

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM HIDROCARBONETOS POLICÍCLICOS AROMÁTICOS

Gabriele Larissa Hoelscher¹, Bruna Thaina Bartzen¹, Leticia Delavalentina Zanachi¹, Eloisa Mattei², Affonso Celso Gonçalves Jr.³

¹Mestranda no programa de pós-graduação em agronomia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon-PR, Rua Pernambuco, 1777, CEP 85.960-000, Marechal Cândido Rondon-PR. E-mail: gaby.glh@hotmail.com, bruna_bartzen@hotmail.com, leticia_zanachi@hotmail.com. ²Doutoranda no programa de pós-graduação em agronomia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon-PR, E-mail: eloisa-mattei@hotmail.com. ³Químico Industrial, Dr., Professor associado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon-PR, E-mail: affonso133@hotmail.com

RESUMO: Nas últimas décadas, os problemas ambientais, em especial a contaminação dos solos, têm se tornado cada vez mais crítico e frequente, principalmente devido ao desmedido crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial. Entre os vários contaminantes dos solos, destacam-se os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAPs), que são compostos mutagênicos e carcinogênicos aos humanos e aos animais. Uma estratégia para a eliminação dos HAPs do solo é por meio da biorremediação. A biorremediação é uma técnica que utiliza microrganismos que possuem capacidade de metabolizar os contaminantes transformando-os em substâncias inertes, CO₂ e água. Este processo de remediação tem sido intensamente pesquisado e recomendado, visto que, ele é de fácil aplicação, quando comparada a outros métodos, possui uma boa relação custo/benefício e também exerce um baixo impacto sobre o meio ambiente. Assim, o objetivo desta revisão é expor e avaliar os conceitos e processos relacionados à biorremediação, bem como, discutir as técnicas *in situ* e *ex situ*, que estão sendo atualmente utilizadas para remoção dos HAPs no solo.

PALAVRAS-CHAVES: contaminação de solos, microrganismos, remediação.

BIORREMEDIATION OF SOILS WITH CONTAMINATION OF AROMATIC POLYCYCLIC HYDROCARBONS

ABSTRACT: In the last decades, environmental problems, especially soil contamination, have become increasingly critical and frequent, mainly due to excessive population growth and increased industrial activity. Among the various soil contaminants are polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which are mutagenic and carcinogenic to humans and animals. One strategy for the elimination of PAHs from the soil is through bioremediation. Bioremediation is a technique that uses microorganisms that have the ability to metabolize the contaminants by transforming them into inert substances, CO₂ and water. This remediation process has been intensively researched and recommended, since it is easy to apply when compared to other methods. In addition, it has cost-effectiveness and low impact on the environment. Thus, the objective of this review is to expose and analyze the concepts and processes related to bioremediation, as well as to discuss the *in situ* and *ex situ* techniques that are used to remove PAHs in soil.

KEY WORDS: Soil contamination, Microorganisms, Remediation.

INTRODUÇÃO

Dentre os grandes problemas ambientais da atualidade destaca-se a contaminação dos solos, que decorre do descarte inadequado de resíduos orgânicos e inorgânicos provenientes de atividades antrópicas, tanto de forma proposital quanto acidental. Sendo a humanidade geradora de uma enorme quantidade de resíduos, que podem ter origem nas atividades industriais, agrícolas, e do próprio lixo domiciliar. Metais tóxicos, agrotóxicos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos são considerados alguns dos principais resíduos contaminantes do solo (Costa et al., 2008).

Esse acúmulo de substâncias em concentrações indesejáveis é responsável por sérios problemas ambientais, além de prejudicarem a capacidade do solo de desempenhar suas funções, dentre elas: sustentar o crescimento das plantas, determinar o destino da água na superfície do solo, ser o hábitat de muitos organismos (bactérias, fungos, leveduras e protozoários) e servir de sustentação para a construção civil, podendo assim culminar em diversos problemas de saúde para os seres humanos e afetar as diversas formas de vida (Marques et al., 2011).

E apesar da preocupação com a contaminação dos solos ser algo recente, existem várias técnicas de remediação com possibilidade de serem utilizadas, dentre elas a biorremediação. A biorremediação consiste no uso de microrganismos capazes de transformar resíduos contaminantes em substâncias com menor toxicidade (Colla et al., 2008).

Assim, o objetivo desta revisão é expor e avaliar os conceitos e processos relacionados à biorremediação, bem como, discutir as técnicas *in situ* e *ex situ*, que estão sendo atualmente utilizadas para remoção dos HAPs no solo.

BIORREMEDIAÇÃO

Na língua portuguesa, a palavra remediação significa “ato ou efeito de remediar”. Já no contexto de solos contaminados, a palavra remediação possui um conceito ecológico, voltado ao meio ambiente, podendo ser definido segundo o dicionário da língua portuguesa como sendo o: “Conjunto de técnicas para anular os efeitos nocivos de elementos tóxicos ou contaminantes no meio ambiente”. A remediação é o processo de retorno da funcionalidade de solo, água e ar ao que existia antes da poluição (Zabbey et al., 2017).

Assim dentre as inúmeras tecnologias utilizadas para remediação do solo, ressalta-se a biorremediação, sendo esta uma opção para promover a descontaminação dos locais ou a remoção de elementos contaminantes do solo. O método de biorremediação consiste na utilização de processo ou atividade biológica por meio de organismos vivos, sejam

microrganismos que possuam a capacidade de modificar ou decompor determinados poluentes, transformando-os em substâncias menos tóxicas ou inertes (Jacques et al., 2010).

A biorremediação abrange a utilização de microrganismos, de ocorrência natural (nativos) ou cultivada, para degradar ou imobilizar contaminantes em águas subterrâneas e em solos. Diante disso, geralmente, são utilizados bactérias, fungos filamentosos e leveduras. Destes, as bactérias são as mais aplicadas, deste modo, são consideradas fundamentais em trabalhos que envolvem a biodegradação de contaminantes (Andrade et al., 2010).

Essa técnica vem sendo utilizada há anos em vários países e, em diversas situações, apresenta baixo custo e elevada eficiência na remoção dos agentes contaminantes do solo do que os métodos físicos e químicos, sendo atualmente utilizada no tratamento de diversos resíduos e na remediação de áreas degradadas (Nitisakulkan et al., 2014).

CONTAMINAÇÃO DE SOLOS COM HIDROCARBONETOS

Qualquer substância indesejada introduzida no ambiente é referida como um contaminante (Megharaj et al., 2011). Uma área contaminada, por definição, é onde existem concentrações indesejadas de algum material, de maneira planejada, acidental ou natural, os quais foram depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados e que causam danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem (Brasil, 2017).

Assim, o que são hidrocarbonetos? Hidrocarbonetos são compostos orgânicos constituídos apenas por carbono e hidrogênio, cuja principal característica fundamental é a estabilidade das ligações carbono-carbono. Em geral são divididos em alifáticos e aromáticos, diferenciando-se pelas ligações carbônicas (Peruzzo, 2006).

Já os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), representam uma família de mais de 100 compostos orgânicos, contendo dois ou mais anéis aromáticos condensados. São formados, principalmente, em processos de combustão incompleta da matéria orgânica e encontram-se na natureza como contaminantes de solos, ar, água e alimentos. Os HPAs são poluentes orgânicos de importância ambiental e de interesse toxicológico para homens e animais (Caruso e Alaburda, 2008).

Dentre as técnicas de remediação natural, a biorremediação vem sendo bastante utilizada na recuperação de ambientes impactados por hidrocarbonetos de petróleo por utilizar o potencial metabólico de microrganismos e diminuir a toxicidade dos compostos contaminantes (Chaillan et al., 2004).

Os HAPs são gerados naturalmente, e de forma contínua, pela combustão incompleta de substâncias orgânicas, como resíduos vegetais, madeira, matéria orgânica, etc (Jacques et

al., 2007). A presença de hidrocarbonetos altera o ciclo de nutrientes no solo (reduz a disponibilidade) os deixando inférteis, sendo então inadequados para o crescimento e desenvolvimento das plantas por aumentar a sua toxicidade (Zabbey et al., 2017).

Segundo Fent (2004), existem evidências de que devido à bioacumulação de hidrocarbonetos no solo, em raízes de plantas e em outros elementos agrícolas pode acarretar prejuízos à cadeia alimentar de um determinado local e desse modo, a saúde humana é prejudicada pelo consumo desses produtos contaminados. Sempre que um grande volume de hidrocarbonetos alcança a zona saturada do solo, ele pode deslocar a água dos poros do solo (Teramoto e Chang, 2017), assim a contaminação pode ocorrer e se propagar na própria área e com isso impactar seus arredores alterando características naturais ou qualidades do meio.

Dentre os HAPs de maior importância destacamos os BTX (benzeno, tolueno e xileno), sendo estes bastante relacionados com grandes impactos ambientais. A contaminação preferencial da água por esses elementos advém da alta mobilidade dos hidrocarbonetos BTX nos sistema solo-água que ocorre devido ao baixo coeficiente de partição octanol-água (Log Kow) e consequentemente faz com que ocorra a migração preferencial dessas substâncias na água subterrânea por haver redução da absorção pelo solo (Nakhla, 2003).

O transporte dos hidrocarbonetos no solo é caracterizado pela formação de quatro fases: a fase livre é constituída da porção de hidrocarbonetos não miscíveis em água que flutuam sobre o aquífero. A fase adsorvida (fase residual) é uma fina película de hidrocarbonetos adsorvidos aos coloides orgânicos e minerais do solo, ou então, retidos por forças de capilaridade do solo. A fase dissolvida é dada pelo produto dissolvido e transportado na água subterrânea. A fase vapor que compreende a fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa os poros do solo (Verhnjak, 2015).

UTILIZAÇÃO DA BIORREMEDIAÇÃO

Após qualquer acidente que leve a contaminação dos solos e da água se faz necessária a busca por tratamentos que possam sanar o problema ou diminuir seu impacto. Portanto, diversas empresas de consultoria e remediação ambiental têm buscado a biorremediação como opção para reabilitar as áreas atingidas por diversos compostos tóxicos nocivos ao ser humano, como, por exemplo, o benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (Nascimento et al., 2016).

Em vista disso a escolha e aplicação de qualquer uma das técnicas de biorremediação deve ter início em um cauteloso levantamento hidrogeológico, geoquímico e microbiológico do local afetado, pois cada técnica é dependente de diversos fatores como as condições físicas,

químicas e biológicas do local; concentração do contaminante e; tempo requerido para a degradação ou a remoção do composto alvo (Andrade et al., 2010).

O método de biorremediação pode ser *ex situ*, realizado fora do local onde ocorreu a contaminação, ou *in situ*, realizado no local contaminado, sendo esse último o mais difundido e utilizado no mundo (Andrade et al., 2010).

BIORREMEDIAÇÃO *IN SITU*

A biorremediação *in situ* é uma técnica em que o tratamento é realizado no próprio local, sem a remoção do material contaminado, seja solo e/ou água (Marques et al., 2011). Torna-se uma opção para a degradação de contaminantes de hidrocarbonetos, apresentando vantagens, como a eliminação de custos de remoção do material contaminado e redução de riscos com impactos ambientais, ou seja, é uma técnica mais barata e segura (Wetler-Tonini et al., 2010).

As técnicas de biorremediação *in situ* têm sido muito utilizadas para o tratamento de solos e recursos hídricos contaminados com solventes clorados, metais tóxicos e hidrocarbonetos (Folch et al., 2013; Frascari et al., 2015; Roy et al., 2015).

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO *IN SITU*

Bioestimulação (atenuação natural acelerada)

A bioestimulação, também conhecida como atenuação natural acelerada, é o processo que consiste na introdução de nutrientes, seja na forma de fertilizantes orgânicos e, ou inorgânicos na área contaminada, favorecendo o desenvolvimento e crescimento de microrganismos degradadores de poluentes existentes no ambiente contaminado (Miller, 2010), ocasionando o aumento da população microbiana no meio e conseqüentemente, uma degradação mais acelerada do contaminante ali presente (Kanisserye Sims, 2011).

É uma das técnicas de biorremediação mais utilizada na recuperação de áreas contaminadas, devido a facilidade da prática, em que os microrganismos ali presentes, irão nutrir-se dos múltiplos compostos orgânicos necessários para a sua nutrição, manutenção bem como reprodução, culminando na remoção do contaminante (Mariano et al., 2008).

O nitrato (NO_3^-) é um componente importante na bioestimulação, por ser utilizado por alguns microrganismos a partir de duas rotas metabólicas diferentes: metabolismo assimilativo (como fonte de nutrientes, processo que vai da retirada de nutrientes do solo, transporte destes para o interior das células e posteriormente a sua utilização na biossíntese de macromoléculas)

e no metabolismo dissimilativo (receptor de elétrons na produção de energia por meio da desnitrificação) (Costa et al., 2009).

Bioaugmentação

A bioaugmentação é caracterizada pelo aumento da microbiota nativa através de microrganismos alóctones (exógenos ou não indígenos), apesar de considerada uma técnica recente e em fase de desenvolvimento, encontra-se bem descrita na literatura (Andrade et al., 2010). Segundo a normativa da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2007), estes microrganismos pertencem a uma espécie, não nativa de determinada região biogeográfica, os quais são introduzidos em um ecossistema, podendo persistir e até reproduzir-se por um tempo, participando ou não de interações e transformações ecológicas.

Este processo poderá ser aplicado em solos: (a) onde a quantidade de agentes para realizar a biodegradação é baixa ou praticamente nula (b) resíduos que possuem compostos que requerem remediação de múltiplos processos, incluindo àqueles prejudiciais ou tóxicos para os microrganismos e (c) para pequenos locais em que o custo de métodos não-biológicos exceder o custo da bioaugmentação (Mrozik e Piotrowska-Seget, 2010).

Vários são os fatores que irão influenciar na eficiência da bioaugmentação, dentre eles, destacam-se a temperatura, umidade, pH, matéria orgânica, aeração, teor de umidade e o tipo de solo (Mrozik e Piotrowska-Seget, 2010). Além disso, segundo estes mesmos autores, a descontaminação do solo requer conhecimento além do tipo e nível de contaminantes, mas a linhagem mais adequada de microrganismo a ser utilizado, bem como seus consórcios. No entanto, a seleção destes deve basear-se na facilidade de cultivo e crescimento, suportar altas concentrações de contaminantes e na capacidade de sobreviver em condições adversas.

Nesta técnica, são utilizados microrganismos alóctones, bactérias e em alguns casos, fungos, entretanto, atualmente há alguns produtos no mercado, que apresentam microrganismos exógenos, os quais, quando utilizados de forma indiscriminada, podem ocasionar riscos irreparáveis ao meio ambiente, especialmente no que se refere a possibilidade de transferência de informações genéticas para organismos naturais, promovendo desequilíbrio no ecossistema (Weber e Santos, 2013).

Bioventilação

A bioventilação é uma técnica de bioestimulação, onde há a introdução de oxigênio através do solo para estimular o crescimento e a ação dos organismos naturais e/ou aqueles introduzidos pela bioaugmentação (Silva et al., 2014).

Essa técnica, dentre as técnicas de biorremediação *in situ*, destaca-se especialmente pela capacidade de restaurar locais contaminados com produtos petrolíferos ou hidrocarbonetos (Höhener e Ponsin, 2014).

BIORREMEDIAÇÃO *EX SITU*

Nas técnicas *ex situ* o material contaminado é removido do local de origem para realização do tratamento em outro local (Morais Filho e Coriolano, 2010). A remoção pode ser realizada quando se tem a possibilidade de pessoas e/ou do ambiente, próximo do solo a ser biorremediado, serem contaminados, ou quando a presença de altas concentrações de contaminantes demanda a utilização de técnicas específicas como: biopilhas, *landfarming* e também uso de biorreatores (Jacques et al., 2007).

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO *EX SITU*

Biopilhas

A biorremediação por biopilhas é uma técnica em que o solo contaminado é disposto em pilhas, de forma a estimular a atividade microbiana aeróbica no interior dessas, visando assim, promover a biodegradação dos contaminantes ali presentes (Andrade et al., 2010).

Antes da formação das biopilhas e do tratamento biológico, o material contaminado precisa passar por algumas etapas de controle e de pré-tratamento. Primeiramente, o solo deve ser submetido a um estudo prévio, para a comprovação da tratabilidade, o qual pode ser realizado através de testes físico-químicos e de ensaios biológicos (Berger, 2005).

O objetivo destes estudos é avaliar o tipo e a concentração dos poluentes, a presença de possíveis inibidores da biodegradação, a estrutura do material, bem como, os teores ótimos de umidade, de nutrientes, de oxigênio e também a temperatura ideal para a realização do processo (Andrade et al., 2010).

Após esse procedimento, o solo deve passar por uma etapa de pré tratamento mecânico (peneiramento), onde devem ser retirados materiais como plástico, metal e entulho de obras (Berger, 2005). Na sequência, o solo deve ser colocado em pilhas, onde então é realizada a estimulação da atividade microbiana através da aeração, da adição de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e pelo aumento da umidade do solo (Andrade et al., 2010).

Existem basicamente dois tipos de biopilhas: pilhas estáticas e pilhas dinâmicas. No tratamento com pilhas estáticas, é instalado todo um sistema de aeração. Ou seja, uma rede de tubos perfurados é instalada acima da base do solo e então esses são conectados a um soprador ou a uma bomba a vácuo (Berger, 2005).

Já no processo dinâmico, o oxigênio é fornecido através do revolvimento periódico da pilha através de máquinas específicas. Este tipo é mais recomendado quando o solo a ser tratado apresenta tendência de formação de grumos, geralmente em função da presença de altos teores de argila (Seabra, 2005).

Em ambos os tipos, a construção das biopilhas, deve ser realizada sobre uma base impermeável, para assim, reduzir o risco de migração dos lixiviados para a subsuperfície do solo. Além disso, é preciso cobri-las, com uma membrana, também impermeável, para prevenir a liberação de contaminantes para atmosfera (Francisco e Queiroz, 2018).

A biorremediação por biopilha tem como principal vantagem a possibilidade de se ter um controle mais eficiente das condições físicas, químicas e biológicas do solo contaminado. Porém, é um procedimento que deve ser realizado com cautela, para evitar que haja contaminação humana e também, evitar que ocorra a propagação da contaminação para outros meios (Andrade et al., 2010).

Landfarming

O *landfarming* é uma técnica da biorremediação muito utilizada, onde os microrganismos heterotróficos presentes no solo são estimulados a degradar os contaminantes ali presentes. Tal estimulação ocorre por meio do revolvimento do solo, o qual é realizado através de operações de aração e gradagem, da adição de nutrientes e de umidade (Jacques et al., 2007).

Esta técnica pode ser realizada tanto *in situ*, quando a descontaminação do solo ocorrer no mesmo local onde este foi contaminado, ou pode ser realizada *ex situ*, se o solo contaminado for removido para outro local onde o *landfarming* será operado (Moraes Filho e Coriolano, 2016).

O *landfarming* pode ser considerado também como um sistema de tratamento de resíduos. Neste caso, uma área é destinada exclusivamente para esse fim, onde os resíduos são espalhados e misturados à camada reativa do solo, de modo que, a própria microbiota do solo atue como agente de degradação (Jacques et al., 2007).

De acordo com a NBR da ABNT 13.894:1997 (Tratamento no solo – *Landfarming*) todos os processos, desde a realização do projeto até a manutenção das unidades de *landfarming*, devem ser realizados de forma a elevar o máximo possível à degradação, a transformação e/ou imobilização dos contaminantes presentes no solo.

Ainda segundo a norma, para a construção do sistema de tratamento de resíduos, deve haver todo um preparo, para reduzir, ao máximo, os riscos de contaminação de lençóis freáticos por lixiviação de poluentes. É necessário que sejam feitas barreiras laterais, bem como, fazer

uso de uma camada impermeabilizante, que pode ser de polietileno de alta densidade ou argila compactada.

As refinarias e indústrias petroquímicas de vários países, inclusive do Brasil, fazem uso do *landfarming* para o tratamento dos seus resíduos. A escolha desse método deve-se a sua simplicidade de operação e a possibilidade de tratar um grande volume de resíduo no solo. No entanto, erros em sua operação, condições ambientais desfavoráveis à atividade microbiana e à presença de metais pesados, podem reduzir as atividades de biodegradação (Paudyn et al., 2008).

Biorreatores

Normalmente, solos que apresentam altos níveis de contaminação de HAPs utilizam biorreatores, como forma de biorremediação (Jacques et al., 2007). Nessa técnica, o solo contaminado é misturado com água, formando então, uma suspensão com 10 a 50% de sólidos, que é agitada mecanicamente. Isso permite com que se tenha um aumento da aeração, da homogeneidade e também da disponibilidade dos poluentes aos microrganismos degradadores (Wetler-Tonini et al., 2010).

No interior do biorreator, as condições que favorecem o máximo crescimento microbiano, como a disponibilidade de nutrientes, a aeração e a temperatura são sempre otimizadas. Ainda é possível, bioaumentar o substrato (Jacques et al., 2007) o que torna o processo muito eficiente. Após a redução da concentração dos contaminantes, a suspensão é desidratada e a água pode ser então reutilizada no biorreator (Khan et al., 2004).

A principal vantagem do uso dessa técnica é que eles permitem altas taxas de biodegradação, resultando assim, em um tratamento rápido (Francisco e Queiroz, 2018). Porém, a quantidade de solo a ser tratado é limitada pelo tamanho dos biorreatores. Em alguns casos, é necessário, que seja feito um pré-tratamento do solo, para reduzir o tamanho de seus agregados, além de que, tem-se um elevado custo, devido à alta tecnologia utilizada nos biorreatores (Wetler-Tonini et al., 2010).

Por esta razão que, seu uso se restringe aos casos em que outras técnicas provavelmente não trariam resultados satisfatórios (Jacques et al., 2007).

CONCLUSÕES

No contexto atual em que a preocupação com o meio ambiente é crescente, o domínio de tecnologias limpas tornou-se importante para qualquer país que deseja remediar suas contaminações sem a necessidade de agredir o meio ambiente. Sendo a biorremediação uma

prática eficiente de tratamento de contaminantes, pois é de fácil aplicação quando comparada a outros métodos e possui uma relação custo/benefício melhor, além de exercer baixo impacto sobre o ambiente.

Em vista da difusão do seu uso, torna-se importante à otimização desta prática, que deve ser iniciada com planejamento e um cauteloso levantamento da área, para posteriormente definir o conjunto de métodos a serem trabalhados.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13894**: Tratamento no solo (*landfarming*), Rio de Janeiro, p. 10, 1997.

ANDRADE, J. de A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I.C.S.F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, v.35, n.3, p.17-43, 2010.

BERGER, T.M. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos totais de petróleo – enfoque na aplicação do processo terraferm**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 86 f., 2005.

CARUSOI, M.S.F.; ALABURDA, J. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - benzo(a)pireno: uma revisão. **Revista do Instituto Adolfo Lutz (Impr.)** v.67 n.1, p.1-27, 2008.

CETESB: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Avaliação do uso de produtos biotecnológicos para tratamento de efluentes líquidos, resíduos sólidos e remediação de solos e águas** – L1.022, 2007, 21p. Disponível em: <<https://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 20 set. 2018.

CHAILLAN, F.; LE FLÈCHE, A.; BURY, E.; PHANTAVONG, Y.; GRIMONT, P.; SALIOT, A.; OUDOT, J.; Identification and biodegradation potential of tropical aerobic hydrocarbon-degrading microorganisms. **Research in Microbiology**. V.155, n.7, p.587-595.

COLLA, L.M.; PRIMAZ, A.L.; LIMA, M. de; BERTOLIN, T.E.; COSTA, J.A.V. Isolamento e seleção de fungos para Biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas Triazínicos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 809-313, 2008.

COSTA, A.H.R.; NUNES, C.C.; CORSEUIL, H.X. Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n.2, p.265-274, 2009.

COSTA, S.T.E.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; OLIVEIRA, L.C.A. de; VISIOLI, E.L.; LOPES, G. Subproduto da indústria de alumínio como amenizante de solos contaminados com cádmio e chumbo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2533-2546, 2008.

FENT, K. Ecotoxicological effects at contaminated sites. **Toxicology**, Limerick, v.205, n.3, p. 223-240, 2004,

FOLCH, A.; VILAPLANA, M.; AMADO, L.; VICENT, R.; CAMINAL, G. Fungal permeable reactive barrier to remediate groundwater in an artificial aquifer. **Journal of Hazardous Materials**, v.262, n.15, p.554-560, 2013.

FRANCISCO, W.C.; QUEIROZ, T.M. Biorremediação. **Nucleus**, v.15, n.1, p.249-256, 2018.

FRASCARI, D.; ZANAROLI, G.; DANKO, A.S. In situ aerobic cometabolism of chlorinated solvents: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v.283, n.11, p.382-399, 2015.

HÖHENER, P.; PONSIN, V. In situ vadose zone bioremediation. **Current Opinion in Biotechnology**, v.27, n.1, p.1-7, 2014.

JACQUES, R.J.S.; BENTO, F.M.; ANTONIOLLI, Z.I.; CAMARGO, F.A.O. Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural**, v.37, n.4, p.1192-1201, 2007.

JACQUES, R.J.S.; SILVA, K.J. da; BENTO, F.M.; CAMARGO, F.A.O. Biorremediação de um solo contaminado com antraceno sob diferentes condições físicas e químicas. **Ciência Rural**, v.40, n.2, p.280-287, 2010.

KANISSERY, R.G.; SIMS, G.K. Biostimulation for the enhanced degradation of herbicides in soil. **Applied and Environmental Soil Science**, v.2011, n.1, p.01-11, 2011.

MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C.; SILVA, J.J.L.S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.1-11, 2011.

MARIANO, A.P.; TOMASELLA, R.C.; MARCONDES DE OLIVEIRA, L.; CONTIERO, J.; DE ANGELIS, F. Biodegradability of diesel and biodiesel blends. **African Journal of Biotechnology**, v.7, n.9, p.1323-1328, 2008.

MILLER, H. Biostimulation as a form of bioremediation of soil pollutants. **Basic Biotechnology Journal**, v.6, n.1, p.7-12, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **Áreas Contaminadas**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas.html>>. Data de acesso: 26 set. 2018.

MROZIK, A.; PIOTROWSKA-SEGET, Z. Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds. **Microbiological Research**, v.165, n.5, p.363-375, 2010.

MORAIS FILHO, M.C.; CORIOLANO, A.C.F. Biorremediação, uma alternativa na utilização em áreas degradadas pela indústria petrolífera. **Holos**, v.07, n.32, p.133-150, 2016.

NASCIMENTO, E.A.; ARAUJO, J.C. de S.B.; MACHADO, K.M.G. APLICAÇÃO DA BIORREMEDIAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Leopoldianum**, Santos, v. 42, p.17-34, 2016.

NAKHLA, G. Biokinetic modeling of in situ bioremediation of BTX compounds—impact of process variables and scaleup implications. **Water Research**, v.37, n.6, p.1296-1307, 2003.

NITISAKULKAN, T.; OKU, S.; KUDO, D.; NAKASHIMADA, Y.; TAJIMA, T.; VANGNAI, A.S.; JUNICHI, K. Degradation of chloroanilines by toluene dioxygenase from *Pseudomonas putida* T57. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.117, n.3, p.292-297, 2014.

PAUDYN, K.; RUTTER, A.; ROWE, R.K.; POLAND, J. S. Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian Arctic by *landfarming*. **Cold Regions Science and Technology**, v.53, n.1, p.102-144, 2008.

PERUZZO, F.M.; CANTO, E.L. do. **Química na Abordagem do Cotidiano**. 4. ed. São Paulo: Moderna. v. 3, Química Orgânica. 2006. 344p.

ROY, M.; GIRI, A.K.; DUTTA, S.; MUKHERJEE, P. Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water. **Environment International**, v.75, n.1, p.180-198, 2015.

SAM, K.; ONYEBUCHI, A.T. MEGHARAJ, M. RAMAKRISHNAN, B.; VENKATESWARLU, K.; SETHUNATHAN, N.; NAIDU, R. Bioremediation approaches for organic pollutants: a critical perspective. **Environment International**, Crete, v.37, n.8, p.1362-1375, 2011.

SILVA, J.S.; SANTOS, S.S.; GOMES, F.G.G.A. Biotecnologia como estratégia de reversão de áreas contaminadas por resíduos sólidos. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v.18, n.4, p.1361-1370, 2014.

SEABRA, P. N.C. **Aplicação de biopilha na biorremediação de solos argilosos contaminados com petróleo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 169 f., 2005.

TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K. Field data and numerical simulation of btex concentration trends under water table fluctuations: example of a jet fuel-contaminated site in Brazil. **Journal of Contaminant Hydrology**, Bemidji, v.198, n.4, p.37-47, 2017.

VERHNJAK, M.S.S. **Avaliação do processo de contaminação e remediação de água subterrânea por hidrocarbonetos**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho- UNESP, Bauru, 2015.

WEBER, B.D.; SANTOS, A.A. Utilização da biorremediação como ferramenta para o controle da degradação ambiental causada pelo petróleo e seus derivados. **Engenharia Ambiental**, v.10, n.1, p.114-133, 2013.

WETLER-TONINI, R.M.; REZENDE, C.E.; GRATIVOL, A. D. Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: revisão. **Oecologia Australis**, v.14, n.4, p.1010-1020, 2010.

ZABBEY, N.; SAM, K.; ONYEBUCHI, A.T. Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: prospects and challenges. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v.586, n.90, p.952-965, 2017.