

Métodos eficientes para remediação de Dinitrotoluenos (DNT) em solos e corpos hídricos

Taciana da Costa Queiroz

¹Mestre em Biodiversidade e Ecologia Marinha e Costeira, Unifesp, Brasil. (*Autor correspondente: tacianna.costa@hotmail.com)

Histórico do Artigo: Submetido em: 20/02/2023 – Revisado em: 04/04/2023 – Aceito em: 15/04/2023

RESUMO

Este artigo discute a contaminação do solo e das águas subterrâneas por compostos orgânicos persistentes, com destaque para o dinitrotolueno (DNT). A contaminação por DNT é comumente encontrada em áreas industriais, apresentando riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Diferentes tecnologias de remediação têm sido propostas, incluindo opções físicas, químicas e biológicas, com aplicação in situ ou ex situ. A seleção de uma metodologia adequada deve considerar as propriedades do solo, as características químicas, físicas e biológicas do local contaminado, e as tecnologias disponíveis. A biorremediação é uma abordagem eficaz e segura, com benefícios ambientais significativos e potencial para renovar ecossistemas. Apesar de algumas fragilidades, como a lentidão do processo e o risco de desequilíbrio ecológico, espera-se que a aplicação da biorremediação se torne cada vez mais comum, com um melhor entendimento da relação custo-benefício e a possibilidade de aplicação a outros contaminantes orgânicos. A acessibilidade e o interesse no desenvolvimento de tecnologias limpas são cruciais para a remediação de solos e corpos hídricos contaminados.

Palavras-Chaves: contaminação, remediação de solos, remediação de corpos hídricos, biorremediação.

Efficient methods of Dinitrotoluene (DNT) remediation in soils and water

ABSTRACT

This article discusses the contamination of soil and groundwater by persistent organic compounds, with emphasis on dinitrotoluene (DNT). DNT contamination is commonly found in industrial areas, presenting risks to human health and the environment. Different remediation technologies have been proposed, including physical, chemical, and biological options, with in situ or ex situ application. The selection of an appropriate methodology should consider the soil properties, chemical, physical, and biological characteristics of the contaminated site, and available technologies. Bioremediation is an effective and safe approach, with significant environmental benefits and potential to renew ecosystems. Despite some weaknesses, such as the slowness of the process and the risk of ecological imbalance, it is expected that the application of bioremediation will become increasingly common, with a better understanding of the cost-benefit relationship and the possibility of application to other organic contaminants. Accessibility and interest in the development of clean technologies are crucial for the remediation of contaminated soils and bodies of water.

Keywords: Dinitrotoluene, contamination, soil remediation, water body remediation, bioremediation.

1. Introdução

Com o passar dos anos, as águas e os solos se mostraram cruciais para o desempenho de papéis específicos no funcionamento de ecossistemas. No entanto, a civilização humana adquiriu, há muito tempo, o hábito de dispor seus resíduos indiscriminadamente no solo, tendo em vista a capacidade de depuração e atenuação que o mesmo possui. Porém, a prática excessiva desta ação, principalmente por parte das indústrias, trouxe como resultado uma poluição generalizada, que contamina o solo e, conseqüentemente, a água subterrânea. Isto interfere diretamente na qualidade do meio, tendo em vista que os locais contaminados

Queiroz, T. (2023). Métodos eficientes para remediação de Dinitrotoluenos (DNT) em solos e corpos hídricos. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.11, n.2, p.164-179.



passam a funcionar como depósitos de substâncias e, estas entram em contato umas com as outras e se tornam cada vez mais complexas e tóxicas, fazendo-se necessária a aplicação de processos de tratamento (Alazaiza *et al.*, 2022; Rate, 2022).

De acordo com Moraes *et al.* (2017), resíduos resultantes do processo de produção das indústrias comumente são descartados no meio ambiente, desprezando qualquer prévio tratamento e gerando a contaminação do solo e de corpos hídricos do entorno. Com base nisto, apesar das águas subterrâneas serem mais protegidas, elas passaram a ficar mais expostas a contaminações, tanto quanto as águas superficiais e vem se tornando uma questão mais relevante para a tomada de decisões, em comparação a períodos anteriores, tornando-se alvo de debates, conferências e discussões. Assim, o desenvolvimento de tecnologias de tratamento e monitoramento viáveis vem ganhando espaço e destaque, principalmente nas áreas industriais, que requerem processos ecológicos específicos de descontaminação (Serrano-Gonzalez *et al.*, 2018; Rodgers *et al.*, 2001; Rosa, 2020; Cetesb, 2021; Kalsoom *et al.*, 2021). Desta forma, em paralelo à crescente degradação do meio ambiente, houve um avanço na busca pela sustentabilidade em função da percepção acerca da finitude dos recursos naturais e, como resultado do rápido desenvolvimento que, até os dias de hoje, tem gerado problemas que costumavam ser negligenciados.

Neste estudo será destacado o dinitrotolueno (DNT), composto pertencente à classe dos polinitroaromáticos (P-NACs), um contaminante orgânico, resistente à degradação química, biológica e fotolítica (Wenchu Zhao *et al.*, 2021), naturalmente encontrado em pequenas quantidades no ambiente, mas quando em altas concentrações, se torna tóxico e potencialmente cancerígeno (Ias Heras *et al.*, 2011; Parry *et al.*, 2011). Sua contaminação é advinda dos resíduos provenientes de indústrias de explosivos (Amaral *et al.*, 2010; Gonçalves, 2011; Jorge, 2017) e petroquímica (Lemes, 2018; Quintero, 2016), por exemplo. Quando em contato com o meio, este composto se incorpora ao corpo hídrico, se deposita no solo, migra e se transfere por um longo tempo, sobrecarregando os organismos associados (Wenchu Zhao *et al.*, 2021). Sua interação com os seres humanos se dá através da pele, intestinos e sistema respiratório, acumulando-se no tecido adiposo e nos órgãos, tornando-se o causador de uma série de doenças, como: anemia, hiperplasia e degeneração hepática (Kutateladze *et al.*, 2018).

Em decorrência dos impactos mencionados, há algum tempo, existe a necessidade em se buscar diferentes opções para remediar áreas que sofreram perturbações e estão contaminadas com dinitrotolueno (DNT) ou compostos similares (Wenchu Zhao *et al.*, 2021). Para isto, ainda que variadas tecnologias venham surgindo nos últimos tempos, são preferíveis aquelas com ação de tratamento mais rápida e com o melhor custo-benefício (Alazaiza *et al.*, 2022). No entanto, para selecionar uma metodologia adequada para tratar um local, são também consideradas as propriedades do solo, características químicas físicas e biológicas, as substâncias contaminantes presentes e as tecnologias de remediação possíveis para os mesmos (Alazaiza *et al.*, 2022).

As opções de remediação se classificam como físicas, químicas e biológicas, além de terem a possibilidade de aplicação *in situ* (no local) ou *ex situ* (fora do local). Os mecanismos mais utilizados no processo de descontaminação de solo e de águas subterrâneas incluem o sequestro, separação, extração, remoção, destruição da moralização e/ou a transformação dos poluentes em formas inofensivas, que não sejam perigosas e/ou reativas. Há, ainda, a possibilidade de implementar este processo em conjunto ou de forma isolada, a depender da escala de poluição e dos níveis de concentração dos contaminantes (Alazaiza *et al.*, 2022).

Com base nisto, recentemente, foi aplicado um conceito que foca em um processo integrado, unindo as questões técnicas aos princípios da sustentabilidade social, ambiental e econômica (Alazaiza *et al.*, 2022). Entre os estudos que partem deste pressuposto, as tecnologias baseadas em biorremediação se destacam e se mostram muito eficientes e sustentáveis (Carosia, 2011; Kist *et al.*, 2020), devido a sua capacidade de degradação do composto. No entanto, diferente desta, as opções que abordam tratamentos químicos não obtiveram resultados muito promissores (Quintero, 2016).

O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão bibliográfica e unir, de forma geral, informações acerca das técnicas aplicadas na remediação de corpos hídricos e solos contaminados com DNTs, caracterizando o composto DNT, avaliando o comportamento e os impactos acerca da presença de DNT em corpos hídricos e no solo para o ecossistema e saúde humana, diferenciando, com base na literatura, os tipos de remediação existentes para o contaminante em questão e, por fim, avaliando quais técnicas apresentaram resultados mais eficientes no tratamento de águas e solos contaminados com o DNT. Por fim, esta revisão atesta que a remediação deste contaminante ainda não é exaustivamente abordada e, portanto, há espaço para experimentações de novas tecnologias.

2. Material e Métodos

Neste artigo de revisão, estudos relevantes foram buscados acerca do tema “Métodos eficientes para remediação de dinitrotoluenos (DNTs) em solos e corpos hídricos”, utilizando determinado banco de dados digitais, que incluíam Google Scholar, Science Direct, Scielo, Research Gate e Portal de periódicos da Capes, onde foi possível realizar uma pesquisa prévia e identificar o maior número de trabalhos que estavam próximos ao tema proposto. A busca incluiu artigos publicados entre 1995 e 2022, com as seguintes palavras-chave: “dnt”, “dinitrotoluene remediation”, “dinitrotoluene”, “industries waste”, “remediation”, “2,4-dnt”, “2,6-dnt”, “2,4-dinitrotoluene”, “2,6-dinitrotoluene”, “bioremediation”, “dnt contamination”, “biological remediation”, “Biogeochemistry” OR “geochemistry” AND “dnt” OR “2,4-dinitrotoluene”, “bioestimulation”, “soil contamination”, “water contamination”, “dinitrotolueno” e “remediações de dnt”. Além disso, também foi feita uma análise nas referências destes artigos, com o objetivo de identificar estudos adicionais relevantes.

Inicialmente, foram encontrados, aproximadamente, 100 artigos e produções de pesquisa relacionados e/ou próximos ao tema. Para a primeira seleção, foram selecionados os artigos com títulos e resumos potencialmente relevantes e, posteriormente, foram aplicados os seguintes critérios: remediação de DNT realizada em solos ou em águas; remediação realizada em solos ou em águas; métodos de remediação acessíveis; remediação específica do DNT. Desta forma, a lista foi reduzida para 38 artigos e produções de pesquisa que investigaram diferentes métodos de remediação do dinitrotolueno ou compostos nitroaromáticos e explanaram os resultados de forma relevante. Materiais que não apresentavam o respectivo foco de estudo e/ou não atenderam aos critérios de qualidade foram excluídos.

Por fim, os resultados foram apresentados e organizados em tópicos diferentes, com base em cada tipo de remediação aplicável e, também, foi incluída uma tabela para resumir os principais estudos encontrados. No geral, a metodologia de pesquisa estabelecida garantiu que conduzíssemos uma busca sistemática e assertiva dos estudos relevantes da área.

3. Resultados e Discussão

Todos os materiais utilizados para pesquisa e produção desta revisão foram dispostos na Tabela 1. Nela estão descritos os títulos, objetivos, autores e ano de publicação de todas as 38 referências consultadas. Posteriormente, os resultados e discussões foram dispostos em tópicos que descrevem os principais e mais eficientes métodos de remediação referentes ao tema encontrados.

Tabela 1. Relação de referenciais bibliográficos utilizados para a produção desta revisão acerca dos processos de remediação de dinitrotoluenos em solos e corpos hídricos.

Autor(es)	Ano	Objetivo	Título
Alazaiza, M. <i>et al.</i>	2022	Abordar estudos recentes na remediação térmica de solos, águas e sedimentos contaminados.	Tecnologias de remediação térmica para solo e águas subterrâneas: uma revisão.

Rate, A.	2022	Discutir os fatores que afetam a escolha do método de remediação de solos, avaliar o próprio solo como meio de tratamento para a água e avaliar exemplos de marcos regulatórios úteis na remediação de solos urbanos nos Estados Unidos, Europa e Austrália.	Remediação de solos urbanos.
Ias Heras, A. <i>et al.</i>	2011	Avaliar como funcionariam determinados processos de degradação do dinitrotolueno – DNT.	Associação de genes DNT de <i>Burkholderia</i> sp. DNT com o regulador cego de substrato DntR traça o itinerário evolutivo da biodegradação do 2,4-dinitrotolueno.
Karnjanapiboonwong, A. <i>et al.</i>	2009	Avaliar o efeito do TNT e seus metabólitos (DNTs) na produção do grilo <i>Acheta domesticus</i> .	Toxicidade reprodutiva de nitroaromáticos ao grilo <i>Acheta domesticus</i> .
Cardoso, J.	2018	Avaliar as técnicas de remediação aplicadas para conter a contaminação por hidrocarbonetos em água subterrânea e solo em postos de combustíveis do Estado de São Paulo, através da revisão de técnicas de remediação e da compilação de estudos de casos.	Avaliação de técnicas de remediação em processos de contaminação da água e do solo por hidrocarbonetos.
Kist, C. <i>et al.</i>	2020	Avaliar, comparativamente, a capacidade dos fungos <i>Pleurotus ostreatus</i> POS 560 e <i>Pleurotus floridae</i> PSP1 na degradação de 2,4 e 2,6-dinitrotolueno (DNTs) em efluente da indústria de explosivos.	Biodegradação de compostos nitroaromáticos em Água Vermelha pelos fungos de degradação branca <i>Pleurotus ostreatus</i> e <i>floridae</i> .
Gonçalves, C.	2011	Implementar métodos que permitissem a quantificação de 2,4,6-TNT; 2,4-DNT; 2,6-DNT; 2-NT e 4-NT em águas e solos.	Implementação do método analítico para a determinação de compostos polinitroaromáticos (explosivos) em solos e águas - aplicação a um caso de estudo no Seixal.
Reddy, G. <i>et al.</i>	2017	Observar a remoção do 2,4-DNT pelos grânulos aeróbicos em reator de batelada de sequenciamento	Remoção de 2,4-dinitrotolueno em reatores de batelada de sequenciamento de biomassa granular aeróbica.
Amaral, H. <i>et al.</i>	2010	Avaliar, estimar e entender a transformação natural de TNT e DNT, por meio de métodos isotópicos, datação de águas pelo método 3H-3He e química e, a evolução destes compostos orgânicos nos aquíferos.	A contaminação por TNT e DNT das águas subterrâneas do Seixal.
Hamdi, H. <i>et al.</i>	2007	Estudar a degradação de antraceno adicionado (ANT), pireno (PYR) e benzo[a]pireno (B[a]P) no solo (3000 mg Σ 3 PAHs kg ⁻¹ solo seco), em microcosmos incubados aerobiamente por	Efeitos de bioaumento e bioestimulação na dissipação de PAH e ecotoxicidade do solo sob

		120 d., visando aumentar a remoção de PAH dos solos altamente contaminados.	condições controladas.
Rodgers, J. <i>et al.</i>	2001	Revisar as tecnologias disponíveis ou sob investigação para remediar áreas contaminadas com compostos nitroaromáticos.	Métodos de tratamento para a remediação de explosivos nitroaromáticos.
Xu, J. <i>et al.</i>	2012	Utilizar métodos bioquímicos para determinar a atividade enzimática e as reservas energéticas (proteínas, glicogênio e lipídios) no fígado de <i>Cyprinus carpio</i> por exposição subaguda ao 2,4-DNT <i>in vivo</i> 15 d.	Efeitos da exposição ao 2,4-dinitrotolueno sobre a atividade enzimática, reservas de energia e fatores de condição em carpa comum (<i>Cyprinus carpio</i>).
Kalsoom, A. <i>et al.</i>	2021	Isolar e triar as bactérias resistentes ao cromo de resíduos industriais coletados em Korangi e Lyari, Karachi (24°52'46,0"N 66°59'25,7"E e 24°48'37,5"N 67°06'52,6"E).	Isolamento e triagem de bactérias resistentes ao cromo de resíduos industriais para fins de biorremediação.
Kutateladze, L. <i>et al.</i>	2018	Selecionar cepas de fungos que realizam a degradação mais ativa do composto TNT.	Eliminação fúngica de 2,4,6-trinitrotolueno (TNT) dos solos.
Kwang-Hee, S. <i>et al.</i>	2005	Investigar a biodegradação anaeróbica de quatro isômeros dinitrotolueno, 2,3-, 2,4-, 2,6- e 3,4-DNT, usando <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> cepa 27, que foi isolada do intestino de minhocas.	Biotransformação anaeróbica de isômeros dinitrotolueno por <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> cepa 27 isolada do intestino de minhoca.
Liebeg, E. <i>et al.</i>	1999	Determinar o efeito da adição de macro e/ou micronutrientes, por meio de estudos com respirômetros, para melhorar a biorremediação de HAP e/ou solos contaminados com petróleo.	A investigação da biorremediação aprimorada por meio da adição de macro e micronutrientes em um solo contaminado com PAH.
Moraes, M. <i>et al.</i>	2017	Analisar os custos ambientais relacionados com a gestão de resíduos em indústrias químicas localizadas na região metropolitana de Porto Alegre.	Análise dos custos ambientais relacionados com a gestão de resíduos em indústrias químicas.
Lemes, M.	2018	Avaliar as interações entre os produtos químicos de preocupação na Área P, pertencente a uma Unidade Industrial na América do Sul, durante a biodegradação sob condições aeróbicas e anaeróbicas, bem como o impacto potencial dos produtos da redução/oxidação química sequencial da zona de origem na biodegradação em águas subterrâneas a jusante.	Biodegradação de Clorobenzenos e Nitrotoluenos em uma Unidade Industrial na América do Sul.
Carosia, M.	2011	Avaliar a remoção de alquilbenzeno sulfonado linear (LAS), presente na composição do detergente em pó doméstico, e caracterizar os microrganismos do domínio Bacteria, do reator anaeróbio de leito fluidificado.	Caracterização microbiana e degradação de detergente de uso doméstico em reator anaeróbio de leito fluidificado.
Yadav, M. <i>et al.</i>	2021	Discutir os métodos atuais de biorremediação	Capítulo 6 -

		para a remoção de contaminantes orgânicos e suas vantagens e limitações.	Biorremediação de poluentes orgânicos: uma abordagem verde sustentável.
Moraes, S. <i>et al.</i>	2014	Contribuir para os processos de gerenciamento de áreas contaminadas, em termos de abordagem metodológica, pautada em preceitos técnico-científicos que auxiliem a tomada de decisão.	Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas.
Shukla, N. <i>et al.</i>	2018	Fornecer uma síntese fácil de nanocompósito de ferro/sílica (Fe/SiO ₂) e estudar a remoção adsorptiva de DNT e TNT por este nanocompósito e o mecanismo de degradação proposto.	Cinética de remoção e mecanismo de degradação de 2,4-dinitrotolueno (DNT) e 2,4,6-trinitrotolueno (TNT) usando nanocompósito ferro-sílica de valência zero
Quintero, P.	2016	Avaliar a interação entre os produtos químicos de interesse na Área P (em uma unidade industrial na América do Sul) durante a biodegradação sob condições aeróbicas e anaeróbicas, bem como o impacto potencial dos produtos de oxidação química na biodegradação.	Efeitos inibitórios e sinérgicos durante a biodegradação de contaminantes mistos em uma unidade industrial na América do Sul.
Tchounwou, P. <i>et al.</i>	2003	Atualizar o perfil toxicológico dos DNTs, fornecendo uma revisão crítica da patologia ambiental e toxicológica dos DNTs, com ênfase especial em suas possíveis implicações para a saúde pública.	Toxicologia ambiental e efeitos na saúde associados à exposição ao dinitrotolueno.
Parry, R.	2011	Resumir as informações atuais sobre as estruturas de ocorrência natural de nitrocompostos e na biossíntese do grupo nitro.	Nitrocompostos de ocorrência natural.
Rieger, P. <i>et al.</i>	1995	Apresentar uma visão crítica dos principais mecanismos catabólicos conhecidos e discutir novos insights sobre a degradação microbiana de compostos aromáticos nitro-substituídos.	Conhecimento básico e perspectivas sobre a biodegradação do 2,4,6-trinitrotolueno e compostos nitroaromáticos relacionados em solo contaminado.
Podlipná, R. <i>et al.</i>	2015	Comparar a capacidade de plantas cultivadas (cânhamo, linho, girassol e mostarda) de germinar e crescer em solos contaminados com 2,4-DNT.	Biodegradação de 2,4-dinitrotolueno por diferentes espécies vegetais.
Baptista, S. <i>et al.</i>	2013	Avaliar as relações carbono:nitrogênio:fósforo (C:N:P) que melhor contribuíram para a biodegradação do óleo cru em biorreatores aeróbios de 50ml.	Avaliação da bioestimulação em solos argilosos contaminados com petróleo.
Santos, A.	2010	Apresentar os resultados obtidos em duas áreas industriais onde foram aplicadas técnicas de remediação, envolvendo a redução química <i>in situ</i> , através da injeção de polisulfeto de cálcio e a oxidação química <i>in situ</i> , com a injeção de permanganato de potássio.	Aplicação de técnicas químicas de remediação em áreas contaminadas por compostos organoclorados.

Serrano-Gonzalez, M. <i>et al.</i>	2018	Revisar o estado de biodegradação do TNT por várias vias: aeróbica, anaeróbica, combinada, fúngica, enzimática e bioeletroquímica.	Biotransformação e degradação de 2,4,6-trinitrotolueno pelo metabolismo microbiano e sua interação.
Sisnando, L.	2018	Propor uma técnica de remediação, ou um conjunto delas, para um posto de combustível localizado em Brasília-DF.	Proposta de remediação de área contaminada por derivados de hidrocarbonetos – Estudo de caso para um posto de abastecimento no Distrito Federal.
Young, R.	2014	Abordar histórico e definições acerca do dinitrotolueno.	Dinitrotolueno.
Zhou, E. <i>et al.</i>	1995	Testar, em um estudo da cinética de biodegradação, as taxas de degradação da gasolina sob várias condições (diferentes núcleos de solo, temperaturas, concentrações de oxigênio e concentrações de nutrientes).	Efeitos do oxigênio, nitrogênio e temperatura na biodegradação da gasolina no solo.
Tavares, S.	2013	Abordar técnicas de fitorremediação para metais pesados, considerando que esta tecnologia de baixo custo tem grande potencial para utilização em países tropicais como o Brasil.	Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos.
Sunsoo Han, S. <i>et al.</i>	2011	Explorar as menores concentrações alcançáveis de isômeros de dinitrotolueno (DNT) que dariam suporte ao crescimento sustentado de microrganismos degradadores de DNT sob uma condição aeróbica.	Determinação dos limites de biodegradação de 2,4 e 2,6-dinitrotolueno.
Zhao, W. <i>et al.</i>	2021	Apresentar uma investigação pioneira para a contaminação e transferência geoquímica de DNTs.	Características de distribuição e migração de sulfonatos de dinitrotolueno (DNTs) em locais típicos de produção de TNT: efeitos e avaliação de risco à saúde.
Su, Y. <i>et al.</i>	2011	Observar os transportes de DNT e TCB no xilema das raízes para a parte aérea com mudas de trigo e tomate.	Transporte via xilema de atrazina, 2,4-dinitrotolueno e 1,2,3-triclorobenzeno em mudas de tomate e trigo.
Su, Y. <i>et al.</i>	2007	Analisar a absorção de seis compostos orgânicos, dinitrobenzeno (DNB), dinitrotolueno (DNT), lindano (LIN), 1,2,3-triclorobenzeno (TCB), fenantreno (PHN) e pireno (PYR) por raízes de arroz recém-excisadas e raízes de arroz mortas (aquecido por 40 minutos a 105 graus C).	Mecanismos de transporte para a absorção de compostos orgânicos pelas raízes do arroz (<i>Oryza sativa</i>).

3.1 Caracterização dos DNTs

De acordo com Young (2014), o dinitrotolueno é uma mistura entre o tolueno e o ácido nítrico, com fórmula química $C_6H_3(CH_3)(NO_2)_2$. Em temperatura ambiente tem cor amarelo alaranjado, é um sólido cristalino, possui seis isômeros possíveis e, com relação às informações disponíveis, os tipos 2,4-DNT, 2,6-DNT ou a mistura de ambos, são os mais recorrentes.

São amplamente usados como solventes (Shin *et al.*, 2005) ou na fabricação de explosivos comerciais e militares, sendo um dos precursores de um dos mais fabricados no mundo, o TNT e, mesmo após a redução na produção do mesmo, o DNT permaneceu como um importante produto químico industrial (Podlipná *et al.*, 2015). Também é aplicado no processo produtivo de herbicidas, fungicidas, inseticidas, espuma de poliuretano, corantes e, como intermediário na produção do diisocianato de tolueno, podendo ser convertido à contaminantes em vários meios, como o solo, as águas superficiais e as águas subterrâneas. Além disso, este composto tóxico também pode ocorrer no ambiente como resultado de escoamento agrícola e operações militares e, portanto, tornaram-se poluentes ambientais significativos de grande preocupação (Reddy *et al.*, 2017; Shin *et al.*, 2005).

O 2,4-DNT e o 2,6-DNT podem ser mineralizados, em condições aeróbias e anaeróbias (Rieger e Knackmuss, 1995), por determinados tipos de microrganismos de forma relativamente rápida em laboratório (*ex situ*). Entretanto, este composto pode ser persistente, a longo prazo, em solo contaminado e sofre lixiviamento constante até as águas subterrâneas (Han *et al.*, 2011).

Considerando os impactos resultantes do contato de animais e trabalhadores com esta substância, estudos relatam o desenvolvimento de metemoglobinemia, câncer, redução no número de espermatozoides, alteração na fertilidade, neurotoxicidade, toxicidade hepática, sobrevida reduzida e efeitos carcinogênicos em seres vivos (Karnjanapiboonwong *et al.*, 2009; Podlipná *et al.*, 2015; Tchounwou *et al.*, 2003; Xu & Jing, 2012). Neste contexto, técnicas tradicionais utilizadas no tratamento são consideradas muito lentas e onerosas, podendo produzir produtos intermediários ou subprodutos, que podem ou não serem tóxicos. Assim, diversas técnicas físicas, químicas e biológicas vem sendo propostas e testadas no processo de remediação deste composto em corpos hídricos contaminados (Shukla *et al.*, 2018).

3.2 Métodos de remediação – Químicas

As metodologias químicas destrutivas de remediação vêm sendo notadas por apresentarem resultados satisfatórios em comparação à outras técnicas. Uma dessas tecnologias é conhecida como Redução química *in situ*, que consiste no uso de um agente químico para redução de óxidos de ferro III, transformação do mesmo em ferro II e, por fim, redução a contaminantes organoclorados. O alvo principal deste método é eliminar, de uma só vez, dois átomos de cloro que estejam presentes nas moléculas dos contaminantes. Por fim, como resultado, há a diminuição ou eliminação do acúmulo de subprodutos tóxicos (Santos, 2010).

Outro exemplo dado pela mesma autora é a Oxidação química *in situ*. Técnica utilizada para remediar locais contaminados, utilizando um agente que proporciona a transferência de elétrons, ou seja, o potencial de oxidação de determinados compostos químicos com o objetivo de degradar o contaminante presente e, pode ser aplicada tanto na água quanto no solo. Os compostos são, em sua maioria, transformados em dióxido de carbono e água.

Há vários materiais que podem ser utilizados com base nas técnicas descritas anteriormente, entretanto, a maioria traz consequências para o aquífero, como o estudado por Santos (2010), onde houve um aumento nas concentrações de metais dissolvidos, como: alumínio, bário, cromo e ferro.

Outras duas diferentes abordagens de remediação química são as Barreiras reativas e o Ozônio Sparging. A primeira, parte do princípio da separação, a partir da criação de uma barreira física à jusante da pluma de contaminação. Assim, é realizada a filtração dos contaminantes presentes, no momento em que eles atravessam

um material permeável específico. Desta forma, o tratamento é promovido química e biologicamente, com a quebra e degradação dos contaminantes. Já com o Ozônio Sparging, é aplicado o Ozônio no corpo hídrico e, este realiza a oxidação de compostos como o BTXE, MTBE, TPH, Clorados e Pesticidas. A propagação do gás é feita de acordo com a porosidade do local. Entretanto, esta técnica não é eficiente em contaminações localizadas no solo (Ambscience, 2021).

Em outros estudos mais aplicados ao dinitrotolueno, relatados por Reddy *et al.* (2017), considerando uma prática atual, normalmente utilizada no tratamento de águas residuais contaminadas com 2,4-DNT, os autores tiveram um processo físico-químico realizado, por meio da adsorção do dinitrotolueno por carvão ativado e a incineração do mesmo. No entanto, esse método foi considerado muito oneroso, em relação ao benefício obtido e, além disso, ainda trouxe um impacto na qualidade do ar.

3.3 Métodos de remediação – Físicas

As técnicas de remediação física de contaminantes visam o tratamento e o isolamento de áreas contaminadas, reduzindo a massa de contaminantes no meio, com o objetivo de viabilizar o seu uso atual ou futuro (Seravalli, 2021). De acordo com Maluf e Vicino (2021), as principais técnicas físicas de remediação para áreas contaminadas são conhecidas como Pump and Treat, Soil Vapor Extraction, Air Stripping, Multi Phase Extraction, Dual Phase Extraction ou Bioventing.

Para impedir o avanço da pluma de contaminação do local até os rios ou nascentes, o Pump and Treat – Bombeamento e Tratamento/Controle Hidráulico, é considerada uma abordagem interessante. Este tem o objetivo de bombear a água subterrânea contaminada, através de poços de extração, até o local de tratamento (dentro ou fora do site), aplicando diferentes técnicas até o alcance do nível de descontaminação desejado e, posteriormente, segue para o descarte ou devolução ao aquífero, quando as condições hidrogeológicas são favoráveis. O sistema pode ser composto por uma bomba simples que movimenta a água e o contaminante juntos, ou pode ser um sistema duplo de bombas, onde uma movimenta a água e a outra o contaminante. Em termos de utilização, esta técnica é bastante empregada por apresentar características mais acessíveis e poderem se associar a outras tecnologias de remediação, com o objetivo de acelerar a descontaminação do local de interesse.

De acordo com Tavares (2004), nos Estados Unidos, essa tecnologia é bastante utilizada para conter as plumas de contaminação, entretanto, ela se mostra frequentemente ineficaz como método único a ser empregado, em decorrência do tempo necessário para atingir o limite de limpeza.

Outra técnica para tratamento envolvendo principalmente a remoção de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis é a Soil Vapor Extraction – Extração de Vapor do Solo, onde a remoção física dos contaminantes é realizada na zona local não saturada, próximo à área superficial, por meio de extração à vácuo nos poços. Sua eficiência, se unida com outros métodos relacionados à injeção de ar, pode ser elevada. Este mesmo ar deve retirar do solo a água, desassociando o contaminante do mesmo e fazendo com que ele vá até a superfície. Usualmente, esta técnica é aplicada para descontaminar solos que tenham, no máximo, um nível médio de permeabilidade (Tavares, 2004).

O método chamado de Air Stripping consiste na extração de contaminantes de origem orgânica, seja do solo ou da água, forçando a passagem de ar (por meio do vácuo) através das águas subterrâneas que também possuam compostos voláteis. O ar permite que estes contaminantes entrem em estado de vapor e, assim, sejam removidos. É um método não destrutivo que, a partir do contato da água contaminada com a corrente de ar que já foi descontaminada, permite a passagem dos contaminantes orgânicos voláteis da fase líquida para a fase gasosa. De forma resumida, este método de tratamento pode ser aplicado através de colunas de stripping ou de tanques de aeração (Cardoso, 2018).

As principais vantagens deste sistema estão vinculadas à sua simplicidade de operação, modelo compacto, confiável, não requer muita manutenção e pode ser aplicado em amplas concentrações do poluente.

Na contramão, é uma tecnologia que produz resíduos que necessitam de uma disposição específica, o gás precisa ser tratado e o crescimento de bactérias aliado à precipitação do ferro, podem colmatar o sistema, interferindo na necessidade de manutenção (Cardoso, 2018).

Sisnando (2018) detalha os processos do Air Sparging como uma técnica *in situ*, utilizada na remediação de solos contaminados, que consiste na inserção de ar na área saturada do solo, transferindo os contaminantes voláteis para a fase de vapor. Assim, eles migram para a zona não saturada e podem ser removidos por outras técnicas.

O Multi-Phase Extraction, conhecido no Brasil como Extração Multifásica (MPE), é um processo rápido e emergente, que realiza uma extração à vácuo do contaminante local, na fase líquida, em forma de vapor d'água e, ainda, quando dissolvidas no solo e na água subterrânea. Esta técnica é muito eficiente na remoção dos compostos orgânicos voláteis em combustíveis fósseis, presentes na zona não saturada do solo e na fase dissolvida nas águas subterrâneas, mais comumente aplicada em zonas de moderada permeabilidade (Department of the army U.S., 1999).

Por fim, o Bioventing é a injeção de ar e nutrientes no ambiente, com o objetivo de aerar o solo e estimular a atividade biológica dos organismos presentes e, conseqüentemente, a degradação aeróbia dos contaminantes presentes. Esta técnica pode ser classificada como uma tecnologia ativa, quando auxiliada por um soprador ou bomba, ou passiva, quando a troca de gás através de poços de ventilação é realizada pelo efeito da pressão atmosférica (Yadav, 2021).

Há, ainda, algumas pesquisas onde são utilizados outros mecanismos físicos para remoção do dinitrotolueno, como no estudo realizado por Shukla *et al.* (2018), que teve o objetivo de analisar nanocompósitos de ferro/sílica (Fe/SiO₂) como removedor por adsorção do DNT. Neste estudo, os autores receberam um retorno positivo, pois o nanocompósito apresentou um grande potencial para o tratamento eficiente de diferentes áreas poluídas por dinitrotoluenos e compostos similares.

3.4 Métodos de remediação - Biológicas

A remediação biológica, também conhecida como biorremediação, consiste no uso de seres vivos para os processos de descontaminação em locais onde ocorreram desastres ambientais – derramamento de óleo no mar, vazamento de combustíveis ou efluentes industriais (Guz, 2016; Reis *et al.*, 2012). Os organismos são dispostos no ambiente de interesse e, de forma natural, metabolizam os resíduos tóxicos, transforma-os em outras moléculas e utilizam-nas para gerar alimento. Entre estes, os mais utilizados são os fungos, as bactérias, as plantas, os microrganismos e as algas. Eles reduzem o tempo de decomposição dos resíduos e são selecionados com base no tipo de contaminante presente, atuando nas diversas esferas (mares, oceanos, lagos e solos) (Moraes *et al.*, 2014; Ribas *et al.*, 2009; Superbac, 2021).

As tecnologias utilizadas para biorremediação são bastante promissoras, em decorrência da capacidade de biotransformação e biodegradação dos compostos poluentes. Entre as bactérias capazes de realizar a biodegradação do DNT, tem-se, por exemplo: *Arthrobacter sp.*, *Rhodococcus pyridinivorans*, *Burkholderia sp.* e *Pseudomonas sp.* As possibilidades de remoção do DNT por microrganismos foram observadas em condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias, além do sistema aeróbio e anaeróbio acoplados. Os mecanismos de remoção envolvem biodegradação, biotransformação ou ambos (Reddy *et al.*, 2017).

Observando as opções possíveis, a biorremediação ganhou seu espaço, pois é uma prática segura, que minimiza os danos antrópicos causados ao ambiente e possui um grande potencial para renovar os ecossistemas sem gerar uma poluição secundária ou, pelo menos, reduzindo a possibilidade (Guz, 2016; Moraes *et al.*, 2014). Han *et al.* (2011) obtiveram resultados positivos acerca do potencial da biorremediação em águas subterrâneas contaminadas com DNTs. Os autores concluíram que a extensão da degradação do composto em questão, dentro da pluma de contaminação, tendo em vista um cenário envolvendo águas subterrâneas, irá variar a depender das características específicas do local, que podem interferir na capacidade bacteriana, como:

presença de outros tipos de poluentes, pH, composições minerais, hidrogeologia da água e propriedades físico-químicas dos materiais do aquífero.

Outro estudo que obteve sucesso com a remediação biológica foi realizado por Reddy *et al.* (2017), onde os autores desenvolveram uma biomassa granular aeróbia, com a capacidade de remover o dinitrotolueno. Ela foi cultivada com sucesso a partir do uso de lodo ativado em um reator de lote de sequenciamento, alimentado com DNT e acetato. Os grânulos aeróbicos obtidos foram capazes de remover efetivamente o DNT, quando alimentados junto com acetato ou lactato. Em conclusão, a remoção de DNT por biomassa granular aeróbia foi, provavelmente, mediada por vias oxidativas e redutivas. Na via oxidativa, o DNT pôde sofrer ação das oxigenases e foi convertido em dióxido de carbono e água. E, este foi o primeiro estudo, no cultivo de grânulos aeróbicos, com capacidade de remoção do dinitrotolueno.

De acordo com Ribas *et al.* (2009) e Superbac (2021), o processo inicial da remediação biológica consiste em avaliar o contaminante que será tratado, caracterizar a contaminação do local, identificar o tipo mais adequado de remediação e decidir entre os modelos *in situ* (tratamentos com custos reduzidos, realizado no local de contaminação), ou *ex situ* (tratamento realizado fora do local de contaminação, quando há um grande potencial de propagação). Abordando o dinitrotolueno como poluente principal, aqui serão descritos os principais tratamentos realizados por meio da biorremediação, através de técnicas como o bioestímulo, bioaumento e a fitorremediação.

Para que o processo de biológico ocorra, é necessária a presença, no local de contaminação, de nutrientes suficientes para o desenvolvimento e a manutenção da vida dos microrganismos decompositores. Neste cenário, surge a técnica de biorremediação denominada de bioestímulo, empregada com o objetivo de adicionar fontes de nutrientes, sais, aceptores de elétrons, enzimas extracelulares ou emulsificantes que, por sua vez, irão influenciar à atividade microbiana nativa, promovendo alterações no ambiente e tornando os processos fisiológicos e bioquímicos mais eficientes e constantes. Além da adição de nutrientes, a bioestimulação traz outras respostas, como: o aumento na aeração do solo, o monitoramento e a correção da sua umidade e pH (Baptista *et al.*, 2013; Moraes *et al.*, 2014; Silva, 2010). Os nutrientes mais utilizados para estimular microrganismos são o nitrogênio e o fósforo (Liebeg; Cutright, 1999) pois, em concentrações adequadas, são considerados limitantes no processo de degradação do DNT (Zhou; Crawford, 1995).

Como forma de exemplificação, Baptista *et al.* (2013), em seus estudos, desenvolveram uma pesquisa verificando a melhor relação entre carbono, nitrogênio e fósforo para a degradação de óleo cru, em biorreatores aeróbicos. Além disso, eles também testaram como cada um deles poderia influenciar na biodegradação de um solo que tivesse características argilosas e com presença de petróleo. Os autores concluíram que o método da bioestimulação pode ser aplicado como uma ferramenta adicional no tratamento de solos contaminados em geral. Entretanto, reforçam a necessidade de um estudo prévio de todas as fontes de nutrientes que devem favorecer a biodegradabilidade do composto de interesse.

Outra forma de incentivar a biorremediação é o bioaumento, uma técnica de aceleração que consiste no aumento da quantidade de microrganismos no local de interesse por meio de injeção, com o intuito de elevar o grau de biodegradação do contaminante, podendo ser realizado através de culturas puras, pertencentes à própria área contaminada ou não, consórcios microbianos ou culturas cultivadas e ampliadas em laboratório, adequando à necessidade de cada situação (Moraes *et al.*, 2014; Moreira & Siqueira, 2006; Seabra, 2005). Um estudo realizado por Bento (2008) indicou uma redução de 70% do contaminante a partir da aplicação desta técnica.

Por fim, há um outro modelo muito conhecido, a partir do uso de plantas que podem ser aplicadas na remoção, transformação ou acúmulo de produtos químicos tóxicos, como o dinitrotolueno, esteja ele no sedimento, corpo hídrico ou atmosfera. A fitorremediação é um método que utiliza plantas e toda a sua microbiota associada, removendo corretivos, fertilizantes e matéria orgânica do solo, além de imobilizar toda a periculosidade em torno dos contaminantes. É uma técnica vantajosa, acessível (PIRES *et al.*, 2003) e que elimina determinados contaminantes, entre eles: o hidrocarboneto de petróleo, solventes clorados, corantes,

pesticidas, explosivos e metais pesados. E, tendo em vista que a maioria dos ambientes subterrâneos poluídos estão localizados a uma distância de 20 metros da superfície do solo, há um número significativo de locais que podem ser considerados adequados ao tratamento por meio da fitorremediação (Podlipná *et al.*, 2015).

Durante o processo de degradação de poluentes nitroaromáticos, como os DNTs, a fitorremediação age realizando uma transformação dos mesmos em compostos que possuem uma toxicidade inferior ou nula e captura-os por meio das plantas (Podlipná *et al.*, 2015). Estudos realizados por Su e Zhu (2007), detalharam o processo de absorção do dinitrotolueno pelas raízes do arroz, planta utilizada, e comprovaram que o transporte deste composto é realizado, especificamente, por meio simplástico. Já no ano de 2011, Su e Liang obtiveram dados evidentes em torno do transporte do DNT, desde as raízes até os brotos, via xilema. Outras evidências interessantes nesse campo foram trazidas por Podlipná *et al.* (2015), com culturas de cânhamo, linho, girassol e mostarda, que se desenvolveram em locais contaminados com DNT e, portanto, poderiam ser utilizadas para fitorremediação.

Foi verificada a habilidade de metabolização do DNT a partir de culturas *in vitro* de *S. jacobaea* e culturas em suspensão de *S. officinalis* e *P. australis*. Como resultado da degradação do DNT, os compostos 2-amino-4-nitrocompostos e 4-amino-2-nitrocompostos foram encontrados. Vale ressaltar que a cultura de erva-sabão metabolizou DNT de forma mais eficiente que as células de junco.

4. Conclusão

Sintetizando as informações dispostas e detalhadas nos tópicos anteriores, é possível perceber como e por que a biorremediação conquistou seu espaço. Entre as outras abordagens químicas e físicas de remediação, existem projetos que obtiveram resultados positivos, mas com ressalvas para algumas problemáticas. Já com os microrganismos, não foram encontrados problemas posteriores à aplicação dos mesmos. Os modelos de estudo que aplicaram Bioestímulo, Bioaugmentação e Fitorremediação no tratamento de locais contaminados com dinitrotoluenos aparecem com maior frequência nas plataformas de publicação de pesquisas, o que pode ser um indicativo de aumento na implementação destas metodologias de tratamento atualmente.

Tendo em vista os custos reais para a prática *in situ* destas metodologias, há uma falta de informação e avaliação objetiva. Em sua maioria, existem análises econômicas voltadas aos testes em escala laboratorial. Além disso, como conclusão de todas as informações fornecidas aqui, foram observados os pontos fortes e fracos acerca da biorremediação. Como pontos fortes, podemos citar vários, entre técnicas voltadas ao solo ou corpo hídrico: sua segurança, excelentes benefícios, redução nos danos antrópicos causados ao meio, baixo custo e, potencial destaque na renovação de ecossistemas. Em relação às fragilidades dessa metodologia, tem-se: lentidão no processo a depender do método de biorremediação selecionado e das características do local e, uso de microrganismos que não pertencem àquele ambiente, com riscos para o desenvolvimento de um desequilíbrio ecológico. Porém, ressalta-se a importância de avaliar o contaminante que será tratado, caracterizar a contaminação do local, identificar a metodologia mais adequada para realizar a biorremediação e decidir entre os modelos *in situ* ou *ex situ*.

Portanto, para o futuro é esperado que sua aplicação se torne cada vez mais generalizada. Além disso, um melhor conhecimento da relação custo-benefício dessa tecnologia voltada para a remediação do DNT seria desejável, para demonstrar ainda mais vantagens no seu uso. E uma aplicação generalizada a outros contaminantes orgânicos que ainda não foram testados também seria interessante. E, finalmente, mais acessibilidade e interesse para o desenvolvimento de tecnologias limpas na remediação de solos e corpos hídricos.

5. Referências

- A, Ias Heras, M. Chavarría, & V. Lorenzo (2011). Associação de genes dnt de Burkholderia sp. DNT com o regulador cego de substrato DntR traça o itinerário evolutivo da biodegradação do 2,4-dinitrotolueno. *Molecular Microbiology*. Vol. 82. Ed. 2, 287-299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2011.07825.x>. Ambscience. Remediação. Disponível em <https://ambscience.com/remediacao-parte-ii/>. Acesso em: 25/11/2021.
- A. Karnjanapiboonwong, B. Zhang, Ch.M. Freitag, M. Dobrovolny, Ch.J. Salice, P.N. Smith, R.J. Kendall, T.A. Anderson. Reproductive toxicity of nitroaromatics to the cricket, *Acheta domesticus*. *Sci. Total Environ.*, 407 (2009), pp. 5046-5049.
- Alazaiza, Motasem & Albahnasawi, Ahmed & Copty, Nadim & Ali, Gomaa & Bashir, Mohammed & Al Maskari, Tahra & Abu Amr, Salem & Abujazar, Mohammedshadi & Nassani, Dia Eddin. (2022). Thermal based remediation technologies for soil and groundwater: a review. *Desalination and Water Treatment*. 259. 206-220. 10.5004/dwt.2022.28433.
- CARDOSO, José Eduardo Taddei. Avaliação de técnicas de remediação em processos de contaminação da água e do solo por hidrocarbonetos. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. 2018.
- Cetesb (2021). Poluição das águas subterrâneas. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/>.
- Cristiane Patrícia Kist, Claudio Eduardo Scherer, Marlene Soares, & Marcio Barreto Rodrigues (2020). Biodegradação de compostos nitroaromáticos em Água Vermelha pelos fungos de degradação branca *Pleurotus ostreatus* e *floridae*. *Rev. Ambient. Água*. 15 (6). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2594>.
- C. R. R. Jorge (2017). Principais características e comportamento(s) dos diferentes contaminantes no solo. Seminário APEMETA "Descontaminação de Solos".
- C. S. M. Gonçalves (2011). Implementação do método analítico para a determinação de compostos polinitroaromáticos (explosivos) em solos e águas - aplicação a um caso de estudo no Seixal. Universidade do Algarve. Department of the army U.S. Engineering and Design Multi-Phase Extraction. Engineer Manual. United States. Manual No. 1110-1-4010. 1999.
- G. Kiran Kumar Reddy, M. Sarvajith, Y.V. Nancharaiyah, V.P. Venugopalan. 2,4-Dinitrotoluene removal in aerobic granular biomass sequencing batch reactors. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Volume 119, 2017, Pages 56-65, ISSN 0964-8305. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.045>.
- H. I. F. Amaral, J. Fernandes, M. Berg, P. S. René, & R. Kipfer (2010). A contaminação por TNT e DNT das águas subterrâneas do Seixal. Repositório Ineg.
- HAMDI, H.; BENZARTI, S.; MANUSADZIANAS, L.; AOYAMA, I.; JEDIDI, N. Bioaugmentation and biostimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 39, n. 8, p. 1926–1935, Aug. 2007.
- J. D. Rodgers & N. J. Bunce (2001). Treatment methods for the remediation of nitroaromatic explosives. *Water Res.* 35 (9), 2101-2111. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00505-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00505-4).

J. Xu, N. Jing. Effect of 2,4-dinitrotoluene exposure on enzyme activity, energy reserves and condition factors in common carp (*Cyprinus carpio*). *J. Hazard. Mater*, 203-204 (2012), pp. 299-307.

Kalsoom, Batool A., Din G., Din S., Jamil J., Hasan F., Khan S., Malik B., & Shah A. (2021). Isolation and screening of chromium resistant bacteria from industrial waste for bioremediation purposes. *Braz. J. Biol.* 83, 2021. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.242536>.

Kutateladze, Lali, Zakariashvili, Nino, Khokhashvili, Izolda, Jobava, Maya, Alexidze, Tinatin, Urushadze, Tamar & Kvesitadze, Edisher. Fungal elimination of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) from the soils. *The EuroBiotech Journal*. Vol.2, no.1, 2018, pp.39-46. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2018-0007>.

Kwang-Hee Shin, Yoongho Lim, Joong-Hoon Ahn, Jinmo Khil, Chang-Joon Cha, Hor-Gil Hur, Anaerobic biotransformation of dinitrotoluene isomers by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain 27 isolated from earthworm intestine, *Chemosphere*, Volume 61, Issue 1, 2005, Pages 30-39, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.020>.

LIEBEG, E. W., CUTRIGHT, T. J. The investigation of enhanced bioremediation through the addition of macro and micro nutrients in a PAH contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v.44, p. 55-64, 1999.

M. A. Moraes, V. Thes, M. B. Vier, D. Schreiber (2017). Análise dos custos ambientais relacionados com a gestão de resíduos em indústrias químicas. *Revista de Administração Contabilidade e Economia*. 16(2): 505. <https://doi.org/10.18593/race.v16i2.12475>.

M. C. S. Lemes (2018). Biodegradation of chlorobenzenes and nitrotoluenes at an industrial site in South America. Graduate School of Clemson University.

M. F. Carosia (2011). Caracterização microbiana e degradação de detergente de uso doméstico em reator anaeróbio de leito fluidificado. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Monika Yadav, Gurudatta Singh, R.N. Jadeja. Chapter 6 - Bioremediation of organic pollutants: a sustainable green approach. Editor(s): Virendra Kumar Mishra, Ajay Kumar. *Sustainable Environmental Clean-up*. Elsevier. 2021. Pages 131-147. ISBN 9780128238288. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823828-8.00006-2>.

MORAES, Sandra Lúcia; TEIXEIRA, Cláudia Echevengúá; MAXIMIANO, Alexandre Magno de Sousa. Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. 1ª edição revisada. São Paulo. 2014.

Nivedita Shukla, Vatsana Gupta, Ashok Singh Rawat, Vikas Kumar Gahlot, Sarita Shrivastava, Pramod Kumar Rai. 2, 4-Dinitrotoluene (DNT) and 2, 4, 6-Trinitrotoluene (TNT) removal kinetics and degradation mechanism using zero valent iron-silica nanocomposite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 6, Issue 4. 2018. Pages 5196-5203. ISSN 2213-3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.018>.

P. A. B. Quintero (2016). Inhibitory and synergistic effects during biodegradation of mixed contaminants at an industrial site in South America. Graduate School of Clemson University.

P.B. Tchounwou, D. Newsome, K. Glass, J.A. Centeno, J. Lesczynski, J. Bryant, J. Okoh, A. Ishaque, M. Broker Environmental toxicology and health effects associated with dinitrotoluene exposure. *Rev. Environ. Health*, 18 (2003), pp. 203-229.

Parry R., Nishino S., & Spain J. (2011). Naturally-occurring nitro components. *Nat Prod Rep.* 28:152 - 167.

P.-G. Rieger, H.-J. Knackmuss. Conhecimento básico e perspectivas sobre a biodegradação do 2,4,6-trinitrotolueno e compostos nitroaromáticos relacionados em solo contaminado. *JC Espanha (Ed.)*. A biodegradação de compostos nitroaromáticos, Plenum, Nova Iorque (1995), pp. 1 – 18.

Radka, Podlipná; Blanka, Pospíšilová; Tomáš, Vaněk, Biodegradation of 2,4-dinitrotoluene by different plant species, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 112, 2015, Pages 54-59, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.07.026>.

Rate, Andrew. (2022). *Urban Soil Remediation*. 10.1007/978-3-030-87316-5_11.

Sandro J. Baptista; Magali C. Cammarota; Denize D. C. Freire. Avaliação da bioestimulação em solos argilosos contaminados com petróleo. 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS. 2013.

SANTOS, Alaine Cunha. Aplicação de técnicas químicas de remediação em áreas contaminadas por compostos organoclorados. Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. Dissertação de mestrado. 2010.

Serrano-Gonzalez, M. Y. Chandra, R. Castillo-Zacarias, C. Robledo-Padilla, F. Rostro-Alanis, M. D. J., Parra-Saldivar, & R. (2018). Biotransformation and degradation of 2,4,6-nitrotoluene by microbial metabolism and their interaction. *Def. Technol.* 151-164, 02.

SISNANDO, Lucas Bezerra. Proposta de remediação de área contaminada por derivados de hidrocarbonetos – Estudo de caso para um posto de abastecimento no Distrito Federal. Universidade de Brasília. Monografia. 2018.

S. R. L., Tavares. Técnicas de Remediação. Capítulo 2. Pgs 61-89. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/983651/1/Cap2LivroCASilvioTavares.pdf>. Acesso em: 23/11/2021.

Sungsoo Han, Sachiyo T. Mukherji, Angela Rice, Joseph B. Hughes. Determination of 2,4- and 2,6-dinitrotoluene biodegradation limits, *Chemosphere*, Volume 85, Issue 5, 2011, Pages 848-853. ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.100>.

Wenchu Zhao, Xiao Yang, Aixi Feng, Xiulan Yan, Lingqing Wang, Tao Liang, Juan Liu, Huansong Ma, & Yaoyu Zhou (2021). Distribution and migration characteristics of dinitrotoluene sulfonates (DNTs) in typical TNT production sites: Effects and health risk assessment. *Journal of Environmental Management*. Volume 287, 1 June 2021, 112342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112342>.

Y.H. Su, Y.C. Liang. Transport via xylem of atrazine, 2,4-dinitrotoluena, and 1,2,3-trichlorobenzene in tomato and wheat seedlings. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 100 (2011), pp. 284-288.

Y.H. Su, Y.G. Zhu. Transport mechanisms for the uptake of organic compounds by rice (*Oryza sativa*) roots. *Environ. Pollut.*, 148 (2007), pp. 94-100.

Young, R. A. Dinitrotoluene. *Encyclopedia of Toxicology*. 3^a ed., Academic Press. 2014, Pages 179-182, ISBN 9780123864550. Disponível em <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00671-0>. Acesso em 23/11/2021.

ZHOU, E., CRAWFORD, R. L. Effects of oxygen, nitrogen and temperature on gasoline biodegradation in soil. *Biodegradation*, v. 6, p. 127-140, 1995