

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Emprego de Fungos Filamentosos na  
Biorremediação de Solos Contaminados por  
Petróleo: Estado da Arte**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Luiz Inácio Lula da Silva**

**José Alencar Gomes da Silva**

Vice-Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**Sérgio Machado Rezende**

Ministro da Ciência e Tecnologia

**Luiz Antonio Rodrigues Elias**

Secretário-Executivo

**Luiz Fernando Schettino**

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Adão Benvindo da Luz**

Diretor do CETEM

**Antônio Rodrigues Campos**

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais

**João Alves Sampaio**

Coordenador de Processos Minerais

**José da Silva Pessanha**

Coordenador de Administração

**Ronaldo Luiz Correa dos Santos**

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

**Zuleica Carmen Castilhos**

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

# **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-61121-32-7

**STA - 45**

## **Emprego de Fungos Filamentosos na Biorremediação de Solos Contaminados por Petróleo: Estado da Arte**

### **Sabrina Dias de Oliveira**

Química, M.Sc. em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos

### **Judith Liliana Solórzano Lemos**

Engenheira Química, D.Sc. em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos, Pesquisadora/Bolsista PCI do CETEM/MCT

### **Claudia Afonso Barros**

Química, mestranda em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos

### **Selma Gomes Ferreira Leite**

Engenheira Química, D.Sc., Professora Titular da Escola de Química da UFRJ

**CETEM/MCT**

2008

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Luis Gonzaga Santos Sobral**

Editor

**Andrea Camardella de Lima Rizzo**

Subeditora

### **CONSELHO EDITORIAL**

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio Moreira Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia 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 desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas**

Coordenação Editorial

**Vera Lúcia Espírito Santo Souza**

Programação Visual

**Sabrina Dias de Oliveira**

Editoração Eletrônica

---

Oliveira, Sabrina Dias de.

Emprego de Fungos Filamentosos na Biorremediação de Solos Contaminados por Petróleo: Estado da Arte / Sabrina Dias de Oliveira, Judith Liliana Solórzano Lemos, Claudia Afonso Barros, Selma Gomes Ferreira Leite. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

67p. (Série Tecnologia Ambiental, 45)

1. Solos contaminados. 2. Contaminação por petróleo. 3. Fungos filamentosos. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Barros, Claudia Afonso. III. Leite, Selma Gomes Ferreira. IV. Título. V. Série. VI. Lemos, Judith Liliana Solórzano.

---

CDD – 628.5

## **SUMÁRIO**

<b>RESUMO</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>8</b>
<b>1   INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2   REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>10</b>
<b>2.1   Solo</b>	<b>10</b>
<b>2.2   Petróleo</b>	<b>17</b>
<b>2.3   Biorremediação</b>	<b>19</b>
<b>2.4   Fisiologia dos fungos</b>	<b>27</b>
<b>2.5   Perspectivas de aplicação de fungos em processos de biorremediação</b>	<b>34</b>
<b>3   CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>45</b>



## **RESUMO**

A utilização de tecnologias inovadoras de tratamento de resíduos contempla, em suas formas mais variadas, o emprego de técnicas de biorremediação. A partir desse pressuposto, o presente trabalho reúne uma série de artigos científicos e outras referências recentes para discutir assuntos relevantes na conjuntura atual, tais como poluição do solo por meio do derramamento de petróleo, tipos de tratamentos biológicos convenientes, com destaque para a biorremediação, e perspectivas da aplicação de fungos filamentosos nos processos de biodegradação. Além disso, são apresentados resultados positivos e negativos – oriundos de publicações – sobre o emprego de fungos para degradação de hidrocarbonetos presentes no petróleo, permitindo um questionamento abrangente sobre a seletividade da fonte de carbono e identificação/utilização de linhagens degradadoras. Porém, torna-se necessário apontar a ausência de tópicos de interesse na literatura, como complexidade enzimática, mecanismo de degradação dos compostos e competição fungos-bactérias. Por fim, as técnicas biológicas, em substituição ou aliadas aos processos químicos, geralmente, apresentam relação custo-benefício satisfatório, são menos agressivas ao ambiente, produzindo menos resíduos, e garantem boa aceitação pública.

### **Palavras-chave**

Biorremediação, petróleo, fungos filamentosos.

## **ABSTRACT**

The use of innovative technologies of treatment of residues meditates, in their more varied forms, the use of bioremediation techniques. From this assumption, the present work brings together a number of scientific papers and other recent references to discuss issues relevant to the current juncture, such as soil pollution by the oil spill, types of convenient biological treatments, with emphasis on bioremediation, and prospects of implementation of fungal filaments in the processes of degradation. Moreover, positive results and negative are shown - from publications - on the use of fungi to degradation of hydrocarbons in the oil, allowing a comprehensive questioning about the selectivity of carbon source and identification/usage of degrading lineages. However, it is necessary to point out the absence of topics of interest in the literature, such as enzymimatic complexity, mechanism of degradation of compounds and fungi-bacteria competition. Finally, the use of biological techniques to replace or allied to the chemical processes, usually presents satisfactory cost-benefit relation, is less environmentally aggressive producing less waste and has good public acceptance.

### **Keywords**

Bioremediation, petroleum, fungi.



## 1 | INTRODUÇÃO

Pearson (1995) afirma que a degradação de áreas ambientais já podia ser observada no Oriente Médio e na Índia, em 2000 a.C. Segundo ele, a alteração no solo era causada pelo sistema de irrigação com água salobra, que era a fonte de água utilizada na época. O autor refere que as altas concentrações de sal na água causavam a desertificação do solo.

Os problemas de poluição e degradação ambiental agravaram-se com a formação dos centros urbanos e, com a Revolução Industrial, no final do século XVIII, durante a qual se intensificou a produção de resíduos, devido à mecanização dos processos de produção (LEITE, 1995 *apud* DIAS, 2000). Naquela época a disposição e o tratamento destes resíduos eram bastante precários. Da mesma forma, a aceleração dos processos industriais, principalmente no século XX, geraram os chamados poluentes ambientais, decorrentes da produção e má administração destes resíduos, que se refletem atualmente nas inúmeras áreas contaminadas em todo o mundo.

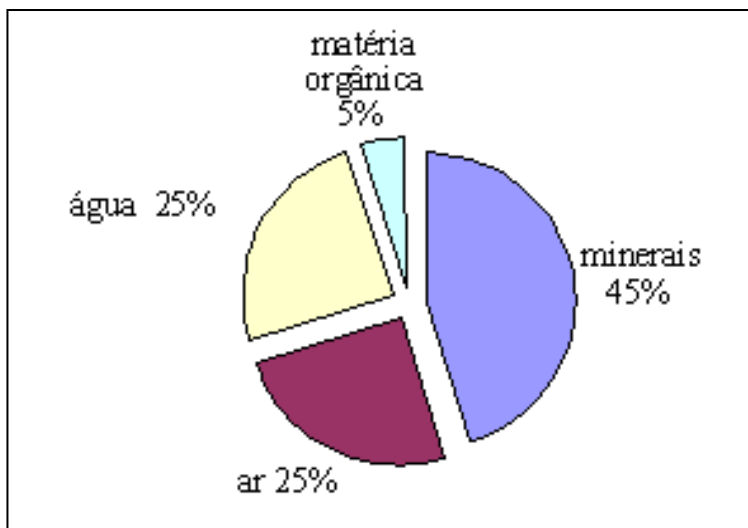
No âmbito industrial, destaca-se o setor do petróleo. A manutenção de padrões de produção e consumo não sustentáveis impõe um desafio em busca de estratégias e medidas para enfrentar os efeitos da contaminação do meio ambiente.

Comercialmente explorado desde a metade do século XIX, o petróleo tem sido usado por muitas décadas, para iluminação e, em menor escala, como lubrificante. No entanto, a invenção do motor de combustão interna e sua rápida adoção em todas as formas de transporte aumentaram o consumo dessa fonte natural, o que elevou sua demanda, produção, transporte e distribuição, assim como dos seus subprodutos. Todas essas atividades envolvem riscos de poluição que podem ser minimizados, mas não totalmente eliminados, causando sérios problemas para o ambiente (PALA, 2006).

## 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 | Solo

Define-se solo como a camada superficial da crosta terrestre, que é transformada por fatores climáticos, biológicos e, em grande parte, pelas atividades antropogênicas, sendo composto de fases sólida, líquida e gasosa, intensamente misturadas. Em geral, a fase sólida, constituída de formações minerais e de fração orgânica, ocupa em média 50% do volume total do solo, sendo que 45% são representados por minerais e 5% por matéria orgânica. O restante do volume do solo é ocupado por fases líquida e gasosa, representando, cada uma, 25% do volume total do solo, como mostra a Figura 1 (ROCHA et al, 2004).



Fonte: CETESB, 2007.

**Figura 1.** Constituição de um solo ideal

A fase líquida é uma solução aquosa de minerais e compostos orgânicos solúveis. A fase gasosa é qualitativamente semelhante à composição do ar, contendo, entretanto, sempre um pouco menos de  $O_2$  e muito mais  $CO_2$  e outros compostos voláteis orgânicos e inorgânicos em comparação com o ar livre. Porém, a composição das fases e das frações, bem como as proporções citadas, variam nos diferentes solos, dependendo da sua origem, das condições ambientais e do tipo de vegetação (ROITMAN *et al.*, 1991). A Figura 2 mostra a formação do solo influenciada pelos efeitos do clima.



Fonte: CETESB, 2007.

**Figura 2.** Formação do solo pelos efeitos do clima

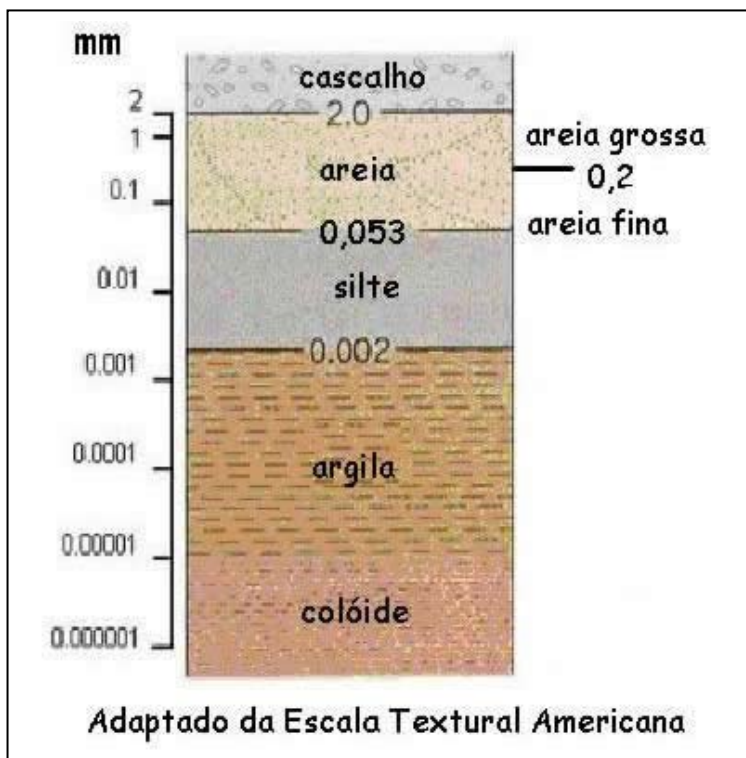
Dentre os constituintes do solo, a matéria orgânica inclui uma grande variedade de seres vivos, desde bactérias e fungos até protozoários etc. Os organismos do solo, em especial os microrganismos, são responsáveis pela decomposição de resí-

duos orgânicos, bem como pela síntese de moléculas orgânicas de elevada estabilidade – as substâncias húmicas – com propriedades importantes, como a capacidade de retenção de água, poder tamponante do solo, além de se constituir numa fonte de nutrientes para a microbiota (BARROS, 2007).

Os horizontes dos solos, ou seja, camadas que se diferenciam entre si, são formados por meio dos processos de intemperismo, apresentando diferentes colorações de acordo com o grau de hidratação do ferro, dos teores de cálcio e óxido de silício, além do teor de matéria orgânica nas camadas superficiais. O perfil do solo é então, o conjunto dos horizontes e/ou camadas que abrangem, verticalmente, desde a superfície até o material originário. As propriedades físicas do solo (textura, estrutura, densidade, porosidade, permeabilidade, fluxo de água, ar e calor) são responsáveis pelos mecanismos de atenuação física de poluentes, como filtração e lixiviação, possibilitando ainda condições para que os processos de atenuação química e biológica possam ocorrer (CETESB, 2007).

O solo desempenha uma grande variedade de funções vitais de caráter ambiental, ecológico, social e econômico. As suas características são determinadas pelos seus processos de formação e são dependentes da natureza da fonte geológica principal, dos organismos que vivem no solo e acima do mesmo, da erosão, dos níveis de água subterrânea, do seu alagamento, do vento, da chuva, da radiação solar etc. Com o tempo, os processos de formação dos solos modificam o material original, contribuindo para a formação de diferentes camadas, e produzindo uma grande variedade de tipos de solo. Essa distribuição do solo em camadas tem implicação na migração e destino dos contaminantes na subsuperfície (DINIZ

e FRAGA, 2005). A Figura 3 mostra a classificação granulométrica do solo.



Fonte: CETESB, 2007.

**Figura 3.** Classificação granulométrica do solo

Por outro lado, as propriedades químicas dos solos – pH, teor de nutrientes, capacidade de troca iônica e condutividade elétrica – são, junto com a matéria orgânica e da atividade biológica responsáveis pelos mecanismos de atenuação de poluentes nesse meio. Entre os mecanismos envolvidos, podem ser

destacadas a adsorção, a fixação química, precipitação, oxidação, troca iônica e a neutralização que, invariavelmente, ocorrem no solo, e que por meio do manejo de suas propriedades, podem ser modificados de acordo com a conveniência (CETESB, 2007).

São funções do solo:

- Sustentação da vida e do ‘habitat’ para pessoas, animais, plantas e outros organismos;
- Manutenção do ciclo da água e dos nutrientes;
- Proteção da água subterrânea;
- Manutenção do patrimônio histórico, natural e cultural;
- Conservação das reservas minerais e de matérias-primas;
- Produção de alimentos;
- Meio para manutenção da atividade socioeconômica.
- A proteção do solo e a limitação dos processos de degradação deste recurso são, reconhecidamente, imprescindíveis para a sustentabilidade do seu desenvolvimento (RODRIGUES e DUARTE, 2003).

### 2.1.1 | Poluição do Solo

Na atualidade, o tema poluição do solo tem despertado, a um só tempo, interesse e preocupação dos especialistas e das autoridades. São importantes, não apenas, os aspectos ambientais e de saúde pública, como também e, principalmente, a ocorrência de episódios críticos de poluição de âmbito mundial, tais como a questão das áreas contaminadas (GÜNTHER, 2005).

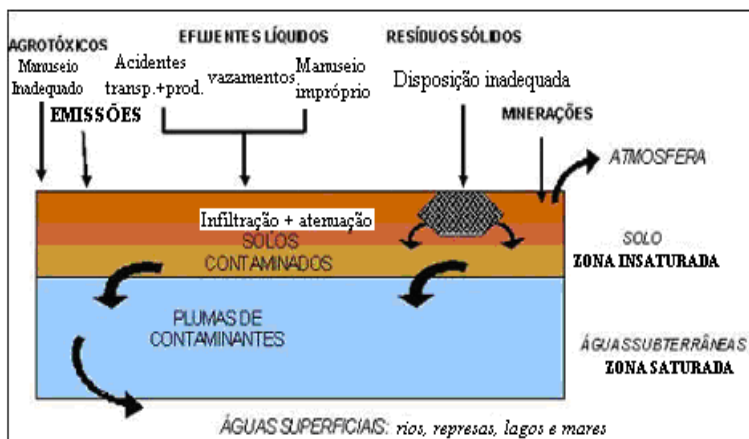
Segundo Brasil (1981), o termo poluição é definido como toda alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas que possa constituir prejuízo à saúde, à segurança e ao bem-estar das populações e, ainda, possa comprometer a biota e a utilização dos recursos para fins comerciais, industriais e recreativos. Desta forma, a poluição do solo significa a presença significativa de algum elemento ou substância que podem afetar componentes bióticos do ecossistema, comprometendo sua funcionalidade e sustentabilidade. Assim, a poluição do solo está ligada à concentração, ou quantidade de resíduos, incorporados acidentalmente ou intencionalmente. De acordo com a legislação ambiental, para o controle dessa poluição, certos padrões e indicadores de qualidade do solo (taxa de erosão etc.) devem ser respeitados num determinado ambiente (BRAGA *et al.*, 2002). Conseqüentemente, a introdução de contaminantes no solo pode resultar na perda de algumas, ou várias, de suas funções e ainda provocar contaminação de água subterrânea. A ocorrência de contaminantes no solo, originados por várias fontes, acima de certos níveis, provoca múltiplas conseqüências negativas para a cadeia alimentar, para a saúde pública e para os diversos ecossistemas e recursos naturais (RODRIGUES e DUARTE, 2003).

Embora a poluição do solo, geralmente, não seja tão visível ou imediatamente perceptível, seus efeitos podem ser muito nocivos, uma vez que o solo é um compartimento ambiental que não se renova rapidamente, ao contrário do ar e da água (BRASIL, 1983 *apud* DIAS, 2000). As complexas reações químicas que acontecem no solo são realizadas pela presença de milhares de espécies de microrganismos, como bactérias, fungos e algas, entre outros. A grande maioria destes organismos vive no primeiro horizonte do solo, até uma profundidade de

cerca de 40 cm. É dessa estreita camada que os vegetais retiram nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, garantindo alimento para os animais que habitam sobre ela. Entretanto, esta é a primeira a ser atingida pelos compostos tóxicos. Desta forma, quando estas substâncias são descartadas, os organismos morrem, comprometendo diretamente todo o sistema de respiração do solo (DIAS, 2000).

A poluição dos solos, por metais pesados e substâncias tóxicas orgânicas e inorgânicas, tem sido relatada em muitos contextos diferentes, sendo essencial sua detecção para evitar problemas relacionados à saúde, bem como às degradações ambientais (BERNARD, 1997; ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000). Um dos poluentes que merece destaque é o petróleo, pelo seu alto teor de contaminantes, com drásticos efeitos no meio ambiente e na saúde.

Na Figura 4, observamos um esboço das formas de contaminação que ocorrem no meio ambiente.



Fonte: CETESB, 2007.

**Figura 4.** Esquema de contaminação no meio ambiente



## 2.2 | Petróleo

O petróleo foi um dos primeiros recursos naturais que nossos antepassados aprenderam a usar. No entanto, sua utilização mais intensa se iniciou, efetivamente, ao redor de 1847, quando um comerciante de Pittsburg, na Pensilvânia, EUA, começou a engarrafar e vender petróleo resultante de vazamentos naturais (*oil seeps*) para ser utilizado como lubrificante. Em 1852, um químico canadense descobriu que o aquecimento e a destilação do petróleo produziam querosene, que podia ser utilizado em lâmpadas. Sete anos mais tarde, em Titusville, Pensilvânia, foi perfurado o primeiro poço de petróleo, com a profundidade de 21,2 metros, do qual se obteve mais de 35 barris de petróleo (CORREIA, 2003).

Petróleo significa óleo da pedra, por ser encontrado, normalmente, impregnado em determinadas rochas porosas denominadas de arenito, dispostas em camadas geológicas sedimentares. Formou-se na Terra há milhões de anos, a partir da decomposição de pequenos animais marinhos, plâncton e vegetação típica de regiões alagadiças e é encontrado junto ao gás de petróleo, formando bolsões entre rochas impermeáveis ou impregnando rochas de origem sedimentar (FONSECA, 1992).

O petróleo é constituído, essencialmente, de carbono e hidrogênio (90% dos óleos crus), com quantidades relativamente pequenas de compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e organometálicos. Predominam os hidrocarbonetos como os acíclicos saturados (alcanos), de cadeia normal e ramificada, bem como os cíclicos, também de cadeia normal ou ramificada (cicloalcanos) e os aromáticos. Os demais compostos, por figurarem na composição com teores minoritários, são classificados como impurezas oleofílicas. No petróleo

bruto, não ocorrem hidrocarbonetos olefínicos. Quando esses compostos aparecem nos derivados do petróleo é porque foram incorporados durante o processamento ([www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG\\_0599.EXE/4333\\_3.PDF?](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/4333_3.PDF?)).

As impurezas oleofílicas são solúveis no petróleo, fazendo parte de sua constituição. São consideradas impurezas por se apresentarem em teores minoritários e, também, porque, do ponto de vista do refinador e do consumidor, conferem ao petróleo e derivados, propriedades indesejáveis que são o motivo da existência de muitos processos dispendiosos de tratamento. Em certos casos, tais impurezas podem ser recuperadas no processamento, com fins comerciais, como ocorre com os ácidos naftênicos e o enxofre. Na Tabela 1, as impurezas oleofílicas estão agrupadas de acordo com os teores em que ocorrem no petróleo ([www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG\\_0599.EXE/4333\\_3.PDF?](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/4333_3.PDF?)).

A composição química do petróleo varia com a sua origem e, conseqüentemente, afeta a susceptibilidade ao ataque microbiano. A maioria dos hidrocarbonetos possui baixa solubilidade em água o que acarreta baixas taxas de metabolização do poluente (WIDDEL e RABUS, 2001).

A introdução de óleo cru no solo, seja esta acidental ou intencional, provoca aumento do número de microrganismos com capacidade de degradação de petróleo e, conseqüentemente, a elevação da atividade microbiana nesse ambiente. Isso ocorre, porque os microrganismos oriundos do solo podem adaptar-se ao petróleo, sofrer enriquecimento seletivo e mudanças genéticas, que possibilitam esse aumento. Em solos não contaminados, menos de 1% da população microbiana nativa apresenta capacidade para degradar hidrocarbonetos de petróleo, enquanto esse valor pode atingir de 1 a 10% do total de

microrganismos nativos presentes em ambientes terrestres contaminados por óleo cru (ATLAS, 1991).

**Tabela 1.** Impurezas Oleofílicas

<b>Tipos de compostos</b>	<b>Teor (%)</b>
Sulfurados	0,1 a 5, como enxofre
Nitrogenados	0,05 a 15, em volume
Oxigenados (não ácidos) como resinas, cresóis etc.	0 a 2, como oxigênio
Oxigenados (ácidos naftênicos)	0,3 a 0,4 em volume
Organometálicos (ferro, níquel, cobre, vanádio, arsênico etc.)	Até 400ppm, como metal

### **2.3 | Biorremediação**

A aplicação de processos biotecnológicos envolvendo, conjuntamente, microrganismos e/ou enzimas e surfactantes, com o objetivo de solucionar ou minorar problemas de poluição ambiental, tem se tornado crescente.

A biorremediação pode ser definida como um conjunto de tecnologias, que utilizam processo(s) biológico(s), aplicadas à recuperação ou remediação de áreas contaminadas, ou ao tratamento de compostos orgânicos voláteis tóxicos ou efluentes, contendo resíduos, que devam ser eliminados antes da descarga no ambiente. Para isto, em geral, utilizam-se microrganismos, plantas ou produtos biológicos, como enzimas e componentes celulares, com a finalidade de realizar uma mineralização, a qual, possivelmente, resulta em gás carbônico e á-

gua como produtos finais (DIAS, 2000). Dessa forma, a microbiologia de degradação de hidrocarbonetos constitui um campo de pesquisa em pleno desenvolvimento (BONAVENTURA e JOHNSON, 1997). E, como destaque, surge a biorremediação como prática atrativa de remoção de hidrocarbonetos de petróleo, por causa da simplicidade da manutenção, aplicação em grandes áreas, baixo custo, além da possibilidade de ocasionar a destruição completa do contaminante (BENTO et al., 2005).

O objetivo da biorremediação, quando usada como técnica de tratamento em áreas contaminadas, é induzir ou acelerar os processos biológicos naturais de reciclagem de compostos de interesse, incluindo compostos orgânicos ou inorgânicos. Assim, o desafio principal é utilizar a capacidade intrínseca dos microrganismos de degradar matéria orgânica para degradar compostos orgânicos tóxicos, tanto de origem natural como compostos sintéticos (DIAS, 2000).

Os processos de biorremediação, há muitas décadas, já vêm sendo usados com sucesso no tratamento de efluentes industriais e esgotos domésticos. Também podem observar-se processos biológicos de tratamento em aterros industriais de resíduos perigosos e aterros de resíduos urbanos, em geral. Atualmente tem crescido o interesse em relação à biorremediação, como objeto da sua aplicação em áreas contaminadas pela descarga inadequada (intencional ou acidental) de resíduos sólidos (DIAS, 2000).

### 2.3.1| Tecnologias de biorremediação

As técnicas de biorremediação podem ser classificadas segundo o tratamento e a fase utilizada. De acordo com o tipo de tratamento, as técnicas de biorremediação são denominadas *in*

*situ* e *ex situ*. Essas técnicas devem levar em conta os poluentes, o custo dos processos e, principalmente, a concentração final do contaminante, no término do tratamento, como aceitável para o tipo de resíduo e para o uso futuro da área.

Na biorremediação *in situ*, o processo de biodegradação ocorre no local contaminado. As técnicas *in situ*, geralmente, envolvem o aumento da atividade microbiana local, por meio da alteração da área degradada, usando-se a adição de nutrientes, ajuste de pH e o controle da umidade e da aeração para propiciar as condições ótimas de degradação biológica dos componentes tóxicos (FERRARI, 1996; BOOPATHY, 2000; MARTINS, 2003).

Na biorremediação *ex situ*, o solo é retirado e transferido até a unidade de tratamento. Para este propósito, emprega-se a remoção do material contaminado, geralmente, por escavação do solo e o bombeamento da água. Quando o tratamento é do tipo *ex situ*, em geral, envolve o uso de biorreatores ou de algum mecanismo que possibilite o aumento do controle dos parâmetros mais importantes do processo de remediação (FERRARI, 1996; BOOPATHY, 2000; MARTINS, 2003). Nesse caso, diz-se que o tratamento é efetuado em **fase sólida** se o solo for tratado em um leito especialmente preparado na ausência de líquido livre. Assim sendo, o teor de umidade é mantido em níveis suficientes para a manutenção da atividade microbiana, 50 a 75% da capacidade de retenção de água, no caso de tratamento de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo.

Por outro lado, denomina-se o tratamento em **fase lama** quando a biotransformação é levada a cabo em um reator onde acontece a formação de polpa entre o solo a ser tratado e a

água adicionada ao sistema (FERRARI, 1996). Geralmente, o tratamento em fase lama é realizado em reatores verticais, nos quais o teor de sólidos é estabelecido numa faixa de 10 a 40% (ALEF & NANNIPIERI, 1995). Nesse tipo de processo, a agitação da mistura não serve somente para homogeneizar a lama, mas também promove: quebra das partículas sólidas; dessorção do contaminante das partículas sólidas; contato entre contaminante e microrganismos; oxigenação da mistura e volatilização dos contaminantes (DYMINSKI, 2006).

Skipper (1999) *apud* Bento *et al.* (2005) menciona estratégias para um tratamento de biorremediação barato e natural que incluem uso de técnicas como **atenuação natural, bioventilação, landfarming, compostagem, fitorremediação**, além de técnicas auxiliares, como **bioaumento e bioestímulo**.

O termo **atenuação natural** parece ser o mais adequado para descrever todos os processos que ocorrem sem a intervenção humana, sendo uma forma passiva de remediação (NYER, 1998 *apud* ROSADO, 2005). Moreno *et al.* (2004) descreve atenuação natural como uma coleção de processos biológicos, químicos e físicos que ocorrem naturalmente, resultando na contenção, transformação ou destruição de produtos químicos indesejáveis no ambiente.

A **bioventilação** é uma técnica geralmente usada para remediar solos contaminados com hidrocarbonetos do petróleo, pois aumenta a habilidade da microbiota do solo para degradar compostos naturais e xenobióticos. O ar injetado na zona não saturada do solo fornece aos microrganismos condições de transporte de oxigênio adequadas de forma que a degradação possa continuar de maneira eficiente por períodos mais longos (ÖSTERREICHER-CUNHA *et al.*, 2004).

Atualmente, uma das técnicas preferidas para a remediação de solos contaminados por derramamento de combustíveis é o **landfarming**. Esta técnica é muito utilizada em locais remotos, porque o método requer o uso reduzido de equipamentos, sendo a opção de mais baixo custo, principalmente se comparada à incineração. O termo *landfarming*, geralmente, refere-se a um processo em que o solo contaminado com hidrocarbonetos é distribuído em uma camada de meio metro de espessura, com adição de nutriente, devendo ser periodicamente revolvido. Essa última etapa deve permitir a mistura dos resíduos à camada fértil do solo, a fim de que a própria microbiota do solo atue como agente de degradação. A homogeneização e a aragem do solo, geralmente, são realizadas por meio de tratores utilizados na agricultura (JORGENSEN *et al.*, 2000). Por outro lado, durante o tratamento, podem ser perdidos hidrocarbonetos por volatilização, bem como pela ação da biorremediação e, assim, conclui-se que o *landfarming* recorre à combinação dos dois processos (PAUDYN *et al.*, 2008)

A **compostagem** é uma ação biológica de decomposição da matéria orgânica presente em restos de origem animal ou vegetal. Ocorre por ação de agentes microbianos e, portanto, precisa de condições físicas e químicas adequadas para que o composto orgânico final seja de boa qualidade (PERES e NAUMOFF, 1998). A presente estratégia, diferente da técnica de *landfarming*, requer a adição de material que favoreça o aumento da porosidade e a transferência de oxigênio, bem como forneça, ao sistema, uma fonte de energia capaz de beneficiar um rápido crescimento microbiano. Os materiais, comumente, adicionados na compostagem são: palha, grama, folhas, bagaço de cana, serragem ou esterco. Uma das características do processo é que o calor, gerado metabólica-

mente, se mantém preso ao sistema, provocando o aumento de temperatura e mudanças na sua população microbiana (POTTER *et al.*, 1999; SEMPLE *et al.*, 2001).

O produto resultante da compostagem pode ser considerado como um enriquecedor do solo, ou seja, poderá ser aplicado para melhorar as características do mesmo, sem que haja uma contaminação do meio ambiente (BRITO *et al.*, 2003). É importante salientar que a técnica pode ser utilizada para a degradação de derivados de petróleo. Nesse caso, o processo denomina-se biopilha, sendo o produto final não necessariamente empregado na agricultura, a não ser no caso da comprovação da ausência de toxidez do resíduo. Na pesquisa de Seabra (2005), o autor constatou que é viável a aplicação de biopilha, na biodegradação de petróleo de solos com altos teores de argila e silte, podendo eliminar os riscos do óleo residual, a curto e médio prazo. O trabalho ainda menciona que o tratamento em biopilha também contribuiu para recuperar a qualidade dos solos em termos de ecotoxicidade.

A **fitorremediação** utiliza sistemas vegetais (árvores, arbustos, plantas rasteiras e aquáticas) e a sua microbiota com o fim de remover, degradar ou isolar substâncias tóxicas do ambiente. A fitorremediação, como qualquer outra tecnologia, apresenta várias vantagens e desvantagens. Se o baixo custo é uma vantagem, o tempo para que se observem os resultados pode ser longo, pois depende do ciclo vital da planta. Além disso, a concentração do poluente e a presença de outras toxinas devem estar dentro dos limites de tolerância da planta. Outra limitação é que as plantas usadas com o propósito de minimizar a poluição ambiental podem entrar na cadeia alimentar, resultando, em conseqüências indesejáveis. Apesar dos



problemas ainda não resolvidos, o mercado para a exploração dessa tecnologia é promissor (PLETSCH, 1999).

O processo de **bioaumento** envolve a introdução de microrganismos, que têm sido cultivados, para degradar várias cadeias de hidrocarbonetos, dentro de um sistema contaminado. As culturas podem ser derivadas de um solo contaminado ou obtidas de uma cultura estoque, que tenha demonstrado, previamente, capacidade para degradar esses hidrocarbonetos (SARKAR *et al.*, 2005).

Para que a aplicação do bioaumento tenha sucesso, é necessário que os microrganismos selecionados apresentem algumas características, como: capacidade para degradar a maior parte dos contaminantes, estabilidade genética, alto nível de atividade enzimática, além da capacidade de competir com a população intrínseca do solo. Deve ser lembrado que os agentes microbianos não podem ser patogênicos e não devem produzir substâncias tóxicas durante o processo de biodegradação (LEAHY & COLWELL, 1990).

Por outro lado, o processo de **bioestímulo** é uma das estratégias mais adotadas em tratamentos de recuperação de áreas impactadas. Esta técnica consiste na correção das condições ambientais, tais como nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio), oxigênio e umidade para aumentar a atividade da população microbiana existente nas áreas contaminadas (ATLAS, 1981; LIN *et al.*, 1999; PANKRANTZ, 2001 *apud* SARKAR *et al.*, 2005). Os microrganismos podem ou não, inicialmente, ter como alvo os hidrocarbonetos como fonte de alimento. Contudo, os hidrocarbonetos são, supostamente, degradados mais rapidamente do que no processo de degradação natural, devido à elevação da população de microrganismos, causada pelo au-

mento dos níveis de nutrientes (SARKAR *et al.*, 2005). A suplementação de nutrientes para a degradação de hidrocarbonetos tem sido, tradicionalmente, focada na adição de fontes de N e P, tanto orgânicas quanto inorgânicas. Devido ao fato do carbono ser o principal constituinte dos combustíveis de petróleo, a sua dosagem tem sido considerada como um índice para a determinação das quantidades de N e P que necessitam ser adicionadas para atingir a ótima relação C:N:P (RISER-ROBERTS, 1998 *apud* SARKAR *et al.*, 2005). Várias fontes de nutrientes, tais como fertilizantes inorgânicos, uréia, serragem, húmus, estrume e biosólidos têm sido usados no bioestímulo (CHO *et al.*, 1997; NAMKOONG *et al.*, 2002).

É importante destacar, mais uma vez, a seleção correta de uma tecnologia, dentre as diversas opções, para uma biorremediação eficiente de solos contaminados. Sabe-se que, em ambientes onde já se estabeleceu um equilíbrio e a microbiota nativa encontra-se adaptada, o bioaumento pode não promover um acréscimo das taxas de biodegradação. Nessas situações, a escolha de uma simples bioestimulação torna-se mais prudente (SÁ, 2002).

Por fim, o uso da técnica de biorremediação, embora apresente inúmeras vantagens – tais como aplicação em grandes áreas, baixo custo e destruição completa do contaminante (BENTO *et al.*, 2005) – depende de muitos fatores, entre os quais: o tipo, a concentração e a biodisponibilidade dos poluentes; suprimento de nutrientes e do histórico da contaminação, para o alcance das condições ótimas de biodegradação (HAMDI *et al.*, 2007; BENTO *et al.*, 2005). Bento e colaboradores (2005) também citam, como fatores-chave para o sucesso: o conhecimento da densidade da população de microrganismos degradadores de

óleo e o seu potencial de biodegradação para o emprego da técnica nos sítios contaminados.

## 2.4 | Fisiologia do Fungo

Os fungos estão amplamente distribuídos na natureza, assim, eles são encontrados na água, no ar atmosférico, no solo, sobre os animais e vegetais vivos parasitando-os, na matéria orgânica em decomposição, nos produtos alimentícios e produtos industriais (SILVEIRA, 1995).

Constituem um conjunto de seres vivos que inclui, desde organismos unicelulares a organismos pluricelulares macroscópicos. São formados por células eucariotas, com uma parede rígida, e se caracterizam por serem imóveis, apresentam nutrição heterotrófica por absorção e reprodução assexuada e sexuada (SILVEIRA, 1995).

Como biodegradadores naturais, os fungos encontram as substâncias necessárias para o seu desenvolvimento na natureza, principalmente, macromoléculas insolúveis, que precisam ser primeiramente degradadas em unidades monoméricas solúveis antes de sua assimilação. Polissacarídeos, proteínas, ácidos nucléicos, lignina, lipídios e outros compostos de grande peso molecular, ou insolúveis, não podem ser incorporados diretamente sem antes terem sido reduzidos. Os fungos absorvem nutrientes através da membrana plasmática, como compostos de baixo peso molecular dissolvidos em água, o que justifica essa necessidade. Para isso, esses organismos secretam enzimas específicas para o meio exterior, conseguindo reduzir o tamanho das moléculas e aumentar a sua solubilidade. Assim, essas substâncias passam pela membrana, que

tem grande poder seletivo para moléculas pequenas, apesar de algumas enzimas que fazem parte de sua composição podem incorporar, ativamente, determinados nutrientes por seleção. Desse modo, moléculas simples terão preferência na sua utilização como nutrientes, sendo, então, reprimida a síntese de enzimas para moléculas mais complexas. Por exemplo, se houver glicose no meio, a qual é preferida pelo fungo, não serão formadas as enzimas para degradar substratos complexos, como amido e celulose, nem enzimas para degradar dissacarídeos, como galactose, maltose e sacarose (PUTZKE, 2002).

Tal como nas plantas, em geral, os fungos também necessitam de duas classes de nutrientes de acordo com a quantidade necessária em suas dietas: os macronutrientes (exigidos em quantidades por volta de  $10^{-3}$ M) e os micronutrientes (requeridos em quantidades por volta de  $10^{-6}$ M ou menos). Os macronutrientes são: carbono, hidrogênio, oxigênio, fósforo, potássio, nitrogênio, enxofre e magnésio, dos quais o primeiro é mais exigido, por ser um elemento estrutural, associado ao hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Entre os micronutrientes, são citados o ferro, cobre, manganês, zinco e molibdênio (PUTZKE, 2002).

A literatura descreve, em geral, a necessidade de incorporação de macroelementos como requisito nutricional para o crescimento de fungos em laboratório. Portanto, destacam-se dentre os macronutrientes, os seguintes elementos:

### **Carbono**

É amplamente utilizado por ser um dos componentes estruturais dos fungos, pois sabemos que os microrganismos apresentam 50% de carbono na sua massa celular. Dependendo do tipo de metabolismo, os microrganismos incorporam à célula

proporções diferentes de substrato de carbono, o que para os anaeróbicos é de 10%, para os aeróbios representa de 50 a 55% (ROITMAM *et al.*, 1988). A glicose é a fonte de carbono mais amplamente utilizada, sendo os estudos realizados principalmente com esse ou outro carboidrato, como frutose, manose e galactose (PUTZKE, 2002).

### **Nitrogênio**

O nitrogênio é encontrado no solo, em maior quantidade na forma de nitrato, sendo amplamente utilizável por fungos, mas nem todas as espécies têm essa capacidade. Dentre as demais formas de nitrogênio que podem ser encontradas no solo, somente a amônia (base forte) tem ampla utilização, apesar de ser tóxica. Mas isso é facilmente contornável em função de ser encontrada na forma de seu íon  $\text{NH}_4^+$ , o que leva a um pH levemente básico, que permite o crescimento dos fungos. Nitrito e hidroxilamina, apesar de serem tóxicos também, são empregados como fonte de N para muitas espécies, tal como uréia, aminoácidos e outros compostos nitrogenados. Misturas de aminoácidos parecem ser mais apropriadas, pois aceleram o crescimento em relação a culturas onde um único componente é adicionado (PUTZKE, 2002).

Dentro desse contexto, Pereira e Lemos (2003) estudaram o efeito das fontes de nitrogênio na degradação de petróleo por *A. versicolor*, realizando um experimento que possibilitou a comparação de quatro diferentes fontes de nitrogênio: extrato de levedura (EL), uréia ( $(\text{NH})_2\text{CO}$ ), sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) e nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ). O resultado mostrou que a maior eficiência de degradação foi alcançada quando se fez uso de EL (39,5%). O emprego de  $(\text{NH})_2\text{CO}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  e  $\text{NaNO}_3$  proporcionou um resul-

tado decrescente em relação à fonte anterior, com percentuais na ordem de 17,41%, 6,8% e 4,8%, respectivamente.

No trabalho de Santos (2007), foi avaliado o efeito da adição de duas fontes de nitrogênio, uréia e nitrato de sódio, em amostras contaminadas por petróleo e adicionadas de pó da casca de coco verde, como material estruturante. O experimento, no qual o solo foi corrigido com uréia, foi responsável por uma remoção de carbono 66% maior do que a amostra controle.

Putzke (2002), ainda, descreve as formas de utilização das diferentes fontes de nitrogênio por espécies de fungos, discutidas a seguir.

A assimilação de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) pelos microrganismos conduz à redução de ambas fontes de N a amônia, através de vias metabólicas específicas. A redução de nitrato a amônia envolve duas enzimas: nitrato redutase e nitrito redutase, como mostra a **Reação 1** (WIAME *et al.*, 1985; GRIFFIN, 1994). Experiências, com relação à síntese dessas enzimas por *Aspergillus nidulans*, indicam que a sua formação é controlada tanto pela indução por nitrato como pela repressão por amônia. Além disso, admite-se a possibilidade de que nitrato redutase desempenhe um papel regulador autógeno que controla a sua própria síntese e a de nitrito redutase (MARZLUF, 1981).

O íon nitrato pode ser incorporado ao meio de cultivo, utilizando-se nitrato de amônio, nitrato de potássio, nitrato de sódio e nitrato de cálcio. Os passos da redução que permitem ao fungo a utilização do nitrato são apresentados, esquematicamente, na Reação 1, a seguir:



Fonte: PUTZKE, 2002.

**Reação 1.** Reação de redução do nitrato à amônia realizado por fungos

### Amônia

Muitos fungos não têm a capacidade de utilizar outra fonte de nitrogênio, que não seja a amônia. O íon amônio e o nitrogênio orgânico apresentam o mesmo nível de oxidação, dispensando a necessidade de produção das enzimas redutoras. A utilização preferencial da amônia, evidentemente, também representa um gasto energético menor para o fungo.

As evidências sugerem que os fungos assimilam amônia e a transformam em aminoácidos, por meio das vias do glutamato e da glutamina. O grupamento  $\alpha$ -amino, da maioria dos aminoácidos, é proveniente do grupamento  $\alpha$ -amino do glutamato, obtido por transaminação. O glutamato é sintetizado a partir do íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e de  $\alpha$ -cetoglutarato, um intermediário do ciclo do ácido cítrico, graças à ação da glutamato desidrogenase. Por sua vez, a glutamina contribui com a sua cadeia lateral para a biossíntese de variados compostos, e forma-se pela incorporação de íons amônio na molécula de glutamato, por ação da glutamina sintetase. Esta enzima é considerada um elemento controle-chave no metabolismo intermediário, devido à regulação do fluxo metabólico do nitrogênio (SLAUGHTER, 1988).

### **Nitrogênio orgânico**

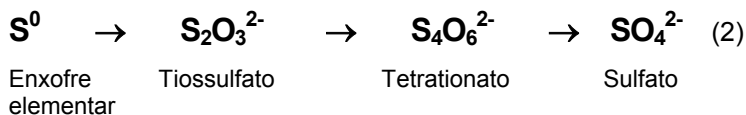
O nitrogênio orgânico pode ser adicionado aos meios de cultura, por meio da utilização de aminoácidos, peptídios ou peptonas. Estes últimos por hidrólise resultam em aminoácidos. Em geral, a maioria dos fungos utiliza nitrogênio orgânico (PUTZKE, 2002).

Sabe-se que, o extrato de levedura estimula o crescimento de diversos microrganismos, por ser uma fonte de aminoácidos e vitaminas, especialmente do complexo B. Porém, apesar da importância do extrato de levedura como fonte de N e de outros nutrientes, deve-se ter, também, um compromisso com a viabilidade econômica do processo em desenvolvimento, devido ao custo elevado do nutriente. Para tal, torna-se indispensável a procura por outras fontes de N, visando substituir o extrato de levedura e diminuir os custos de produção. As fontes inorgânicas seriam, neste caso, as mais recomendáveis, uma vez que são as mais baratas e muito utilizadas nos processos industriais (ANTUNES, 1997).

### **Enxofre**

Em culturas de fungos, normalmente utiliza-se o sulfato de magnésio como fonte de enxofre, do qual o íon sulfato é o mais comum, entrando facilmente na célula, por transporte ativo. Muitos fungos podem reduzir o íon enxofre e, ainda, oxidar enxofre puro ou formas reduzidas de enxofre a partir dos meios onde ocorram. A seqüência da reação é mostrada na Reação 2:





Fonte: PUTZKE, 2002.

## **Reação 2.** Oxidação do enxofre puro por fungos

### **Fósforo**

O ânion fosfato é importante para o metabolismo da célula fúngica por fazer parte da molécula de DNA, RNA, além de fosfolipídios, NAD, FAD, coenzima A e de algumas vitaminas. Em meio de cultura, a inclusão de fósforo é feita com a adição de sais de fosfato inorgânico ao mesmo (PUTZKE, 2002).

Geralmente, o teor de fósforo encontra-se em baixa concentração nos ambientes contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, onde as relações carbono/nitrogênio e carbono/fósforo são elevadas e desfavorecem o crescimento microbiano (ATLAS, 1981).

Cabe salientar, que a fonte de fósforo pode ser tóxica para os microrganismos envolvidos na biorremediação, e pode inviabilizar o referido processo, como comprovado para o ácido metilfosfônico, que causa destruição da membrana celular devido à sua natureza lipofílica (DEL'ARCO, 1999).

### **Potássio**

O potássio é, geralmente, empregado em sua forma inorgânica  $\text{K}^+$ . É importante nos processos de transporte celular e na regulação do potencial osmótico da célula (PUTZKE, 2002).

## Magnésio

O magnésio é, da mesma forma que o potássio, empregado em sua forma inorgânica  $Mg^{+2}$ , tendo ação importante na estruturação da membrana celular (PUTZKE, 2002).

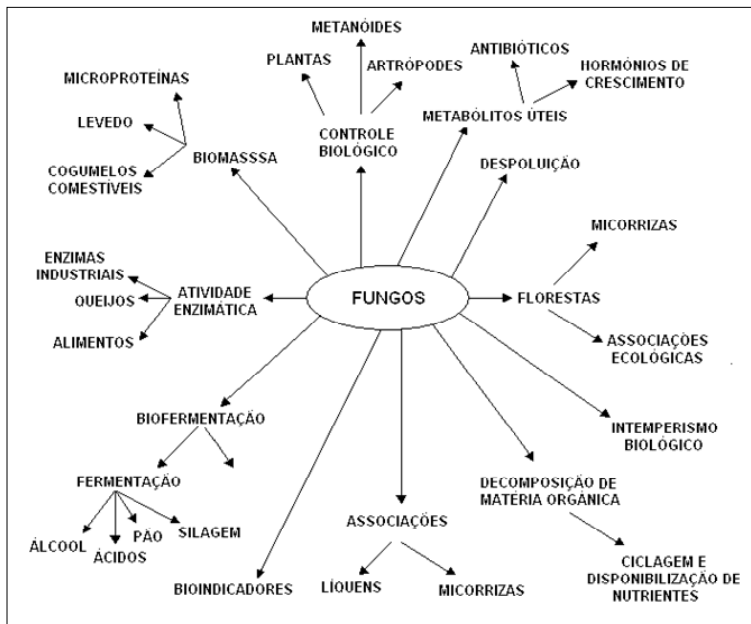
## 2.5 | Perspectivas de Aplicação de Fungos em Processos de Biorremediação

Os fungos apresentam uma série de características econômicas e ecológicas que os transformaram em organismos indispensáveis para todo e qualquer ecossistema. Estão presentes na vida cotidiana seja na elaboração de pães, queijos e bebidas, seja degradando e reciclando nutrientes como mostra a Figura 5 (PUTZKE, 2002).

As tecnologias de biorremediação contam, comumente, com a atividade das bactérias para descontaminar o ambiente. Entretanto, menos atenção tem sido dada a biorremediação de ambientes contaminados efetuada por fungos. Por outro lado, avaliações de fungos em escala de laboratório apresentam um potencial adequado para degradar hidrocarbonetos aromáticos policíclicos de alto peso molecular (PAHs) e outros compostos orgânicos recalcitrantes, por meio de sistemas enzimáticos extracelulares e outros. Portanto, os fungos se constituem num grupo de microrganismos atrativo e promissor para a sua investigação como agentes degradadores (ATAGANA, 2006).

Na última década, têm sido identificadas e caracterizadas diferentes espécies de bactérias e fungos filamentosos, utilizados nos processos de biorremediação. Os fungos são conhecidos pela sua diversidade e habilidade notável para degradar materiais naturais complexos e persistentes, tais como lignina, qui-

tina e celulose microcristalina. Portanto, algumas características dos fungos filamentosos, como a bioatividade e o crescimento morfológico, os tornam potencialmente melhores degradadores do que as bactérias. Além disso, os fungos são capazes de crescer sob condições ambientais de estresse como meios com baixos valores de pH, pobres em nutrientes e com baixa atividade de água, favorecendo o seu desenvolvimento diante de outros microrganismos (MOLLEA *et al.*, 2005; DAVIS & WESTLAKE, 1978 *apud* ATAGANA, 2006).



Fonte: PUTZKE, 2002.

**Figura 5.** Principais benefícios proporcionados pelos fungos

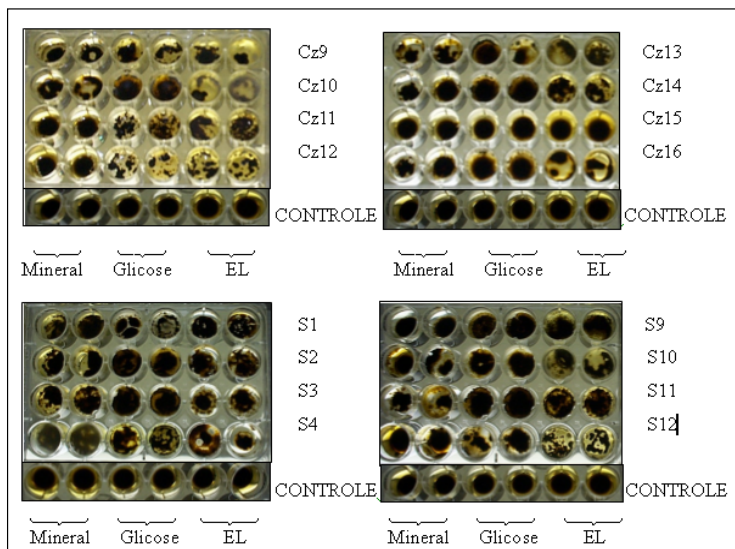
Na pesquisa de Araújo e Lemos (2002), foram realizados o isolamento e identificação de fungos filamentosos com capacidade de degradação do petróleo. A partir de um solo contaminado com 5% p/p de petróleo, foram obtidas oitenta linhagens, das quais sessenta apresentaram capacidade para degradar hidrocarbonetos de petróleo. A identificação dos microrganismos os agrupou em quatro gêneros fúngicos (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Paecilomyces* e *Fusarium*) subdivididos nas seguintes espécies: *Aspergillus terreus*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus niveus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium corylophilum*, *Paecilomyces variotti*, *Paecilomyces niveus* e *Fusarium sp.*

Na Figura 6, são apresentadas placas de culturas de células que mostraram os resultados qualitativos da degradação do petróleo. No trabalho citado, foram utilizados: o meio mineral e o óleo cru, como única fonte de carbono, nas duas primeiras cavidades da placa; além de outros dois nutrientes adicionais – o extrato de levedura (EL) e a glicose – nas cavidades subsequentes. A análise qualitativa para degradação do petróleo é feita por meio de parâmetros que indiquem a presença microbiana, podendo destacar: a turvação no líquido e a alteração na película do óleo.

Numa pesquisa posterior, realizada por Reiche e Lemos (2006), foram isoladas espécies de fungos filamentosos, presentes em um solo nordestino, capazes de degradar óleo cru. A partir do isolamento, foram obtidas 50 colônias, submetidas ao teste qualitativo de degradação de petróleo, utilizando placas de culturas de células. Nesse trabalho, conforme mostra a Figura 7, foram utilizados: nas duas primeiras cavidades, somente o óleo cru, como única fonte de carbono; o óleo mais a glicose,

nas duas cavidades do centro; e óleo e extrato de levedura (EL), nas duas últimas cavidades.

Esse teste permitiu apontar 25 linhagens como potenciais agentes de degradação de óleo cru. Na Figura 7, são mostradas apenas quatro linhagens avaliadas.

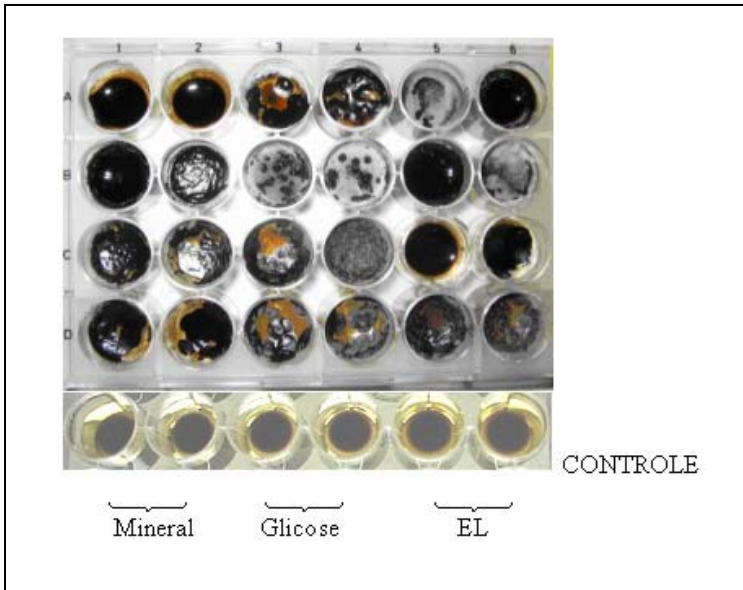


Fonte: Araújo e Lemos, 2002.

**Figura 6.** Degradação de hidrocarbonetos de petróleo em meios mineral, mineral com glicose e mineral com EL – extrato de levedura

Del'Arco (1999) realizou um teste de assimilação de óleo, sendo o contaminante, empregado como única fonte de carbono, e o óleo mineral, como diluente. Durante os 28 dias de cultivo, foi avaliada a capacidade de degradação de 24 linhagens de bactérias, 23 de fungos e 9 culturas mistas, oriundas de solo contaminado por petróleo, *landfarming* e coleções. Duas cultu-

ras mistas foram selecionadas pela capacidade de degradação de até 28% da fração pesada do óleo.



Fonte: Reiche e Lemos, 2006.

**Figura 7.** Teste de degradação de petróleo em placa de poliestireno com linhagens A, B, C e D

Atlas (1981) destacou onze gêneros de fungos e seis gêneros de bactérias responsáveis pela oxidação de hidrocarbonetos em solo. Em outro estudo, realizado por Atlas (1981), foram isoladas sessenta espécies de fungos, capazes de crescer em n-tetradecano, tolueno, naftaleno e sete tipos de óleo cru. Os fungos encontrados com maior frequência no solo foram aqueles que produziram pequenos conídios, tais como *Penicillium* e *Verticillium ssp.*

Ravelet *et al.* (2000) identificaram várias espécies de fungos com capacidade para degradar pireno, um hidrocarboneto policíclico aromático que possui quatro anéis aromáticos. Os microrganismos isolados foram: *Mucor racemosus*, *Mucor racemosus var. sphaerosporus*, *Gliocadium virens*, *Penicillium simplicissimum*, *Penicillium janthinellion*, *Phialophora alba*, *Phialophora hoffmannii*, *Trichoderma hazianum*, *Scopulariopsis brumptii* e *Coniothyrium fuckelii*.

Mollea *et al.* (2005) também utilizaram linhagens fúngicas puras na otimização da biodegradação de HPAs. Os resultados apresentados nesse artigo mostraram que *T. harzianum* não foi capaz de biodegradar naftaleno diretamente no microcosmo contendo solo, enquanto *P. Chrysosporium*, nas mesmas condições de teste, biodegradou os HPAs até aproximadamente 600 mg/kg de solo. Porém, no trabalho de Baheri & Meysami (2002), o bioaumento, com linhagens de fungo da podridão branca, não teve um efeito significativo na biorremediação do solo. Isso é devido, segundo o próprio artigo, à presença de linhagens naturais de fungos da podridão branca do solo e do material estruturante empregados. Porém, é conhecido que os microrganismos podem não degradar o contaminante numa exposição inicial, mas fazê-lo após uma exposição duradoura. Essas adaptações metabólicas têm sido objeto de estudo quanto aos mecanismos que as causam, dentre elas a de adaptação de enzimas de crescimento das populações biodegradantes e mutações genéticas (BRITO *et al.*, 2004).

Atagana *et al.* (2006) avaliaram a capacidade de linhagens fúngicas (*Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus* e *Pleorotus*), isoladas do solo contaminado com creosoto, na degradação de HPAs. O estudo foi realizado com bioestímulo,

sob a forma de adição de nutrientes. Os pesquisadores apontaram *Pleurotus*, um fungo da podridão branca, como o microrganismo com maior potencial degradador. Embora todas as culturas puras tenham degradado ativamente o creosoto (máximo de remoção de 80%), a mistura de culturas fúngicas foi mais efetiva, com remoção igual a 94,1% no tratamento do solo com adição de nutrientes.

Oliveira e Lemos (2005) também analisaram o benefício do tratamento *ex-situ* de amostras contaminadas por petróleo, empregando, conjuntamente, o bioestímulo, com fontes de nitrogênio, e o bioaumento, com *Aspergillus versicolor*. O tratamento proporcionou um aumento de 57,4% na atenuação de hidrocarbonetos do petróleo em relação à amostra controle.

Barros *et al.* (2007) avaliaram o desempenho da associação de inoculo fúngico e pó de coco como material estruturante. O trabalho relatou que, nas amostras sem inóculo fúngico, o desempenho da atividade dos microrganismos se mostrou sempre inferior, demonstrando a importância dos fungos no processo.

Dessa forma, o uso de microrganismos, especialmente fungos filamentosos, em processos de produção em grande escala é altamente conveniente, principalmente em função da dispensa de reagentes químicos adicionais, da freqüente auto-sustentabilidade do processo e da natureza pouco poluente dos processos biológicos (BRITO *et al.*, 2004).



### 3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na situação atual, as técnicas largamente empregadas para eliminação de resíduos, oriundos de processos industriais, compreendem a remoção de material contaminado das áreas afetadas, seguida de tratamento químico ou físico dos resíduos, e retorno ao meio ambiente. Os resíduos, que não podem sofrer esse tratamento, são incinerados ou depositados em aterros próprios para esta destinação. Entretanto, tais procedimentos geram outros resíduos e agravam o problema dos aterros, ao passo que a incineração leva à geração de gases tóxicos e transferência de poluentes para a atmosfera. Estes inconvenientes acabam por acentuar outras questões ambientais, tais como contaminação da água e do subsolo, chuva ácida, além do aumento do efeito estufa.

Além disso, a aplicação do método de remoção e tratamento químico do material contaminado apresenta algumas limitações: no caso de instalações localizadas em terra, há restrições quanto à profundidade; e para instalações marítimas, as dificuldades existem em função das condições meteorológicas, de ondas e do efeito da dispersão provocada por correntes marinhas.

Porém, o cenário mundial aponta para a implantação de programas ambientalmente sustentáveis como seqüestro de carbono, uso de biocombustíveis e outras fontes de energia renováveis para promoção da redução do aquecimento global. Nessa conjuntura recente, o uso de *tecnologias verdes* – como técnicas que utilizam processos biológicos – para o tratamento de sítios poluídos torna-se popular e recebe grande aceitação pública. Dessa forma, a aplicação da biorremediação está bem inserida nesse contexto, já que se trata da incrementação de

um processo biológico que ocorre naturalmente, sem intervenção humana enérgica. Esse incremento pode ser feito através da adição de microrganismos indígenas ou exógenos (bioaumento), introdução de nutrientes através da correção das relações de carbono-nitrogênio-fósforo (bioestímulo) ou de material estruturante, ajuste de pH, umidade, aeração, entre outros.

Até o presente momento, os processos biológicos de recuperação de solos contaminados por óleo e/ou derivados têm se baseado na estimulação dos microrganismos nativos – pela adição de nutrientes e aeração – e, em alguns casos, no aumento da população microbiana, através da incorporação de organismos endógenos/exógenos. Pouco sucesso tem sido alcançado neste último caso, principalmente, pelo fato de que muitos destes organismos, disponíveis no mercado, têm sua atuação limitada em função de serem oriundos de áreas distintas do sítio contaminado. Além disso, esses microrganismos não se mostram competitivos, quando comparados à população nativa, já adaptada ao tipo de solo e condições climáticas locais. Neste sentido, uma alternativa para o aumento de microrganismos, nos solos a serem recuperados, seria o isolamento de espécies a partir do próprio solo, crescimento e reintrodução das mesmas no sistema. Ocorre que os métodos convencionais de isolamento só são capazes de extrair uma pequena parcela de organismos viáveis presentes no ambiente (especialmente em se tratando de solos argilosos, largamente encontrados no Brasil), fato que limita a obtenção de espécies de interesse.

Sabe-se que os agentes biológicos, mais utilizados na biorremediação, são microrganismos e plantas. Dentre os microrganismos que atuam nesse processo, as bactérias recebem maior destaque. São os microrganismos mais empregados na

degradação de poluentes, devido à assimilação de maior quantidade de nutrientes, especialmente as fontes de carbono, durante um menor período de tempo, em comparação com os demais. A prevalência bacteriana está atrelada à velocidade de crescimento desses microrganismos, quando comparado a dos fungos e leveduras, principalmente, quando as condições de cultivo são apropriadas para o crescimento de toda a microbiota presente no ambiente. Apenas, em casos onde as condições favoreçam um outro tipo de microrganismo, as bactérias são preteridas.

Entretanto, a eficiência da microbiota exógena se apresenta de forma distinta em diferentes áreas contaminadas, ainda que o poluente seja o mesmo. Desse fato, podem surgir dois problemas: o microrganismo exógeno pode ser suprimido do ambiente pela microbiota local, ou pode eliminar os concorrentes nativos do sistema contaminado. Portanto, não é interessante eleger uma determinada espécie microbiana, exclusivamente, para solucionar um dado problema.

Uma outra opção eficiente, em termos de biorremediação, compreende o emprego de fungos para metabolizar os resíduos poluentes. Vários autores têm compilado, em seus trabalhos, listas que contêm tanto gêneros bacterianos, quanto fúngicos, oriundos do ambiente marinho ou de solos, e que são capazes de degradar um amplo espectro de contaminantes.

É conhecido que os fungos são degradadores em potencial e apresentam boa resposta às condições de estresse, como sobrevivência em meios com baixos valores de pH e pobres em nutrientes. Os fungos filamentosos estão presentes em qualquer sistema contaminado e podem utilizar até compostos recalcitrantes existentes no petróleo como fonte de energia. Por

outro lado, os fungos quando comparados com as bactérias e as leveduras, apresentam uma capacidade maior de adaptação em meios com baixa atividade de água, tornando-se os microrganismos mais promissores em condições de baixa umidade relativa. Em resumo, os fungos se adequam em sistemas inóspitos, geralmente características de sítios contaminados.

Portanto, a biorremediação de solos contaminados por petróleo utilizando fungos filamentosos tem respaldo na literatura e resultados convincentes. No entanto, pesquisas futuras devem ser realizadas para otimização do processo, elucidação das vias metabólicas e estudo da viabilidade de sua aplicação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ÁLVARES, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (2000) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS (1): 299-352
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (1995) **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1<sup>st</sup> ed., 576p.
- ANTUNES, J.G. (1997) **Bioconversão de D-xilose a etanol por *Pichia stipitis***. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- ARAÚJO, F.S.M. e LEMOS, J.L.S. (2002) **Isolamento e identificação de fungos degradadores de petróleo**. In: X Jornada de Iniciação Científica, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT.
- ATAGANA, H.I.; HAYNES, R.J. & WALLIS, F.M. (2006) Fungal Bioremediation of creosote contaminated soil: a laboratory scale bioremediation study using indigenous soil fungi. **Water, Air, and Soil Pollution**, 172: 201-219.
- ATLAS, R.M. (1981) Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: an Environmental Perspective. **Microbiological Reviews**, 45 (1):180 – 209.
- ATLAS, R.M. (1991) Microbial Hydrocarbon Degradation: bioremediation of spills. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 52: 149 – 156.
- BAHERI, H.; MEYSAMI, P. (2002) Feasibility of fungi bioaugmentation in composting a flare pit soil. **Journal of hazardous materials**, B89: 279 – 286.
- BARROS, C.A. (2007) **Um Estudo sobre Biorremediação: uma ciência levada à sala de aula**. Monografia apresentada no final do curso de Licenciatura em Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 60 p.

- BARROS, C.A.; RASCHLE, L.H.; OLIVEIRA, S.D. e LEMOS, J.L.S. (2007) **Estudo da degradação de petróleo em solo arenoso com bioaumento fúngico utilizando casca de coco como material estruturante.** In: VII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology & XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. V. 2 – Ouro Preto/Minas Gerais.
- BENTO, F.M.; CAMARGO, F.A.O.; OKEKE, B.C. & FRANKENBERGER, W.T. (2005) Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. **Bioresource Technology**, 96:1049-1055.
- BERNARD, A.M. (1997) Effects of heavy metals in the environment on human health. In: **Contaminated soils.** Les Colloques, 85:21-33.
- BOOPATHY, R. (2000) Factors limiting bioremediation technologies. **Bioresource Technology**, 74: 63 – 67.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. (2002) Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo: Prentice Hall. 305 p.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO INTERIOR. (1983) Diretrizes nacionais de limpeza urbana: 1ª fase – Formulação do Programa. Rio de Janeiro: Sema/CNDU/Abes apud DIAS, A. E. X. O. (2000) Biorremediação de áreas afetadas por resíduos sólidos tóxicos. In: SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. (Org.) **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar.** Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 142 p.
- BRASIL. Lei Federal n. 6.939 de 31 de agosto de 1981. **Define a política nacional do meio ambiente.**
- BONAVENTURA, C.; JOHNSON, F.M. (1997) Healthy environments for healthy people: Bioremediation today and tomorrow. **Environmental Health Perspectives**, 105: 5 – 20.
- BRITO, N.N.; BRANDÃO, T.C.O.; CONEGLIAN, C.M.R.; SOBRINHO, G.D.; TONSO, S. e PELEGRINI, R. (2003) **Compostagem.** IV

Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, SP.

BRITO, N.N.; ZAMORA, P.P.; NETO, A.L.O.; DE BATTISTI, A.; PATERNIANI, J.E.S. e PELEGRINI, R.T. (2004) **Utilização de fungos na remediação de efluentes industriais**. IV Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, SP.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Secretaria do Estado do Meio Ambiente. São Paulo. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Pesquisado em agosto de 2007.

CHO, B.H.; CHINO, H.; TSUJI, H.; KUNITO, T.; MAKISHIMA, H.; UCHIDA, H.; MATSUMOTO, S.; OYAIZU, H. (1997) Analysis of oil components and hydrocarbonsutilizing microorganisms during laboratory-scale bioremediation of oil contaminated soil of Kuwait. **Chemosphere** (35), 7: 1613-1621. *apud* MORAIS, E. B.(2005) **Biodegradação de Resíduos Oleosos Provenientes de Refinaria de Petróleo Através do Sistema de Biopilhas**. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.

CÔRREA, O.L.S. (2003) **Petróleo: noções sobre exploração, perfuração, produção e microbiologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 90 p.

DAVIS, J.S.; WESTLAKE, D.W.S. (1978) Crude oil utilization by fungi. *Can. J. Microbiol.* 25: 146-156 *apud* ATAGANA, H.I.; HAYNES, R.J. & WALLIS, F.M. (2006) Fungal Bioremediation of creosote contaminated soil: a laboratory scale bioremediation study using indigenous soil fungi. *Water, Air, and Soil Pollution*, 172: 201-219.

DEL'ARCO, J.P. (1999). **Degradação de hidrocarbonetos por bactérias e fungos em sedimento arenoso**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 171 p.

DIAS, A.E.X.O. (2000) Biorremediação de áreas afetadas por resíduos sólidos tóxicos. In: SISINNO, C.L.S.; OLIVEIRA, R.M. (Org.) **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 142 p.

- DIAS, A.E.X.O. (2000) Biorremediação de áreas afetadas por resíduos sólidos tóxicos. In: SISINNO, C.L.S.; OLIVEIRA, R.M. (Org.) **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 142 p.
- DYMINSKI, A.S. (2006) **Contaminação de solos e águas subterrâneas**. Acessado em: [www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC019\\_Contaminacao\\_de\\_solos.pdf](http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC019_Contaminacao_de_solos.pdf) - Pesquisado em: 19/05/ 2008.
- DINIZ, A.; FRAGA, H. (2005) Poluição dos Solos: Riscos e Conseqüências. **Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia**, 2: 97 – 106. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10284/208>. Pesquisado em agosto de 2007.
- FERRARI, M.D. (1996) Biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos y su aplicación en la biorremediación de suelos y lodos contaminados. **Revista Argentina de Microbiología**, 28: 83-98.
- FONSECA, M.R.M. (1992) **Química: química orgânica**. São Paulo: FTD, 368 p.
- GRIFFIN, D.H. (1994). *Fungal Physiology*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons.
- GÜNTER, H. (2005). Poluição dos solos. In: PHILIPPI JR., A., PELICIONI, M. C. (Eds). **Educação Ambiental e Sustentabilidade**. São Paulo: Manole, pp.191.
- HAMDI, H.; BENZARTI, S.; MANUSADZIANAS, L.; AOYAMA, I. & JEDIDI, N. (2007) Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions. **Soil Biology & Biochemistry**, 39: 1926 – 1935.
- JORGENSEN, K. S., PUUSTINEN, J. & SUORTTI, A.M. (2000). Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil by Composting in Biopiles. **Environmental Pollution**, 107: 245-254.
- LEAHY, J.G.; COLWELL, R.R. (1990) Microbial Degradation of Hydrocarbons in the Environment. **Microbiological Reviews**, 54 (3): 305 – 315.



- LEITE, W.C.A. (1995) Resíduos sólidos urbanos: contribuição para o gerenciamento. In: TAU-K-TORNISIELO, S. M. et al. (Orgs.) Análise ambiental: estratégias e ações. São Paulo: T. A. Queiroz Ed. apud DIAS, A.E.X.O. (2000) Biorremediação de áreas afetadas por resíduos sólidos tóxicos. In: SISINNO, C.L.S.; OLIVEIRA, R.M. (Org.) **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 142 p.
- LIN, Q.; MENDELSSOHN, I.A.; HENRY JR., C.B.; ROBERTS, P.O.; WALSH, M.M.; OVERTON, E.B.; PORTIER, R.J. (1999) Effects of bioremediation agents on oil degradation in mineral and sandy salt marsh sediments. **Environmental Technology**, 20: 825 – 837.
- MARTINS, A.; DINARDI, A.L.; FORMAGI, V.M.; LOPES, T.A.; BARROS, R.M.; CONEGLIAN, C.M.R.; BRITO, N.N.; SOBRINHO, G.D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. (2003) **Biorremediação**. III Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, SP. Disponível em: [www.ceset.unicamp.br/ite/artigos/3fec2401](http://www.ceset.unicamp.br/ite/artigos/3fec2401) - Pesquisado em 20/08/2006.
- MARZLUF, G.A. (1981) Regulation of nitrogen metabolism and gene expression in fungi. **Microbiol. Rev.**, 45: 437 – 461.
- MOLLEA, C.; BOSCO, F. & RUGGERI, B. (2005) Fungal biodegradation of naphthalene: microcosms studies. **Chemosphere** (submetido).
- MORENO, C.M.; BECERRA, A.G.; SANTOS, M.J.B. (2004) Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. **Rev. Iberoam. Micol.**, 21: 103 – 120.
- NAMKOONG, W.; HWANG, E.; PARK, J.; CHOI, J. (2002) Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting. **Environmental Pollution**, 119: 23 – 31.
- NYER, E.K. (1998) In: Groundwater and soil remediation: practical methods and strategies. Ann Arbor Press, Michigan apud ROSADO, A. (2005) **Microbiologia e Biorremediação de Petróleo e Derivados**. Rio de Janeiro: Núcleo de Ciências Ambientais/UFRJ, 62 p.

- OLIVEIRA, S.D. e LEMOS, J.L.S. (2005) **Biodegradação de petróleo de solo areno-argiloso por fungo filamentosos**. In: XIII Jornada de Iniciação Científica, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT.
- ÖSTERREICHER-CUNHA, P.; VARGAS JR, E.A.; GUIMARÃES, J.R. D.; CAMPOS, T.M.P.; NUNES, C.M.F.; COSTA, A.; ANTUNES, F.S.; SILVA, M.I.P.; MANO, D.M. (2004) Evaluation of bioventing on a gasoline–ethanol contaminated disturbed residual soil. **Journal of Hazardous Materials**, 110: 63 – 76.
- PALA, D.M.; CARVALHO, D.D.; PINTO, J.C. & SANT’ANNA JR., G.L. (2006) A suitable model to describe bioremediation of a petroleum-contaminated soil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 58: 254 – 260.
- PANKRANTZ, T.M. (2001) Environmental Engineering Dictionary and Directory. CRC Press, Boca Raton, FL apud SARKAR, D.; FERGUSON, M.; DATTA, R.; BIRNBAUM, S. (2005) **Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation**. Environmental Pollution, 136: 187 – 195.
- PAUDYN, K., RUTTER, A.; ROWE, R.K.; POLAND, J.S. (2008) Remediation of hidrocarbon contaminated soils in the Canadian Artic by landfarming. **Cold Regions Science and Technology**, 53: 102 – 114.
- PEARSON, K.M. (1995). On the remediation of polluted land – ex-site treatment. In: GOMES, M. M. & HOGLAND, W. (Eds.) proceedings of the Latin American. **Swedish Seminar on Solid Waste Management and Round Table on Landfill Technology and Contaminated Site Remediation**. Sweden: Lund University, 195 – 196.
- PEREIRA, L.T.C. e LEMOS, J.L.S. (2003) **Os Fungos Filamentosos, uma opção em estudo para a Biorremediação II**. In: XI Jornada de Iniciação Científica, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT.
- PERES, C.S. e NAUMOFF, A.F. (1998) Destinação de resíduos sólidos urbanos: o processo de compostagem. In: SOARES, C.H.

- L. (Ed.) **II Reunião Nacional de Microbiologia Aplicada**. Florianópolis: Universidade de Santa Catarina, v. 2. Disponível em: <http://www.ufsc.br/ccb/PDF/c7.PDF>
- PLETSCH, M.; CHARLWOOD, B.V.; ARAÚJO, B.S. Fitorremediação de águas e solos poluídos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**. Disponível em: <http://www.biotecnologia.com.br/> - Pesquisado em: junho de 2008.
- POTTER, C.L.; GLASER, J.A.; CHANG, L.W.; MEIER, J.R.; DOSANI, M. e HERRMANN, R.F. (1999) Degradation of Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Under Bench-Scale Compost Conditions. **Environmental Science Technology**, 33: 1717 – 1725.
- PUC-RIO – Certificação Digital nº9716243/CA – Petróleo e Gasolina. Disponível em: [http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG\\_0599.EXE/4333\\_3.PDF?](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/4333_3.PDF?), Pesquisado em: Outubro de 2007.
- PUTZKE, J. e PUTZKE, M.T.L. (2002) **Os Reinos dos Fungos**. Santa Cruz do Sul: EDUNISC, 214 p. v.2
- RAVELET, C.; KRIVOBOK, S.; SAGE, L. e STEIMAN, R. (2000). Biodegradation of Pyrene by Sediment Fungi. **Chemosphere**, 40: 557 – 563.
- REICHE, A.P. e LEMOS, J.L.S. (2006) **Estudo do potencial de degradação de petróleo de linhagens de fungos isoladas de solo nordestino**. In: XIV Jornada de Iniciação Científica, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT.
- RISER-ROBERTS, E. (1998) Remediation of Petroleum Contaminated Soil: Biological, Physical, and Chemical Processes. CRC Press LLC, Boca Raton, FL apud SARKAR, D.; FERGUSON, M.; DATTA, R.; BIRNBAUM, S. (2005) Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. **Environmental Pollution**, 136: 187 – 195.
- ROCHA, J.C.; ROSA, A.H.; CARDOSO, A.A. (2004). **Introdução à Química Ambiental**. Porto Alegre: Bookman. 154p.

- RODRIGUES, S.; DUARTE, A.C. (2003). Poluição do solo: revisão generalista dos principais problemas. In: CASTRO, A., DUARTE, A., SANTOS, T. (Ed.). **O Ambiente e a Saúde**. Lisboa, Instituto Piaget: 136 – 176.
- ROITMAN, I.; TRAVASSOS, L.R. e AZEVEDO, J.L. (Eds.) (1991) **Tratado de Microbiologia, v. 2**. São Paulo: Editora Manole, 126 p.
- ROSADO, A. (2005) **Microbiologia e Biorremediação de Petróleo e Derivados**. Rio de Janeiro: Núcleo de Ciências Ambientais/UFRJ, 62 p.
- SÁ, M.C.C. (2002) **Tratamento biológico de solo contaminado com hidrocarbonetos de petróleo Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 105 p.
- SANTOS, R.M. (2007) **Avaliação da adição do pó da casaca de coco verde, como material estruturante, na biorremediação de solo contaminado por petróleo**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 143 p.
- SARKAR, D.; FERGUSON, M.; DATTA, R.; BIRNBAUM, S. (2005) Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: comparison of biosolids addition, carbon supplementation, and monitored natural attenuation. **Environmental Pollution**, 136: 187 – 195.
- SEABRA, P.N.C. (2005) **Aplicação de biopilha na biorremediação de solos contaminados com petróleo**. Tese (Doutorado no Programa de Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 169 p.
- SEMPLE, K.T.; REID, B.J. e FERMOR, T.R. (2001) Impact of Composting Strategies on the Treatment of Soils Contaminated with Organic Pollutants. **Environmental Pollution**, 112: 269 – 283.
- SKIPPER, H.D. (1999) Bioremediation of contaminated soils. In: Sylvia, D.M. (Ed.), Principles and Applications of Soil Microbiology. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ: 469 -481 apud BENTO,

- F.M.; CAMARGO, F.A.O.; OKEKE, B.C. & FRANKENBERGER, W.T. (2005) Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. **Bioresource Technology**, 96:1049-1055.
- SLAUGHTER, J.C. (1988) Nitrogen metabolism. In: BERRY, D. R.; BLACKWELL (Eds). **Physiology of industrial fungi**. London: Scientific Publication: 59 – 129.
- TRINDADE, P.V.O.; SOBRAL, L.G.; RIZZO, A.C.L.; LEITE, S.G.F.; SORIANO, A.U. (2005) Bioremediation of a weathered and a recently oil-contaminated soils from Brazil: a comparison study. **Chemosphere**, 58: 515 – 522.
- WIAME, M.A.J., GRENSON, M.; ARST, H.N. (1985). Nitrogen catabolite repression in yeast and filamentous fungi. In: ROSE, A.H. and TEMPEST, D.W. (Eds). **Advances in Microbial Physiology** (26): 1 – 87.
- WIDDEL, F.; RABUS, R. (2001) Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons. **Current Opinion in Biotechnology**, 12: 259–276.
- ZAIDI, B.R.; IMAM, S.H. (1999) Factors Affecting Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Phenanthrene in the Caribbean Coastal Water 1. **Marine Pollution Bulletin**, 38: 737 – 7.

## 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 2007, 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 <http://www.cetem.gov.br/series>.

### Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-44 - **Neutralização de Emissão de Gases de Efeito Estufa: um Indicador de Desenvolvimento Sustentável nas Responsabilidades Socioambiental Empresarial e Individual.** Eraldo José Brandão, Luis Gonzaga Santos Sobral, Ana Claudia Nioac de Salles e Sueli Mello Braga, 2008.

STA-43 - **Revisão acerca da Utilização de Microrganismos na Biorremediação de Rejeitos Industriais Contendo Metais Pesados.** Judith Liliana Solórzano Lemos, Marion Cony Carlos, Yaci Pira-Tatá Maria Marcondes Farias e Ronaldo Luiz Correa dos Santos, 2008.

STA-42 - **Processos Biológicos de Remoção de Selênio de Efluentes: revisão crítica.** Andrea C. de Lima Rizzo, Valéria Millioli, Judith Liliana S. Lemos, Érica Valdman e Ronaldo Luiz Correia dos Santos, 2007.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Geral: (21) 3867-7222  
Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233  
Telefax: (21) 2260-2837  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)  
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS 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.