
Biorremediação com fungos - um tratamento natural para poluição

Sarah de Oliveira Vicente

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-2.c5>

Resumo

A biorremediação é uma alternativa limpa e eficiente para o tratamento de áreas poluídas (solos, águas, efluentes) podendo ser feita tanto *in situ* (no próprio local) quanto *ex situ* (fora do local). Para realizar a biorremediação, pode-se usar plantas, bactérias e também fungos. Esses organismos irão metabolizar os poluentes com seu aparato enzimático e transformar, atenuar ou até mesmo eliminar os contaminantes presentes. Porém nem sempre isso é possível, como no caso de metais pesados, onde eles são removidos, mas não conseguem ser transformados. Devido a crescente poluição causada por diversas indústrias, mineração, defensivos e fertilizantes químicos, fármacos, aterros sanitários, entre outros contaminantes é necessário fazer o tratamento das áreas afetadas, pois a contaminação influencia nos ecossistemas, já que graças a poluição, pode haver diminuição e até extinção de diversas espécies importantes para o equilíbrio ambiental. Por conta disso, usar fungos para descontaminação é uma ótima alternativa, pois eles são, na grande maioria, altamente toleráveis a contaminantes, graças às enzimas como as peroxidases, lacases, ligninases e celulases, que possuem estruturas químicas que conseguem ligar-se aos contaminantes e transformá-los em outros componentes que podem ser menos tóxicos ou ainda degradá-los completamente. Além disso, usar fungos para a biorremediação é economicamente viável.

Palavras-chaves: Biorremediação, contaminantes, fungos, enzimas.

Abstract

Bioremediation is a clean and efficient alternative for the treatment of polluted areas (soil, waters, wastewater) and it can be done *in situ* (in the place) or *ex situ* (outside the place). The process of bioremediation can be done with plants, bacteria and fungi, where these organisms will metabolize the pollutants with their enzymatic apparatus and transform, attenuate or even eliminate the present contaminants. But this isn't always possible, as in the case of heavy metals, they are removed, but can't be transformed. Due the growing pollution caused by industries, mineration, chemical pesticides and fertilizers, pharmaceuticals, landfills, dyes, and others contaminants the treatment of the affected areas is necessary because the contamination influences the ecosystem, once due the pollution can lead to the diminution or even the extinction of several important species to the environmental balance. Thus, using fungi, to do the decontamination it's a great alternative, because the vast majority of the fungi are highly tolerable to contaminants, due the peroxidases, laccases, ligninases, and cellulases enzymes that have chemical structures that can bind to the contaminants and transform them in other compounds that can be less toxic or even degrade them entirely. In addition, using fungi to do the bioremediation is economically viable.

Key words: Bioremediation, contaminants, fungi, enzymes.

1. Introdução

A busca pelo desenvolvimento é algo que move o ser humano desde o começo da civilização, porém este desenvolvimento com o passar dos anos foi se tornando cada vez mais acelerado e acarretou alguns problemas perceptíveis nos dias atuais. A grande demanda humana por diversos recursos e a exploração acelerada de fontes não renováveis de energia gerou muita poluição tanto em solos, quanto nas águas (rios, mares e efluentes) e isso foi causado por diversos xenobióticos (xeno= estranho, biótico= vida, ou seja, qualquer composto estranho a um sistema biológico) como os metais pesados residuais de diversos tipos de indústrias e da mineração, petróleo e seus derivados, corantes, pesticidas, produtos químicos como fertilizantes, defensivos agrícolas e solventes, fármacos, produtos cosméticos, resíduos plásticos, esgoto doméstico e industrial, entre outros. Esses xenobióticos trazem diversos malefícios para o ecossistema, já que muitas vezes ocorre acúmulo dos mesmos em lugares indevidos, sem descarte correto e sem tratamento. Com isso, pode haver um desequilíbrio no ecossistema, pois compromete a interação das espécies, podendo levar a perda de biodiversidade. A perda de biodiversidade reduz a resiliência dos ecossistemas e compromete sua capacidade de fornecer serviços ecológicos essenciais¹.

Considerando este problema, busca-se uma forma de solucioná-lo ou diminuí-lo de alguma forma. Existem muitas abordagens para realizar o tratamento de áreas afetadas, porém estes métodos nem sempre são efetivos e limpos, ecologicamente falando. A partir disso, entra em ação a biorremediação, um processo que organismos vivos, plantas ou microrganismos são utilizados tecnologicamente para remover ou remediar poluentes no ambiente² e também a fitorremediação (fito= planta, remediação= correção) envolve o emprego de plantas, sua microbiota associada e de amenizantes do solo³. Quase todas as plantas são capazes de absorver, sequestrar e/ou degradar contaminantes⁴ do solo, água e sedimentos através da sua fisiologia. De forma similar, os microrganismos também podem auxiliar na biorremediação, atuando como biodegradadores dos contaminantes. Os biodegradadores podem pertencer a diferentes grupos taxonômicos como, algas, bactérias, fungos e protozoários^{5 6}. E existem diversos microrganismos que apresentam potencial metabólico⁷.

para serem utilizados nos processos de biorremediação, dentre eles, gêneros de bactérias como *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Enterobacter*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Streptomyces*, *Nocardia* e de fungos como *Mucor*, *Fusarium*, *Chaetomium*, *Phanerochaete* e *Trametes*⁸.

2. Tipos de biorremediação

Como citado, existem diversas formas de fazer a biorremediação e a figura 1 ilustra isso. Essa tecnologia não é algo novo, por séculos civilizações têm usado biorremediação natural no tratamento de efluentes, mas o uso intencional para a redução de resíduos perigosos é um desenvolvimento mais recente⁹. A primeira biorremediação propriamente dita foi feita pelo engenheiro de petróleo George M. Robinson em 1960 no estado da Califórnia, Estados Unidos. Ele usou microrganismos para mitigar (suavizar) os efeitos causados por um vazamento de petróleo comercial. A biorremediação apresenta diversos benefícios, é ecologicamente correta, efetiva e essa degradação ocorre ainda a um custo baixo e é menos complexa que outras formas de descontaminação, como incineração e lavagem de solo¹⁰. Para uma biorremediação ser efetiva, deve-se considerar a molécula que será degradada, o microrganismo utilizado deve conseguir metabolizar o xenobiótico em um produto seguro, atóxico e deve apresentar bom custo benefício. Parâmetros como pH, temperatura, nutrientes e oxigênio disponível também são importantes para haver uma boa biorremediação e irão mudar de acordo com o microrganismo utilizado e por conta disso, é necessário realizar a bioprospecção.

A bioprospecção consiste na identificação, avaliação e exploração sistemática da diversidade de vida existente em determinado local e tem por objetivo a busca de recursos genéticos para fins comerciais. Se tratando de microrganismos, engloba, principalmente, estratégias para exploração da fração cultivável e da fração não-cultivável da biodiversidade microbiana¹¹. E este processo é importante, pois através dele pode-se entender o comportamento do microrganismo estudado e desta forma direcioná-lo para o melhor tipo de biorremediação ou então o descarte da possibilidade de usá-lo.

A biorremediação pode ser feita de duas maneiras, *in situ* e *ex situ*. Quando realizada *in situ*, ela será feita na área que foi contaminada e pode usar os microrganismos do próprio local e quando realizada *ex situ*, será realizado o tratamento fora da área contaminada, em um laboratório, por exemplo.

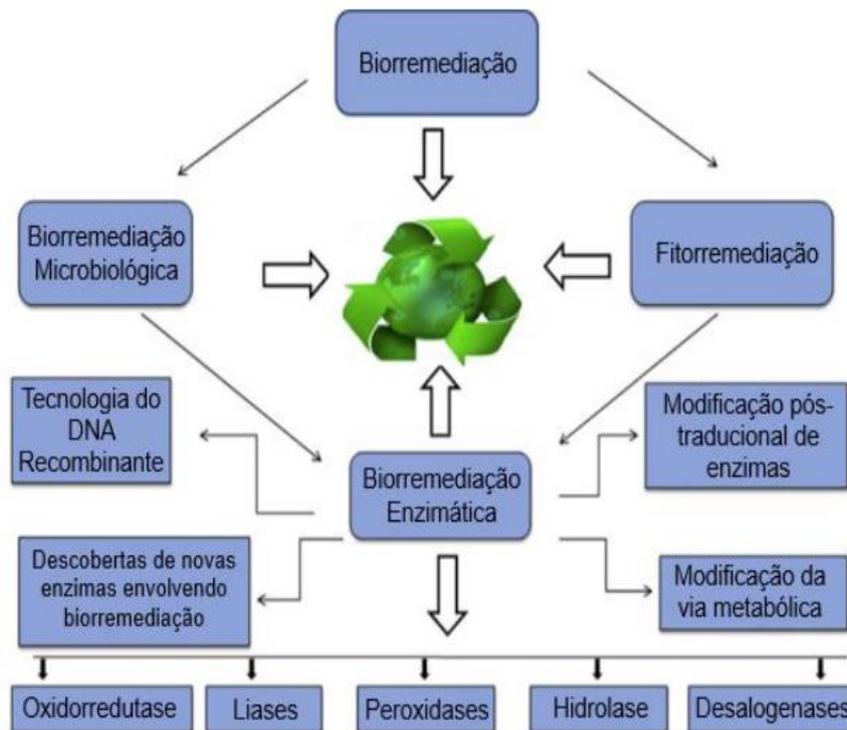


Figura 1. Esquema de metodologias usadas para biorremediação. Fonte: Adaptado de SHARMA, DANGI & SHUKLA (2018)¹².

Os principais tipos de biorremediação são: Fitorremediação, bioestimulação (estimulação do crescimento dos microrganismos naturais da área afetada para uma performance mais rápida e mais eficiente), bioaugmentação (aplicação dos microrganismos na área afetada), landfarming (inserção do resíduo oleoso que contém o carbono orgânico concentrado na superfície do solo contaminado para promover a sua biodegradação), biorreatores (transformam materiais com o auxílio de microrganismos), além de bioventilação (introdução de ar diretamente no solo), biopilhas (empilhamento de solos contaminados, onde haverá a simulação da atividade microbiana aeróbia acelerando a degradação do poluente através de aeração, adição de nutrientes e correção de umidade), compostagem (reciclagem de material orgânico) e

biorremediação passiva (atuação normal dos microrganismos, portanto lenta), porém estas três últimas técnicas geralmente são menos empregadas. Foi separado algumas dessas técnicas em *ex situ* e *in situ* na figura abaixo.



Figura 2. Alguns tipos de biorremediação. Fonte: A autora.

Em todas essas técnicas podem ser empregados os fungos, para serem agentes biorremediadores e quando isso é feito, a técnica é denominada micorremediação (mico= fungo, remediação=correção).

3. Micorremediação, a biorremediação com fungos.

Os fungos são microrganismos muito estudados em diversas áreas, principalmente na biorremediação, pois eles possuem diversas características as quais os cientistas conseguem avaliar seu potencial como agentes biorremediadores. Eles fazem parte do reino Fungi, um reino pertencente ao domínio dos eucariotos, como apresentado na figura 3. Os principais filos são: Ascomiceto, Basidiomiceto, Glomeromiceto, Quitridiomiceto e Zigomiceto. O número de espécies de fungos descritas é de apenas aproximadamente 1 milhão¹³, mas o número total de espécies de fungos é estimado entre 2 a 4 milhões¹⁴.

Eles desempenham um importante papel como degradadores de diversos tipos de matéria orgânica na natureza, desempenhando um papel principal na reciclagem de energia e nutrientes, influenciando a composição da comunidade de plantas através de relações simbióticas¹⁵. Essa degradação é uma forma dos fungos se alimentarem e crescerem, assim eles conseguem realizar a transformação desses materiais orgânicos complexos em água e CO₂ (dióxido

de carbono). Além disso, os fungos conseguem crescer em condições e ambientes adversos, como em déficit de nutrientes, diferentes temperaturas e presença de poluentes, conferindo maior resistência quando estão em ambientes contaminados.

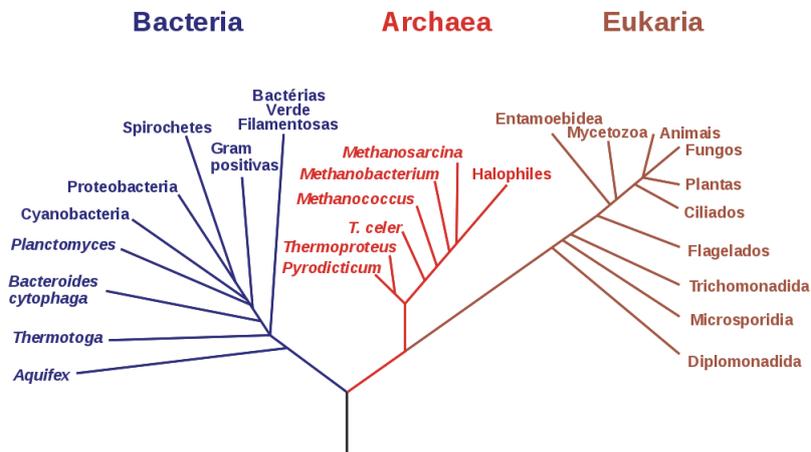


Figura 3. Árvore filogenética. Fonte: Eric Gaba, 2008.

Um dos principais motivos pelo qual os fungos são ótimos degradadores, é por conta de seu metabolismo, que é bem complexo e possui diversos tipos de enzimas, como as enzimas extracelulares lignina-peroxidase, manganês-peroxidase e lacase. Essas enzimas são lignolíticas, ou seja, conseguem degradar a lignina, um composto complexo e graças ao seu maquinário enzimático intra e extracelular e sua habilidade de excretar ácidos, os fungos são capazes de atacar e metabolizar uma grande gama de classes de compostos poluentes inorgânicos e orgânicos^{16 17 18}. Enzimas de fungos normalmente são caracterizadas por baixa especificidade do substrato¹⁹. E contra intuitivamente, isso dá uma vantagem, porque as enzimas não-específicas catalisam uma grande gama de reações possibilitando os fungos a usarem uma vasta gama de compostos como carbono e fonte de energia²⁰. Assim, eles conseguem degradar completamente ou realizar a biotransformação dos poluentes em compostos menos tóxicos. Para obter uma otimização do processo usando as enzimas, é possível realizar a imobilização das mesmas por diversas técnicas como: confinamento, encapsulação, adsorção (via troca iônica), ligação covalente e reticulação. A fim de aumentar a estabilidade operacional e atividade destas

enzimas, de forma que suportem as condições de operação mais severas, utiliza-se a estratégia de imobilização²¹.

Os fungos possuem uma estrutura chamada hifa, importante para a sua fixação ao solo, absorção dos nutrientes e graças a elas, pode haver a frutificação dos fungos (formação dos cogumelos). Além disso, ela traz mais benefícios para os fungos, pois por conta da presença das hifas há uma área superficial maior, facilitando a absorção e a degradação dos poluentes no solo ou água.

As principais espécies utilizadas em micorremediação no geral são os descritos na tabela:

Tabela 1. Espécies, filo e função dos fungos mais utilizados em micorremediação.

Espécies de fungos mais usados em micorremediação	Filo e função
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Basidiomiceto. Degrada lignina e celulose. Decompõe dioxinas e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs)
<i>Trametes versicolor</i>	Basidiomiceto. Degrada diversos poluentes como HAPs e pesticidas.
<i>Aspergillus niger</i>	Ascomiceto. Degrada* metais pesados e também compostos orgânicos
<i>Fusarium solani</i>	Ascomiceto. Degrada pesticidas e contaminantes orgânicos.
<i>Penicillium chrysogenum</i>	Ascomiceto. Degrada poluentes orgânicos, tóxicos e compostos fenólicos.
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Basidiomiceto. Degrada HAPs, pesticidas e alguns metais pesados.
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	Ascomiceto. Degrada petroquímicos e pesticidas.

*O termo *biorremediação*, no caso dos metais pesados, pode parecer *inapropriado*, já que *nenhum processo pode degradar ou eliminar elementos inorgânicos*, no entanto, em alguns casos sua *imobilização mediada pelos microorganismos pode ser a única forma praticável para proteger águas subterrâneas e a cadeia alimentar de uma contaminação*²². Fonte: a autora.

Os fungos dos gêneros *Candida* e *Trichophyton*, têm se destacado em estudos de biorremediação. Muitas espécies de levedura da *Candida spp.* produzem biossurfactantes, sendo aplicados para micorremediar petróleo, óleo motor, metais tóxicos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs)^{23 24}. Algumas espécies do fungo filamentosos *Trichophyton spp* se mostraram eficientes na biorremediação de corantes azo têxteis e pentaclorofenol²⁵.

4. Conclusão

Como apresentado, a micorremediação apresenta diversos pontos positivos, principalmente do ponto de vista ecológico, já que os fungos naturalmente são recicladores de matéria orgânica e graças ao seu metabolismo complexo são ótimos degradadores de moléculas de difícil degradação. Sendo desta forma, uma alternativa mais limpa e também eficaz aos métodos químicos e físicos de remediação de áreas contaminadas. Porém, esta abordagem promissora é relativamente nova e com isso é necessário que haja mais estudos nesta área, para que assim os resultados obtidos sejam cada vez mais satisfatórios, o custo de operação diminua e as abordagens sejam mais acessíveis.

5. Referências

1. NAIMAN, R.J. Socio-ecological complexity and the restoration of river ecosystems. *Inland Waters*, v.3, n.4, p.391-410,2013.
2. GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, M. D. L.; MANFIO, Gilson Paulo. Biorremediação. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, v. 34, p. 36-43, 2005.
3. ACCIOLY, A. M. A.; 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, 2000. v. 1. p. 299-352.
4. CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.*, v. 56, p. 55-114, 1996.
5. GHIORSE, W. C.; WILSON, J. L. Microbial ecology of the terrestrial subsurface. *Advances in Applied Microbiology*, San Diego, v. 33, p. 107-172, 1988.

6. MELO, I.S.; AZEVEDO, J.L. *Microbiologia Ambiental*. Embrapa-CNPMA, 1997, 246p.
7. RÉGIS, G. Tratamento eletrolítico das águas residuárias de uma indústria produtora de antioxidante de borracha visando sua biodegradação. 117f. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2000.
8. MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. Xenobióticos do solo. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. Cap. 6. p.263-311, 2006.
9. ADAMS, Godleads Omokhagbor; FUFYIN, Prekeyi Tawari; OKORO, Samson Eruke; EHINOMEN, Igelenyah. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*. v. 3, n. 1, p. 28-39, 2015.
10. MANTZAVINOS, D.; PSILLAKIS, E. Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, v. 79 (5), p. 431–454, 2004.
11. DE ALMEIDA, J. R. M.; COLLARES, D. G.; BARBOSA, PFD. Bioprospecção microbiana. 2015.
12. SHARMA, Babita; DANGI, Arun K.; SHUKLA, P. Contemporary enzyme-based technologies for bioremediation: A review. *Journal of Environmental Management*, v.210, p.10-22.2018.
13. WU, Bing et al. Current insights into fungal species diversity and perspective on naming the environmental DNA sequences of fungi. *Mycology*, v. 10, n. 3, p. 127-140, 2019.
14. HAWKSWORTH, David L.; LÜCKING, Robert. Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology spectrum*, v. 5, n. 4, p. 10.1128/microbiolspec. funk-0052-2016, 2017.
15. DIGHTON, John. *Fungi in ecosystem processes*. CRC press, 2018.
16. DASHTBAN, Mehdi et al. Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin. *International journal of biochemistry and molecular biology*, v. 1, n. 1, p. 36, 2010.
17. HARMS, Hauke; SCHLOSSER, Dietmar; WICK, Lukas Y. Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, v. 9, n. 3, p. 177-192, 2011.
18. DESHMUKH, Radhika; KHARDENAVIS, Anshuman A.; PUROHIT, Hemant J. Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation. *Indian journal of microbiology*, v. 56, p. 247-264, 2016.
19. EL-GENDI, Hamada et al. A comprehensive insight into fungal enzymes: Structure, classification, and their role in mankind's challenges. *Journal of Fungi*, v. 8, n. 1, p. 23, 2021.

20. HARMS, Hauke; SCHLOSSER, Dietmar; WICK, Lukas Y. Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, v. 9, n. 3, p. 177-192, 2011.
21. TALEKAR, S. et al. Parameters in preparation and characterization of cross linked enzyme aggregates (CLEAs). *RSC Advances*, v. 3, n. 31, p. 12485-12511, 2013.
22. SPROCATI, Anna Rosa et al. Investigating heavy metal resistance, bioaccumulation and metabolic profile of a metallophile microbial consortium native to an abandoned mine. *Science of the total environment*, v. 366, n. 2-3, p. 649-658, 2006.
23. SOARES, I. A. et al. Fungos na biorremediação de áreas degradadas. *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 78, n. 2, p. 341-350, 2011.
24. DURVAL, Italo José Batista. Estudo de um biossurfactante produzido por espécies de *Bacillus* isoladas de água do mar e seu potencial para biorremediação de derramamento de petróleo. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
25. SANTOS, Gabrielly Karla Silva et al. Isolamento de fungos filamentosos em sistema aberto de tratamento do soro do leite por microalgas. 2023.

Autores

Sarah de Oliveira Vicente

Programa de Pós graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá