EPSTEIN, 1975).

3.2.2 FERRO (FE)

O ferro é um dos componentes estruturais dos citocromos e das ferredoxinas das cadeias de transporte de elétrons, na respiração e na fotossíntese. Também é um ativador de várias enzimas da síntese de proteínas, do metabolismo de ácidos nucleicos e da síntese de clorofila (EPSTEIN, 1975).

3.2.3 BORO (B)

Auxilia na formação de complexos orgânicos estáveis, com fenóis e boratos, e na síntese de lignina na parede celular, no metabolismo e transporte de açúcares e no metabolismo de ácidos nucleicos (EPSTEIN, 1975).

3.2.4 MANGANÊS (MN)

O manganês é um dos ativadores enzimáticos da síntese protéica, do Ciclo de Krebs, da fotossíntese e da formação de clorofila; ele garante o funcionamento do cloroplasto (a evolução do O_2 é Mn dependente). Na síntese de proteínas, ele exerce função estrutural, garantindo a manutenção dos ribossomos e tem também função regulatória, ordenando a atividade da RNA polimerase (EPSTEIN, 1975).

3.2.5 ZINCO (ZN)

Segundo Epstein (1975), o zinco é um ativador de várias enzimas de síntese de triptofano, que além de aminoácido essencial é também precursor das auxinas (uma classe de hormônio vegetal) e SOD – Superóxido Dismutase (enzima que remove radicais superóxidos formados a partir do O_2).

3.2.6 COBRE (Cu)

O cobre também é um ativador, especialmente de várias enzimas de oxidação-redução, como nos seguintes metabolismos: (i) do ácido ascórbico, (ii) das oxidases do citocromo, (iii) das enzimas da fotossíntese, como a plastocianina e rubisco, (iv) da SOD – Superóxido dismutase, (v) de polifenóis, (vi) do ABA – Ácido Abscísico, um hormônio vegetal (EPSTEIN, 1975).

3.2.7 NÍQUEL (Ni)

O níquel é essencial à atividade enzimática da urease, no metabolismo do nitrogênio e também de enzimas ligantes do enxofre (EPSTEIN, 1975).

3.2.8 MOLIBDÊNIO (Mo)

Atua especificamente no metabolismo do nitrogênio, pois é constituinte das enzimas nitrogenase (que fixa o N_2) e redutase do nitrato (que garante a redução do nitrato para incorporação em compostos orgânicos) (EPSTEIN, 1975).

3.3 | Elementos benéficos

Além dos macro e micronutrientes, alguns elementos, quando adicionados às plantas, são capazes de incrementar o crescimento. Embora não sejam considerados essenciais, ou apenas para determinada espécie de planta ou em algumas condições específicas, esses estimulantes do crescimento são tidos como Elementos Benéficos (EPSTEIN, 1975).

3.3.1 SILÍCIO (Si)

Em algumas gramíneas, a deposição de sílica em células epidérmicas e nos tricomas aumenta a estabilidade da parede celular (EPSTEIN, 1975).

3.3.2 COBALTO (Co)

Fundamental à fixação de N_2 nos nódulos das raízes de leguminosas, em associação com bactérias fixadoras (EPSTEIN, 1975).

3.3.3 SELÊNIO (SE)

Semelhante ao S, compete com os mesmos sítios. Deficiência de Se em folhas de *Astragalus* leva ao acúmulo de níveis tóxicos de fosfato (EPSTEIN, 1975).

3.3.4 ALUMÍNIO (AL)

Normalmente tóxico, em baixas concentrações (entre 70 e 180 μ M) pode estimular o crescimento de algumas plantas (EPSTEIN, 1975).

4 | ABSORÇÃO DOS NUTRIENTES

Segundo Epstein (1975), a absorção depende de uma série de fatores: aeração (o oxigênio é necessário à respiração das raízes, fonte de energia para a absorção); temperatura (a faixa térmica entre 5 e 30°C aumenta a quantidade de íons absorvidos devido à atividade metabólica); umidade (mesmo sendo a água o veículo natural dos sais, a absorção desses na célula varia, pois cada elemento penetra na célula com uma determinada velocidade); presença de outros íons (interação entre eles); presença de cálcio (mantém a integridade funcional das membranas); estado iônico interno (se todos os sítios da raiz disponíveis para a “troca” inicial estiverem saturados, fica menor a possibilidade de absorção); potencialidade genética (a capacidade de absorção pode variar com a espécie); pH (valores inferiores a 7,0 favorecem a absorção de ânions, enquanto os valores mais próximos à neutralidade auxiliam a entrada de cátions).

Concentrações elevadas de metais, mesmo os essenciais ao crescimento vegetal, podem gerar sintomas de contaminação e conseqüente inibição do crescimento vegetal. Diversas estratégias no nível celular e molecular são adotadas para diminuir a toxicidade dos metais, ou até mesmo impedi-los de se interiorizar, e sua compreensão se faz necessário para tornar sua aplicação mais prática, norteando a estratégia de descontaminação a ser tomada (BROOKS, 1998).

5 | PLANTAS HIPERACUMULADORAS

Existem plantas que exibem a capacidade natural de acumular metais nos seus diferentes tecidos, sendo denominadas hiperacumuladoras (Tabela 05). As concentrações podem ser cerca de 100 vezes maiores quando essas são comparadas com as não-hiperacumuladoras que crescem no mesmo substrato (MCGRATH, 2003). Um tipo de samambaia é disponível comercialmente para fitoextração de arsênio, e resultados promissores são relatados em Salido (2003). As complexas interações no transporte destes elementos, do meio externo para o interior do vegetal, e sua distribuição e acúmulo, como aglomerados amorfos ou como semicristais, em estruturas celulares ou subcelulares, decorrem de processos específicos para cada espécie. No entanto, as causas da variação de forma e de localização dos precipitados metálicos (microbiolitos) em diferentes compartimentos internos da planta são ainda pouco conhecidas (LIMA e CUNHA, 2004).

TABELA 05: Espécies hiperacumuladoras. Comparação entre crescimento em solo contaminado e solo não contaminado.

Elemento	Espécies	Concentração	Biomassa
Cádmio	<i>Thlaspi caerulescens</i>	3000 (1)	4
Cobalto	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10 200 (1)	4
Cobre	<i>Haumaniastrum katangense</i>	8356 (1)	5
Chumbo	<i>Thlaspi rotundifolium subsp.</i>	8200 (5)	4
Manganês	<i>Macadamia neurophylla</i>	55 000 (400)	30
Níquel	<i>Alyssum bertolonii</i>	13 400 (2)	9
	<i>Berkheya coddii</i>	17 000 (2)	18
Selênio	<i>Astragalus pattersoni</i>	6000 (1)	5
Tálio	<i>Iberis intermedia</i>	3070 (1)	8
Urânio	<i>Atriplex confertifolia</i>	100 (0.5)	10
Zinco	<i>Thlaspi calaminare</i>	10 000 (100)	4

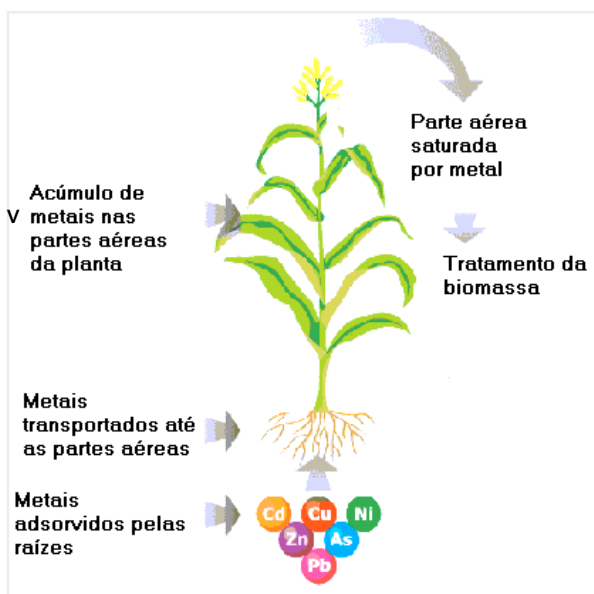
As concentrações são para valores médios ($\mu\text{g/g}$ de matéria seca); os valores nos parênteses são equivalentes para plantas não-hiperacumuladoras; biomassa é ton/ha/ano. Retirado de Brooks et al, (1998).

6 | TÉCNICAS DE FITORREMEDIAÇÃO

A técnica de fitorremediação já sofreu avanços significativos quanto à natureza dos agentes poluidores com a elucidação dos processos envolvidos, dentre os quais, alguns serão abordados neste texto, tais como: Fitoextração, Fitoestimulação, Fitotransformação (fito-volatilização e fitodegradação), Fitoestabilização, Rizofiltração.

6.1 | Fitoextração

Esta técnica envolve a absorção dos contaminantes pelas raízes, onde são armazenados ou transportados e acumulados em suas partes aéreas. É aplicada principalmente para metais como cádmio, níquel, cobre, zinco e chumbo, podendo ser usada também para compostos inorgânicos e compostos orgânicos (MCGRATH, 1998). Na Figura 02 é possível observar o mecanismo de fitoextração dos contaminantes na planta.



Fonte: Nascimento, 2006.

FIGURA 02: Esquema representativo dos processos envolvidos na fitoextração de solos contaminados por metais pesados.

No campo da fitorremediação de solos contaminados por metais pesados, a fitoextração tem sido a técnica mais utilizada, devido, sobretudo, à possibilidade de elevada eficiência e baixo custo. Porém, a fitoextração só é eficiente se o contaminante for removido do solo. Em geral, é necessário colher as plantas antes da queda ou da sua decomposição, de modo que os contaminantes não se dispersem ou retornem ao solo. Depois do recolhimento da biomassa contaminada, essa deverá ser processada através de processos térmicos, físicos, químicos ou biológicos para extração dos metais adsorvidos. No caso da queima, por exemplo, a energia produzida representa uma valorização econômica do processo. Em alguns casos a remoção pode ocorrer espontaneamente, por volatilização dos metais absorvidos pelo vegetal (SCHNOOR, 2002). Na Figura 03, a seguir, é possível observar as etapas que envolvem o processo de fitoextração.

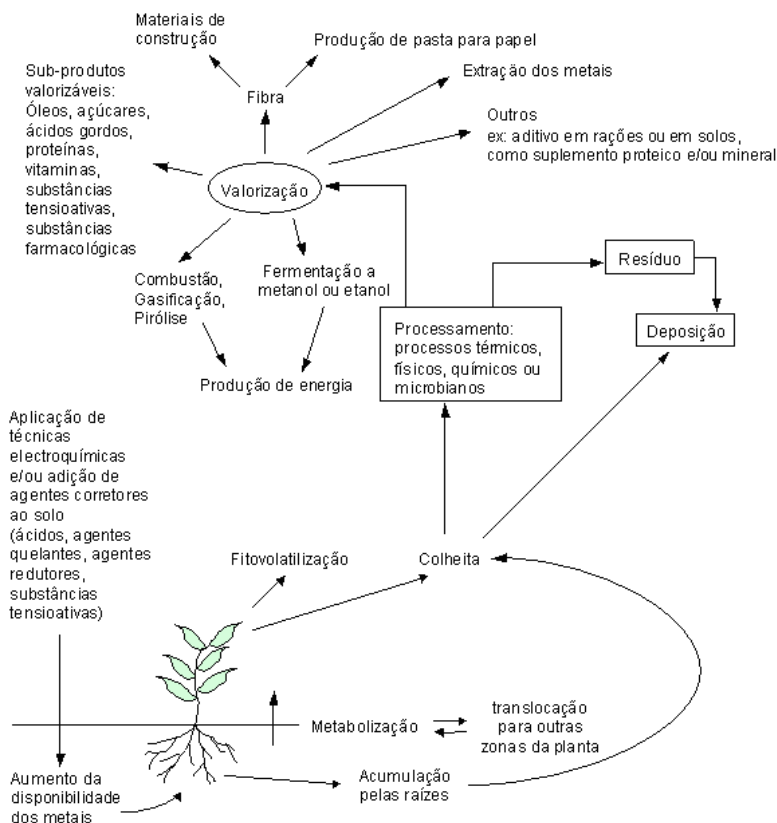


FIGURA 03: Processos envolvidos na fitoextração. Fonte: www.institutovirtual.pt/edu-agri-biotec/doc/Miscanthus.doc.

Alguns fatores podem influenciar diretamente na absorção dos metais pesados pela planta, tais como a natureza do solo (pH, salinidade e textura), o clima, o tipo da concentração dos poluentes (GLASS, 1998).

Algumas plantas são hiperacumuladoras de metais, ou seja, são capazes de absorver e armazenar, através de suas raízes, altas concentrações de metais específicos, podendo chegar a concentrações de 0,1% a 1% do peso seco, dependendo do metal (MCGRATH, 1998). Em função dessas características, esta técnica utiliza plantas hipe-

racumuladoras para a remediação de solos contaminados por metais pesados (Figura 04).

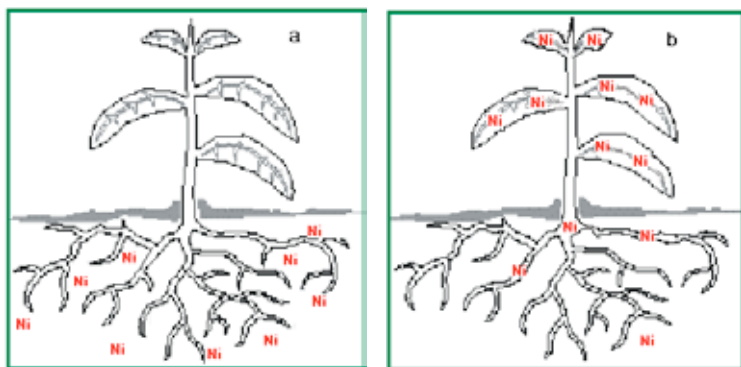


FIGURA 04: Esquema do mecanismo de planta hiperacumuladoras: (a) contaminantes no solo; (b) contaminantes adsorvidos na planta. Fonte: Dinardi, 2003.

As espécies de *Brassica juncea*, *Aeolanthus biformifolius*, *Alyssum bertolonii* e *Thlaspi caerulescens* são exemplos de plantas hiperacumuladoras de Pb, Cu/Co e Zn, respectivamente (Figura 05).



FIGURA 05: Plantas hiperacumuladoras: (a) *Thlaspi caerulescens* (b) *Brassica juncea*

Durante centenas de anos, prospectores de cobre ou de outros metais usavam esta informação para encontrar minérios preciosos localizados próximo às superfícies. Esta capacidade era desenvolvida ao longo do tempo, à medida que as plantas cresciam em solos contendo elevadas concentrações de metais pesados, como, por exemplo, regiões próximas a mineradoras.

Observa-se alta taxa de acúmulo de metais em árvores, arbustos, ervas, gramas e sementes. Portanto, é fundamental que se tenha conhecimento profundo dos mecanismos fisiológicos, bioquímicos, moleculares e dos genes envolvidos na hiperacumulação em espécies tolerantes aos metais pesados, para fornecer a base para o melhoramento do seu desempenho em termos de tolerância e acumulação de metais. Desta forma, pode haver uma redução dos metais ao longo da cadeia alimentar e, conseqüentemente, a diminuição de metais pesados (NASCIMENTO, 2006).

6.2 | Fitoestimulação

O estímulo à atividade microbiana, promovido pela liberação de exsudatos radiculares, tais como aminoácidos e polissacarídeos, que atuam na degradação de compostos no solo, caracteriza, em algumas plantas, a aptidão rizosférica para a biorremediação. A comunidade microbiana na rizosfera é heterogênea devido à distribuição espacial variável dos nutrientes nesta zona, porém, os *Pseudomonas* são os organismos predominantes associados às raízes (BROOKS, 1998; ARTHUR *et al.*, 2000).

A rizosfera é um habitat mutável onde a planta pode modificar as características químicas do solo nas proximidades de suas raízes, através dos fragmentos oriundos da superfície dessas raízes e dos exsudados solúveis (açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, peptídeos, nucleotídeos, vitaminas e outros compostos biologicamente ativos), enriquecendo o solo com uma larga variedade de compostos orgânicos. O consumo de O_2 e a liberação de CO_2 modificam a atmosfera radicular, a absorção seletiva de íons nutritivos, a redução da concentração de sais, o consumo de H_2O , diminuição da

umidade, que são fatores que também modificam a estrutura do solo (CROWLEY, 1996).

A comunidade microbiana presente na rizosfera é fortemente influenciada pelas condições ambientais supracitadas, bem como por compostos adicionados, podendo, deste modo, ser afetada de forma qualitativa e quantitativa. Normalmente, o efeito rizosférico da interface solo-raiz resulta na proliferação da comunidade microbiana nessa região (ARTHUR *et al.*, 2000). Interações planta-microorganismos estendem-se pelo tempo (estágio de desenvolvimento da planta e época de cultivo), espaço (macro e microhabitat) e substrato (fonte de energia e disponibilidade). O número de microorganismos nos solos rizosféricos é normalmente de 5 a 10 vezes maior em relação aos que não são rizosféricos, entretanto, esta diferença pode chegar a 100 vezes (ANDERSON *et al.*, 1993). Por esta razão, a rizosfera pode ser ótimo sítio de degradação de compostos orgânicos indesejáveis, graças à comunidade microbiana associada (bactérias, actinomicetos e fungos) que pode, em alguns casos, utilizar os contaminantes como nutrientes e fontes de carbono primário. Estudos já indicam que, embora os agrotóxicos possam causar efeitos negativos à população microbiana, as bactérias conseguem resistir à ação desses agrotóxicos, até mesmo se proliferar na presença desses em elevadas concentrações, maiores ainda do que aquelas aplicadas no campo (MARTENSSON, 1992; SCHNOOR, 2002). Para este tipo de estudo, a taxa de evolução de CO₂ do solo tem sido utilizada como índice da atividade, assim como o tamanho da biomassa microbiana do solo e, ainda, o metabolismo do carbono lábil do solo (SOUZA *et al.*, 1999).

A biorremediação aeróbia na região na rizosfera se mostra eficiente no ataque a substâncias químicas aromáticas hidrofóbicas como PHAs, BTEX e fenólicos, em locais onde a contaminação não é profunda (SCHNOOR, 1997 *apud* HSY *et al.*, 1992).

Para aplicação adequada desta técnica, torna-se fundamental a identificação de espécies de plantas que estimulem a atividade e o crescimento microbiano na rizosfera, resultando no aumento das taxas de degradação do herbicida do composto do solo, principal-

mente se esse apresenta persistência elevada (BOVEY *et al.*, 1982). É fundamental que as espécies sejam de fácil aquisição, que ocorra rapidamente a multiplicação de seus propágulos e que não haja dificuldade na erradicação da espécie da área, uma vez que pode tornar-se espécie daninha. A identificação destas espécies, associada às características de interesse agrônômico, é um passo importante para a elaboração de programas de descontaminação de solos. O uso de leguminosas, por exemplo, além de possibilitar a despoluição do solo, proporciona, entre outros benefícios, a fixação simbiótica do nitrogênio atmosférico. Essas plantas poderão ser incorporadas ao solo quando não houver necessidade da retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada, além de reduzir o processo erosivo do solo evitando o transporte de solo e água contaminados para outras áreas. É importante destacar que apesar da maioria dos testes avaliar plantas isoladas, várias espécies podem ser usadas num mesmo local ao mesmo tempo ou em sucessão, para remover mais de um contaminante, uma vez que em áreas agrícolas vários herbicidas são utilizados (PIRES, 2003).

A Figura 06 a seguir é a espécie *Canavalia ensiformis*, conhecida como feijão-de-porco. Além de apresentar características de adubo verde, tem sido testada e aprovada como espécie remediadora de solos contaminados por herbicidas (PIRES, 2005).



FIGURA 06: *Canavalia ensiformis*.

6.3 | Fitotransformação

A fitotransformação se dá pela absorção com subsequente volatilização, ou degradação parcial ou completa, com transformação em compostos menos tóxicos, combinados e/ou ligados nos tecidos das plantas (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000). Em geral, a maioria dos compostos orgânicos passa por alguma transformação nas células das plantas antes de ser isolada em vacúolos ou ligar-se a estruturas celulares insolúveis, como a lignina (SALT *et al.*, 1998).

Em ambos os mecanismos, a presença de raízes é determinante. Portanto, espécies selecionadas devem apresentar sistema radicular vigoroso, agressivo e profundo e, além disso, elevada taxa transpiratória, responsável pelo fluxo de substâncias das raízes para a parte aérea (SCHNOOR & DEE, 1997).

6.3.1 FITOVOLATILIZAÇÃO

Esta técnica é utilizada para remediação potencial de substâncias químicas orgânicas voláteis, sendo utilizada para compostos orgânicos, principalmente para mercúrio, selênio e arsênio, que são absorvidos pelas raízes, convertidos em formas menos tóxicas ou não tóxicas e posteriormente liberados na atmosfera (BROOKS, 1998).

Rugh (1996) realizou alguns estudos de fitovolatilização com mercúrio e selênio. No caso do mercúrio, ele é transportado para as partes aéreas da planta em forma catiônica, Hg^{+1} ou Hg^{+2} , e reduzido nos tecidos da planta a mercúrio elementar (Hg^0). Esse é bastante volátil e pode ser volatilizado nos tecidos das folhas durante a transpiração, o que é de grande preocupação ambiental, pois o mercúrio elementar persiste no meio ambiente, bioacumulando. Só foi possível a realização destes estudos com a manipulação genética de plantas. Já nos estudos realizados com Se, observou-se que a fitovolatilização acontece naturalmente nas plantas.

6.3.2 FITODEGRADAÇÃO

Segundo Cunningham (1996), a fitodegradação depende da captação direta dos contaminantes do solo ou de águas subterrâneas e sua subsequente degradação dentro das células vegetais através

da ação de enzimas específicas (Figura 07) como, por exemplo, as nitroreduases (degradação de nitroaromáticos), desalogenases (degradação de solventes clorados e pesticidas) e lacases (degradação de anilinas).

As espécies *Populus sp.* e *Myriophyllum spicatum* são exemplos de plantas que possuem tais sistemas enzimáticos (CUNNINGHAM, 1996).

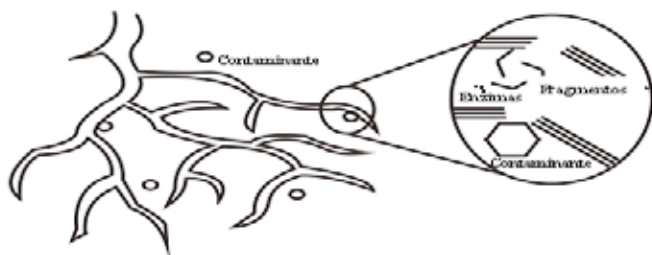


FIGURA 07: Representação esquemática da fitodegradação de poluentes (DINARDI, 2003)

6.4 | Fitoestabilização

Segundo Schoor (1997), fitoestabilização é um termo que se refere à manutenção de solos e sedimentos contaminados com a utilização de sistemas vegetais, por meio da imobilização de contaminantes no solo. O estabelecimento das raízes impede que a ação de ventos fortes promova o espalhamento do material contido nos locais contaminados evitando, assim, maiores contaminações. O controle hidráulico é possível em alguns casos devido ao grande volume de água transpirada pelas plantas, que evita a migração do lixiviado para águas subterrâneas ou corpos receptores.

A fitoestabilização é especialmente aplicável em locais contaminados com metais pesados onde a melhor alternativa é, freqüentemente, manter o contaminante no local. A captação dos metais *in situ* é, muitas das vezes, considerada a melhor alternativa para locais com baixos níveis de contaminação (abaixo dos limites de risco) ou para recuperar áreas contaminadas através de uma ação

de remoção em larga escala ou ainda quando a remediação *in situ* não é viável. O crescimento das plantas é necessário para realizar o controle hidráulico e a imobilização no local. Além disso, as plantas não podem morrer ou ser removidas durante o processo. Tais plantas são algumas vezes utilizadas para imobilizar metais pesados, tais como: chumbo, cádmio, zinco e arsênio. Exemplos de plantas cultivadas com este fim são espécies de *Haumaniastrum*, *Eragrostis*, *Ascolepis*, *Gladiolus* e *Alyssum* (Figura 08).



FIGURA 08: Plantas com capacidade para promover fitoestabilização: (a) *Haumaniastrum caeruleum*; (b) *Eragrostis spectabilis*; (c) *Ascolepis capensis*.

6.5 | Rizofiltração

A rizofiltração é uma técnica que utiliza sistemas vegetais com o objetivo de promover a remoção dos contaminantes de um meio aquoso. Nesse processo, é utilizado um sistema hidropônico, no qual as raízes dos vegetais permanecem em contato com o efluente, através das quais os contaminantes são absorvidos e concentrados. Plantas com grande biomassa radicular (hiperacumuladoras aquáticas), como *Helianthus annuus* e *Brassica juncea*, apresentam potencial aplicabilidade para esta tecnologia (GLASS, 1998). O sistema radicular funciona como um filtro mecânico e retém material particulado (orgânico e mineral) existente na água.

A intensa absorção de nutrientes, o rápido crescimento, as facilidades de retirada das lagoas e as possibilidades de aproveitamento da biomassa escolhida justificam a utilização de plantas aquáticas

em sistemas de hidroponia. Plantas aquáticas, hidrófitas, como as macrófitas providas de rizomas, têm sido utilizadas visando à melhoria da qualidade de efluentes e o tratamento de águas residuais, principalmente no que diz respeito à redução das concentrações de nitrogênio e fósforo (GRANATO, 1995). As macrófitas exercem papel importante na remoção de substâncias dissolvidas, assimilando-as e incorporando-as à sua biomassa.

Segundo Dinardi (2003), diversos sistemas de lagoas podem ser construídos, considerando as características de cada espécie vegetal, para a aplicação de macrófitas no tratamento de água contaminada, tais como:

Sistemas baseados em macrófitas aquáticas flutuantes: trata-se de plantas com seus tecidos fotossintéticos flutuantes e com raízes longas livres ou enraizadas, dependendo da profundidade do meio a ser tratado (Figura 09):

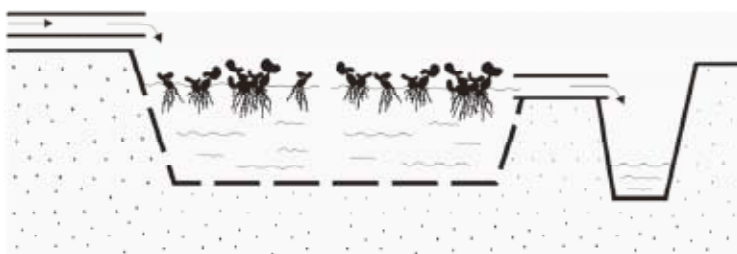


FIGURA 09: Representação de um sistema de tratamento de águas residuais baseado em macrófitas aquáticas flutuantes. Fonte: Dinardi, 2003.

Sistemas baseados em macrófitas submersas: trata-se de plantas com os seus tecidos fotossintéticos completamente imersos. As principais espécies que integram esse tipo de planta são: *Elodea canadensis*, *Elodea nuttali*, *Egeria densa*, *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata*, *Cabomba caroliniana*, *Miriophyllum heterophyllum* e *Potamogeton sp* (Figura 10).

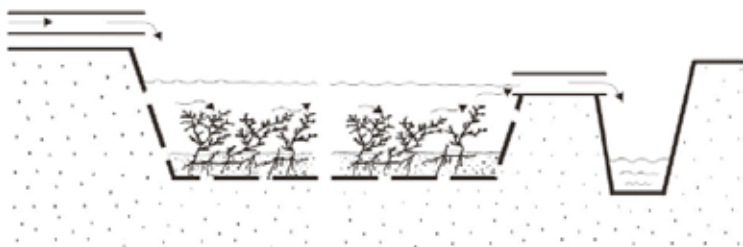


FIGURA 10: Representação de um sistema de tratamento de águas residuais baseado em macrófitas aquáticas submersas. Fonte: Dinardi, 2003.

Sistemas baseados em macrófitas aquáticas emergentes: é possível optar por um dos sistemas de tratamentos supramencionados, isoladamente, ou combiná-los entre si, ou com órgãos de sistemas convencionais de depuração (Figura 11, 12 e 13).

Sistema de tratamento com Macrófitas emergentes.
Fluxo superficial

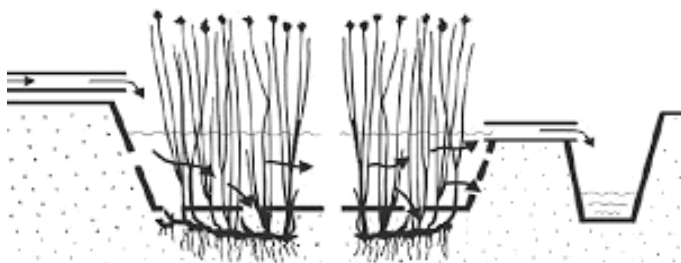


FIGURA 11: Fluxo superficial com ilustração da espécie *Scirpus lacustris* (DINARDI 2003 *apud* MOSSE, 1980).

Sistema de tratamento com Macrófitas emergentes.
Fluxo sub-superficial horizontal (translação)

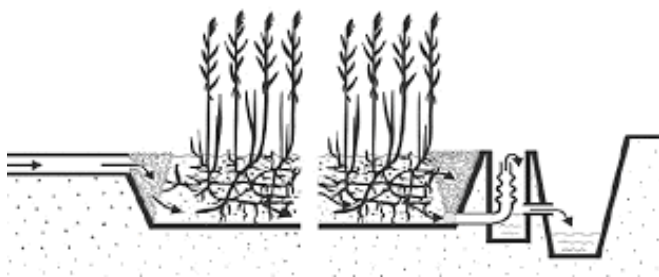


FIGURA 12: Fluxo sub-superficial horizontal com ilustração da espécie *Phragmites australis* (DINARDI 2003 *apud* MOSSE, 1980).

(c) Sistema de tratamento com Macrófitas emergentes.
Fluxo sub-superficial vertical (percolação)

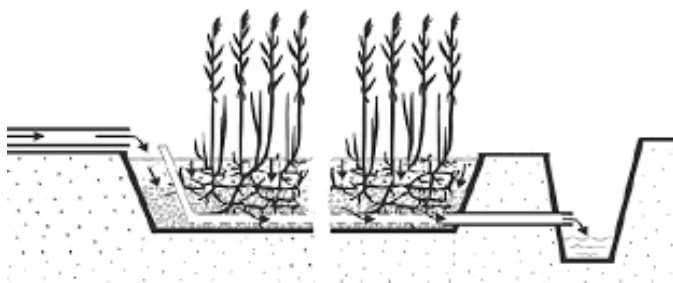


FIGURA 13: Fluxo subsuperficial vertical (percolação) com ilustração da espécie *Phragmites australis* (DINARDI 2003 *apud* MOSSE, 1980).

7 | FITOMINERAÇÃO

A fitominação surge como proposta promissora para remediação de áreas contaminadas com baixos teores no metal de interesse (<1%) ou exploração economicamente viável de minérios com concentrações, no metal de interesse, inferiores a 1% (BROOKS *et al.*, 1998).

Segundo Brooks (1998), para se obter um retorno econômico de \$500 ha⁻¹, a variação de concentração em µg g⁻¹ de matéria seca deve aumentar proporcionalmente à uma redução da produção de biomassa (t ha⁻¹), como se pode verificar na Tabela 06.

TABELA 06: Concentração do metal (µg.g⁻¹ matéria seca) nos cultivos para se obter um lucro de \$500 ha⁻¹ (excluindo energia de incineração) com variação de biomassa

Metal	US\$/Ton	Produção de biomassa (ton/ha)					
		1	10	15	20	25	30
Platina ¹	14 720 752	34	3,4	2,3	1,7	1,4	1,1
Ouro ¹	11 040 564	45,3	4,6	3,1	2,2	1,8	1,5
Paládio ¹	4 464 000	112	11,2	7,5	5,6	4,5	3,7
Tálio	300 000	1667	167	111	83	67	56
Prata ¹	152 113	3278	327	218	164	131	109
Cobalto	48 000	10 417	1042	694	521	417	347
Urânio	22 000	22 728	2273	1515	1137	910	758
Níquel	6090	82 164	8216	5477	4108	3286	2739
Estanho ¹	5580	88 715	8871	5914	4435	3548	2957
Cádmio	3750	133 333	13 333	8889	6667	5333	4444
Cobre	1964	254 970	25 497	16 998	12 749	10 199	8499
Manganês	1700	294 120	29 412	19 608	14 706	11 765	9804
Zinco	1192	417 076	41 707	27 805	20 853	16 683	13 902
Chumbo ¹	577	869 040	86 904	57 936	43 452	34 761	29 968

¹ Provavelmente requer indução de hiperacumulação. Retirado de Brooks *et al.*, (1998).

No trabalho relatado por Anderson (2001), verifica-se a hiperacumulação de níquel por *Hybanthus ustrocaledonicus*, como pode ser observado na Tabela 07, a seguir.

TABELA 07: Concentrações de elemento em plantas “normais” de *Alphitonia neocaledonica*, e um hiperacumulador de níquel (*Hybanthus austrocaledonicus*).

Elemento	Planta “normal” (mg/kg)	Hiperacumuladora (mg/kg)	Total de concentração no solo (mg/kg)
Potássio	5600	7500	500
Cálcio	9600	9500	6800
Magnésio	1600	7100	57,5
Ferro	240	220	258
Cobalto	< 2	25	610
Cromo	4	20	180
Manganês	330	226	6100
Níquel	27	12,400	5900

Fonte: Anderson, 2001.

Testes conduzidos pelo *US Bureau of Mines* (Reno, Nevada) com uma espécie de ocorrência natural de *Streptanthus polygaloides*, uma espécie conhecida como acumuladora de níquel (NICKS, 1994; NICKS, 1995), onde o solo local continha aproximadamente 0,35% níquel, bem inferior à uma concentração econômica para mineração convencional. Esse mesmo autor Nicks (1994, 1995, 1998) propôs que um retorno líquido de \$513 ha⁻¹ para um crescimento poderia ser alcançado, assumindo que:

- i. Um mínimo de crescimento seletivo produziu plantas com 1% de níquel em massa seca.
- ii. O preço mundial de níquel era \$7,65 kg⁻¹.
- iii. O rendimento de biomassa depois de fertilização moderada era de 10 t ha⁻¹.

- iv. Um quarto da energia de combustão da biomassa poderia ser transformado em eletricidade com um rendimento de $\$131 \text{ ha}^{-1}$.
- v. O retorno de $\$765$ seria relacionado com o rendimento do cultivo (recuperação do metal) mais o rendimento de $\$131$ oriundos da queima do material para geração de energia.

Isto se compara bem com os lucros comuns de outras colheitas nos EUA, como, por exemplo, à colheita de trigo (NICKS, 1998).

8 | CONCLUSÕES

- i. Uma das principais vantagens da utilização da fitorremediação é a possibilidade de realizar o tratamento *in situ* (geralmente associado à outra técnica remediadora) para a descontaminação em áreas de grandes extensões contendo resíduos orgânicos e/ou inorgânicos. Além disso, quando comparada a técnicas convencionalmente utilizadas, se mostra bastante atraente em função do baixo custo de implementação e manutenção, com possibilidades de remediar águas contaminadas e solo e, ao mesmo tempo, contribuir com a melhoria do aspecto visual do ambiente.
- ii. Dependendo do nível de contaminação e dos agentes contaminantes, sua aplicação pode ser associada a outras técnicas remediadoras, ou, ainda, como um tratamento final em locais já tratados, mas que ainda apresentam baixos teores de contaminantes.
- iii. Apesar das limitações, os benefícios gerados pela aplicação da fitorremediação fazem com que essa técnica se mostre bastante promissora diante do panorama preocupante dos locais contaminados, impedindo que a poluição de águas e solos alcance níveis cada vez mais alarmantes.
- iv. O avanço das pesquisas, objetivando a elucidação dos mecanismos fisiológicos envolvidos na fitorremediação, é de grande importância tanto para a melhoria da aplicabilidade da técnica, a fim de evitar os riscos como a possibilidade de os vegetais entrarem na cadeia alimentar, acarretando possíveis danos à saúde pública, quanto para a maximização da exploração do seu potencial econômico, relacionado à fitomineração.

9 | REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A. M. A. e SIQUEIRA, J. O. Contaminação Química e Biorremediação do Solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 1. p. 299-352 (2000).
- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N. e MOREIRA, F.M.S. Amenização do Calcário na Toxidez de Zinco e Cádmio para Mudanças de *Eucalyptus Camaldulensis* Cultivadas Em Solo Contaminado. *Revista Brasileira de Ciência do solo*. v. 28, p. 775-783, (2004).
- ALVEY, S. e CROWLEY, D.E. Survival and activity of an atrazine-mineralizing bacterial consortium in rhizosphere soil. *Environ. Sci. Technol.*, 27:1596-1603, (1996).
- ANDERSON, C.W.N.; STEWART, R.B.; MORENO, F.B.; WREESMANN, C. T. J.; GARDEA-TORRESDEY, J.L.; ROBINSON, B.H e MEECH, J.A. Gold phytomining. Novel Developments in a Plant-based Mining System, GOLD 2003: *New Industrial Applications for Gold*, October 1. Vancouver, Canada.:the World Gold Council (2003).
- ANDERSON, T.A.; GUTHRIE, E.A. e WALTON, B.T. Biorremediation In The Rhizosphere: Plant Roots and Associated Microbes Clean Contaminated Soil. *Environ. Sci. Technol.*, 27: 2630-2636, (1993).
- ARTHUR, E.L.; PERKOVICH, B.S.; ANDERSON, T. A. e COATS, J.R. Degradation of an atrazine and metolachor herbicide mixture in pesticide – contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. *Water, air, soil poll.*, 119:75-90, (2000).
- BOVEY, R.W.; MEYER, R.E. e HEIN, JR., H. Soil Persistence of Tebuthiuron In The Clypan Resource Area of Texas. *Weed Sci.*, 30:140-144, (1982).
- BROOKS, R.R.; CHAMBERS, M.F.; NICKS, L.J. e ROBINSON, B.H: Phytomining. *Trends In Plant Science*, Vol 3, (9):359-362 (1998).
- BROOKS, R. R. Phytoremediation By Volatilisation. In Brooks, R.R [Ed], *Plants That Yperaccumulate Heavy Metals*, CAB International, Walling-ford, p.289 (1998).
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, P. e HSU, F. C. Phytoremediation of Soils Contaminated With Organic Pollutants. *Adv. Agron.* (56) p.55 (1996). [Ed], *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals*, CAB International, Wallingford, p.261 (1998).

- DINARDI, A. L.; FORMAGI, V. M.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N.N.; SOBRINHO, G. D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Fitorremediação III Fórum de Estudos Contábeis, (2003).
- FERRO, A. M.; SIMS, R. C. e BUGBEE, B. Hycrest Crested Wheatgrass Accelerates The Degradation of Pentachlorophenol In Soil. *J. Environ. Qual.*, v. 23, p. 272-279, 1994.
Furtado, M.; Química e Derivados, 412, 15 (2003).
- FURTADO, M.; Química e Derivados, 412, 15 (2003).
- GLASS, D.J. The 1998 United States Market for Phytoremediation. D. Glass Associats Inc., Needham, 3 – 7, (1998).
- GRANATO, M. Utilização Do Aguapé No Tratamento de Efluentes com Cianetos. Rio De Janeiro: CETEM /CNPq, Série Tecnologia Ambiental v.5 p 1. (1995).
- MACHADO, I. C. Estudo da Ocorrência dos Metais Pesados Pb, Cd, Hg, Cu e Zn Na Ostra de Mangue *Crassostrea Brasiliana* do Estuário De Cananéia-SP, Brasil *Rev. Inst. Adolfo Lutz*, 61(1):13-18, (2002).
- MARTENSSON, A.M. Effects of Agrochemicals and Heavy Metals on Fast-Growing Rhizobia and Their Symbiosis With Small-Seeded Legumes. *Soil Biol. Biochem.*, 24: 435-445, (1992).
- MCGRATH, S.P. e ZHAO, F.J. Phytoextraction Of Metals And Metalloids From Contaminated Soils. *Curr Opin Biotechnol*, 14:277-282 (2003).
- MCGRATH, S.P. Phytoextraction For Soil Remediation. In Brooks, R.R. Ed, Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals, CAB International, Wallingford, p. 261, (1998).
- MELO, V. F. Balanço Nutricional, Eficiência de Utilização e Avaliação da Fertilidade do Solo Em P, K, Ca E Mg Em Plantios De Eucalipto No Rio Grande Do Sul. IPEF, v. 48/49, p. 8-127, (1995).
- MOSSE, R.A.; CHAGAS; J.M. e TERRA, A.R.S. Utilização De Lagoas De Maturação Com Aguapé (*Eichhornia Crassipes*) Na Remoção de Algas E Coliformes em Efluentes de Lagoas de Estabilização. *Eng. Sanit.*; v. 19 (1), p. 72 (1980).
- NASCIMENTO, C.W.A. e XING, B. Pytoextraction: A Review on Enhanced Metal Availability and Plant Accumulation. *Sic. Agric.*, v. 63, n.3, p.299-311, (2006).
- NERBITT, C. C. e DAVIS, T. E.; *Miner. Met. Mater. Soc.*, 331 (1994).

- NEWMAN, L. A. Phytoremediation of Organic Contaminants: A Review of Phytoremediation Research At The University Of Washington. *J. Soil Contamin.* v. 7, p. 531-542, (1998).
- NICKS, L.J. e CHAMBERS, M.F. Nickel farming, *Discover Mag.* 19 September (1994).
- NICKS, L.J. e CHAMBERS, M.F. Farming for metals, *Mining Environ. Mgt* 15–18 September (1995).
- NICKS, L.J. e CHAMBERS, M.F. A Pioneering Study Of The Potential Of Phytomining For Nickel, In *Plants That Hyperaccumulate Heavy Metals* (Brooks, R.R., ed.), pp. 313–326, CAB International (1998).
- PERKOVICH, B. S.; ANDERSON, T.A.; KRUGER, E.L. e COATS, J.R.. Enhanced Mineralization Of [¹⁴C] Atrazine In *K. Scoparia* Rhizosferic Soil From a Pesticide-Contaminated Site. *Pestic. Sci.*, v. 46, p. 391-396, (1996).
- PIRES, F. R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O. e FERREIRA, L.R. Seleção de Plantas com Potencial para Fitorremediação de Tebuthiuron. *Planta Daninha*, Rio de Janeiro, v. 21, p. 451-458, (2003).
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; CECON, P.R.; SANTOS, J.B.; TÓTOLA, M.R.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O. e FERREIRA, L.R.; SILVA, C.S.W. Inferências Sobre Atividade Rizosférica de Espécies Com Potencial Para Fitorremediação do Herbicida Tebuthiuron. *Revista Brasileira de Ciência do Solo. Ci. Solo*, v. 29, p. 627-634, (2005).
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O. e FERREIRA, L.R. Fitorremediação de Solos Contaminados com Herbicidas *Planta Daninha*, Viçosa – MG, v. 21, n.2, p. 335-341, (2003).
- PROVIDENTI, M.A.; LEE, H.; TREVORS, J.T. “Selected Factors Limiting The Microbial Degradation of Recalcitrant Compounds”, *Journal of Industrial Microbiology*, vol. 12, p. 379-395 (1993).
- REEVES, R.D. Nickel uptake by Californian *Streptanthus* and *Caulanthus* with particular reference to the hyperaccumulator *S. polygaloides* Gray (Brassicaceae), *Am. J. Bot.* 68, 708–712 (1981).
- RUGH, C.L.; WILDE, H.D.; STACK, N.M.; THOMPSON, D.M.; SUMMERS, A.O. e MEAGHER, R.B.; Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene. *Proc Natl Acad Sci U S A* 93:3182-3187 (1996).
- SALGADO, P. E. T. Em Fundamentos de toxicologia; Oga, S., ed.; 2ª ed., Atheneu: São Paulo, (2003).

- SALIDO, A.L.; HASTY, K.L.; LIM, J. M. e BUTCHER, D.J.: Phytoremediation of arsenic and lead in contaminated soil using Chinese brake ferns (*Pteris vittata*) and Indian mustard (*Brassica juncea*). *Int J Phytoremediation*, 5:89-103(2003).
- SCHNOOR J. L. e DEE, P. E. Phytoremediation. *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*, (1997).
- SCHNOOR J. L. Phytoremediation of Soil and Groundwater *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*, (2002).
- SOUZA, A.P.; FERREIRA, F.A.; SILVA, A.A.; CARDOSO, A.A. e RUIZ, H.A. Respiração microbiana do solo sob doses de glyphosate e de imazapyr. *Planta Daninha*, 17:387-398, (1999).
- VOSE, J. M.; SWANK, W. T.; HARVEY, G. J.; CLINTON, B. D. e SOBEK, C. Leaf water relations and sapflow in Eastern cottonwood (*Populus deltoides Bartr.*) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. *Intern. J. Phytoremediation.*, v. 2, p. 53-73, (2000).
- www.institutovirtual.pt/edu-agri-biotec/doc/Miscanthus.doc (Site 1) Consultado em 20/11/2006.
- www.plantsdatabase.com/membrs/horseshoe (Site 2) Consultado em 08/12/2006.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2005, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, cerca de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa *homepage*. As obras estão disponíveis em texto completo para *download*. Visite-nos em www.cetem.gov.br/series.

ÚLTIMOS NÚMEROS DA SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

STA-38 – Recuperação de Metais Preciosos a Partir de Lamas Anódicas de Processos de Eletrorefino de Ouro, Prata e Cobre. Gabrielle Nogueira Bard, Luis Gonzaga Santos Sobral e Renata de Barros Lima, 2006.

STA-37 – Biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores. Andréa C. de Lima Rizzo, Selma Gomes Ferreira Leite, Adriana Ururahy Soriano, Ronaldo Luis Correa dos Santos e Luis Gonzaga dos Santos Sobral, 2006.

STA-36 – Remoção de Mercúrio de Efluentes Líquidos da Indústria Soda-Cloro usando *Sargassum* sp. Luis Gonzaga Santos Sobral, André Luiz Ventura Fernandes, Renata de Barros Lima, Débora Monteiro de Oliveira e Priscila Gonçalves Xavier, 2006.

STA-35 – Seleção de microrganismo para produção de xilanases em bagaço de cana-de-açúcar. Judith Liliana Solórzano Lemos, 2006

STA-34 – Estudo da Vermiculita como Adsorvente de Óleo e Metal Pesado. José Fernandes de Oliveira Ugarte e Marisa Bezerra de Mello Monte, 2005.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Tel.Geral: (21) 3867-7222 - Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOSSAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.

