

## O PROCESSO DE BIORREMEDIAÇÃO NA RECUPERAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

**Rogério R. R. da Silva<sup>1</sup>, Ana Paula do Nascimento Lamano Ferreira<sup>1</sup>, Maurício Lamano Ferreira<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Nove de Julho, São Paulo, SP, Brasil, Av. Adolfo Pinto, 109, Barra Funda, 01156-050 rogerio17dez@yahoo.com.br, apbnasci@yahoo.com.br - <sup>2</sup> Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), Piracicaba, SP, Brasil, Av. Centenário, 303, CP 96, 13416-000 mauecologia@yahoo.com.br

**Resumo-** O aumento da contaminação no meio ambiente tem levado a comunidade científica a procurar meios de reparar tais perturbações de forma barata, viável e menos impactante possível. Assim, este estudo teve por objetivo fazer uma revisão bibliográfica sobre processos de biorremediação e recuperação em solos contaminados. Para se obter sucesso em tais processos e promover uma eficiente remoção dos contaminantes do ambiente, algumas metodologias de biorremediação têm sido apresentadas a comunidade científica, dentre as quais se podem destacar biorremediação passiva, bioaumentação, bioestimulação, fitorremediação, landfarming e compostagem. Em geral, os artigos pesquisados ressaltam a eficiência desta metodologia pelo baixo custo de sua aplicação e pela eficiência na resposta remediadora. **Palavras-chave:** Biorremediação, contaminação de solos, microorganismos

**Área do Conhecimento:** Ciências Biológicas

### Introdução

O processo de contaminação do meio ambiente começou de maneira acelerada através da revolução Industrial, que teve seu real início no fim do século XVIII, com a busca constante de modernização de máquinas e equipamentos que viessem facilitar a vida humana, porém com isto a troca de materiais e produtos gerou uma grande quantidade de lixo doméstico e industrial devido ao consumo da população mundial (Alexander, 1994).

Preocupações com a qualidade do ar e das águas começaram a surgir com mais intensidade ao redor do mundo, mas as preocupações com solos contaminados não surgiram de imediato, pois por não serem visualmente percebidas demoram a mostrar os efeitos ao seres humanos. Apenas no final da década de 70 alguns estudos focaram para a avaliação das condições do solo e a busca de meios de conter a contaminação (Bento et al., 2003).

Assim, pode-se sugerir que a biorremediação seja considerada como uma nova tecnologia para tratar ambientes contaminados utilizando-se agentes biológicos capazes de modificar ou decompor poluentes alvos (Mariano, 2006).

Este estudo teve o objetivo de revisar o processo de se recuperar um solo contaminado através da técnica da biorremediação em seus vários processos de aplicação. Além de mostrar os efeitos de um bom planejamento para se aplicar esta técnica, de maneira segura e eficaz no processo de descontaminação do solo.

### Metodologia

Este trabalho foi baseado numa revisão bibliográfica em várias fontes, utilizando-se

algumas bases de dados como Scielo, Google acadêmico e livros técnicos referentes ao assunto. As palavras chave utilizadas neste trabalho foram "biorremediação", "contaminação de solos" e "microorganismos do solo". A pesquisa foi feita no primeiro semestre do ano de 2011 e não se estabeleceu uma data inicial das fontes.

### Resultados e discussão

Biorremediação é a utilização de microorganismos naturalmente presentes no subsolo que são capazes de metabolizar uma série de compostos introduzidos antropicamente no meio ambiente (figura 1). Esse processo apresenta uma série de vantagens sobre os processos convencionais, como por exemplo, a minimização da geração de efluentes e resíduos. O conhecimento das condições hidrogeológicas do meio, da distribuição dos contaminantes e o seu comportamento perante a ação dos microorganismos autóctones são essenciais para o emprego e o sucesso desta tecnologia. Existem dois tipos principais de processos envolvidos na biorremediação, são eles: os processos aeróbios, onde o oxigênio desempenha um papel essencial na transformação dos compostos existentes e os processos anaeróbios, onde na falta do Oxigênio, outros parâmetros vão direcionar o desencadeamento dos mecanismos de decomposição dos contaminantes (HEINEICK,2008).

A fitorremediação pode ser definida como, o uso de vegetação in situ para o tratamento de solos contaminados. As plantas podem remediar os solos contaminados com metais pesados através dos seguintes mecanismos: absorção e

acumulação dos metais pesados nos tecidos das plantas (fitoextração), adsorção dos metais no sistema radicular, imobilizando os contaminantes (fitoadsorção), liberação para o solo de oxigênio e outros compostos, que podem imobilizar os metais pesados (fitoestabilização), estimulação da biorremediação por fungos ou outros microrganismos localizados no sistema solo-raiz.

Os órgãos ambientais de São Paulo, principalmente a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, estão ativamente empenhados, desde 1993, em mapear todas as áreas contaminadas do Estado e já identificaram cerca de 240 delas, o que é um número modesto comparado com os 350 mil dos países membros da Comunidade Européia e mais de 100 mil dos Estados Unidos, na figura 1 temos alguns exemplos de contaminações de solos (CORDAZZO,2000).

Há São Paulo problemas de contaminações de solo, como em qualquer região industrializada que tenha uma pesada herança do passado, mas não há motivos para pânico, pois ela está sendo enfrentada. Dificilmente, novas áreas de contaminação serão produzidas daqui para frente, devido à vigilância dos órgãos ambientais. A remediação das áreas já contaminadas é, porém, o grande desafio diante de nós.

Os objetivos da remediação deverão ser estabelecidos por meio de processo interativo, tendo em vista o quadro real no local, a viabilidade técnica e respeitando o princípio da proporcionalidade. Uma vez concluída a avaliação de risco, o órgão competente define inicialmente os objetivos de proteção tendo em vista o caso concreto, os bens a proteger e as vias de exposição.

Possíveis objetivos de proteção são, entre outros:

- ❖ Evitar a absorção de contaminantes por seres humanos via contato direto ou indireto;
- ❖ Evitar a percolação de contaminantes para a água subterrânea;
- ❖ Evitar a disseminação de contaminantes através da água subterrânea;
- ❖ Evitar a migração de contaminantes em espaços estanques/confinados;
- ❖ Evitar a emissão de poeira carregada de poluentes;

De acordo com Paul e Clark (1989), o objetivo da biorremediação é definido por visar o controle de riscos, atendendo sempre às normas legais, ao bom senso e ao princípio de que a medida será razoável se o risco residual ou contaminação residual forem toleráveis. Para cada caso examinado devem ser observados e avaliados os seguintes critérios:

Uso da área (plano urbanístico, uso anterior e uso futuro da área a ser remediada), vias de

exposições consideradas (por exemplo, solo, água subterrânea, ar) e condições de disseminação, Exposição dos bens a proteger (seres humanos, água subterrânea, solo), Bens tangidos dignos de proteção, Avaliação toxicológica,

Valores comparativos dos dispositivos reguladores ajudam para a avaliação e estudos, exequibilidade técnica e princípio de proporcionalidade (HEINECK, 2008).

Deve-se considerar que em tais metodologias remediadoras os respectivos meios podem ser criados em termos de valores numéricos, ou seja, os níveis limite de substâncias nocivas no meio contaminado (valores alvo da remediação aplicados ao caso isolado, índices para deposição de solo tratado, índices para afluentes, exposição residual tolerável) ou sua correspondente descrição discursiva. Exemplos de descrição discursiva são a escavação do material contaminado dentro de uma área definida; a extração de água subterrânea ou de vapores do solo, com subsequente tratamento até alcançar uma concentração residual tolerável na área contaminada e em seus arredores; a impermeabilização/cobertura da superfície para impedir o contato direto com um dado meio ou organismo.

A deposição de sedimentos na zona insaturada do solo deve ser evitada mediante impermeabilização da superfície.

#### *Biorremediação na fase sólida*

É baseada nos mesmos princípios do método anterior, porém constitui-se de pilhas de solo, que funcionam como células de tratamento. Nas células realiza-se controle mais rigoroso da volatilização dos materiais. Neste método pode ocorrer a lixiviação e o escoamento superficial de material contaminado, o que não ocorre no "landfarming", sendo, portanto, mais seguro e apropriado para tratamento de solos contendo compostos que oferecem elevado risco ambiental (Agourakis et al. 2006).

Na biorremediação fase sólida pode-se também optar pela compostagem que consiste em um tratamento controlado pela geração de calor pelos aeróbios termófilos (Brito et al. 2008; Silva et al. 2008).

A elevação da temperatura na massa contaminada é ideal para tratamento de rejeitos e lodos diversos, incluindo contaminantes explosivos. É um processo barato e fácil de ser monitorado.

#### *Tratamentos "in situ"*

Os tratamentos "in situ" são baseados na manipulação da fase aquosa e estímulo da decomposição pela injeção de ar (bioventilação) e

suplementação com nutrientes em galerias e poços de infiltração. É comum o uso de plantas nesse tipo de tratamento, as quais fornecem substratos à atividade microbiana enquanto os microrganismos transformam os contaminantes. Além da biodegradação, os microrganismos atuam direta ou indiretamente na biosorção, reduzindo a ação dos contaminantes no meio ambiente (MELO, 1997, LUZ et al. 2011).

### Bioaugmentação

A Biorremediação envolve ainda a inoculação do solo com culturas puras ou consórcio microbiano contendo microrganismos selecionados para degradações de contaminantes específicos (WATERLOO, 1999).

Esses processos são conhecidos por bioaugmentação que tem sido bastante estudada para vários herbicidas, hidrocarbonetos clorados e carbonatos através do emprego de populações indígenas aclimatadas, isolados selecionados e até mesmo microrganismos transgênicos contendo plasmídeos degradadores (STRUTHERS et al., 1998). Para isso, recorre-se a populações aclimatadas através de mutação direta ou transformação genética, para degradação acelerada de determinado composto (Felsot & Shelton, 1993). Isolados indígenas, bem como microrganismos modificados geneticamente, contendo plasmídeos catabólicos, têm sido empregados na produção de inoculantes comerciais para biorremediação. Várias bactérias e fungos, compreendendo dezenas de formulações comerciais, são vendidos nos EUA a preços que variam de US\$ 3,6 a US\$ 18,0 kg-1 (GLASS, 1992).

### Fitorremediação

Neste processo emprega-se plantas para descontaminar sítios com resíduos químicos orgânicos em sua porção superficial. Áreas contendo plantas apresentam uma biodegradabilidade mais acelerada e completa se comparada com áreas não plantadas devido:

a) Expansão da população ativa dos microrganismos no solo (rizosfera) que se utilizam da fração "exudata" das raízes como fonte de alimento.

b) O exudato das raízes também estimula transformações cometabólicas, assim sendo, muitos contaminantes são degradados via estimulação da microbiota pela presença do exudato.

c) Algumas plantas produzem enzimas que transformam metabolicamente os contaminantes orgânicos contribuindo desta forma para sua

oxidação mais rápida pelos microrganismos presentes no solo.

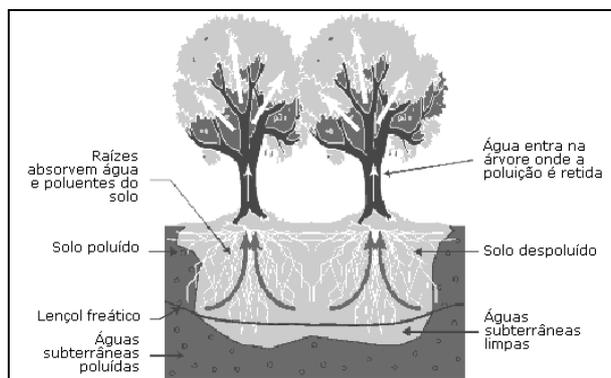


Figura 1 – Fitorremediação em processo de descontaminação (fonte :UNICAMP/2009)

A tecnologia de biorremediação tornou-se um importante método de restauração de ambientes contaminados por resíduos de petróleo, pois utilizam a capacidade dos microrganismos em biodegradar ou biotransformar as mais diversas substâncias (GUIGUER, 2000).

A biodegradação ou biotransformação de compostos orgânicos contaminantes é uma das principais medidas de recuperação de ecossistemas contaminados e requer a interação de muitos grupos de organismos vivos diferentes que trabalhem juntos ou seqüencialmente na degradação dos compostos (KATAOKA, 2001). Os mais eficientes biodegradadores são os microrganismos, devido à abundância, grande diversidade de espécies, versatilidade catabólica e anabólica, bem como a capacidade de adaptação às condições adversas do meio (KATAOKA, 2001).

Microrganismos que degradam hidrocarbonetos estão amplamente distribuídos no solo e em ambientes aquáticos. Populações desses microrganismos normalmente constituem menos que 1% da comunidade microbiana total, mas quando hidrocarbonetos estão presentes, essas populações aumentam em 10% da comunidade (ATLAS, 1995). A biorremediação teve um papel muito importante na limpeza do derramamento de 41 milhões de litros de petróleo causado pelo navio Exxon Valdez, no Golfo do Alasca, em 1989, dando início ao desenvolvimento dessa técnica; e há boas razões para se acreditar que este método terá um papel importante no tratamento de futuros derramamentos de óleo em circunstâncias apropriadas (SEABRA; 1999).

O mercado de tecnologias ambientais disponível hoje é bastante amplo, sendo que uma atenção maior tem sido dispensada aos tratamentos e remediações de solos e águas subterrâneas. Este fato pode ser entendido por razão da geração de

resíduos sólidos estar sendo cada vez maior e também pela existência de políticas ambientais cada vez mais restritivas nos últimos anos.

#### *Aspectos Biológicos das Técnicas Landfarming*

A aplicação do contaminante em forma líquida ou sólida na camada arada do solo, onde se concentram 90% dos microrganismos que usam os contaminantes como fonte de energia e que pode modificá-los geralmente, mas não exclusivamente por co-metabolismo. A matriz é misturada ao solo por aração e gradagem e as condições físico-químicas do solo (água, aeração e nutrientes) ajustadas para maximizar a atividade heterotrófica. Cria-se assim a camada reativa zona de tratamento fazendo com que esta camada de solo atue como bioreator natural. Essa camada pode atingir 50 cm, dependendo da profundidade de incorporação dos resíduos. Abaixo desta zona situa-se uma camada de solo ainda não saturada, acima do lençol freático. Uma variação do "landfarming" convencional inclui a presença de plantas, cujo ambiente rizosférico aumenta a atividade dos heterotróficos e a biodegradação do contaminante. A pulverização do solo pela aração e gradagem facilita o espalhamento do solo com contaminante pelo vento. Para que isso seja evitado, o solo deve ser mantido úmido. O "landfarming" é empregado com elevada capacidade no tratamento de rejeitos industriais, especialmente na indústria petroquímica. Concentrações de petróleo de até 7% (70.00" kg-1) são reduzidas para 100-200 mg kg-1 em poucos meses, desde que as condições físicas (umidade e aeração), químicas (presença de aceptores de elétrons) e biológicas (elevada atividade heterotrófica) sejam adequadas. Para a degradação de 100 unidades de C são necessárias, em média, 2 unidades N para as bactérias, 3 0.4 parara fungos e 3 a 6 para os actinomicetos (Bumpus, 1993).

#### **Conclusão**

A biorremediação tem se mostrado como uma ferramenta que pode ser utilizada tanto no solo, na água e no ar, pois os vários meios de aplicação desta técnica favorecem o seu uso devido a utilização de determinados microorganismos. Os estudos utilizados neste trabalho favoreceram ainda mais a utilização da biorremediação como medida remediadora dos excessos de poluição ambiental, fato tem ajudado bastante no fator de descontaminação. A biorremediação deve ser compreendida de forma clara pela sociedade brasileira e mundial, uma vez que se trata de uma metodologia viável e barata para se recuperar um ambiente alterado pelas ações humanas.

#### **Referências**

- AGOURAKIS D. C., CAMARGO I. M. C., COTRIM M. B., FLUES M. Comportamento de zinco e manganês de pilhas alcalinas em uma coluna de solo. *Quim. Nova*, vol. 29(5): 960-964, 2006
- ALEXANDER, M. Biodegradation and Bioremediation, 302 p, Academic Press, 1994.
- ATLAS, R.M. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: na Environmental Perspective. *Microbiological Reviews*, 45 (1):180 – 209, 1981.
- BUMPUS J.A. White-rot fungi and their potential use in soil bioremediation processes. In: J.M Bollag and G. Stotzky (Eds.) *Soil Biochemistry*, Marcel Dekker, New York, 65-100, 1993.
- BENTO, F. M.; CAMARGO, F. A. O.; OKEKE, B. Bioremediation of soil contaminated by diesel oil, *Brazilian Journal of Microbiology*, v.34 (Suppl.1), p. 65-68, 2003.
- BRITO L. M., AMARO A. L., MOURÃO I. & COUTINHO J. Transformação da matéria orgânica e do nitrogênio durante a compostagem da fração sólida do chorume bovino. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1959-1968, 2008.
- CORDAZZO, J. Modelagem e simulação numérica do derramamento de gasolina acrescida de álcool em águas subterrâneas. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC – Florianópolis, SC, 2000.
- GUIGUER, N. Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos empostos de abastecimento. *Waterloo Hydrogeologic, Inc.* 356p., 2000.
- HEINECK, K. Biorremdição de Solos. UFRGS São Paulo, 2008.
- FELSOT, A.S., AND D.R. SHELTON. Enhanced biodegradation of Sloan, J.J., R.H. Dowdy, and M.S. Dolan. 1998. Recovery of biosolids- soil pesticides: Interactions between physicochemical processes and microbial ecology. p. 227–251 *In: Sorption and Degradation of applied heavy metals sixteen years after application. J. Environ. Pesticides and Organic Chemicals in Soils. SSSA Spec. Publ. 32. Qual. 27:1312–1317, 1993.*
- KATAOKA, A. P. A. G. Biodegradação de resíduo oleoso de refinaria de petróleo por microrganismos isolados de "landfarming". Tese de doutorado apresentado ao instituto de biociências, Unesp-Rio Claro, 2001.

-MARIANO, A. P. Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro/ UNESP, 2006.

- LUZ, C. C., SANTOS, A. A., SANTOS, M. O. S., MUSSY, M. Y., YAMASHITA M., BASTOS, W. R., BRUCHA G., REIS M. M. , REIS M. G. Estudos de biodegradação de óleo diesel por consórcio microbiano coletado em Porto Velho – RO, Amazônia. *Quim. Nova*, Vol. 34, No. 5, 775-779, 2011.

-MELO, I.S.; AZEVEDO, J.L. (Ed.). Microbiologia ambiental!. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 44 p

- PAUL, E. A.; CLARK, F. G. Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press. San Diego. p. 340, 1989.

-SEABRA, P.N.C. (2005) Aplicação de biopilha na biorremediação de solos contaminados. Tese (Doutorado no Programa de Engenharia Química) – COPPE , Universidade Federal do Rio de Janeiro. 169 p.

- SILVA, F. A. M.; GUERRERO LOPEZ, F.,; VILLAS BOAS, R L; SILVA, R B. Transformação da matéria orgânica em substâncias húmicas durante a compostagem de resíduos vegetais. *Rev. Bras. de Agroecologia* 4(1): 59-66, 2009.

-STRUTHERS, J. K., JAYACHANDRAN, K. , MOORMAN, T. B. Biodegradation of atrazine by agrobacterium radiobacter 14a and use of this strain in bioremediation of contaminated soil. *Appl. Environ. Microbiology* 64 (9): 3368-3375.

-WATERLOO. Caracterização Geológica, Hidrogeológica e Análise Qualitativa da Contaminação no Solo e na Água Subterrânea. Relatório da Waterloo Hydrogeologic Brasil, São Paulo, pp.40, 1999.