

## **Fitorremediação: Considerações Gerais e Características de Utilização**

**Henrique Douglas Coutinho\* e Alyne Rats Barbosa\*\***

\*Professor

Universidade Federal da Paraíba. Centro de Ciências Exatas e da Natureza.  
Departamento de Biologia Molecular. Laboratório de Biologia Molecular e Ecologia,  
João Pessoa-PB, CEP 58051-900 BRASIL

\*\*Especialista no Ensino de Biologia e Química

Universidade Regional do Cariri. Centro de Ciências Biológicas e da Saúde.  
Departamento de Ciências Físicas e Biológicas. Rua Coronel Antônio Luiz, nº 1161,  
CEO 63105-000 Crato-CE, BRASIL

---

**Sumário.** Hoje sectores de várias áreas têm observado com grande interesse o crescente número de poluentes existentes em todo o mundo. Por esse motivo aumenta o interesse por técnicas remediadoras, tendo neste momento um foco maior para o solo. Várias técnicas são estudadas e a fitorremediação possui um lugar de destaque devido à sua eficiência na descontaminação dos solos e também devido ao seu custo ser mais acessível do que outras técnicas. O presente trabalho baseia-se em várias pesquisas realizadas em solos poluídos, com o objectivo de apresentar as características peculiares da técnica de fitorremediação e também de outras técnicas utilizadas na remediação de solos contaminados. A presente revisão bibliográfica foi realizada através da análise do material disponível nos bancos de dados internacionais SciELO, LILACS, HIGHWIRE, PUBMED e SCIRUS e engloba diversos trabalhos que têm sido desenvolvidos na área de remediação de poluentes do ambiente. Os organismos, principalmente as plantas, apresentam maneiras específicas para a remoção, imobilização ou transformação de poluentes específicos. O estudo e a subsequente avaliação da interacção entre o solo, a planta e o poluente, são necessários e constituem uma promissora área de pesquisa para a remediação do ambiente. Em vista disso, é necessário que mais estudos nessa área sejam realizados para melhor conhecermos a capacidade fitorremediadora das plantas para a sua possível utilização no combate à poluição.

**Palavras-chave:** poluentes; áreas contaminadas; fitorremediação; metais pesados; herbicidas; organoclorados

### **Phytoremediation: General Topics and Methods for Utilization**

**Abstract.** Nowadays, sectors of some areas have been observing with great interest the increasing number of pollutants in the world. For this reason, the interest for remediation techniques grows, having at this moment a great focus on the soil. Several techniques are studied and the fitorremediation takes a prominence place due to its efficiency in the depollution of soils and also because it's cost is more accessible than other techniques. The

present work takes in account the research carried out in polluted soils, with the objective to present the peculiar characteristics of the fitoremediation techniques and also others techniques that are used in the remediation of contaminated soils. A bibliographic revision through the analysis of the available material in international data bases SciELO, LILACS, HIGHWIRE, PUBMED and SCIRUS was carried out, which encloses several works that are being developed in the area of remediation of environmental pollutants. The organisms, mainly the plants, have specific ways for removal, immobilization or transformation of specific pollutants. The study and the subsequent evaluation of the interaction among soil, plant and pollutants are necessary and is also a promising research area for the remediation of environment. So, it is necessary to have more studies carried out in this area for a better understanding of the plants fitoremediative capacity and its possible use in the pollution combat.

**Key words:** pollutants; contaminated areas; fitoremediation; heavy metals; herbicides; organochlorine

#### **Phytoremédiation: Considérations Générales et Caractéristiques d'Utilisation**

**Résumé.** Il y a d'importantes observations et un grand intérêt est porté sur les nombreux polluants existants dans le monde. Pour cette raison il a une augmentation du développement des techniques capables de résoudre ce problème. Dans plusieurs techniques, la remédiation biologique a lieu, grâce à l'efficacité et aussi au coût des matériaux utilisés. Ce travail rend compte de plusieurs recherches basées sur des données internationales comme le SciELO, le LILACS, le HIGHWIRE, le PUBMED et le SCIRUS qui montrent des polluants de la Terre et ces recherches montrent différentes comparaisons des techniques, mettant en évidence la technique de la remédiation biologique. Les usines dans d'autres organisations mettent en place des techniques importantes pour une production qualifiée par rapport aux polluants spécifiques de l'environnement et de façon très exigeante. Elles prennent en charge les études et l'élaboration de techniques de plus en plus efficaces afin de pouvoir réduire ou éliminer des pollutions.

**Mots clés:** polluants; secteurs souillés; phytoremédiation; métaux lourds; herbicides; organochloré

---

#### **Introdução**

No último meio século, observou-se a introdução de numerosos poluentes, cujos efeitos finais, na biosfera e na saúde humana, em particular, são totalmente desconhecidos, pois na maioria das vezes esses produtos são extremamente tóxicos. Governos de todo mundo estão procurando abordagens economicamente viáveis para a recuperação de áreas poluídas e para a conservação da biodiversidade, como a formação de áreas protegidas como parques e reservas da natureza. Estas áreas funcionariam como um reservatório de espécies animais e vegetais que poderiam recompor os ecossistemas

originais que foram degradados. Outra proposta é a regeneração propriamente dita da região degradada pela agricultura e indústria, de forma a reduzir a pressão antrópica para uma maior conversão deste "habitat" natural (DOBSON *et al.*, 1997).

A poluição que afecta essas áreas é hoje um grande problema pois muitos poluentes possuem utilidades não dispensáveis, como os agrotóxicos. Estes produtos bem como outros poluentes, possuem características bastante preocupantes, devido à sua persistência no solo, na água e nos alimentos. Na procura de alternativas para despoluir áreas contaminadas por diferentes compostos, procura-se identificar

técnicas que apresentem eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, menor tempo demandado pelo processo e menor custo. Nesse contexto, aumenta o interesse pela utilização da biorremediação, caracterizada como uma técnica que objectiva descontaminar solo e água por meio da utilização de organismos vivos, como microrganismos e plantas (PIRES *et al.*, 2003ab).

Dentro da biorremediação, a fitorremediação é uma das técnicas mais estudadas. Segundo PIRES *et al.* (2003ab), esta técnica envolve o emprego de plantas, sua microbiota associada e de amenizantes (correctivos, fertilizante, matéria orgânica etc.) do solo, além de práticas Agronómicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos para o ecossistema.

Essa técnica, que no Brasil é ainda incipiente, tem uso difundido nos EUA e na Europa, principalmente na remediação de metais pesados e têm sido identificadas algumas espécies de comprovada eficiência (SANTOS *et al.*, 2004). Além disso, marcadores moleculares como RFLP (*Random Fragments of Length Polymorphism*), RAPD (*Random Amplified Polymorphism DNA*), AFLP (*Assimetric Fragments of Length Polymorphism*) e SSR (*Simple Sequence Repeat*) têm sido usados para verificar e acompanhar as modificações genéticas em plantas com intuito de torná-las fitorremediadoras (MARTÍNEZ *et al.*, 2003).

A técnica de fitorremediação requer como em todas as outras técnicas, padrões para que sejam executadas como potencial para fitorremediação, suas limitações e benefícios. Neste trabalho serão avaliadas técnicas remediadoras em descontaminar áreas poluídas, com

um foco maior para a fitorremediação, através de uma revisão bibliográfica realizada nos bancos de dados internacionais SciELO, HIGHWIRE, LILACS e SCIRUS, com o objectivo de compilar as informações do que já foi avaliado pela ciência sobre a técnica de fitorremediação.

### Poluentes

A fitorremediação de áreas poluídas é bastante útil para o meio ambiente devido à utilização de plantas específicas, no intuito de amenizar ou até mesmo despoluir totalmente áreas contaminadas. É necessário a utilização de plantas que possuam determinadas características como uma boa capacidade de absorção, sistema radicular profundo, acelerada taxa de crescimento, fácil colheita e que apresentem uma grande resistência ao poluente.

Solos contaminados apresentam certas limitações à fitorremediação por serem, muitas vezes, tóxicos às plantas, principalmente onde ocorrem misturas de poluentes, o que dificulta a selecção de plantas resistentes e fitorremediadoras para este conjunto de compostos.

### Pesticidas

BUOSI e FELFILI (2004) relatam o caso de uma fábrica de hexaclorociclohexano (HCH), que é um pesticida organoclorado, a qual foi desactivada entre os anos de 1960 e 1965, permanecendo no local todo seu acervo abandonado, inclusive os "stocks" e resíduos da produção fabril na Cidade de Meninos - RJ. Após a condução de vários estudos ambientais inconclusivos na área, o Ministério da Saúde do Brasil decidiu

proceder à neutralização do HCH, numa tentativa de remediar a contaminação do solo, por meio da aplicação de cal virgem (CaO). Devido a esta acção, a composição inicial dos resíduos foi modificada, gerando novos compostos e novos riscos.

Associado à aplicação da cal e à agregação de adubo orgânico ao solo, foi sugerido o plantio de espécies florestais na área contaminada, visando a uma fitorremediação associada ao tratamento químico com vista a promover a ciclagem de nutrientes (LASAT, 2002). Duas espécies de eucalipto foram escolhidas devido ao seu rápido crescimento: *Eucalyptus grandis* e *Corymbria citriodora* (BUOSI e FELFILI, 2004).

Os indivíduos de *E. grandis* foram distribuídos em cinco classes de altura, sendo a mais representativa em números de indivíduos, a classe que compreendia os 6,1 a 8,0 m, enquanto *C. citriodora* foi distribuída em quatro classes de altura, sendo a com o maior número de indivíduos, a que compreendia os de 1,6 a 20 m de altura. As médias de altura encontradas em *C. citriodora* foram similares aos valores dos outros ensaios. Já com relação a *E. grandis*, a média foi abaixo do valor encontrado em outros trabalhos (BUOSI e FELFILI, 2004).

As análises físico-químicas das amostras de solo da área de estudos indicaram que o solo apresentou pH igual a 8,2 e 8,4 nas amostras de solo 1 (área de *E. grandis*) e 2 (área de *C. citriodora*), respectivamente. Essa condição favorece a retenção de compostos organoclorados no solo, sendo um resultado positivo da fitorremediação, sendo a retenção maior na área com plantio de *E. grandis*. A área com plantio de *C. citriodora* apresentou maior conteúdo de matéria orgânica e

solo menos argiloso, favorecendo a decomposição dos compostos organoclorados (BUOSI e FELFILI, 2004).

Nas folhas de *Eucalyptus grandis*, colhidas na área principal de contaminação na Cidade de Meninos, foram detectados os compostos DDE (diclorodifenildicloroetileno) e triclorobenzeno e  $\alpha$  - HCH, pentaclorofenol e diclorodifeniltricloroetano (DDT). As concentrações foram da ordem de dezenas de mg/Kg, com excepção da concentração de  $\alpha$  - HCH (BUOSI e FELFILI, 2004). Nas folhas de *C. citriodora* foram detectados, em todas as amostras, os compostos triclorobenzeno e pentaclorofenol. As concentrações foram similares às encontradas na espécie *E. grandis* (BUOSI e FELFILI, 2004)

A contaminação do solo nas áreas em estudo, anos após a desactivação da fábrica ainda é alta, apesar de apresentar teores mais baixos do que os encontrados em trabalhos anteriores, o que evidencia a função destas espécies como fitorremediadoras, tanto na absorção de compostos organoclorados quanto na melhoria das condições do solo pela reciclagem de nutrientes e pela introdução de matéria orgânica.

A interacção entre plantas, poluente e solo é o primeiro passo para a realização eficaz da técnica de fitorremediação, porém vários estudos ainda terão que ser realizados para que esta técnica seja totalmente eficaz.

#### *Herbicidas*

Solos contaminados com herbicidas apresentam certas limitações à fitorremediação quando comparados com aqueles contaminados com poluentes orgânicos ou inorgânicos, por serem, muitas vezes, tóxicos para as

plantas, principalmente quando ocorrem misturas desses compostos.

Para PROCÓPIO *et al.*, (2004), um factor negativo relacionado com a utilização de herbicidas de longo efeito residual no solo é a maior probabilidade de ocorrência de lixiviação das suas moléculas originais ou dos seus metabólitos para camadas mais profundas do solo, podendo atingir o lençol freático.

Segundo PIRES *et al.*, (2003a) a absorção de herbicidas pelas plantas é afectada pelas propriedades químicas do composto, pelas condições ambientais e pelas características das espécies vegetais.

O desenvolvimento de herbicidas com efeitos residuais longos possibilitou o controle efectivo de plantas daninhas por um período de tempo maior, reduzindo com isso o número de aplicações. No entanto, foi observada a ocorrência de fitotoxicidade em culturas sensíveis plantadas após a utilização desses herbicidas, cujo efeito residual varia de alguns meses até três anos ou mais. Esse fenómeno tem sido observado com os diversos herbicidas. Nessa situação, é possível e recomendável o emprego de espécies vegetais na descontaminação do solo (KNUTESON *et al.*, 2002).

A possibilidade de uma planta ser fitorremediadora depende do tipo de poluente, devendo ser testadas várias plantas para que seja detectada aquela que possui maior resistência ao poluente. PIRES *et al.* (2003a) relataram que a linhagem DN3A de *Populus deltoides nigra* foi capaz de absorver a maior parte de Atrazina aplicada, que não foi totalmente adsorvido à fracção orgânica do solo, sem efeitos adversos detectáveis nas árvores da espécie testada. Estes autores

afirmaram que duas espécies ornamentais (*Acorus gramineus* e *Pontederia cordata*) foram testadas em relação à fitotoxicidade, absorção e distribuição de Simazina marcado com C<sup>14</sup> e verificaram que o efeito do Simazina na solução foi reduzido a 45 e 34% respectivamente, ao fim de sete dias.

O herbicida Trifloxysulfuron Sodium tem sido amplamente utilizado na cultura do algodão, sendo aplicado no período inicial do cultivo. Um vasto estudo foi realizado para detectar o potencial fitorremediador das plantas contra o Trifloxysulfuron. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre as espécies vegetais *Calopogonium muconoides* (calopogônio), *Crotalaria juncea* (crotalária), *Crotalaria spectabilis* (crotalária), *Vicia sativa* (ervilhaca), *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Canavalia ensiformes* (feijão-de-porco), *Helianthus annuus* (girassol), *Dolichus lablab* (lablab), *Pennisitum glaucum* (milheto), *Stylosantes guianensis* (mineirão), *Mucana cinereum* (mucana-anã), *Mucana cinereum* (mucana-cinza), *Mucana aterrina* (mucana-preta), *Raphanus sativus* (nabo forrageiro) e *Lupinus albus* (tremoço-branco) (PROCÓPIO *et al.*, 2004). A escolha destas espécies foi baseada em ensaios preliminares de tolerância ao herbicida (SANTOS *et al.*, 2004).

As espécies mais eficientes na descontaminação do herbicida Trifloxysulfuron Sodium em solo foram *M. aterrina* e *C. enziformis*. No entanto, a continuação destes estudos de fitorremediação é necessária a nível de campo, visando confirmar os resultados obtidos.

#### *Metais pesados*

Alguns metais como Cobre (Cu<sup>+2</sup>) e Zinco (Zn<sup>+2</sup>) são necessários para o

crescimento e desenvolvimento de plantas, porém em excesso podem produzir sintomas tóxicos e a inibição do crescimento da planta. Várias tecnologias de fitorremediação estão sendo usadas para retirar metais de áreas poluídas (COUTINHO, 2000).

BENNETT *et al.* (2003) avaliaram o potencial de fitorremediação das plantas transgênicas da Mostarda indiana *Brassica juncea* projectada para produzir peptídios ligantes de metais. As plantas transgênicas, bem como as do tipo silvestre (WT) de mostarda indiana, foram semeadas no solo poluído por metais. Após 14 semanas de crescimento, as plantas foram colhidas e as concentrações de metais comparadas, tendo-se verificado que as plantas transgênicas continham maiores concentrações de cádmio ( $Cd^{+2}$ ) e cromo ( $Cr^{+2}$ ).

Para BENNETT *et al.*, (2003), as plantas transgênicas de mostarda indiana removeram mais metal de solo contaminado que o tipo silvestre. Estes resultados sugerem que a superprodução de grupos tiol ligantes de metais e fitoquelantes representam uma estratégia promissora para produção de plantas com propriedades maiores de fitorremediação de metais pesados.

Um metal bastante utilizado em curtumes é o  $Cr^{+2}$ , que contamina a água utilizada e que nem sempre é reciclada. Preocupados com o destino dessa água, têm sido testadas alternativas para tratamento e recuperação dos efluentes residuais do processo.

Estudos realizados indicam que as plantas aquáticas possuem uma certa tolerância a metais, como foi demonstrado pelo Lírio Aquático, que apresentou uma elevada taxa de crescimento e importante capacidade de

absorver metais pesados pelo seu sistema radicular. ALVAREZ *et al.* (2004), separaram 4 efluentes de curtumes que utilizam o  $Cr^{+2}$ . A presença de iões que causam impacto na dureza da água como:  $Ca^{++}$ ,  $Na^{+}$ ,  $Mg^{++}$ , é proveniente dos produtos químicos usados no processo. Adicionalmente podem ser detectados os compostos orgânicos de carga importantes responsáveis pela Demanda Química de Oxigênio (DQO) que é a medida da capacidade de consumo de oxigênio pela matéria orgânica presente na água ou água residual, utilizada para medir a quantidade de matéria orgânica em águas naturais e de esgotos e pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que é o consumo de oxigênio através de reacções biológicas e químicas.

Os efluentes testados durante o período de caracterização mostraram variações significativas quanto aos parâmetros de DBO e pH, indicando que a planta utilizada no tratamento de  $Cr^{+2}$  trabalha com uma eficiência em torno de 75% (ALVAREZ *et al.*, 2004).

#### *Outros poluentes*

Sabemos que tanto hidrocarbonetos quanto metais pesados apresentam uma grande resistência no solo dificultando a sua extracção, imobilização ou amenização. Quando se trata de compostos xenobióticos, além de sua persistência no ambiente, as suas propriedades químicas influenciam tanto na sua toxicidade quanto na maneira como são degradados pelos microrganismos, o que torna a sua mineralização mais lenta.

SICILIANO *et al.* (2003), avaliaram o impacto da remediação microbiana na massa do solo e a capacidade da comunidade microbiana em degradar

hidrocarbonetos no intuito de determinar se os tratamentos de fitorremediação aumentam o potencial metabólico da comunidade microbiana do solo pela alteração da sua estrutura taxonômica. Foi verificado que o melhor sistema de remediação para diminuição da concentração de hidrocarbonetos no solo, foi obtido pelo aumento da população bacteriana contendo genes para o catabolismo de hidrocarbonetos na comunidade da rizosfera, demonstrando-se assim a importância do uso de microrganismos na fitorremediação. Porém, é preciso identificar as espécies de plantas apropriadas que podem alterar benéficamente a diversidade microbiana para remediação do solo. Os resultados sugerem que o sistema de fitorremediação pode ser considerado como um método de aumento do potencial do solo para degradar contaminantes.

ESTEVE-NÚNEZ *et al.* (2001) avaliaram o trinitrotolueno (TNT), e verificaram que a sua estrutura química influencia a sua biodegradação. Segundo estes autores, o metabolismo oxigenado para compostos aromáticos por bactérias não ocorre no TNT por causa de suas propriedades químicas, pois formas parcialmente reduzidas de TNT reagem entre elas na presença de oxigênio para formar compostos mais mutagênicos que o TNT, que não são metabolizáveis por microrganismos.

Porém, os processos anaeróbicos têm vantagens por causa da ausência de oxigênio. Por isso o uso de fungos para a biorremediação do TNT tem gerado interesse considerável.

ESTEVE-NÚNEZ *et al.* (2001), concluíram que a remediação do TNT por esses organismos é um processo bastante válido e a rizoremediação por micróbios

capazes de colonizar a rizosfera de plantas fornecerá um pouco dispendioso, rápido e eficiente processo para a remoção deste poluente.

Existem também os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) que também resistem durante bastante tempo no solo. Como exemplos de POPs podemos citar o Diclorodifeniltricloroetano (DDT), os Bifenilos Policlorados (PCBs) e a Dioxina, entre outros.

LEE *et al.* (2003) citam que como os POPs no solo resistem durante décadas, tornam-se menos acessíveis para extração por solventes orgânicos, degradação de micróbios, e retirada por organismos tais como minhocas (CORDEIRO *et al.*, 2002). Porém, pesquisas em laboratórios têm mostrado que uma grande variedade de plantas podem absorver resíduos de POPs do solo tais como Chlordane e DDT e transportar os compostos através dos tecidos aéreos da planta. Estudos mais aprofundados sobre POPs serão necessários para entendermos o que acontece e como acontece o bombeamento desses poluentes nas plantas.

Devido à variedade dos poluentes, são necessárias técnicas que sejam eficazes para cada situação. O estudo do poluente é bastante importante para termos a certeza de que a fitorremediação acontecerá de maneira eficaz.

### **Mecanismos celulares para desintoxicação**

Muitos são os sintomas tóxicos na planta causados pela exposição aos poluentes. O resultado da intoxicação pode ser devido a ação do poluente, inibindo a actividade celular ou rompendo a estrutura da célula devido à sua interferência sobre um elemento

essencial.

Para HALL (2002), as plantas têm uma série de potenciais mecanismos a nível celular. Estes podem estar envolvidos com a detoxificação dos metais pesados. As estratégias para controlar o aumento de metais pesados são diversas. Extracelularmente, elas incluem funções para micorrizas, parede celular e transpiração extracelular. A tolerância aos metais pesados podem também envolver a membrana plasmática, seja por redução do aumento de metais pesados ou por estimulação de efluxo.

#### *Micorrizas*

HALL (2002), citou que embora nem sempre sejam consideradas como um mecanismo de tolerância a metais, as micorrizas, e particularmente as ectomicorrizas, são características de árvores e arbustos, podendo ser úteis na diminuição do efeito tóxico em plantas hospedeiras.

Foi demonstrado que a ectomicorriza *Paxillus inudatus* retém Zinco ( $Zn^{+2}$ ) contido em *Pinus sylvestris*, enquanto outras espécies como *Thelephora terrestris* retém pouco  $Zn^{+2}$  contido no hospedeiro (COLPAERT e VAN ASSCHE, 1992).

Os mecanismos utilizados pelo fungo para adaptação da célula e para tolerância aos metais pesados são similares às estratégias usadas por plantas grandes, forçando a ligação do metal no meio extracelular e isolando-o no compartimento vacuolar. Desta forma, a tolerância dos fungos *Pisolithus tinctorius* ao  $Cu^{+2}$  e  $Zn^{+2}$  foi devida a uma ligação na parte externa da hifa enquanto que a desintoxicação do  $Cd^{+2}$  em *Paxillus involutus* envolveu a acumulação no vacúolo.

#### *Membrana plasmática*

Segundo HALL (2002), a membrana plasmática da planta pode ser considerada a primeira estrutura viva que funciona como um alvo para a intoxicação dos metais pesados, pois a sua função pode ser rapidamente afectada.

Por exemplo, o  $Cu^{+2}$  causa aumento do fluxo de  $K^{+}$  em raízes cortadas de *Agrostis capilaris*. Outra conclusão é que a perda da membrana das células, monitorizada pelo esvaziamento de iões, é a primeira causa da intoxicação por  $Cu^{+2}$  em raízes de *Silene vulgaris*, *Mimulus guttatus*, e trigo respectivamente. Tal perda pode ser resultado de vários mecanismos incluindo a oxidação de proteínas da membrana tal como o  $H^{+}$ -ATPase, ou mudança da composição e fluidez dos lipídios da membrana (HALL, 2002).

Outro factor pode ser a manutenção da integridade da membrana plasmática na presença de metais pesados. A membrana pode desempenhar uma importante função na homeostase de metais, seja pela prevenção ou redução da entrada na célula ou através de mecanismos de efluxo. Transportadores de efluxo podem também desempenhar uma função na homeostase do ião metal em células animais. Por exemplo, uma proteína da membrana plasmática transportadora de  $Zn^{+2}$  (ZnT-1) foi isolada do rim de um rato. Células transformadas com um ZnT-1 mutante mostraram sensibilidade ao  $Zn^{+2}$ . Foi proposto que normalmente ZnT-1 transporta  $Zn^{+2}$  para fora das células e que a sua ausência produz aumento da sensibilidade das células mutantes à intoxicação pelo  $Zn^{+2}$  (HALL, 2002).

Outro grupo de transportadores que

parece estar envolvido na homeostase do  $\text{Cu}^{+2}$  pelo sistema de exportação é a P<sub>x</sub>-ATPase. Defeitos nestas ATPase podem dar origem a dois tipos de doenças humanas, a doença de Menkes e a doença de Wilson, resultantes da exportação defeituosa do  $\text{Cu}^{+2}$  e assim, a sua acumulação em alguns tecidos. Porém as formas de transporte e as localizações específicas de muitas proteínas envolvidas na acumulação de metais pesados nas plantas ainda são desconhecidas.

#### *Proteínas de choque térmico*

Para HALL (200a), as proteínas de choque térmico (HSPs) mostram expressões aumentadas em resposta ao aumento da temperatura. Podem ser encontradas em todos os grupos de organismos vivos, podendo ser classificadas de acordo com o tamanho molecular e são conhecidas por se expressarem em resposta a uma variedade de condições de "stress", incluindo metais pesados. Estas proteínas actuam como "chaperones" moleculares na formação do enrolamento de proteínas normais podendo também funcionar na protecção e no reparo de proteínas submetidas a condições de esforço.

TSENG *et al.* (1993) mostraram que no arroz, tanto o calor quanto os metais pesados aumentaram os níveis de mRNAs para HSPs de baixo peso molecular, enquanto NEUMANN *et al.* (1995) indicaram que HSP17 foi expresso em raízes da *Armeria maritima* que cresceram em solo rico em  $\text{Cu}^{+2}$ .

Em trabalhos realizados em culturas de células de *Lycopersicon peruvianum* foi mostrado que uma HSP também respondia ao  $\text{Cd}^{+2}$ . Foi interessante

verificar que a HSP70 estava presente no núcleo e no citoplasma, bem como na membrana plasmática. Estes resultados sugerem que a HSP70 estaria envolvida na protecção das membranas contra a acção do  $\text{Cd}^{+2}$  (HALL, 2002).

E assim, em relação às mais recentes discussões acerca dos mecanismos de tolerância envolvendo uma membrana plasmática mais resistente ou melhorando mecanismos de reparo, as HSPs teriam uma importante função. Obviamente mais estudos moleculares são necessários para demonstrar o seu mecanismo de acção na reparação ou protecção.

#### *A parede celular e a exsudação da raiz*

Embora a parede celular da raiz esteja directamente em contacto com os metais na solução do solo, a absorção da parede celular deve ser de capacidade limitada e assim ter um efeito limitado na actividade do metal na superfície da membrana plasmática. A exsudação da raiz tem uma variedade de funções, inclusive a quelação de metais que podem aumentar o bombeamento de certas substâncias. Um exemplo claro de uma função na tolerância das secreções da raiz é a relação dos ácidos orgânicos e a desintoxicação do  $\text{Al}^{+3}$ . O trigo preto, por exemplo, secreta ácido oxálico das raízes em resposta à pressão do  $\text{Al}^{+3}$ , e acumula AL-oxalate não tóxico nas folhas. Assim a desintoxicação ocorre tanto externamente como internamente (MA *et al.*, 1997).

Para HALL (2002), os ácidos carboxílicos e aminoácidos são potentes ligantes para metais pesados e podem por isso desempenhar uma função na tolerância e desintoxicação. Contudo ainda não foi observada uma forte

evidência para uma função na tolerância, tal como uma clara correlação entre quantidades de ácidos produzidos e exposição a um metal.

#### *Compartimentação vacuolar*

Segundo HALL (2002), o fluxo de íões para a membrana plasmática ou transporte para o vacúolo são dois meios de reduzir os níveis de metais tóxicos no citoplasma, constituindo mecanismos potencialmente importantes para tolerância aos metais pesados.

Estudos mostraram que o vacúolo é o principal local para a acumulação de metais pesados, incluindo  $Zn^{+2}$  e  $Cd^{+2}$ . Análises dos sistemas de transporte até ao tonoplasto foram acrescentando suporte para um mecanismo vacuolar de tolerância. VERKLEIJ *et al.* (1998), isolaram vesículas de tonoplasto de raízes de ecótipos de *Silene vulgaris* sensíveis e tolerantes ao  $Zn^{+2}$ . Estes autores mostraram que em altas concentrações de  $Zn^{+2}$ , o transporte deste metal foi 2,5 vezes maior para vesículas de linhagem tolerantes do que sensíveis, sugerindo que o tonoplasto desempenha uma importante função na tolerância do  $Zn^{+2}$ .

A aplicação de técnicas de biologia molecular deverá ter um enorme impacto, em nosso entendimento, sobre a tolerância aos metais pesados. Tais técnicas permitirão que sejam construídos modelos detalhados das várias respostas que ocorrem nas plantas quando são submetidas ao "stress" por metais pesados.

#### *Fitoquelatinas e metalotioninas*

Entender a base molecular e genética dos mecanismos de desintoxicação de

metais pesados constitui um importante aspecto para poder desenvolver plantas como agentes fitorremediadores de áreas contaminadas (SALT *et al.*, 1998).

SHEN *et al.* (2002), avaliaram a solubilização de metais pesados no solo através de vários tratamentos quelantes. A concentração de  $Pb^{+2}$  na solução do solo foi examinada para avaliar a eficiência relativa de 5 quelantes no aumento da solubilização de  $Pb^{+2}$  do solo. Quando nenhum quelante é adicionado, a concentração de  $Pb^{+2}$  na solução do solo foi 15,2 mg/L. A aplicação de quelantes seleccionados (EDTA, DTPA - ácido dietilenotriaminopentaácético, HEDTA, NTA e ácido cítrico) aumentou significativamente a concentração de  $Pb^{+2}$  na solução do solo. O EDTA foi o mais eficiente, solubilizando o  $Pb^{+2}$  ligado ao solo. A aplicação de Ácido Cítrico ao solo produziu apenas um pequeno aumento na concentração de  $Pb^{+2}$  da solução do solo e foi menos eficiente do que outros quelantes usados.

Segundo COBBETT (2000), um número de ligantes de ligação-metal têm agora sido reconhecido em plantas. O papel dos vários ligantes foi revisto por RAUSER (1999). Quelantes extracelulares como ácidos orgânicos (citrato e malato i.e.) são importantes em mecanismos de tolerância ao alumínio.

Para FIGUEIRA *et al.* (2001), as plantas contem dois principais peptídios quelantes de metais: Fitoquelatinas (PCs) e Metalotioninas (MT), que se ligam aos metais por resíduos de cisteína (ROBINSON *et al.*, 1993; COUTINHO *et al.*, 1999; RAUSER, 1999; COUTINHO, 2000).

Fitoquelatinas (PCs) são polipeptídios consistindo de repetições de  $\gamma$ -glutamilcisteína com um terminal glicina. As fitoquelatinas parecem ser omnipresentes em plantas e têm sido

detectadas em alguns microrganismos. A glutationa é o principal substrato para a síntese de fitoquelantes (COBBETT, 2000).

Embora PCs tenham claramente um papel na desintoxicação de  $Cd^{+2}$ , (DI TOPPI e GABBRIELLI, 1999), tem sido estimado que soluções de solos não poluídos contém concentrações de  $Cd^{+2}$  variando acima de  $0,3 \mu M$  (WAGNER, 1993). Isto pode indicar que as PCs desempenhariam um papel na manutenção da concentração de metais pesados em um ambiente não poluído.

As metalotioninas (MTs), pequenos peptídios ricos em cisteína são requeridos para tolerância de metal em fungos e animais, mas o seu papel nas plantas ainda não está claro. Há relatos que metalotioninas são importantes para tolerância de  $Cd^{+2}$  em *Arabidopsis* e que podem estar associadas com a homeostase do metal nas plantas pela regulação da concentração intracelular de iões (ROBINSON *et al.*, 1993; ZHOU e GOLDSBROUGH, 1995).

A acção das metalotioninas ainda é desconhecida, mas a evidência indica que estas proteínas podem ter um importante papel na homeostase, provavelmente associado com o transporte do metal dentro da célula vegetal.

### Técnicas

A contaminação do solo é uma grande preocupação global, podendo ser considerada um grande obstáculo para o desenvolvimento sustentável. Várias técnicas têm sido desenvolvidas com o objectivo de retirar o poluente do meio.

O estudo da planta é o primeiro passo para que tudo ocorra correctamente. A planta precisa de ter uma boa capacidade de absorção, o seu sistema radicular precisa de ser profundo e possuir

capacidade de desenvolver-se bem em vários ambientes.

Várias técnicas são necessárias e muitas vezes, mais do que uma para um mesmo processo de remediação. Esta interacção é necessária para a remoção do poluente.

A seguir referem-se uma sequência de técnicas capazes de descontaminar áreas poluídas.

#### Escavação

É uma técnica rápida para o tratamento de solo escavado e para limpeza. É geralmente usada para descontaminação de solos fortemente poluídos em curto período de tempo e representa a técnica de remediação mais comum (GILMORE, 2001).

#### Extracção

Também conhecida como lavagem de solo. Entre estas técnicas, o tratamento térmico é uma das mais usadas. Para GILMORE (2001), dependendo do solvente usado no método de extracção, metais inorgânicos (tais como chumbo e crómio) e compostos orgânicos (como bifenilos policloradas (PCBS)) podem ser removidos. As técnicas térmicas envolvem aquecimento do solo e podem ser usadas para tratar poucos tipos de solos, sendo geralmente utilizadas apenas contra compostos orgânicos que podem volatilizar do solo ou queimar em temperaturas altas para formar dióxido de carbono e água.

#### Microrganismos

O uso de microrganismos para degradar compostos orgânicos também é frequentemente utilizado. Nesta técnica

biológica, o solo contaminado é colocado num reactor com os microrganismos e são optimizados parâmetros tais como, temperatura, mistura, pH e oxigénio, os quais estimulam a degradação. Os microrganismos consomem os compostos orgânicos e libertam água e CO<sub>2</sub> como seus produtos. Esta técnica é a mais viável ambientalmente porque não requer grandes entradas de energia, mas é a que consome maior tempo (GILMORE, 2001).

Nestas técnicas, o uso da água é indispensável. Para HUTCHINSON *et al.* (2001), o teor da água no solo está continuamente a mudar. A variação da humidade no solo pode afectar populações microbianas, através da disponibilização de nutrientes e da retenção da estrutura física do solo e consequentemente afectar o andamento do processo de remediação do solo (COUTINHO e CORDEIRO, 2002).

#### *Extracção "in situ"*

Envolve remediação sem a retirada de solo e é frequentemente preferida porque há risco reduzido de exposição às pessoas e à comunidade em redor durante o processo de limpeza. Esta técnica causa menos perturbação do local do que a escavação e frequentemente diminui a necessidade de energia. Podem ser desempenhadas filtrando um solvente adequado através do solo. Este solvente dissolve os poluentes e é enviado para a superfície. O solvente é então tratado como um refugio. Compostos orgânicos voláteis podem ser removidos via extracção a vapor de solo. Neste processo, um gradiente de pressão é produzido entre a superfície e o subsolo pela aplicação de um vácuo no topo. Também os compostos orgânicos

extraídos são libertados directamente no ar ou são quimicamente ou termicamente destruídos num reactor separado à superfície (GILMORE, 2001).

#### *Fixação*

Para GILMORE (2001), esta técnica também conhecida como estabilização e solidificação, visa a prevenção da superfície contra os poluentes.

#### *Vitrificação*

Segundo GILMORE (2001), o solo pode ser aquecido até ao ponto em que a sílica existente no solo origina vidro, cobrindo os poluentes. Devido a estes tratamentos não removerem os poluentes do solo, é urgente que a sua estabilidade a longo prazo seja determinada, embora seja difícil.

#### *Utilização de quelantes*

Um mecanismo geral para desintoxicação de metais pesados em plantas e outros organismos é a quelação do metal por um ligante e em alguns casos, a subsequente compartimentalização do complexo metal-ligante (COBBETT, 2000). Para SHEN *et al.* (2002), agentes complexos tais como HEDTA (ácido N-hidróxietililenodiaminotriacético), NTA (ácido nitrilotriacético) e EDTA (ácido etilenodiamonitetracético) têm sido usados no vasto campo experimental para permitir o aumento da absorção do metal pela planta (HUANG e CUNNINGHAM, 1996; BLAYBOK *et al.*, 1997; HUANG *et al.*, 1998). Estes agentes têm sido estudados pela capacidade de mobilizar metais e aumentar a sua acumulação em diferentes espécies de plantas.

## Conclusão

Estudos sobre a fitorremediação estão sendo desenvolvidos visando uma série de benefícios para o meio ambiente e para as futuras gerações. Vários são os poluentes e a cada dia surge algo novo, trazendo algum tipo de dano para todo o habitat. Dessa forma, a utilização de algumas das técnicas aqui descritas já representa uma esperança interessante.

Esta pesquisa relata alguns dos trabalhos que têm sido desenvolvidos na área de remediação de poluentes do ambiente, assim como outras técnicas que visam a descontaminação de áreas poluídas. Os mecanismos necessários são vários, porém, os organismos, principalmente as plantas, possuem maneiras específicas para remoção, imobilização ou transformação de poluentes específicos. O estudo e a subsequente avaliação da interação entre o solo, a planta e o poluente é bastante necessário e promissor.

Em vista disso, é necessário que mais estudos nessa área sejam realizados para melhor conhecermos a capacidade fitorremediadora das plantas e sua possível utilização no combate à poluição.

## Bibliografia

- ALVAREZ, S.G., MALDONADO, M., PERTH, A., KUSCHK, P., 2004. Caracterización de Agua Residual de Curtiduría y Estudio del Lirio Acuático em la Recuperación de Cromo. *Información Tecnológica* **15** :75-80.
- BENNETT, L.E., BURKHEAD, J.C., HALE, K.L., TERRY, N., PILON, M., PILON-SMITS, E.A.H., 2003. Analysis of Transgenic Indian Mustard Plants for Phytoremediation of Meta - Contaminated Mine Tailings. *Journal of Environmental Quality* **32** : 432-440.
- BLAYLOCK, M.J., DUSHENKOV, S., ZAKHAROVA, O., GUSSMAN, C., KAPULNIK, Y., ENSTEY, B.D., RASKIN, I., 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agent. *Environmental Science and Technology* **31** : 860-865.
- BUOSI, D., FELFILL, J.M., 2004. Recuperação de áreas contaminadas por pesticidas organoclorados na Cidade de Meninos, município de Duque de Caxias, RJ. *Revista Árvore* **28**(3) : 465-470.
- COBBET, C.S., 2000. Phytochelatins and Their Roles in Heavy Metal Detoxification. *Plant Physiology* **123** : 825-832.
- COLPAERT, J., ASSCHE, J., 1992. Zinc toxicity in ectomycorrhizal *Pinis sylvestris*. *Plant and Soil* **143** : 201-211.
- CORDEIRO, L.N., COUTINHO, H.D.M., MELO JÚNIOR, H.N., 2002. Ecologia de oligochaetas (Annelida) nativas da margem do Rio Carás, Ceará, Brasil. *UNIMAR Ciências* **XI**(1/2) : 25-30.
- COUTINHO, H.D.M., 2000. Resistência Bacteriana a metais pesados. *UNIMAR Ciências* **IX**(2) :35-44.
- COUTINHO, H.D.M., CORDEIRO, L.N., 2002. Fatores ambientais e sua influência sobre os microrganismos do solo. *UNIMAR Ciências* **XI**(1/2) : 65-70.
- COUTINHO, H.D.M., LIMA, T.C.S., GRISI, B.M., PESSOA, H.L.F., 1999. Ocorrência de plasmídeos em bactérias resistentes a metais pesados, isoladas de solos contaminados pelas atividades da agroindústria canavieira do estado da Paraíba. *Revista Nordestina de Biologia* **13**(1/2) : 87-104.
- DI TOPPI, S., GABBRIELLI, R., 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* **41** :105-130.
- DOBSON, A.P., BRADSHAW, A.D., BAKER, A.J.M., 1997. Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science* **277** : 515-522.
- ESTEVE - NÚÑEZ, A., CABALLERO, A., RAMOS, J.L., 2001. Biological Degradation of 2,4,6-Trinitrotolvene. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **65**(3) : 335-352.

- FIGUEIRA, A., KIDO, E.A., ALMEIDA, R.S., 2001. Identifying sugarcane expressed sequences associated with nutrient transports and peptide metal chelators. *Genetics and Molecular Biology* **24**(1-4) : 207-220.
- GILMORE, E., 2001. A Critique of Soil Contamination and Remediation: The Dimensions of the Problem and Implications for Sustainable Development. *Bulletin of Science, Technology & Society* **21** : 394-400.
- HALL, J.L., 2002. Cellular mechanism for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* **53**(366) : 1-11.
- HUANG, J.W., BLAYLOCK, M.J., KAPULNIK, Y., ENSLEY, B.D., 1998. Phytoremediation of uranium contaminated soils: Role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plants. *Environmental Science and Technology* **32** : 2004-2008.
- HUANG, J.W., CUNNINGHAM, S.D., 1996. Lead phytoextraction: Species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist* **134** : 75-84.
- HUTCHINSON, S.L., SCHWAB, A.P., BANKS, M.K., 2001. Phytoremediation of Aged Petroleum Sludge: Effect of Irrigation Techniques and Scheduling. *Journal of Environmental Quality* **30** : 1516-1522.
- KNUTESON, S.L., WHITWELL, T., KLAINE, S.J., 2002. Influence of Plant Age and Size on Simazine Toxicity and Uptake. *Journal of Environmental Quality* **31** : 2096-2103.
- LASAT, M.M., 2002. Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms. *Journal of Environmental Quality* **31** : 109-120.
- LEE, W.Y., JANUCCI - BERGER, W., EITZER, B.D., WHITE, J.C., MATTINA, M.J.I., 2003. Persistent Organic Pollutants in the Environment: Chlordane Residues in Compost. *Journal of Environmental Quality* **32** : 224-231.
- MA, J.P., ZHENG, S.J., MATSUMOTO, H., 1997. Detoxifying aluminium with buckwheat. *Nature* **390** : 569-570.
- MARTINEZ, L., CAVAGNARO, P., MASUELLI, R., RODRÍGUEZ, J., 2003. Evaluation of diversity among Argentine grapevine (*Vitis vinifera* L.) varieties using morphological data and AFLP markers. *Electronic Journal of Biotechnology* **6**(3) : 244-253.
- NEUMANN, D., NJEDEN, U.Z., LICHTENBERGER, O., LEOPOLD, I., 1995. How does *Aeminia maritime* tolerate high heavy metal concentrations? *Journal of Plant Physiology* **146** : 704-717.
- PIRES, F.R., SOUZA, C.M., SILVA, A.A., PROCÓPIO, S.O., FERREIRA, L.R., 2003a. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta Daninha* **21**(2) : 335-341.
- PIRES, F.R., SOUZA, C.M., SILVA, A.A., QUEIROZ, M.E.I.R., PROCÓPIO, S.O., SANTOS, J.B., SANTOS, E.A., CECON, P.R., 2003b. Seleção de plantas com potencial de fitorremediação de Tebuthionon. *Planta Daninha* **21**(3) : 451-458.
- PROCÓPIO, S.O., SANTOS, J.B., SILVA, A.A., PIRES, F.R., RIBEIRO JUNIOR, J.I., SANTOS, E.A., FERREIRA, L.R., 2004. Seleção de plantas com potencial para Fitorremediação de solos contaminados com Herbicida Trifloxysulfuron Sodium. *Planta Daninha* **22**(2) : 315-322.
- RAUSER, W.E., 1999. Structure and function of metal chelators produced by plants: the case for organic acids, amino acids, phytin and metallothioneins. *Cell Biochemistry and Biophysics* **31** : 19-48.
- ROBINSON, N.J., TOMMEY, A.T., KUSKE, C., JACKSON, P.J., 1993. Plant metallothioneins. *Biochemical Journal* **295** : 1-10.
- SALT, D.E., RAUSER, W.E., 1995. MgATP dependent transport of Phytochelantins across the tonoplast of oat roots. *Plant Physiology* **107** : 1293-1301.
- SALT, D.E., SMITH, R.D., RASKIN, I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review in Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **49** : 643-668.
- SANTOS, J.B., PROCÓPIO, S.O., SILVA, A.A., PIRES, F.R., RIBEIRO JÚNIOR, SANTOS, E.A., FERREIRA, L.R., 2004. Fitorremediação do herbicida Trifloxysulfuron Sodium. *Planta Daninha* **22**(2) : 323-330.

- SHEN, Z.L., LI, X.D., WANG, C.C., CHEN, H.M., CHUA, H., 2002. Lead Phytoextraction from Contaminated Soil With High-Biomass Plant Species. *Journal of Environmental Quality* **31** : 1893-1900.
- SICILIANO, S.D., GERMIDA, J.J., BANKS, K., GREER, C.W., 2003. Changes in Microbial Community Composition and during a Polyaromatic Hydrocarbon Phytoremediation Field Trial. *Applied and Environmental Microbiology* **69**(1) : 483-489.
- TSENG, T.S., TZENG, S.S., YEH, C.H., CHANG, F.C., CHEH, Y.M., LIN, C.Y., 1993. The heat shock response in rice seedlings- isolation and expression of DNAs that encode class I low- molecular- weight heat shock proteins. *Plant and Cell Physiology* **34** : 165-168.
- VERKLEIJ, J.A.C., KUEVOETS, P.L.M., MECHTEL, M.A., BLAKE - KALFF, M.M.A., CHARDONNENS, A.M., 1998. Evidence for an important role to tonoplast in the mechanism of naturally selected zinc tolerance in *Silene vulgaris*. *Journal of Plant Physiology* **153** : 188-191.
- WAGNER, G.J., 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Advances in Agronomy* **51** : 173-212.
- ZHOU, J., GOLDSBROUGH, P.B., 1995. Structure, organization and expression of the metallothionein gene family in *Arabidopsis*. *Molecular and General Genetics* **248** : 318-328.

Entregue para publicação em Março de 2006

Aceite para publicação em Setembro de 2006