



Universidade Federal de São João del-Rei

DQBIO – Departamento de Química, Biotecnologia e Engenharia de
Bioprocessos

Trabalho de Conclusão de Curso

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Nathália Lorraine Pacheco Modesto

Ouro Branco

Junho/2018

NATHÁLIA LORRAINE PACHECO MODESTO

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no 1º semestre do ano de 2018 ao curso de Engenharia de Bioprocessos, da Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito para obtenção do título Engenheiro de Bioprocessos.

Docente Orientador: Edson Romano Nucci

Modalidade do Trabalho: Revisão Bibliográfica

Ouro Branco

Junho/2018

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo abordar a tecnologia de biorremediação de solos contaminados pelos principais poluentes orgânicos (hidrocarbonetos derivados de petróleo) e inorgânicos, incluindo os metais. A biorremediação consiste no uso de organismos vivos, normalmente microrganismos ou plantas, ou ainda a associação simbiótica de ambos como processo biológico de remediar áreas contaminadas (solos, água superficial e subterrânea) através da degradação parcial ou completa (mineralização) dos poluentes. São vários os fatores físico-químicos que afetam o processo, várias técnicas de tratamento *in situ* e *ex situ* e as estratégias utilizadas para melhorar a eficiência do processo, as quais são empregadas de acordo com as características e necessidades do local a ser tratado. Dentre as técnicas *in situ* estão inseridos os tratamentos de atenuação natural monitorada (bioventing, air sparing, etc), fitorremediação; já as técnicas *ex situ* corresponde aos tratamentos de landfarming, biopilhas, inclusive biorreatores, o qual possui uma ampla aplicação nos bioprocessos atuais. Sendo assim é essencial conhecer as características do solo (textura, porosidade, composição, etc); o tipo e concentração do contaminante; as condições ambientais (pH, temperatura, umidade, nutrientes, etc) para então analisar qual a melhor técnica e estratégia a ser aplicada na descontaminação da área e consequentemente, maior eficiência na remoção do contaminante. Portanto, a fim de minimizar os impactos negativos ao meio ambiente, as técnicas de biorremediação vem se mostrando tecnologias ambientais promissoras de remediação, de fácil implantação e baixo custo, porém complexa mas ecologicamente mais corretas frente às remediações químicas, por exemplo.

Palavras chave: Biorremediação, poluentes derivados de petróleo, metais, solos, microrganismos, fitorremediação, biorreatores.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da composição do solo de acordo com as características de sua formação -----	12
Figura 2 - Camadas básicas de horizontes do solo -----	13
Figura 3 - Esquema básico do processo de biorremediação em um solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo e derivados -----	16
Figura 4 - Esquema geral das etapas para definição e implementação de um processo de biorremediação -----	18
Figura 5 - Comparação entre os custos de tratamento de solos contaminados empregando diferentes técnicas de remediação -----	19
Figura 6 - Processos envolvidos na biodegradação de contaminantes inicialmente presentes no solo pelas bactérias -----	21
Figura 7 - Mecanismos envolvidos no processo de fitorremediação -----	35
Figura 8 - Demonstração da camada de nutrientes, microrganismos, resíduo e areia compactada em uma célula de tratamento landfarming -----	38
Figura 9 - Esquema ilustrativo de um tratamento por biopilha -----	39
Figura 10 - Biorreator de lama em escala piloto -----	42
Figura 11 - Biorreator de lama em cascata. 1- alimentação. 2- descarga. 3- entrada de ar comprimido. 4- filtro de carvão ativado. 5- saída de ar filtrado -----	43
Figura 12 - Esquema representativo do biorreator desenvolvido por SANER et al. 1996 apud RIZZO 2008. 1, 4 e 8 – Engrenagens. 2 – Corpo do biorreator. 3 – Eixo central. 5 – Tampa. 6 – Agitadores. 7 – Eixo agitador secundário -----	45
Figura 13 - Biorreator horizontal em escala piloto utilizado no tratamento de solo argiloso contaminado por petróleo acoplado à um sistema de controle computadorizado (a) e das pás agitadoras em seu interior (b) -----	46

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Distribuição de microrganismos em diferentes profundidades de perfil do solo (organismos/gramas de solo $\times 10^3$) -----	20
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 SOLO	12
3.1.1 Poluentes orgânicos	13
3.1.2 Poluentes inorgânicos	14
3.2 BIORREMEDIAÇÃO – Aspectos gerais	16
3.3 MICRORGANISMOS	20
3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO	22
3.5 ESTRATÉGIAS DE AUMENTO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE BIORREMEDIAÇÃO	28
3.5.1 Bioestímulo (Atenuação Natural Acelerada)	29
3.5.2 Bioaumento e Bioenriquecimento	29
3.5.3 Surfactantes	30
3.5.4 Engenharia Genética	30
3.5.5 Adição de material estruturante	31
3.6 TECNOLOGIAS PARA O PROCESSO DE BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS - <i>in situ</i> e <i>ex situ</i>	32
3.6.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO <i>IN SITU</i>	33
3.6.1.1 Atenuação Natural Acelerada (ANA)	33
3.6.1.2 Atenuação Natural Monitorada (ANM) ou Atenuação intrínseca	34
3.6.1.3 Fitorremediação	34
3.6.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO <i>EX SITU</i>	37
3.6.2.1 Landfarming	37
3.6.2.2 Compostagem	38
3.6.2.3 Biopilhas	38
3.6.2.4 Biorreatores	40

3.7	BIORREATORES	40
3.7.1	Biorreatores de fase semi-sólida (ou reatores de lama)	41
3.7.2	Biorreatores de fase sólida	43
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Com o grande crescimento populacional e consequentemente, a demanda por produtos que atendam às necessidades e o desenvolvimento da sociedade capitalista, as atividades industriais e agropecuárias tem se tornado cada vez mais crescente na atualidade. O mundo globalizado exige cada vez mais dos recursos naturais através da exploração dos mesmos que, por meio da intervenção antropogênica intensifica os impactos ambientais. Como consequência dessa globalização, as atividades industriais e agropecuárias geram subprodutos e rejeitos tóxicos que precisam ser tratados antes de entrarem em contato com o meio ambiente, mas nem sempre isso é cumprido diante das leis ambientais ou até mesmo possível de se conter, por exemplo em solos de agricultura (PEREIRA e FREITAS, 2012; REIS, 2013; FLEMING, 2015).

A forma como essa intervenção humana impacta o meio ambiente tem se tornado crítica. A poluição proveniente das atividades industriais geram desequilíbrios irreversíveis nos diferentes ecossistemas, podendo ser observados por meio de alterações do ar, água e solo (FREIRE et al., 2000; MIRANDA et al., 2006; REIS, 2013). Como alternativa a remediar ambientes contaminados tais como águas superficiais e subterrâneas, solos, além de resíduos e efluentes industriais, as técnicas de biorremediação vem sendo estudadas por diversos autores (GAYLARDE et al., 2005; BARGATO, 2006; JACQUES et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2008; RIZZO, 2008; SILVA, 2009; ANDRADE et al., 2010; SCHENBERG, 2010; PEREIRA e FREITAS, 2012; SALVI, 2013; RAMINHO, 2015; CALAZANS e SANTOS, 2016) como um processo biotecnológico positivo de remediar áreas contaminadas.

Diante dessa problemática, apesar de no Brasil não existir uma legislação federal que regule a remediação de solos e águas contaminadas, existem leis municipais. Com isso as indústrias buscam cada vez mais por métodos de baixo custo que eliminem ou que pelo menos, minimizem esse impacto (BRASIL, 1981; WEBER e SANTOS, 2013).

Os microrganismos vêm se mostrando como uma ótima ferramenta de defesa ambiental e passível de ser potencializada. Os microrganismos atuam no ambiente de forma natural degradando diversos elementos visto como poluentes, utilizando-os

como fonte de nutrientes. Assim a biorremediação é definida como um conjunto de tecnologias nas quais se utilizam microrganismos ou seus produtos e processos, aplicados a remediação de áreas contaminadas. De maneira geral, a técnica utiliza-se de microrganismos, plantas, ou produtos biológicos (enzimas e componentes celulares) com a finalidade de metabolizar totalmente (mineralização) ou parcialmente, os compostos tóxicos (por exemplo, poluentes orgânicos e não orgânicos), os quais quando mineralizados, possivelmente resultam em gás carbônico (CO₂) e água (H₂O) (BARGATO, 2006; ANDRADE, 2009). O conhecimento das condições hidrogeológicas e ambientais do meio, do tipo e a concentração do contaminante, inclusive o seu comportamento perante à ação dos micro-organismos e consequentemente, os microrganismos degradadores utilizados no processo, são fatores determinantes para o sucesso dessa tecnologia (GAYLARDE et al., 2005).

Inserida na tecnologia de biorremediação, a técnica de fitorremediação de modo geral, se dá pelo uso de plantas com aplicabilidade *in situ*. Esta também é vista como uma boa alternativa de remediar áreas contaminadas através de alguns mecanismos, com o objetivo de degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes do solo e da água (VASCONCELLOS et al., 2012). Segundo alguns autores (ANSELMO e JONES, 2005; TAVARES, 2009; SCHENBERG, 2010; REIS, 2013; SILVA, 2006; MADALÃO et al., 2012;) é uma técnica muito interessante para ambientes contaminados com metais pesados, além de estimular a biorremediação por fungos ou outros microrganismos localizados no sistema solo-raiz.

Com isso, a fim de minimizar esses efeitos negativos, as técnicas de biorremediação vem se mostrando eficazes como tecnologias ambientais de remediação, de fácil implantação e baixo custo porém, complexa. Associado à essas novas técnicas a engenharia genética também vem ganhando espaço nesse cenário, através de recombinações para melhoramento genético desses microrganismos e plantas utilizados para tal fim. Essas técnicas biotecnológicas oferecem algumas vantagens em relação à outras técnicas de remediação, física e química por exemplo, pois não alteram o equilíbrio do ecossistema sendo ecologicamente corretas, além de serem de baixo custo (SCHENBERG, 2010; LOPES, 2013). Portanto, uma série de descobertas científicas associadas a pesquisas vem desenvolvendo alternativas promissoras para a remediação de áreas degradadas (BARGATO, 2006; WEBER e SANTOS, 2013).

Por fim, o presente trabalho trata-se de um estudo de revisão bibliográfica, a partir do levantamento de materiais já publicados e disponibilizados na forma de artigos científicos, livros e web sites científicos que abordam e justifiquem a implantação dessas novas técnicas como alternativas biológicas viáveis na remediação de ambientes contaminados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo geral um estudo de revisão bibliográfica sobre a tecnologia de biorremediação e suas técnicas de aplicação direcionada à contaminação de solos, pelos principais poluentes orgânicos (hidrocarbonetos derivados de petróleo) e os poluentes inorgânicos incluindo os metais pesados, ambos provenientes das intensas atividades industriais e da agricultura.

Os objetivos específicos foram:

- Abordar os principais fatores que afetam o processo de biorremediação
- Demonstrar as técnicas *in situ* e *ex situ* e as estratégias da biorremediação de solos;
- O emprego de biorreatores nessa tecnologia.

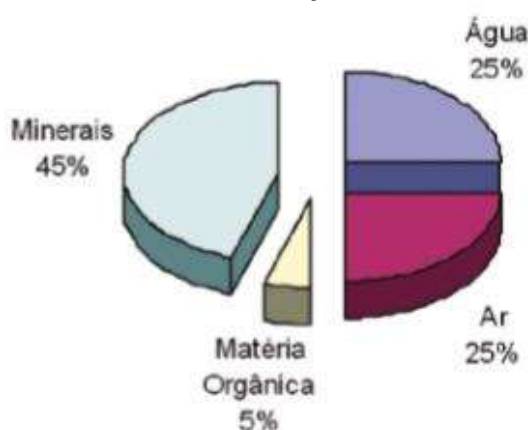
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLO

O solo é formado por ação do intemperismo sobre rochas e minerais, por um processo de pedogênese e tem como elementos de formação: material de origem, clima, organismos, relevo e tempo. Os fatores que contribuem com matéria e energia para o sistema são considerados ativos, dentre eles estão o clima, organismos e água, uma vez que, quanto maior a associação e simbiose entre vegetais, microrganismos e animais, maior a intensidade biótica no solo. Por outro lado, os fatores passivos como material de origem, relevo e o tempo não contribuem com matéria e energia para o sistema (MIRANDA et al., 2006; REIS, 2013).

São três os estados de fases encontradas no solo: fase sólida ocupando cerca de 50% do volume total do solo, a qual é constituída de minerais e matéria orgânica; fase líquida (água) que se encontra nos poros da fase sólida e ocupa entre 15 e 35% do volume total do solo e a fase gasosa (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, metano, etc) que também se encontra nos poros do solo e compete com a fase líquida, onde se um determinado tipo de solo possui alto teor de fase líquida, menor será a oxigenação nesse solo. Porém sua composição pode variar de acordo com as características de sua formação (SEABRA, 2005; MIRANDA et al., 2006; RIZZO, 2008), conforme demonstrado na Figura 1:

Figura 1 – Representação esquemática da composição do solo de acordo com as características de sua formação.

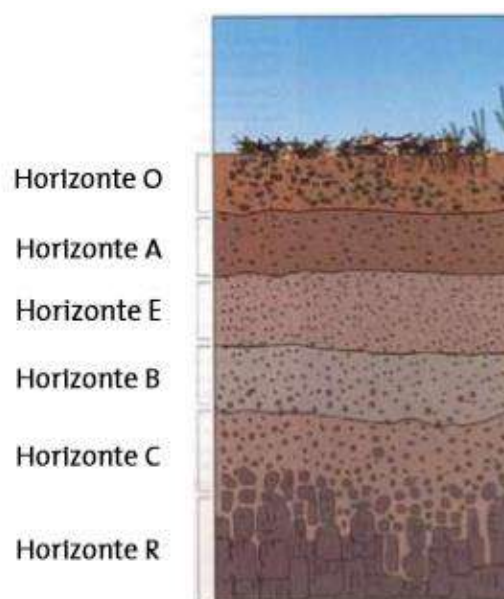


Fonte: (RIZZO 2008).

O solo é dividido em camadas horizontais que tem como características os critérios de textura, cor, consistência, estrutura, atividade biológica, etc, mas pode basicamente ser dividido em cinco camadas. A textura é determinada com base no

teor de areia, argila e silte no solo. A camada “O” corresponde a matéria orgânica presente na superfície, a camada “A” representa a região de perda de material para as camadas mais profundas, a cama “B” é a região onde ficam acumulados os materiais perdidos provenientes da camada “A”, a camada “C” representa a matriz decomposta e a camada “R” representa a matriz não decomposta (SEABRA, 2005). A representação está disposto conforme mostrado na Figura 2:

Figura 2 – Camadas básicas de horizontes do solo.



Fonte: (RIZZO 2008).

A introdução de contaminantes no solo pode resultar na perda de diversas funções do mesmo, além de provocar a contaminação de águas subterrâneas. O solo atua como um filtro capaz de reter, em sua maioria, impurezas presentes nele. A contaminação de solos ocorre através da introdução de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos que possam afetar a composição do solo e em alguns casos a saúde humana (WEBER e SANTOS, 2013).

Os tipos de poluentes encontrados no meio ambiente que contaminam solos e cursos d'água são em sua maioria, orgânicos, inorgânicos inclusive os metais (COUTINHO e BARBOSA, 2007; ANDRADE et al., 2010).

3.1.1 Poluentes orgânicos

Os principais poluentes orgânicos correspondem a todos os compostos que possuem carbono em sua estrutura. Os poluentes alvos da biorremediação mais

estudados são os hidrocarbonetos presentes na mistura complexa do petróleo e seus derivados. O petróleo é constituído, essencialmente, de carbono e hidrogênio, associado a pequenas quantidades de compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados, sendo a predominância dos hidrocarbonetos acíclicos saturados (alcanos) bem como os cíclicos (cicloalcanos) e os aromáticos. Os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xileno) que compõem a maior parte dos derivados de petróleo (por exemplo, gasolina, diesel) são de maior preocupação ambiental e a saúde humana (LEMOS et al., 2009).

A atividade industrial do petróleo e seus derivados é um grande problema à contaminação do meio ambiente (solos, águas subterrâneas, rios, etc) durante as etapas de exploração, refino, transporte e as operações de armazenamento e descarte do petróleo e/ou de seus derivados, podem vir a ocorrer derramamentos acidentais (ANDRADE et al., 2010).

Estes poluentes são mais efetivamente degradados por bactérias e fungos, sendo as bactérias mais utilizadas no processo de biorremediação. Porém algumas espécies de plantas tem se mostrado viáveis em estudos para aplicação na descontaminação de hidrocarbonetos derivados de petróleo. A maioria dos hidrocarbonetos possui baixa solubilidade em água, consequentemente afeta a susceptibilidade ao ataque microbiano resultando em baixas taxas de metabolização do poluente (COUTINHO e BARBOSA, 2007; LEMOS et al., 2009).

3.1.2 Poluentes inorgânicos

Os poluentes inorgânicos de modo geral correspondem aos compostos inorgânicos que não possuem carbono à sua estrutura, incluindo os metais. Esses compostos basicamente são divididos em: ácidos, bases, sais e óxidos porém, em algumas situações o carbono pode aparecer na estrutura do composto mas devido a forma como está ligado é considerado inorgânico, como é caso do CO₂ por exemplo. De modo geral, estes são encontrados em agroquímicos ou agrotóxicos por exemplo, em pesticidas à base de (arsênio, nitrogênio, fósforo, ferro, chumbo, mercúrio, etc), adubos inorgânicos, alguns tipos de herbicidas, etc, os quais são bastante utilizados na agricultura intensa. Estes poluentes levantam uma série de questões de impacto negativo, não somente ao solo causando a infertilidade do mesmo, danos à

microbiota, às espécies vegetais ao redor, como também a saúde humana e a contaminação do lençol freático por lixiviação (COUTINHO e BARBOSA, 2007; MADALÃO et al., 2012).

Por sua vez, as fontes de contaminações por metais ocorrem por meios antropogênicos e até mesmo de forma natural, essa última resulta da ação do intemperismo de minerais. Já a contaminação através da ação do homem está associada principalmente às atividades de mineração, mas também às atividades de polimento de metais, fundição, efluentes industriais, fertilizantes agrícolas, etc. Quando se tem a contaminação do solo consequentemente, pode-se ocorrer a percolação do poluente para o lençol freático, afetando águas subterrâneas (VASCONCELLOS et al., 2012).

Os principais metais pesados presentes no solo e nos produtos utilizados na agricultura são: cádmio, cromo, cobre, ferro, níquel, manganês, mercúrio, chumbo, zinco, selênio, entre outros (TAVARES, 2009).

Entretanto, sabe-se que alguns dos elementos denominados metais pesados (cromo, cobre e zinco), em pequenas concentrações são componentes estruturais e funcionais essenciais para os seres vivos por possuírem como características, a propensão em perder elétrons formando íons com cargas positivas que tendem a ser solúveis em fluidos biológicos, pois é na forma catiônica que os metais desempenham suas principais funções biológicas (BERTOLAZI et al., 2010).

Porém em altas concentrações (altos níveis de toxicidade), não apenas exercem efeitos negativos no crescimento das plantas (bloqueio de enzimas de grupos funcionais de moléculas biologicamente importantes, por exemplo, os sistemas de transporte de nutrientes essenciais e íons), como também afetam os processos bioquímicos que ali ocorrem com reflexos diretos na fertilidade e na produtividade das culturas, bem como na possibilidade da contaminação da cadeia alimentar animal e humana (TAVARES, 2009). Assim a técnica fitorremediação principalmente através de plantas hiperacumuladoras e de associações micorrízicas (associação simbiótica entre fungos como os Basidiomicetos e Ascomicetos e raízes de plantas, onde o fungo fornece nutrientes e água para a planta e esta fornece para o fungo carboidratos provenientes da fotossíntese) tem se mostrado em estudos científicos (ANSELMO e JONES, 2005; TAVARES, 2009; BERTOLAZI et al., 2010; VASCONCELLOS et al.,

2012; LOPES, 2013; TAVARES et al., 2013) como uma ótima alternativa para remediação de solos contaminados por metais.

3.2 BIORREMEDIAÇÃO – Aspectos gerais

As técnicas de biorremediação englobam uma série de tecnologias em que se utiliza o metabolismo dos microrganismos associados as condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento dos mesmos para eliminação ou redução, completa ou parcial em níveis aceitáveis de contaminantes ambientais (RIZZO et al., 2008). Portanto, a biorremediação vem sendo desenvolvida visando explorar a diversidade genética e a versatilidade metabólica microbiana para a transformação de contaminantes, em produtos menos tóxicos que podem ser integrados nos ciclos biogeoquímicos naturais, ou a degradação total do contaminante (mineralização) (COLLA et al., 2007). A Figura 3 ilustra um esquema de biorremediação de um solo contaminado.

Figura 3 – Esquema básico do processo de biorremediação em um solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo e derivados.



Fonte: USEPA 2001 apud ALVES 2013.

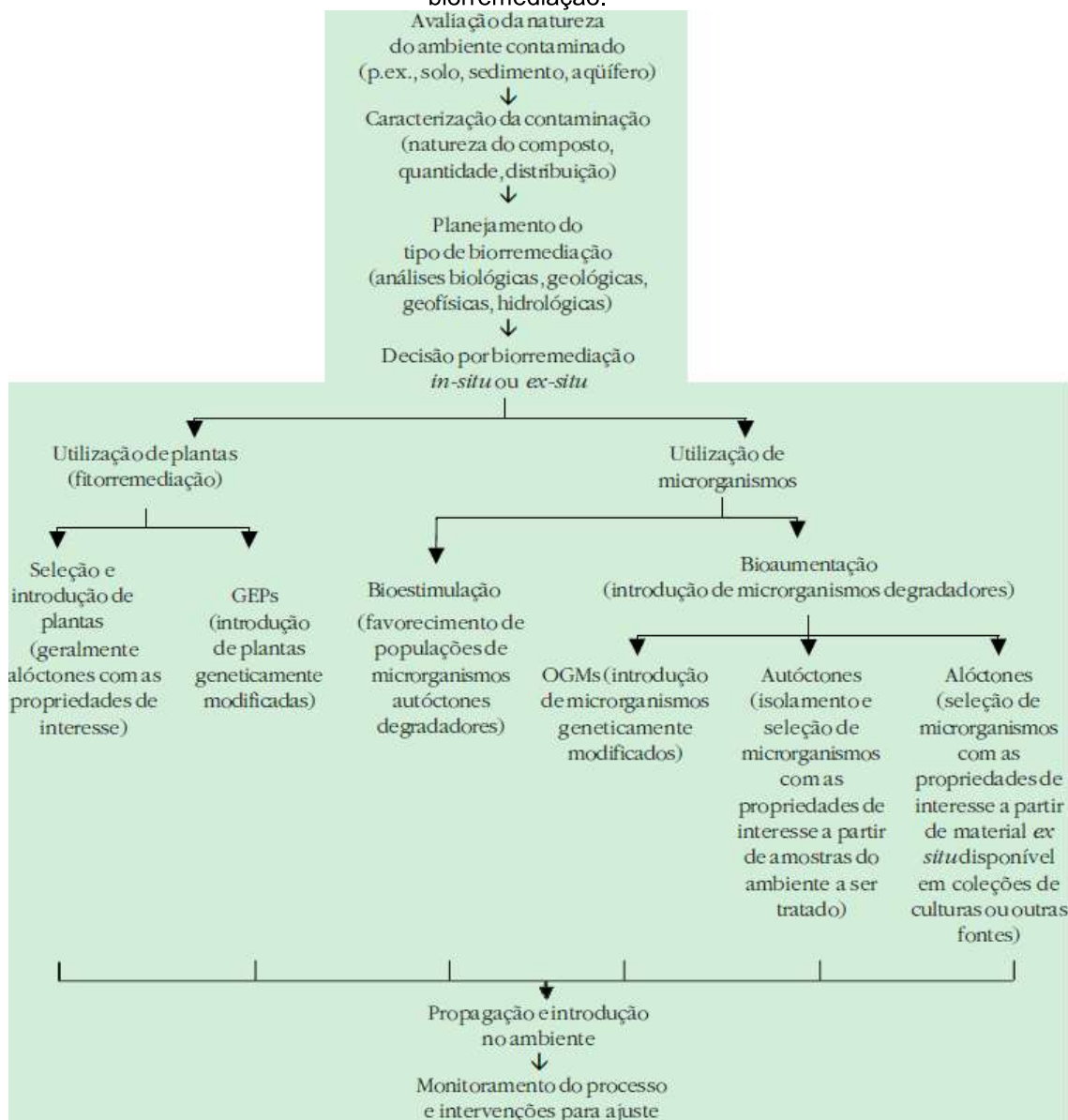
A biorremediação pode ser aplicada não somente à solos contaminados como aborda este trabalho mas também à ambientes como o ar e água (superficiais, subterrâneas e efluentes industriais), contaminados por diversos poluentes, por exemplo, compostos orgânicos HPA's (Hidrocarbonetos aromáticos), BTEX (formado pelos hidrocarbonetos: benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos); inorgânicos (ex: pesticidas); metais pesados (chumbo, zinco, cádmio, etc), entre outros. Se tratando

em termos de biorremediação de solos, existem diferentes tecnologias a serem empregadas no processo as quais se subdividem em tecnologias *in situ* e *ex situ*, a primeira se caracteriza por ser um tratamento realizado no próprio local já a segunda por ser realizada fora do local onde ocorreu a contaminação. São exemplos de tratamento *in situ*: bioventing; biosparging; atenuação natural monitorada, etc e exemplos de tratamento *ex situ*: landfarming; biorreatores; compostagem, etc. E ainda, estratégias (bioestimulação, bioaumentação, engenharia genética, etc) para o aumento da eficácia do processo que serão tratadas com mais detalhes ao longo do trabalho (MOREIRA, 2011; PEREIRA e FREITAS, 2012; RIZZO, 2008).

Para se obter uma descontaminação eficaz da área afetada é necessário o conhecimento das variáveis que determinam o sucesso da biorremediação. Essas variáveis são: os microrganismos (autóctones ou alóctones); as características do solo em relação a composição e concentração dos componentes (areia, argila, silte, etc); o tipo, concentração e disponibilidade do contaminante; fatores químicos e físicos (pH, temperatura, umidade, aeração); concentração e disponibilidade de nutrientes para então escolher a melhor técnica de biorremediação a ser empregada de acordo com as condições levantadas e após realizar um bom planejamento do processo (GAYLARDE et al., 2005; RAMINHO, 2015), um exemplo está ilustrado na Figura 4.

Por se tratar de um sistema interativo entre solo/contaminante/microbiota torna-se complexo de prever um modelo geral de comportamento para esse tipo de tecnologia. As condições ambientais podem influenciar a biorremediação de duas formas: no desenvolvimento dos microrganismos e sua atividade metabólica; nas propriedades físicas e químicas dos contaminantes. Por isso deve-se analisar criteriosamente os parâmetros do processo que acarretará em uma maior eficiência do mesmo. Geralmente são realizados testes em laboratórios de bioestímulo pela adição de nutrientes e ou surfactantes para a estimulação de microrganismos autóctones, e bioaumentação em que é realizada a adição de microrganismos degradadores geneticamente modificados ou não (GAYLARDE et al., 2005; WEBER e SANTOS, 2013).

Figura 4 – Esquema geral das etapas para definição e implementação de um processo de biorremediação.

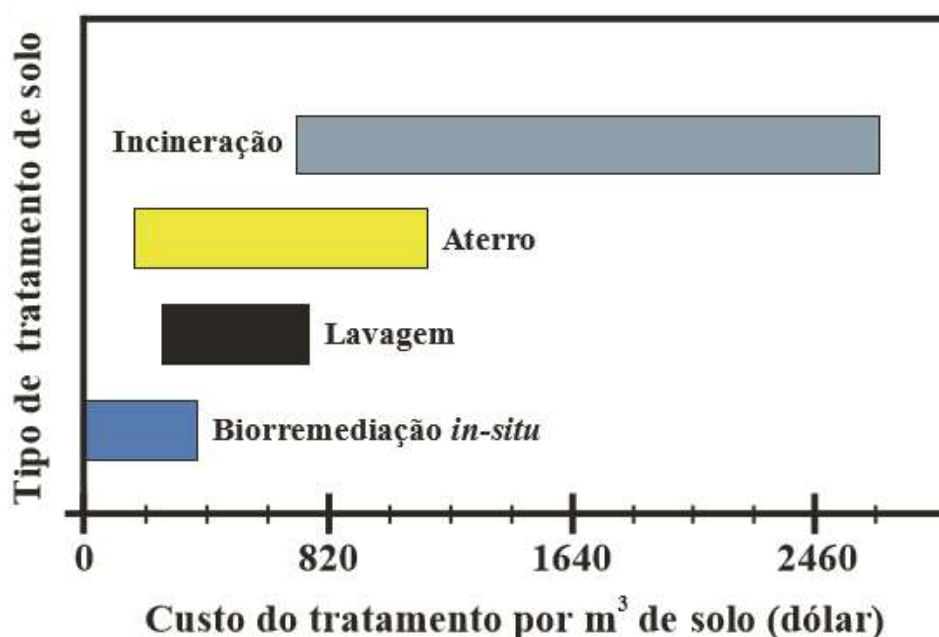


Fonte: GAYLARDE et al., 2005

Como já mencionado, a complexidade desta biotecnologia onde a eficácia da remediação depende de vários fatores, podem surgir alguns problemas durante o processo. Alguns dos principais são: devido a diversidade de contaminantes presentes na área afetada, o que dificulta a seleção de microrganismos capazes de realizar a biodegradação; em relação a concentração dos contaminantes, quando são baixas dificulta o acesso dos microrganismos e os mesmos podem não produzir as enzimas necessárias, e quando são altas podem inibir a atividade metabólica dos mesmos, entre outros, o que consequentemente influenciará na taxa de degradação e no tempo para a biorremediação ocorrer (GAYLARDE et al., 2005; RIZZO, 2008).

Esta biotecnologia já vem sendo estudada e utilizada há alguns anos em vários países, principalmente nos EUA, na remediação de áreas contaminadas e em certos casos, dependendo da área a ser tratada, do tipo e concentração do contaminante, é uma tecnologia que apresenta menor custo e maior eficiência na remoção dos contaminantes do que as técnicas físicas e químicas (incineração e lavagem de solos) (ZILIO, 2013). A seguir, na Figura 5 é mostrada uma comparação entre os custos de tratamento de solos empregando diferentes técnicas de remediação.

Figura 5 – Comparação entre os custos de tratamento de solos contaminados empregando diferentes técnicas de remediação.



Fonte: EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) apud ANDRADE et al., 2010.

Com isso, os bioprocessos vem ganhando espaço em termos não só de custos, mas também como uma opção ambientalmente mais sustentável, causando menos danos ao meio ambiente. Visto que, atualmente há uma conscientização maior com as questões ambientais não somente pelas pessoas mas também pelas empresas devido uma maior rigidez quanto ao cumprimento das legislações ambientais (CALAZANS e SANTOS, 2016).

Portanto o objetivo geral da biorremediação é induzir ou acelerar os processos biológicos naturais de forma a tornar os compostos menos tóxicos ou totalmente mineralizados, e assim incorporá-los ou não, novamente no ciclo biogeoquímico (REGINATTO et al., 2011).

3.3 MICRORGANISMOS

Os microrganismos possuem uma grande importância na natureza contribuindo para a manutenção e sobrevivência das comunidades vegetais e animais, através de atividades como: fixação de nitrogênio atmosférico, decomposição de matéria orgânica, produção de húmus; ciclagem de nutrientes produção de compostos complexos que agregam valor nutricional ao solo; decomposição de poluentes que é o foco desse trabalho; controle de doenças e pragas, entre outras (RIZZO, 2008; PEREIRA e FREITAS, 2012).

Os microrganismos são encontrados em proporções diferentes em diversos ambientes como o solo, água, ar, os quais com o passar do tempo conseguem se adaptar ao ambiente e às fontes de energia e carbono disponíveis para sua sobrevivência e desenvolvimento. O solo por apresentar a natureza heterogênea complexa e dinâmica, permite uma maior diversidade de microrganismos interagindo em um estado de equilíbrio dinâmico (RIZZO, 2008).

Sua superfície contém grandes números de microrganismos que incluem bactérias aeróbicas e anaeróbicas, fungos, actinomicetos e protozoários. Na camada de 0 à 20 cm de profundidade pelo fato de conter maior acúmulo de matéria orgânica do solo por deposição de cobertura vegetal, é a parte que possui maior concentração e até mesmo diversidade de microrganismos (REGINATTO *et al.*, 2011). Na Tabela 1 é mostrado uma relação de concentração de microrganismos (organismos/gramas de solo $\times 10^3$) de acordo com a profundidade do solo (cm).

Tabela 1 - Distribuição de microrganismos em diferentes profundidades de perfil do solo (organismos/gramas de solo $\times 10^3$).

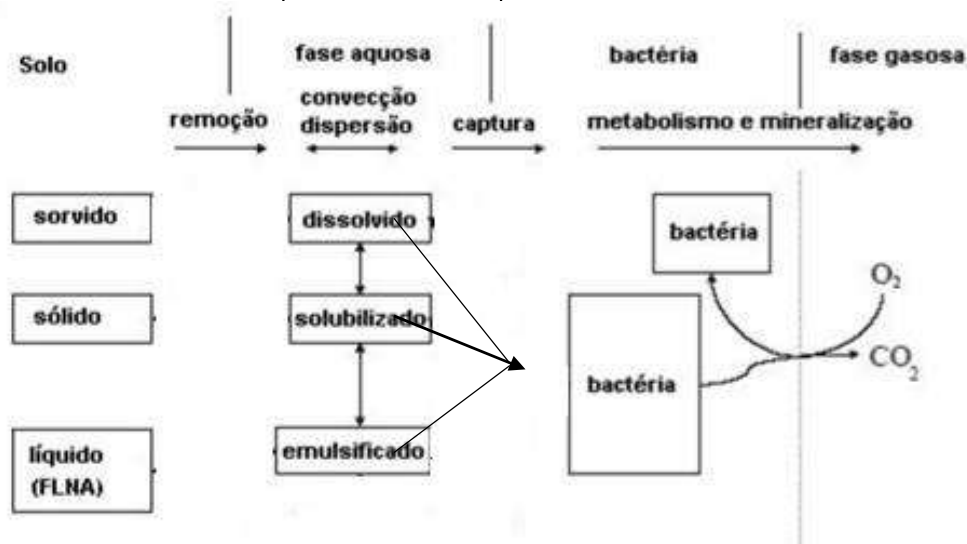
Profundidade (cm)	Bactérias aeróbicas	Bactérias Anaeróbicas	Actinomicetos	Fungos	Algas
3-8	7800	1950	2080	119	25
20-25	1800	379	245	50	5
35-40	472	98	49	14	0,5
65-75	10	1	5	6	0,1
135-145	1	0,4	0	3	0

Fonte: MOREIRA e SIQUEIRA 2002 apud REGINATTO *et al.* 2011.

Na Figura 6 é demonstrado um mecanismo geral dos processos envolvidos na biodegradação de contaminantes inicialmente presentes no solo pelas bactérias. O contaminante se encontra no solo de forma inacessível aos microrganismos e pode

ser encontrado sorvido (adsorvido ou absorvido) à matriz porosa, presente na fase sólida ou na fase líquida (SILVA, 2004).

Figura 6 – Processos envolvidos na biodegradação de contaminantes inicialmente presentes no solo pelas bactérias.



Fonte: SILVA 2004.

Para os contaminantes se tornarem disponíveis aos microrganismos é necessário ocorrer a dessorção, dissolução ou mobilização do contaminante da “fase solo” para a fase aquosa e assim, serem transportados por mecanismos de convecção e dispersão para que haja o contato contaminante-substrato (SILVA, 2004; REGINATTO, 2011).

Na remoção de metais pesados do ambiente e efluentes industriais, muitas bactérias e fungos tem sido utilizados como organismos bioacumuladores, devido a capacidade de adsorver estes metais a componentes presentes na superfície da parede celular e acumulá-los em organelas ou ligá-los a proteínas do seu interior celular (PEREIRA e FREITAS, 2012). Por outro lado a técnica fitorremediação principalmente através de plantas hiperacumuladoras e de associações micorrízicas, tem se mostrado em estudos científicos como uma ótima alternativa para remediação de solos contaminados por metais. Destaca-se alguns exemplos de plantas fitorremediadoras hiperacumuladoras das famílias *Brassicaceae* (*B. juncea* - mostarda-da-índia, *B. napus* - canola), *Asteraceae* (*Heliantus annuus* - girassol), *Euphorbiaceae* e *Leguminosaeae* (*Medicago sativa* - alfafa). (ANSELMO e JONES, 2005; TAVARES, 2009; BERTOLAZI et al., 2010).

Em relação aos compostos orgânicos HPA's, algumas bactérias já foram identificadas como degradadoras desses compostos principalmente as dos gêneros

Pseudomonas, *Aeromonas*, *Microbacterium*, *Flavobacterium*, entre outras (JACQUES *et al.*, 2007). Para a degradação dos BTEX estão as bactérias das espécies pertencentes aos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Achromobacter*, *Acinetocater*, etc (ANDRADE, 2009; LOPES, 2012; WEBER e SANTOS, 2013).

Os fungos apresentam características que os tornam interessantes para a biorremediação, de poluentes orgânicos por exemplo, a capacidade de crescer sob condições de estresse ambiental que podem limitar o crescimento bacteriano. O crescimento dos fungos é induzido quimiostaticamente em direção a fonte de carbono, por meio de alongamento e ramificação das hifas, favorecendo a colonização de grandes áreas e assim o sistema de biodegradação pelas enzimas produzidas pelos fungos, bem como o favorecimento para o ataque bacteriano (ANDRADE, 2009; PEREIRA e FREITAS, 2012). Entre os fungos utilizados estão os do gênero *Aspergillus* e *Penicillium*, os quais possuem várias espécies que assimilam os hidrocarbonetos e *Thricoderma* e *Mortierella ssp* os quais são proeminentes de solos. Porém estes fungos metabolizam de forma incompleta, necessitando da associação de bactérias para uma degradação mais eficiente (COLLA *et al.*, 2008; WEBER e SANTOS, 2013).

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO

De fato, o correto estabelecimento de condições ambientais adequadas para o processo de biorremediação é determinante para um resultado eficaz. São vários os fatores que controlam o processo contribuindo para que os microrganismos envolvidos, sobrevivam e cresçam no meio. Assim, os termos especificidade e condições do meio devem ser estudados para cada tipo de aplicação do processo, uma vez que, todas as aplicações são dependentes de análises criteriosas de acordo com tipo de solo, contaminante, consórcio microbiano por exemplo, para que a biorremediação tenha resultados satisfatório (RIZZO *et al.*, 2008; RAMINHO, 2015).

Fatores como concentração de contaminante, quantidade de microrganismos no meio ou a quantidade de enzimas específicas quando são afetados interferem de modo positivo ou negativo na velocidade de degradação do contaminante (ANDRADE *et al.*, 2010).

Segundo MOREIRA e SIQUEIRA apud RAMINHO 2015, a biorremediação tem como base três condições do ponto de vista microbiológico: I. Disponibilidade do contaminante no meio para o microrganismo ou ataque enzimático; II. Existência de microrganismos com capacidade metabólica para absorver nutrientes e catabolizar os contaminantes; III. Condições ambientais adequadas para o crescimento e desenvolvimento da atividade dos microrganismos.

A seguir, alguns dos principais fatores que precisam ser controlados durante o processo de biorremediação.

Temperatura

É um dos parâmetros ambientais mais importantes não somente nas características físicas como solubilidade, viscosidade, sorção (absorção ou adsorção), etc dos compostos presentes no solo, mas também devido a sua influência na sobrevivência e no metabolismo dos microrganismos, devido a relação com a energia cinética das reações químicas. Microrganismos que atuam aproximadamente na faixa de temperatura entre 0°C e 20° C, são conhecidos como psicrófilos, enquanto que os mesófilos atuam na faixa entre 20°C e 40°C e acima de 40° C tem-se os termófilos (RIZZO, 2008; ALVES, 2013).

A disponibilidade no meio dos componentes presentes no solo são influenciados pela temperatura. Acelerada taxa de biodegradação e altas atividades enzimáticas estão associadas à altas temperaturas, sempre observando a faixa de temperatura ótima para cada espécie de microrganismo envolvido no processo, por outro lado, temperaturas muito acima do valor ótimo causa desnaturação de proteínas e enzimas importantes do processo, bem como torna o oxigênio menos solúvel em água. Assim como temperaturas mais baixas reduz a taxa de biodegradação desses componentes, pelo fato de causar diminuição da fluidez e da permeabilidade da membrana celular que controla o transporte de nutrientes e contaminantes entre o meio exterior e interior da célula microbiana (RAMINHO, 2015; GAYLARDE et al., 2005).

A variação da temperatura influencia indiretamente na taxa de biodegradação do contaminante, pois afeta suas propriedades físicas e químicas, podendo torna-lo indisponível ou até mesmo tóxico aos microrganismos. Um bom exemplo de que a temperatura é um parâmetro importante a ser analisado no processo, é que faixa ótima

para os microrganismos metabolizarem com eficiência os hidrocarbonetos está entre 25°C e 30° C, na qual se encontra a temperatura média da maior parte dos solos brasileiro contaminados por esses poluentes. Ou seja, reforça a aplicabilidade da técnica de biorremediação nesse tipo de solo (ANDRADE et al., 2010).

Potencial hidrogeniônico (pH)

A alteração do pH no solo é um importante indicativo da atividade microbiana. A maioria dos solos apresenta valor de pH entre 4,0 e 8,5, as camadas superficiais de solos de clima mais úmido, tendem a ser mais ácidos devido a lixiviação dos compostos formados pela matéria orgânica, já em solos de clima seco o solo tende a apresentar caráter mais alcalino. A maioria dos microrganismos envolvidos no processo de biorremediação apresentam faixa ideal de pH próximo da neutralidade, possuindo atividade máxima de degradação entre 6,5 e 8,5. Por isso quando o pH do meio se torna extremamente ácido ou básico, é indicado realizar a correção do meio, uma vez que, a taxa de biodegradação decai, diminuindo a eficiência do processo (RIZZO, 2008; RAMINHO, 2015; SALVI, 2013).

Disponibilidade de receptores de elétrons – Aeração

Os microrganismos precisam de energia para crescerem e se desenvolverem no meio. Sabe-se que para os microrganismos aeróbicos o oxigênio é um fator essencial para o seu crescimento e conseqüentemente, para a degradação dos poluentes presentes no meio (SALVI, 2013). Em condições aeróbicas a molécula de oxigênio além de agir como o receptor final de elétrons, é também o substrato nas reações de degradação através das enzimas oxigenases. Sendo assim uma importante variável de ser controlada em processos que empregam o uso de biorreatores, uma vez que, a aeração contribui para manter o controle da temperatura ótima de crescimento e desenvolvimento dos microrganismos. Por outro lado, quando se utiliza microrganismos sob condições anaeróbicas (fermentação) a obtenção de energia na forma de ATP nesse caso, se dá por outras moléculas receptoras de elétrons. Portanto, a ausência desses receptores interfere na eficiência da biodegradação, devido à falta de energia adquirida através das reações de respiração celular ou fermentação (ALVES, 2013; ANDRADE et al., 2010; PEREIRA e FREITAS, 2012).

Umidade do solo

O teor de umidade afeta diretamente o crescimento e a atividade dos microrganismos devido à água ser um componente indispensável do protoplasma celular. A umidade também interfere no transporte dos nutrientes e dos contaminantes, conseqüentemente na captação dos mesmos (RIZZO, 2008). De acordo com SALVI 2013, atividade da água e sua disponibilidade dependem das interações entre o conteúdo da água, a temperatura e a natureza do ambiente (solo) devido a suas características como distribuição do tamanho dos poros, estabilidade e a composição mineralógica, as quais influenciam a retenção da água e captação pelos microrganismos e as raízes das plantas (REGINATTO et al., 2011).

Segundo Silva (2004), a faixa ideal para umidade do solo deve estar entre 40 e 85% da capacidade de retenção da água do solo ou de aproximadamente 12 a 30% em peso, para que taxas ótimas de degradação sejam obtidas. Sabe-se que a umidade reduzida no solo afeta não só o transporte de nutrientes mas também a movimentação dos microrganismos para a degradação dos contaminantes. Por outro lado, quando se tem um excesso de umidade no solo, a movimentação do ar é afetada reduzindo a disponibilidade de oxigênio, o qual é essencial para o metabolismo aeróbico. Assim, o valor ótimo de umidade depende das características do solo e das propriedades do contaminante envolvidos no processo (RAMINHO, 2015; SALVI, 2013).

Agitação

O movimento restrito dos microrganismos no solo afeta a eficiência do processo de biorremediação uma vez que, a não acessibilidade aos nutrientes implica no não desenvolvimento da microbiota e a não acessibilidade aos contaminantes, diminui a eficiência da biodegradação. Para degradar contaminantes recalcitrantes e pouco solúveis é desejável também que os microrganismos estejam agregados para aumentar a eficiência do processo. Quando a biorremediação ocorre *in situ*, a adição de água no solo otimiza o transporte dos microrganismos e compostos, mas em contrapartida causa a lixiviação dos poluentes para o lençol freático por exemplo, e ainda pode causar o excesso de umidade no solo dificultando a proliferação dos microrganismos. Já no tratamento *ex situ* (por exemplo em biorreatores), a agitação

mecânica é uma ótima ferramenta de homogeneização do meio para maximizar o contato entre microrganismos, nutrientes e substrato (contaminantes), além de promover a aeração do meio (RIZZO, 2008; REGINATTO et al., 2011).

Nutrientes

Os microrganismos precisam de nutrientes essenciais básicos para sua sobrevivência e para realizar os processos metabólicos de biodegradação, tais como o nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, ferro e outros minerais em baixo nível (ALVES, 2013). Depois da fonte de carbono como fonte orgânica, o nitrogênio e o fósforo são os elementos mais essenciais ao crescimento celular (RAMINHO, 2015). No caso de microrganismos aeróbicos os nutrientes básicos inorgânicos são: nitrogênio, fósforo, potássio, os quais são adicionados se necessário durante o processo de biodegradação, a fim de prevenir limitações nutricionais, que por sua vez, devem ser adicionados de forma lenta. Porém quantidades excessivas de certos nutrientes como o fosfato e o sulfato podem bloquear o metabolismo microbiano. Já o nitrogênio dependendo da sua quantidade e do tipo adicionado, pode diminuir o pH do solo (SILVA, 2004).

É necessário o conhecimento prévio do teor de matéria orgânica, expresso pela quantidade de carbono orgânico antes de adicionar os nutrientes. Durante a biorremediação os nutrientes NPK (nitrogênio, fósforo, potássio) são utilizados na forma de nitrato de amônio (NH_4NO_3), di-hidrogeno fosfato de potássio (KH_2PO_4) e nitrato de potássio (KNO_3) (Betancur-Galvis *et al.*, 2006 apud ANDRADE et al., 2010). Uma forma fácil de adicionar o nitrogênio que o metabolismo microbiano assimila é na forma de ureia, cloreto de amônio ou nitrato de amônia. Já o fósforo pode ser adicionado na forma de fosfato de potássio, fosfato de sódio, polifosfato, etc (RIZZO, 2008).

De acordo com SILVA 2004, dependendo dos constituintes específicos e dos microrganismos envolvidos na biodegradação a relação de Carbono: Nitrogênio: Fósforo necessária está na faixa de 100:10:1 a 100:1:0,5.

Tipo, disponibilidade e concentração dos contaminantes

O tipo e a forma que os contaminantes se encontram no solo, influenciam profundamente no processo de biorremediação. A estrutura química dos contaminantes interfere na capacidade dos microrganismos metabolizarem esses compostos. Alguns contaminantes são mais facilmente biodegradados do que outros pelos microrganismos, os mais difíceis de metabolizar são conhecidos como recalcitrantes. (ANDRADE et al., 2010).

A disponibilidade dos contaminantes está relacionada não somente com o movimento restrito dos microrganismos no solo, mas também com a solubilidade, já que quanto maior for a solubilidade em água desses compostos maior a biodegradação dos mesmos. Dessa forma, surge como alternativa para aumentar a eficácia da biorremediação, a adição de surfactantes por exemplo, nos casos em que o contaminante são hidrocarbonetos (compostos hidrofóbicos) e a adequada homogeneização do sistema solo/contaminante/microbiota. De modo geral, os surfactantes interagem com os compostos presentes nos hidrocarbonetos tornando-os solúveis em água (RIZZO, 2008; SALVI, 2013).

A concentração do contaminante associado à quantidade de enzimas catalisadoras produzidas pelos microrganismos são fatores que interferem na velocidade de degradação do contaminante. Outro fator relacionado à concentração do contaminante é a toxicidade, uma vez que, a concentração elevada do contaminante acima do nível de tolerância causa a toxicidade dos microrganismos levando a ineficiência do processo de biodegradação ou ainda, os microrganismos podem não sobreviverem (BARGATO, 2006; RAMINHO, 2015).

Tipo de solo

O tipo e a composição do solo a ser tratado também exerce um papel fundamental na eficiência do processo de biorremediação. As características do solo relacionadas à porosidade, textura, consistência, permeabilidade e coloração dependem de sua composição química. O solo é classificado em três grandes grupos: arenosos, argilosos e silteusos, devido à proporção de partículas de areia, argila e silte, respectivamente, presentes no solo. Os componentes do solo podem limitar através

da adsorção e ou absorção (sorção) a biodegradação dos contaminantes presentes no meio. No caso de ocorrer sorção, ou seja, a captação dos contaminantes de seu estado dissolvido, fortemente, eles podem se apresentar indisponíveis aos microrganismos limitando assim a biodegradação (SEABRA, 2005; RIZZO, 2008).

A densidade e a permeabilidade são influenciadas diretamente pelas características de textura e porosidade do solo, assim afetando o comportamento de transporte dos gases e água. Devido as interações químicas e as partículas de areia serem maiores, os solos arenosos (com maior percentual de areia) possuem alta permeabilidade e porosidade, por isso facilita o transporte dos compostos (água, nutrientes, contaminantes, etc), ao contrário dos solos com maior teor de silte e argila devido às suas partículas serem menores. Por isso solos arenosos são mais fáceis de serem tratados, por outro lado, esse fator de alta permeabilidade e porosidade tendem a favorecer a contaminação por percolação do contaminante no lençol freático (COUTINHO e BARBOSA, 2007; RAMINHO, 2014).

3.5 ESTRATÉGIAS DE AUMENTO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE BIORREMEDIAÇÃO

São vários os fatores para o estabelecimento das condições ambientais relacionados ao contaminante e ao ambiente a ser tratado, que influenciam na eficiência do processo de biorremediação, como citado anteriormente. Assim, com o objetivo de aumentar a atividade microbiana para acelerar o processo natural de biodegradação, uma vez que, essas estratégias não incluem tecnologias ativas de remediação, são utilizadas estratégias para estimular o desenvolvimento de microrganismos no local de tratamento (RIZZO, 2008). São utilizadas como estratégias: bioestimulação (adição de agentes estimulantes como, oxigênio, nutrientes), bioaumento (inoculação de consórcios microbianos enriquecidos), adição de surfactantes, adição de material estruturante e até mesmo o uso de engenharia genética (PEREIRA e FREITAS, 2012).

3.5.1 Bioestímulo (Atenuação Natural Acelerada)

A bioestimulação busca principalmente impulsionar o crescimento da microbiota nativa e tem como objetivo a correção das condições ambientais e nutricionais visando o condicionamento do habitat natural dos microrganismos autóctones de modo a acelerar a atenuação natural, de modo a estimular o seu desenvolvimento (ANDRADE et al. 2010).

Para que os microrganismos realizem a descontaminação do solo, é necessário a correção de nutrientes inorgânicos (nitrogênio, fósforo e potássio), correção da umidade, pH, temperatura, aceptores finais de elétrons como oxigênio (nos processos aeróbicos), a fim de aumentar a atividade microbiana. No caso de microrganismos aeróbios que degradam contaminantes que possuem carbono orgânico em sua fórmula, estes utilizam o carbono como principal fonte de energia. Basicamente no caso de microrganismos anaeróbicos faz a correção dos mesmos fatores com algumas diferenças, por exemplo no tipo deceptor final de elétrons que no caso seria o nitrato, pois não se utiliza aeração no sistema (SANTOS, 2007; REGINATTO *et al.*, 2011; RIZZO, 2008).

Para se aplicar essa estratégia deve-se atentar na identificação e análises dos microrganismos autóctones (natural do solo) capazes de degradar o contaminante do meio e que as condições ambientais são insuficientes para obter altas taxas de degradação, fazendo as devidas correções para estimular o metabolismo microbiológico. Uma vez que, a falta da correção desses fatores limita a eficiência do processo de degradação dos contaminantes pelos microrganismos (DEON et al., 2012; RAMINHO, 2014).

3.5.2 Bioaumento e Bioenriquecimento

Quando se identifica uma insuficiência de microrganismos autóctones para a biodegradação dos contaminantes mesmo após a aplicação do bioestímulo, é que se aplica como tentativa de aumentar a eficiência, a estratégia de bioenriquecimento e/ou bioaumento. A estratégia de bioenriquecimento baseia-se na introdução de microrganismos exógenos por não pertencer a microbiota nativa da região contaminada. Já o bioaumento consiste na retirada da microbiota nativa do próprio

solo contaminado, cultivadas *in vitro* e novamente inseridas em maior concentração no ambiente, ambas as estratégias tem o objetivo de intensificar o crescimento microbiano participando de interações e transformações ecológicas. Os microrganismos exógenos inseridos no solo contaminado deve ter características como: degradar o contaminante presente; possuir alto nível de atividade enzimática; não ser patogênico; não produzir substâncias tóxicas, para que o bioenriquecimento tenha sucesso. Devido a esse fato é que alguns autores destacam o bioaumento mais eficaz na descontaminação de solos, visto que, a microbiota nativa já está adaptada ao meio (RAMINHO, 2015; RIZZO, 2008; SILVA, 2004).

3.5.3 Surfactantes

Quando se trata de contaminantes derivados de petróleo (hidrocarbonetos) a sua disponibilidade no solo, pode ser limitada pela sorção (absorção, adsorção) causada pelos componentes do solo, portanto dificultando a captação dos mesmos pelos microrganismos e consequentemente afeta a biorremediação. Uma alternativa para reverter essa situação é o uso de surfactantes (por exemplo, SDS – dodecil sulfato de sódio) e/ou biosurfactantes que nesse caso, possuem a função de emulsionantes e dispersantes a fim de romper a tensão superficial do óleo, fazendo com que fique na forma coloidal facilitando a descontaminação do solo (ZILIO, 2011). Pelo fato da maioria dos surfactantes (sintéticos) serem considerados tóxicos aos microrganismos, tem-se cada vez mais estudado a aplicação de biosurfactantes (por exemplo glicolipídeos). Os biosurfactantes além de possuírem baixa toxicidade aos microrganismos, são biodegradáveis, diminuindo assim o impacto negativo ao solo (DEON et al., 2012; RAMINHO, 2014).

3.5.4 Engenharia Genética

A engenharia genética por unir as técnicas de biologia molecular e os avanços na bioinformática, vem surgindo como uma ótima alternativa para a otimização de processos no geral, por exemplo, na indústria alimentícia, fármacos, ambiental, etc. No processo de biorremediação o melhoramento dos microrganismos é uma ótima alternativa na questão de adaptação ao meio e aumento da taxa de degradação dos

contaminantes. É fundamental identificar os microrganismos nativos e melhor conhecer seu comportamento e processos metabólicos no ambiente contaminado. Um exemplo da utilização da engenharia genética é a aplicação das estratégias de bioaumentação e bioenriquecimento, que visam reinserir a microbiota nativa em maior concentração depois de cultivada *in vitro* e inserir microrganismos exógenos no meio, respectivamente, ambos podendo ter passado por melhoramento genético ou não. Por outro lado, ainda há pouco conhecimento sobre os impactos negativos ao ambiente causado por essa alteração genética. Mas a engenharia genética através da biologia molecular, por usar técnicas precisas de análises das comunidades microbianas mais aptas à atuarem na biorremediação, torna-se portanto, uma ferramenta eficaz para o monitoramento de estudos de impactos ambientais. Pode ocorrer também em solos mais férteis a troca do material genético de forma natural por meio da troca de plasmídeos entre os microrganismos (RIZZO et al., 2006; WEBER e SANTOS, 2013).

3.5.5 Adição de material estruturante

Já foi visto que são vários os fatores que influenciam a taxa de degradação do contaminante, como as características do solo (temperatura, pH, umidade, etc), aeração (no caso de microrganismos aeróbios), nutrientes, tipo, concentração e disponibilidade de contaminantes, etc. A adição de material estruturante se faz uso para melhorar as características do solo relacionadas à textura e consequentemente a permeabilidade. Essas características são influenciadas pelos componentes do solo compostos de argila e silte que por serem partículas menores dificultam a percolação. Os materiais estruturantes adicionados podem ser de origem orgânica, por exemplo, casca de coco, grãos de café, palha, cavaco de madeira, etc ou de origem inorgânica, por exemplo, areia, perlita, calcário, etc. Esses materiais facilitam o transporte de nutrientes e contaminantes pelo fato de diminuírem a densidade do solo, aumentando a sua porosidade. Portanto, melhora a percolação dos compostos influenciando em uma melhor captação de nutrientes e degradação do contaminante pelos microrganismos (SANTOS, 2007; RAMINHO, 2014).

3.6 TECNOLOGIAS PARA O PROCESSO DE BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS - *in situ* e *ex situ*

Atualmente a conscientização em relação as questões ambientais tem se tornado crescente na sociedade. Processos que solucionam ou minimizam os impactos ambientais negativos, estão sendo cada vez mais estudados de forma a otimizar tanto o processo em termos biotecnológicos quanto em termos de custo. Em busca disso, tecnologias de biorremediação tem se destacado como boas alternativas de descontaminação de solos e aquíferos as quais são divididas em tecnologias *in situ* (*on site*) e tecnologias *ex situ* (*off site*) (RIZZO, 2008; RAMINHO, 2015).

Apesar de existir várias tecnologias de biorremediação, a escolha mais adequada dependerá de critérios como: características do solo (geológica e hidrogeológica); características físico-química do contaminante; volume da contaminação e custo (PEREIRA e FREITAS, 2012).

As técnicas *in situ* são realizadas no próprio local sem que haja a remoção do local contaminado, portanto se torna mais atrativa economicamente e evita menor risco de contaminação durante o transporte e armazenamento do solo contaminado. Outro fator positivo é que os produtos finais de uma biorremediação efetiva são água e gás carbônico (mineralização), os quais não apresentam toxicidade ao meio e aos organismos presentes (MOREIRA, 2011). Por outro lado, quando não ocorre a mineralização completa pode ocorrer percolação dos compostos derivados da degradação para o lençol freático. (RIZZO, 2008).

As técnicas *ex situ* por sua vez, são realizadas fora do local contaminado onde é necessário a remoção do solo. Esse processo gera um maior custo quando comprado às técnicas *in situ*, porém possui a vantagem de ter as variáveis mais facilmente controladas, por exemplo, em biorreatores. Essas técnicas se fazem necessárias quando se tem uma alta concentração de contaminante com risco de expandir para o local e para as pessoas (PEREIRA e FREITAS, 2012).

3.6.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO *IN SITU*

3.6.1.1 Atenuação Natural Acelerada (ANA)

Técnica que inclui o fornecimento de oxigênio para as zonas saturadas e insaturadas do solo e nutrientes necessários para que se tornem disponíveis aos microrganismos, de forma a acelerar o processo natural de biodegradação (ALVES, 2013). Estão subdivididas conforme a seguir:

- **Bioventing (Bioventilação):** consiste na injeção de ar lentamente na zona insaturada do solo com o objetivo de favorecer a oxigenação no meio, suprindo assim a necessidade do oxigênio para os processos metabólicos realizado pelos microrganismos. É geralmente aplicada à degradação de hidrocarbonetos de petróleo (processo aeróbico), o ar injetado fornece aos microrganismos condições de transporte de oxigênio adequada para que a degradação ocorra por tempo mais longo e de forma eficiente (OLIVEIRA et al., 2008; CALAZANS e SANTOS, 2016).
- **Air Sparging e Biosparging:** baseiam-se na injeção de ar na zona saturada do solo, ou seja, no lençol freático com o objetivo de transferir os contaminantes até a zona insaturada onde se encontram a microbiota capaz de degradá-los. No air sparging a injeção de ar é sobre pressão porém não a ponto de os contaminantes serem volatilizados para a atmosfera e sim degradados pelos microrganismos na superfície. Já no biosparging além da injeção de ar pode-se introduzir nutrientes essenciais para os processos metabólicos dos microrganismos (RIZZO, 2008; CALAZANS e SANTOS, 2016).
- **Bioslurping (Extração multifásica):** é uma tecnologia que associa a injeção de ar do bioventing através de bombeamento a partir da aplicação de alto vácuo em poços de extração simultânea das diversas fases dos hidrocarbonetos, onde a fase vapor e a fase líquida extraídas são encaminhadas para sistemas de separação específico (separadores vapores/liquídos). É aplicada na recuperação de contaminantes livres no solo e também em águas subterrâneas. Através desse bombeamento o fluxo de ar gerado pela extração à vapor gera aeração na superfície aumentando o oxigênio, com isso aumenta-se o processo de degradação (RIZZO, 2008; RAMINHO, 2015).

3.6.1.2 Atenuação Natural Monitorada (ANM) ou Atenuação intrínseca

Ocorre por meio de processos naturais biológicos, físicos e químicos de biodegradação, volatilização, diminuição da concentração inicial do contaminante e sorção (absorção/adsorção) do contaminante pelos microrganismos. Ou seja, é um processo não monitorado em que apenas a concentração do contaminante é controlada (PEREIRA & FREITAS, 2012). Trata-se de uma técnica de menor impacto negativo, menor custo e muito utilizada para remediação de contaminações por vazamentos subterrâneos de combustíveis BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos). Porém, não deve ser usada como justificativa para não se realizar a descontaminação da área, devendo antes realizar algumas análises como: histórico da qualidade e potencial do solo de regressão natural; demonstração de que está ocorrendo a atenuação natural indiretamente e indicadores microbiológicos, teores de oxigênio dissolvido, etc (ALVES, 2013; RAMINHO, 2014).

3.6.1.3 Fitorremediação

De acordo com o significado (*fito* = planta; *remediação* = corrigir) é uma técnica que envolve o emprego de plantas (árvores, arbustos, plantas rasteiras e aquáticas) geneticamente modificada ou não e sua microbiota associada à amenizadores (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica, etc) do solo, com o objetivo de remover, imobilizar ou pelo menos reduzir os níveis de contaminação de ambientes poluídos. Além de ser uma técnica versátil, a fitorremediação pode ser aplicada à diferentes meios: aquáticos, ar ou solo, o que irá determinar as variáveis do emprego da técnica é o tipo de processo que se quer implementar (BELO, 2006; SILVA, 2006; TAVARES et al., 2013).

É importante ressaltar que as plantas através da secreção de compostos (carboidratos, aminoácidos, vitaminas, etc), os quais enriquecem o solo, estimulam o desenvolvimento dos microrganismos contribuindo para a eficiência do processo de biorremediação (VASCONCELLOS et al., 2012).

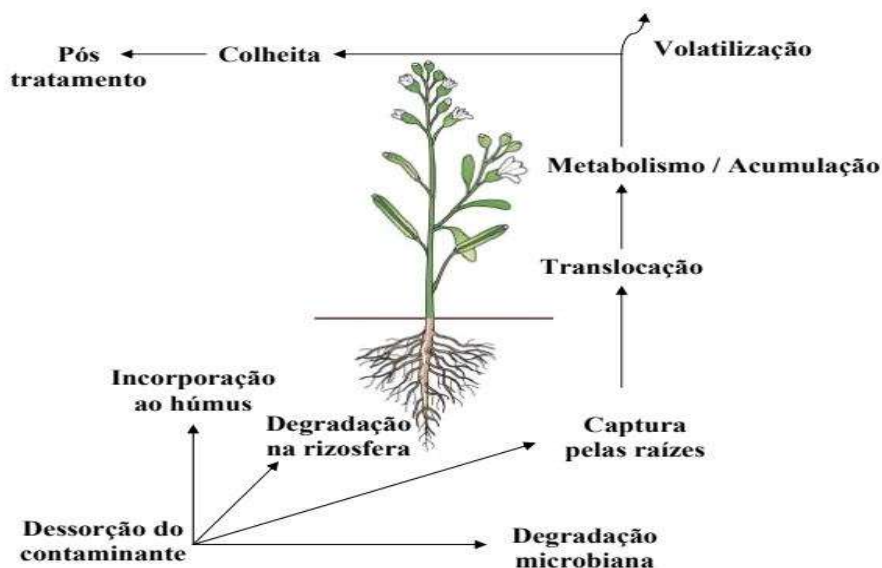
A fitorremediação é aplicada principalmente para remediar áreas contaminadas por metais pesados (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Ni, Hg, Se), compostos inorgânicos (NO₃, PO₄), elementos químicos radioativos (U, Cs, Sr), hidrocarbonetos derivados de

petróleo, pesticidas e herbicidas (atrazine, bentazona, compostos clorados), resíduos orgânicos industriais (PCPs, PAHs), entre outros (SILVA, 2006; MOREIRA, 2011). No caso de contaminação de solos diversos materiais têm sido testados como amenizadores, a fim de estabilizar o meio para assim, imobilizar elementos-traço (metais catiônicos e oxiânions em concentrações menores que 1g.Kg^{-1}) sendo o calcário, óxidos de ferro, manganês e lama vermelha (LOPES, 2013).

As plantas em sua maioria são capazes de sequestrar e/ou degradar contaminantes. Uma vez que, cádmio, zinco, cobre, ferro, molibdênio, níquel, etc, são metais de transição necessários para o desenvolvimento e crescimento normal da planta, pois desempenham funções específicas no metabolismo celular (VASCONCELLOS, 2012). Porém, quando em excesso no solo, esses elementos podem inibir o crescimento das plantas e causar alterações nas comunidades vegetais e de microrganismos, exercendo efeitos adversos interferindo nas funções do ecossistema, com consequência ao meio ambiente e à saúde pública (BERTOLAZZI et al., 2010).

Portanto os poluentes que podem ser alvos da fitorremediação compreendem os compostos orgânicos (hidrocarbonetos derivados de petróleo, solventes clorados, pesticidas), compostos inorgânicos (nitrato, sulfato, cianetos), explosivos, metais pesados, radionuclídeos (nuclídeo instável radioativamente) e lixiviados de aterro sanitário, e que se encontram até 20 metros de profundidade (PAVANELLI, 2007). A figura 7 ilustra os mecanismos gerais envolvidos no processo de fitorremediação:

Figura 7 – Mecanismos envolvidos no processo de fitorremediação.



Fonte: (PAVANELLI,2007).

As técnicas de fitorremediação são subdivididas em: fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação, fitovolatilização e fitoestimulação as quais dependem da natureza físico-química do contaminante e características do solo uma vez que, as espécies vegetais apresentam vários mecanismos fisiológicos para realizar o processo de fitorremediação (MOREIRA, 2011).

- **Fitoextração:** utiliza plantas hiperacumuladoras e pode ser aplicada tanto para remediar solos contaminados por metais pesados quanto contaminados por compostos orgânicos. Essa técnica consiste na absorção dos contaminantes pelas raízes da planta, onde podem ser armazenados ou transportados e acumulados nas partes aéreas por meio da translocação entre os tecidos (MOREIRA, 2011; VASCONCELLOS, 2012).
- **Fitoestabilização:** tem o objetivo de limitar a mobilização e a biodisponibilidade de metais no solo. Geralmente é uma técnica aplicada à contaminação por metais pesados, solventes clorados e fenóis. Esse mecanismo ocorre quando o contaminante é incorporado à lignina da parede vegetal ou ao húmus do solo precipitando os metais sob formas insolúveis, com isso limita a sua difusão no solo através de uma cobertura vegetal e pelo fato de as raízes das plantas específicas reduzirem a quantidade de água no solo (ANSELMO & JONES, 2005; MOREIRA, 2011; VASCONCELLOS *et al.*, 2012).
- **Fitodegradação:** é aplicada à contaminantes orgânicos onde a planta degrada e/ou mineraliza as moléculas orgânicas, quebrando-as em moléculas menores por ação de enzimas específicas dentro das células vegetais por exemplo, as desalogenases (degrada solventes clorados e pesticidas). Dessa forma essas plantas favorecem a degradação mais rápida dos contaminantes orgânicos pela ação dos microrganismos (MOREIRA, 2011).
- **Fitovolatilização:** basicamente consiste na captação do contaminante, converte-os em formas voláteis, em seguida a volatilização do mesmo através da transpiração da planta. Ou apenas capta o contaminante e ocorre a liberação sem a conversão. A volatilização pode ocorrer a partir do solo através da biodegradação na rizosfera associado à ação dos microrganismos. É aplicada a contaminação por compostos orgânicos e inorgânicos, tendo como vantagem a transformação de contaminantes em formas menos tóxicas ao ambiente (TAVARES, 2009; VASCONCELLOS *et al.*, 2012).

- **Fitoestimulação:** ocorre de forma associada aos microrganismos presentes no solo. Através das raízes das plantas é liberado nutrientes necessários (aminoácidos e polissacarídeos, como fonte de energia) ao enriquecimento e desenvolvimento da microbiota, estimulando a atividade microbiana. As plantas por sua vez, também podem secretar enzimas biodegradativas que irão atuar na degradação dos contaminantes (MOREIRA, 2011; VASCONCELLOS *et al.*, 2012).

3.6.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO *EX SITU*

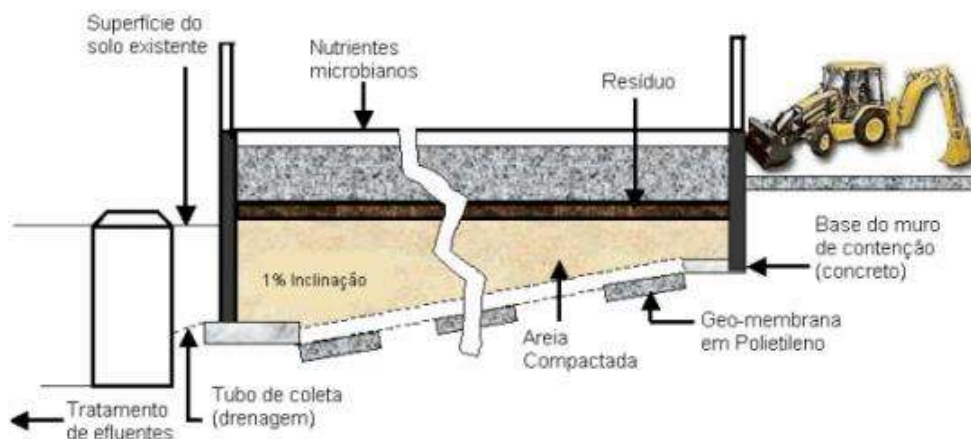
3.6.2.1 Landfarming

Consiste na disposição dos resíduos sólidos (mais utilizado para contaminação por hidrocarbonetos e resíduos industriais perigosos) em células de tratamento (camadas de 0,5 m de espessura) sobre a camada superficial do solo, basicamente ocorre uma compostagem dos resíduos com controle da lixiviação e escoamento superficial dos líquidos originados dessas células alocadas em forma de pilhas. Essas células são de grande extensão e são realizadas na superfície do solo, por esta concentrar uma maior atividade de degradação pelos microrganismos (RIZZO, 2008). Por se tratar de um processo aeróbio diferente dos processos desenvolvidos em aterros sanitários, que neste caso a decomposição é anaeróbica em razão da escassez de ar dentro das células (processo por camadas de aterramento).

Geralmente o processo de aragem é realizado por tratores agrícolas, o que torna o processo de baixo custo quando comparado ao processo de incineração. Na técnica de landfarming pode ocorrer a volatilização dos hidrocarbonetos simultaneamente a degradação realizada pelos microrganismos (OLIVEIRA *et al.*, 2008). Portanto na landfarming é realizada a aragem frequente do solo com o objetivo de oxigenar as células para que a própria microbiota do solo degrade os contaminantes, a correção das condições nutricionais, pH e umidade, aumentando a atividade dos microrganismos aeróbicos (PEREIRA e FREITAS, 2012).

A célula de tratamento é construída de forma planejada e impermeabilizada para que não haja percolação dos lixiviados contaminando o lençol freático, sendo estes coletados e tratados devidamente em reatores (OLIVEIRA *et al.*, 2008), como pode ser visto na figura abaixo:

Figura 8 - Demonstração da camada de nutrientes, microrganismos, resíduo e areia compactada em uma célula de tratamento landfarming.



Fonte: (OLIVEIRA et al.,2008).

3.6.2.2 Compostagem

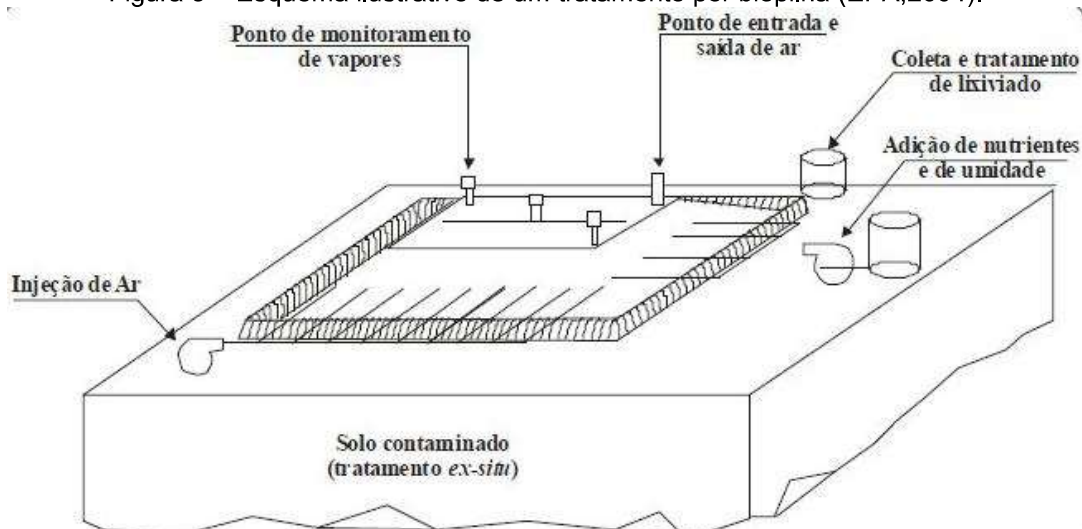
É uma técnica variante da landfarming mais utilizada em solos contaminados por compostos orgânicos (por exemplo os HPA's – hidrocarbonetos poliaromáticos) e funciona mais como estimulação do processo natural de degradação. Consiste na remoção do solo contaminado do local de origem e na sua disposição em forma de pilhas. O objetivo é obter um controle da lixiviação e do escoamento superficial dos líquidos originados durante a fase de decomposição (JACQUES et al., 2007). A fim de aumentar a taxa de permeabilidade do solo e a taxa de transferência de oxigênio, é adicionado ao solo contaminado palha, serragem, madeira, etc os quais também funcionam como fonte de carbono e energia para a sobrevivência e estabilização da atividade microbiana em degradar os contaminantes transformando-os em material orgânico estabilizado, CO₂ e água (ZILIO, 2013).

3.6.2.3 Biopilhas

Como alternativa de melhorar a técnica de landfarming, a técnica de biopilhas consiste no entanto, em um sistema mais complexo e se diferencia pelo fato de serem aeradas por meio de injeção ou extração de ar através de tubos perfurados colocados por toda a pilha, ou seja, o ar é forçado a se mover no solo. É uma tecnologia aplicada para a redução de contaminantes orgânico e tem demonstrado eficiência na

biodegradação de hidrocarbonetos petrolíferos, hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA) e cloretos. Geralmente as estruturas das biopilhas são constituídas: de uma base impermeável a fim de evitar a percolação de lixiviados para os locais não contaminados; uma malha de dutos perfurados instalados na base da biopilha e conectados a um compressor que garante a injeção de ar no sistema; algumas ainda são recobertas por plástico pra evitar a liberação de contaminantes para atmosfera e para proteção de intempéries; quando ocorre adição de umidade constrói-se um sistema de coleta do lixiviado. Assim pode ocorrer tanto a degradação dos contaminantes pela ação dos microrganismos quanto pela volatilização dos constituintes voláteis, através dos coletores sem que os mesmos escapem para a atmosfera (SILVA, 2004; ANDRADE et al., 2010; MOREIRA, 2011). A Figura 8 ilustra um tratamento por biopilha

Figura 9 – Esquema ilustrativo de um tratamento por biopilha (EPA,2004).



Fonte: <http://www.scielo.br/img/revistas/eq/v35n3/a02fig06M.jpg>

A técnica de biopilha permite o controle de alguns fatores que interferem na eficiência do processo, por exemplo: em relação as características do solo (textura, pH, umidade, temperatura, densidade microbiana, concentração de nutrientes) e em relação as características dos contaminantes (volatilidade, estrutura química, concentração e toxicidade), exceto em relação as condições climáticas (temperatura ambiente, precipitação, vento). A eficiência da técnica depende dos controle dos parâmetros citados (SILVA, 2004).

3.6.2.4 Biorreatores

A vantagem de quando se utiliza biorreator é que se tem um controle mais efetivo dos parâmetros portanto, permite um tratamento rápido e eficaz, uma vez que, as concentrações dos nutrientes e oxigênio, pH, temperatura, umidade são mais facilmente monitorados. Assim permitindo o monitoramento contínuo do sistema e suas variáveis que são essenciais ao desenvolvimento dos microrganismos e consequentemente, a otimização da biorremediação. Por outro lado, o tamanho dos biorreatores limitam a quantidade de solo a ser tratado, além de necessitar de um pré-tratamento do solo. Os tipos de biorreatores que podem ser empregados no tratamento de solos contaminados são os biorreatores de fase sólida (tipo a seco) e os biorreatores de fase semi-sólida ou de lama (slurry reactors), sendo esse último amplamente mais utilizado. Os tipos de biorreatores serão tratados com mais abrangência em outro tópico (MOREIRA, 2011; SALVI, 2013; CALAZANS & SANTOS, 2016).

3.7 BIORREACTORES

As técnicas de tratamento ex situ (landfarming, biopilha, compostagem e biorreatores) veem sendo as mais utilizadas no processo de biorremediação de solos contaminados. Entretanto, pelo fato de o local a ser tratado muitas vezes possuir limitações como por exemplo, dificuldades operacionais, limitações geológicas da área contaminada, influências climáticas, etc, o uso de biorreatores vem se destacando como uma opção ainda mais atrativa em relação as técnicas citadas. Além de ser uma técnica que permite um maior controle dos parâmetros do processo, inclusive o tempo de descontaminação do solo mesmo que existam outros fatores que interferem (tipo de solo, tipo e concentração de contaminante, etc), ainda assim essas vantagens mesmo quando comparadas ao custo de operação podem ser uma opção mais interessante (RAIMUNDO, 2004).

A escolha da configuração do biorreator a ser empregado no tratamento depende das avaliações e necessidades do material a ser tratado. Algumas características a serem analisadas vão desde as características do contaminante (tipo, concentração, recalcitrância, etc); os microrganismos envolvidos (aeróbicos, anaeróbicos ou

facultativos); as condições físicas exigidas para a degradação ocorrer (aeração, agitação), uma vez que a agitação no biorreator tem a função de manter a homogeneidade do meio, remover os gases e o calor gerado no processo, até características do solo (percentual da composição, pH, umidade, etc); composição da mistura a ser tratada (solo, água, contaminante) entre outras. Essas características influenciam até mesmo na escolha das estratégias de biorremediação a serem empregadas (bioestímulo, bioenriquecimento, adição de material estruturante, surfactantes, etc) (RIZZO, 2008; SALLES, 2013).

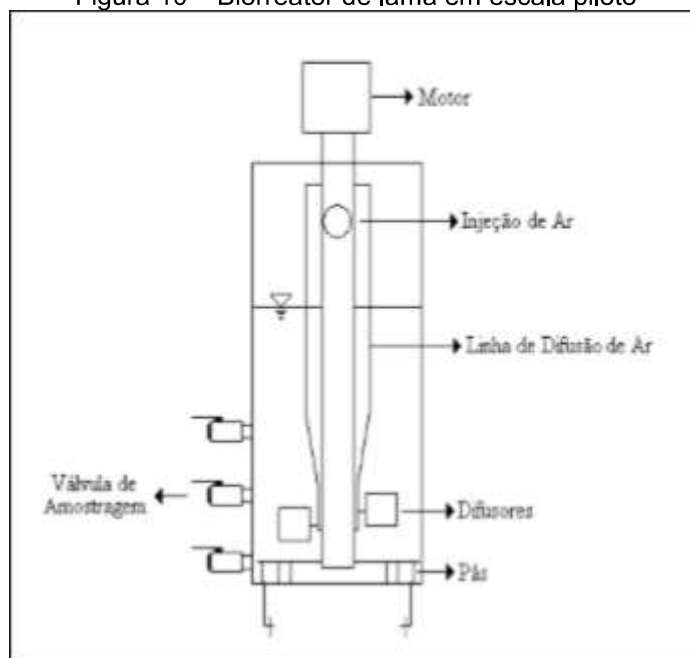
Com isso existem dois tipos de configurações de biorreatores que são mais utilizados na biorremediação de solos contaminados: os biorreatores de fase sólida (tambor rotativo ou tambor fixo) os quais possuem configuração horizontal e os biorreatores de fase semi-sólida (reatores de lama) na configuração vertical. Segundo RIZZO 2008, os biorreatores de fase sólida são mais usados para tratar solos que não passam por um pré-tratamento de remoção das frações mais finas, já os de fase semi-sólida são utilizados quando o solo passa por um sistema de lavagem produzindo assim uma suspensão altamente contaminada com partículas finas de solo. No caso de alguns tipos de contaminantes (por exemplo HPAs – hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) o biorreator de fase lama possui uma eficiência de descontaminação mais alta por permitir o contato entre microrganismos, contaminantes, nutrientes e oxigênio mais íntimo do que em biorreatores de fase sólida (HESHAM, 2006).

3.7.1 Biorreatores de fase semi-sólida (ou reatores de lama)

Para melhorar a eficiência do tratamento do solo, esse tipo de biorreator se dá na forma vertical porém pode ser projetado em diferentes configurações (em cascata, do tipo leito fluidizado, etc), a fim de controlar e otimizar os fatores que influenciam no desenvolvimento e na atividade de degradação microbiana (ex: disponibilização de substratos, nutrientes, pH, temperatura, aeração no caso de microrganismos aeróbicos, etc). Os biorreatores de lama possuem operação similar aos reatores biológicos utilizados no tratamento de lodos ativados (biomassa em suspensão) e podem ser operados através dos sistemas de batelada simples, batelada sequencial ou com alimentação semi-contínua ou contínua (RIZZO, 2008).

Nesse tipo de biorreator (Figura 9 e 10) ocorre a formação de polpa denominada lama (solo em suspensão) devido ser adicionado água ao sistema juntamente com o solo contaminado, onde o teor de sólidos é estabelecido numa faixa de 20 a 40% e as partículas de solo no interior do biorreator não devem exceder o tamanho de 100 μ m (por exemplo, partículas de argila e silte). Quando se tem a formação de lama é necessário uma agitação contínua do sistema, com isso aumenta-se o contato entre nutrientes, microrganismos e contaminantes além de melhorar a taxa de transferência de massa. Usualmente emprega-se associado à esse tipo de tratamento um sistema de lavagem de solos quando se deseja tratar solos com partículas mais grossas (arenosos) (LEMOS et al., 2009; RAMINHO, 2014).

Figura 10 – Biorreator de lama em escala piloto

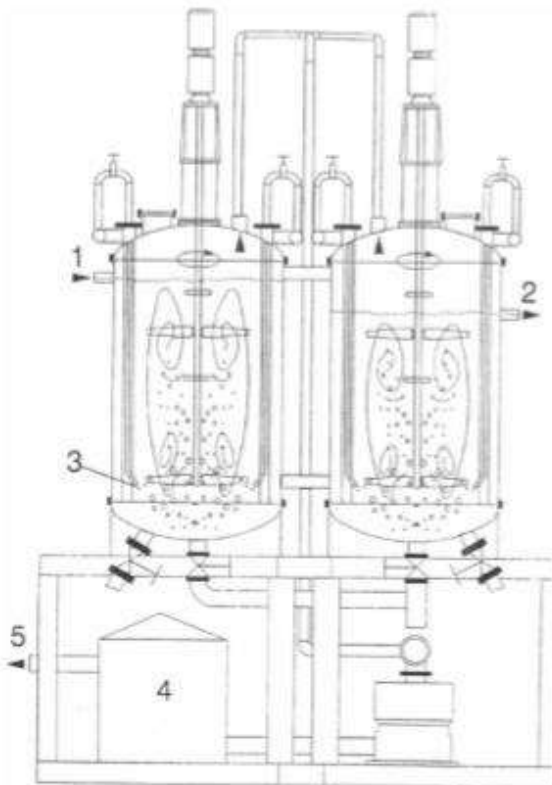


Fonte: RIZZO et al., 2008

O biorreator de lama possui vantagens em relação a homogeneização do solo e da fase lama, o que possibilita um maior contato microrganismos-contaminante proporcionando uma rápida degradação e assim a otimização do processo de descontaminação do solo. Devido a sua estrutura vertical requer uma área pequena para instalação. O sistema de aeração e agitação mecânica favorecem o processo de degradação aeróbica uma vez que, tais microrganismos utilizam o oxigênio tanto como receptor final de elétrons nas vias metabólicas para obtenção de energia quanto como substrato durante as reações de degradação através das enzimas oxigenases. Sendo assim uma importante variável de ser controlada uma vez que, a aeração

contribui para manter o controle da temperatura ótima de crescimento e desenvolvimento dos microrganismos (ALVES, 2013).

Figura 11 – Biorreator de lama em cascata. 1- alimentação. 2- descarga. 3- entrada de ar comprimido. 4- filtro de carvão ativado. 5- saída de ar filtrado.



Fonte: RIZZO et al., 2008

Como já citado, o tratamento de solos arenosos requer uma etapa prévia de separação da fração mais grossa da mais fina, necessitando ser empregado um sistema de lavagem de solo e o tratamento de efluentes gerados no processo, elevando o custo operacional. Tal fato é devido as partículas mais grossas necessitarem de um dispêndio energético maior para manter essas partículas em suspensão (RIZZO, 2008).

3.7.2 Biorreatores de fase sólida

Os biorreatores de fase sólida para esse tipo de processo possuem a configuração cilindro horizontal, as quais são subdivididas em duas formas: tambores rotativos e tambores agitados, que basicamente se diferenciam na forma de mistura. Esse tipo de biorreator diferente dos biorreatores de lama, foram projetados para tratar material com alto teor de sólidos, sendo assim mais adequado para tratar solos contendo

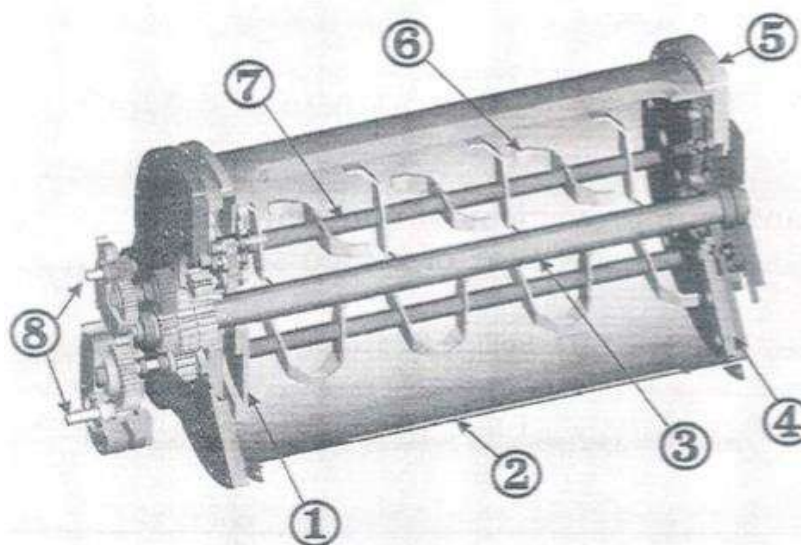
partículas mais grossas (arenosos). O teor de umidade é mantido apenas em níveis suficientes para a sobrevivência e manutenção dos microrganismos, não gerando fase em suspensão, o que pode ser uma desvantagem visto que, a limitação de água pode prejudicar a sobrevivência dos microrganismos (RIZZO, 2008).

- **Biorreatores de tambor rotativo:** nesses biorreatores a homogeneização da mistura é realizada pelo próprio corpo do tambor revolvido para agitar o leito, em torno do seu próprio eixo (SALLES, 2013). A entrada de ar normalmente está localizada na extremidade oposta à da saída de ar e a agitação de mistura no sistema ocorre em regimes suaves (RUTSATZ, 2006). Segundo RIZZO 2008, esses biorreatores possuem a capacidade de carga efetiva em torno de 60% do volume útil do mesmo, apresentando ainda uma agitação e aeração efetiva, por isso é mais indicado ao tratamento de solos com alto teor de sólidos. Uma alternativa à melhorar a transferência de massa e homogeneização no meio (nutrientes, aditivos, contato contaminante-microrganismos) é a incorporação de teores adequados de umidade para melhorar a agitação sem acarretar em agregação de particulado (pellets) e formação de filme de solo na parede do biorreator. Porém para cada tipo de textura do solo (composição) e o tipo de contaminante são necessários estudos para se chegar aos teores ótimos de umidade (RIZZO, 2008).
- **Biorreatores de tambor agitado:** são inseridos nesses biorreatores pás impelidoras no interior do tambor para agitação interna como alternativa para melhorar a eficiência de transferência de massa, a qual era afetada pela formação de filme de solo na parede do biorreator e a formação de agregados de solo (pellets) o que dificultava a homogeneização do meio, porém como desvantagem geram um alto consumo de energia (RUTSATZ, 2006; RIZZO, 2008; RAMIMHO, 2015).

De acordo com SALLES 2013, as características físicas do material a ser tratado em um biorreator é um dos fatores principais para uma homogeneização efetiva. Assim em um estudo realizado por SANER et al. 1996 apud RIZZO 2008, foi desenvolvido um protótipo de biorreator onde o tambor é composto por dois discos de engrenagens circulares conectados a um eixo central e dois eixos secundários onde foram instalados lâminas agitadoras de características específicas para tratar solos

contaminados com hidrocarbonetos mas precisamente o diesel. O resultado foi a otimização do processo de degradação e consequentemente uma eficiente biorremediação desse solo contaminado. Portanto não existe um parâmetro a ser empregado em um processo, onde se tem inúmeras variáveis a serem analisadas e controladas para se obter uma degradação eficiente. A Figura 11 ilustra o sistema representativo do protótipo do biorreator citado acima desenvolvido para o tratamento de solo contaminado por diesel (RIZZO, 2008).

Figura 12 – Esquema representativo do biorreator desenvolvido por SANER et al. 1996 apud RIZZO 2008. 1, 4 e 8 – Engrenagens. 2 – Corpo do biorreator. 3 – Eixo central. 5 – Tampa. 6 – Agitadores. 7 – Eixo agitador secundário.



Fonte: (RIZZO, 2008).

A Figura 12 ilustra um protótipo de biorreator horizontal utilizado no tratamento de solo argiloso contaminado por petróleo desenvolvido por SOARES, 2006 acoplado à um sistema de controle computadorizado que utiliza o software ELISPSE SCADA_R com a finalidade de automatizar e controlar os componentes do sistema (agitação, aeração, inserção de aditivos) e as variáveis do processo (temperatura, umidade, concentração de CO₂), que contém em seu interior um eixo agitador com pás acopladas em formato de “dentes” mais longos e espaçados entre si.

Figura 13 – Biorreator horizontal em escala piloto utilizado no tratamento de solo argiloso contaminado por petróleo acoplado à um sistema de controle computadorizado (a) e das pás agitadoras em seu interior (b).



Fonte: (SOARES, 2006)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do cenário mundial, a tendência para a implantação de processos ambientalmente sustentáveis e de baixo custo, apontam para o crescimento e desenvolvimento do uso da biotecnologia. Pois devido a demanda da intensa atividade industrial e da agricultura, tem cada vez mais degradado os ecossistemas naturais, em destaque o solo como abordado nesta revisão. Em virtude disso, por se tratar de um processo biológico, a tecnologia de biorremediação vem ganhando espaço nos estudos e pesquisas de vários cientistas no Brasil e no mundo, sendo que nos países desenvolvidos, às técnicas de biorremediação já possuem uma implantação significativa em áreas contaminadas.

Na biorremediação mesmo que não ocorra a completa degradação do poluente, este é reduzido à compostos menos tóxicos ao ambiente. Trata-se de uma tecnologia ecologicamente mais correta em comparação com as técnicas de remediações químicas e físicas, por exemplo.

São várias as técnicas de biorremediação existentes: *in situ* e *ex situ* que podem ser aplicadas em áreas contaminadas por diferentes tipos de poluentes. Porém, não existe um regra geral que determine o melhor tratamento para uma área específica, uma vez que, que se trata de um processo complexo onde são analisados fatores ambientais, físicos e químicos em que cada caso possui suas particularidades.

A biologia molecular e a utilização dos bioprocessos, se tratando do uso dos biorreatores aparecem como recursos fundamentais para a aplicação da

biorremediação. O conhecimento dos microrganismos e seu metabolismo e as variáveis das condições do meio (pH, temperatura, umidade, aeração, etc) é de extrema importância para a eficiência dessa biotecnologia. E nos casos que se aplicam o tratamento em biorreatores, estes propiciam um melhor monitoramento das variáveis do processo.

Com a realização dessa revisão da literatura verificou-se que a tecnologia de biorremediação, ainda demanda de mais estudos em relação à mais variedades de microrganismos e plantas e suas propriedades remediadoras, requer também uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos no processo, principalmente relacionado ao tempo de remediação e aos custos operacionais. Porém num mundo em que cada vez mais demanda por soluções biotecnológicas, a biorremediação vem surgindo no mercado como uma ferramenta promissora de remediação de áreas contaminadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Bárbara S. Q. **Levantamento de informação sobre técnicas de biorremediação da contaminação de solos e aquíferos por derramamentos de gasolina.** 2014. 88f. Monografia de especialização. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Medianeira, 2014.

ANDRADE, B. G. N. **Biorremediação de solos contaminados por óleo diesel com o uso da microbiota nativa.** 2009. 18f. (Trabalho de Conclusão de Curso), UEZO, Rio de Janeiro, 2009.

ANDRADE, J. A. et al. **Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados.** Eclet. Quím. v 35. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010046702010000300002> . Acessado em 26 de março de 2018.

BARGATO, M. **Tratamento in situ de solo contaminado por derivado de petróleo e metais.** 2006. 194f. Tese (Doutorado ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BELO, A. F. **Técnicas para fitorremediação de solo contaminado com herbicidas**. 2006. 56f. Tese (Mestrado do Programa de Pós Graduação em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Brasília, DF, ago 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l6938compilada.htm>. Acesso em 08 de junho de 2018.

CALAZANS, R. G.; SANTOS, B. S. **Biorremediação em solos contaminados: ênfase no uso de bactérias rizóbios**. Artigo. Centro universitário UNA. Belo Horizonte/MG, 2016.

COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. **Fitorremediação: Considerações Gerais e Características de Utilização**. Silva Lusitana, vol. 15, p.103-117, Lisboa, 2007.

DEON, M. C. et al., **Biorremediação de solos contaminados com resíduos oleosos através de bioaugmentação e atenuação natural**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, vol. 33, n.1, p. 73-82, jan-jun 2012.

FLEMING, A. **Biorremediação de solo impactado com borra oleosa utilizando resíduo agroindustrial como material estruturante**. Trabalho acadêmico (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitarista), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASO, M. L.; MANFIO, G. P. **Biorremediação: Aspectos biológicos e técnicos de biorremediação de xenobióticos**. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento, n.34, p. 36-43, jan/jun 2005.

HESHAM, A. E. L. et al. **Application of PCR–DGGE to analyse the yeast population dynamics in slurry reactors during degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in weathered oil**. Artigo. Wiley Online Library. 2006. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/yea.1401>>. Acessado em 05 de Maio de 2018.

JACQUES, R. J. S. et al. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos**. Ciência Rural, Santa Maria, v 37, n4, p.1192-1201, 2007.

LE MOS, J. L. S. et al. **Técnicas de biorremediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo**. Artigo. Diálogos & Ciências – Rev. Rede de Ensino FTC, n. 11, p. 47-58, dez 2009.

MOREIRA, I. T. A. **Avaliação da eficiência de modelos de remediação aplicados em sedimentos de manguezal impactados por atividades petrolíferas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

OLIVEIRA, S. D. et al. **Emprego de fungos filamentos na biorremediação de solos contaminados por petróleo: Estado da Arte**. Série Tecnológica Ambiental. CETEM/MCT, 2008.

PAVANELLI, A. G. **Fitorremediação de solo contaminado com petróleo utilizando *Thypha latifolia***. 2007. 71f. Tese (Mestrado em Química e Recursos Naturais), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

PEREIRA, A. R.B.; FREITAS, D. A. F. **Uso de microrganismos para a biorremediação de ambientes impactados**. Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 6, p. 975-1006, 2012.

RAIMUNDO, R. S. **Utilização de biorreatores no tratamento de solos contaminados por hidrocarboneto de petróleo**. 2004. p. 205-219.

RAMINHO, M. L. F. **Utilização de tratamento físico e biológico conjugados empregando reatores de diferentes escalas na remediação de solo contaminado**

por biodiesel. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.

REGINATTO, C.; COLLA, L. M.; THOMÉ, A. **Biorremediação de resíduos oleosos em solos.** Revista CIATEC – UPF, v 3 (2), p. 19-31, 2011.

REICHWALD, D. **Contribuição a gestão ambiental: A biorremediação de solo contaminado com petróleo.** 2011. 44f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental), AVM Faculdade integrada - Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2011.

RIZZO, A. C. L. **Desenvolvimento de biorreator não convencional para o tratamento de solos contaminados por petróleo.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

RUTSATZ, Marcus Darci. **Cultivo em estado sólido: Modelagem e quantificação de biomassa em biorreator cilíndrico horizontal agitado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

SALLES, P. **Avaliação de um reator tipo tambor rotativo para hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de mestrado. São Carlos/SP, 2013.

SALVI, Marina B. **Otimização de biorremediação de colo contaminado com organoclorados utilizando basidiomicetos em biorreatores.** São Paulo, 2013.

SCHENBERG, A. C. G. **Biotecnologia e desenvolvimento sustentável.** Artigo. Rev. Estudos Avançados - USP, n. 24, p. 7-17, out 2010.

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

SILVA, E. P. **Avaliação preliminar do potencial de aplicação de biopilhas para a biorremediação de solos de Guamaré-RN.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos. Natal/RN, 2004.

SILVA, A. C. **Fitorremediação de herbicidas.** Artigo. Rev. Pesquisa & Tecnologia, vol. 3, n.1, p.1-5, jun 2006.

SILVA, D. N. **Remediação de solos impactados com poluentes orgânicos usando os reagentes de fenton.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

SILVA, R. R. **Biorremediação de solos contaminados com organoclorados por fungos basidiomicetos em biorreatores.** 2009. 181f. Tese de doutorado - Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2009.

SOARES, R. P. **Pesquisa e desenvolvimento de biorreator para tratamento de solo.** 2006. 7f. Artigo. XV Jornada de Iniciação Científica – CETEM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

TAVARES, S. R. L. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos.** 2009. 360f. Tese (Doutorado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TAVARES, S. R. L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos.** 1.ed. Rio de Janeiro: [s.n], 2013. 57p.

ZILIO, R. L. **Biorremediação de solos contaminados utilizando biosurfactantes obtidos de resíduos agroindustriais.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2011.

WEBER, B. D.; SANTOS, A. A. **Utilização da biorremediação como ferramenta para o controle da degradação ambiental causada pelo petróleo e seus derivados.** Espirito Santo do Pinhal/SP, v.10, p. 114-133, 2013.