



PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DO SOLO DA CIDADE DE BRUMADINHO - MG SOIL RECOVERY PROPOSAL IN THE CITY OF BRUMADINHO - MG

RAMOS, Matheus Augusto de Oliveira¹; RAMOS, Vania Aparecida Alves¹; BAÚ, Rosana Zanetti²;

¹Graduado do Curso de Engenharia Química – Universidade São Francisco; ²Professor do Curso de Engenharia Química – Universidade São Francisco

rosanazanettibau@gmail.com

RESUMO. No ano de 2019, uma das barragens de rejeitos da mina de ferro do Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, se rompeu derramando uma onda com quase 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos sobre a cidade, ocasionando diversos impactos sociais, econômicos e ambientais. Este estudo teve como finalidade realizar um levantamento bibliográfico sobre os impactos produzidos por este acidente ambiental, os principais contaminantes depositados no solo e propor um método para sua recuperação. Os dados levantados revelaram que a disposição dos rejeitos no ambiente é uma das grandes preocupações visto que, em altas concentrações, os metais pesados se tornam extremamente tóxicos ao ser humano e ao ambiente, sendo necessária sua remoção, uma vez que são elementos muito reativos e bioacumulativos, não podendo ser degradados. As técnicas que utilizam organismos vivos para absorção dos metais pesados, como bactérias, fungos ou plantas, receberam destaque. Concluiu-se que para as condições do solo da cidade de Brumadinho a técnica indicada é a de fitorremediação por meio das espécies *Eucalyptus grandis*, *Ricinus communis*, *Helianthus annuus*, conhecidas popularmente como eucalipto, mamona e girassol, respectivamente, devido ao alto custo-benefício, maior facilidade de aplicação e possibilidade de retorno financeiro a partir da utilização das plantas como matéria prima para produção de papel e celulose, no caso do eucalipto, e produção de biodiesel, a partir da extração dos óleos da mamona e do girassol.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos; Contaminação do solo; Biorremediação; Fitorremediação.

ABSTRACT. In 2019, one of the tailings dams at the Córrego do Feijão iron mine, in the city of Brumadinho, burst, spilling a wave with almost 12 million cubic meters of tailings over the city, causing various social, economic and environmental impacts. This study aimed to carry out a bibliographic survey on the impacts produced by this environmental accident, the main contaminants deposited in the soil and to propose a method for their recovery. The data collected revealed that the disposal of waste in the environment is a major concern since, in high concentrations, heavy metals become extremely toxic to humans and the environment, requiring their removal, since they are very reactive and bioaccumulative elements, and cannot be degraded. Techniques that use living organisms to absorb heavy metals, such as bacteria, fungi or plants, were highlighted. It was concluded that for the soil conditions of the city of Brumadinho, the technique indicated is phytoremediation using the species *Eucalyptus grandis*, *Ricinus communis*, *Helianthus annuus*, popularly known as eucalyptus, castor bean and sunflower, respectively, due to their high cost-effectiveness, greater ease of application and possibility of financial return from the use of plants as raw material for the production of paper and cellulose, in the case of eucalyptus, and production of biodiesel, from the extraction of castor and sunflower oils.

Keywords: Tailings dam; Soil contamination; Bioremediation; Phytoremediation.

INTRODUÇÃO

Brumadinho é uma cidade da região metropolitana de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais, com população estimada em 41000 habitantes, de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020). A cidade sempre contou com agricultura familiar de pequeno porte e, para se manter, a economia local é sustentada pela extração de minérios, que chegou de forma intensa na região.

No dia 25 de Janeiro de 2019, a barragem de contenção de rejeitos B1 da mina do Córrego do Feijão, sob responsabilidade da Vale S.A., se rompeu e derramou cerca de 12 milhões de metros cúbicos de lama contendo diversos materiais potencialmente tóxicos, ocasionando diversos impactos na saúde, socioeconômicos e ambientais a toda a população da cidade de Brumadinho e para mais 18 municípios e 424 comunidades tradicionais às margens do rio Paraopeba (BRASIL, 2020).

De acordo com a Vale S.A. (Sociedade Anônima), a barragem que se rompeu foi construída em 1976 e estava desativada, com projeto de descaracterização em estudo. A barragem seguia o modelo de alteamento a montante, onde uma barreira de terra é construída “represando” o rejeito despejado em uma certa área e, quando o nível se aproxima do máximo, uma nova barreira é levantada sobre a anterior (VALE, 2021). Essa técnica possui baixos custos, pois faz pouco uso de equipamentos de terraplanagem, porém, apresenta grande desvantagem com relação à segurança, podendo acarretar entupimentos e outros problemas.

Os impactos do rompimento da barragem causaram uma desorganização na rotina e no modo de viver de toda sociedade local. Estudos de caracterização da lama de rejeitos de Brumadinho constataram a presença de diversos contaminantes com concentrações acima dos parâmetros definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), e com alta toxicidade como manganês, cobre, bário, chumbo e mercúrio, sendo necessário realizar processos para a sua remoção ou diminuição.

Ambientes contaminados podem ser tratados ou remediados de diversas maneiras, através de técnicas biológicas, físico-químicas ou térmicas, dentre elas lavagem do solo, solidificação/estabilização, separação física, remediação eletrocinética e vitrificação. No entanto, muito se tem discutido a respeito de técnicas de remediação por meio de organismos vivos, como a biorremediação (tratamento por meio da ação de microrganismos), fitorremediação (tratamento por meio do plantio de determinadas espécies de plantas capazes de remover os contaminantes do solo), bem como o uso de biorreatores.

Metais pesados contaminantes do solo

A contaminação do ecossistema é assunto de grande importância atualmente no Brasil, diante do cenário de acidentes envolvendo barragens de rejeitos de mineração. As principais causas de contaminação são as provocadas por desastres ambientais e em decorrência de acidentes, constituindo boa parte das notificações de contaminação no Brasil e, portanto, trata-se de um problema global e seu processo é essencial para reduzir o risco para a saúde humana (MOSCHEM; GONÇALVES, 2020).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (2022) considera áreas contaminadas como locais com concentrações de poluentes, representados por quaisquer

substâncias ou resíduos, que venham a causar danos ou riscos aos bens a proteger, como a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, do solo e a saúde da população humana ou animal.

A contaminação do solo e da água por metais tóxicos é mais preocupante quando comparados a outros contaminantes devido a sua persistência no ambiente, não degradabilidade e a maneira como se movem e se depositam no solo. A definição de metais pesados vem evoluindo com o tempo e pode mudar dependendo da abordagem utilizada, sendo a massa específica igual ou superior a 5 g.cm^{-3} (gramas por centímetro cúbico) a mais utilizada na classificação (LIMA; MERÇON, 2011; COSTA; NUNES, 2019).

Os metais frequentemente causadores da toxicidade são o arsênio, alumínio, chumbo, mercúrio, cádmio, manganês, cobre e ferro. O acúmulo desse material no solo ou no sistema biológico ocorre pelo fato desses compostos não serem biodegradáveis. Assim, sua ingestão pode trazer grandes prejuízos para a saúde de seres humanos e animais podendo, por exemplo, ocasionar problemas renais, pulmonares, cardíacos, neurológicos, gastrointestinais, irritação na pele, cânceres, entre outros (MOSCHEM; GONÇALVES, 2020).

As tecnologias empregadas para tratamento e remediação de solos contaminados devem ser definidas com base nas características dos contaminantes, no seu custo-benefício e na facilidade de emprego. Cada uma delas será apresentada com maior detalhamento nas seções subsequentes.

Biorremediação

A biorremediação é um processo que utiliza microrganismos como fungos, bactérias e cianobactérias para degradar biologicamente, imobilizar ou transformar os contaminantes em substâncias menos tóxicas, por meio da biolixiviação (utilização de microrganismos para a extração de metais), biotransformação (processo de desintegração de materiais realizada por bactérias e fungos), biomineralização (processo pelo qual organismos vivos produzem minerais) e bioissorção (adsorção de metais pesados por meio da utilização de resíduos agroindustriais como adsorventes). Entretanto, é uma técnica muito sensível e que demanda grandes estudos sobre os microrganismos a serem utilizados para o tratamento, pois o processo depende das condições do local a ser tratado, a concentração dos contaminantes, pH, salinidade e umidade do solo (BRAUN *et al.*, 2019).

Embora as técnicas de remediação de solos a partir de seres vivos apresentem grandes percentuais de eficiência na descontaminação quando se é empregado um agente de maneira correta, recomenda-se empregar mais de uma técnica de tratamento para melhorar a taxa de descontaminação. Diversas tecnologias utilizam processos físicos e/ou químicos para a descontaminação de ambientes poluídos, sendo o processo biológico de biorremediação uma alternativa ecologicamente adequada e eficaz para o tratamento de ambientes contaminados por metais tóxicos e moléculas orgânicas de difícil degradação (GAYLARDE *et al.*, 2005).

O processo de biorremediação pode ser realizado *in situ* (no local contaminado) não sendo necessária a remoção do material contaminado para outro local, tornando este um processo menos complexo e com menores custos (CASTELO-GRANDE *et al.*, 2007 *apud* BRAUN *et al.*, 2019).

Na biorremediação *ex situ* ocorre a transferência do material contaminado para um outro local, recomendado quando há a possibilidade de contaminação das pessoas e do ambiente ao redor, ou quando a alta concentração de contaminante exige técnicas mais robustas como a compostagem e o emprego de biorreatores. As vantagens desse processo são o baixo custo, a

eficiência em meios homogêneos e de textura arenosa e o fato de ser destrutiva aos contaminantes. As desvantagens envolvem as dificuldades de aclimação dos microrganismos para água e ar e as limitações em função de heterogeneidades em subsuperfície (PEREIRA; FREITAS, 2012).

Fitorremediação

A fitorremediação é um processo pelo qual plantas removem as impurezas do solo através de mecanismos biológicos que lhes permitem crescer, mesmo na presença de altas concentrações de metais, sendo capazes de capturar, transportar, armazenar e imobilizá-los em suas estruturas celulares. Essa técnica tem se mostrado promissora, pois é simplesmente a utilização da vegetação para recuperar a área contaminada por poluentes tóxicos (BRAUN *et al.*, 2019).

A escolha correta da espécie do vegetal a ser utilizada é um dos pontos mais importantes, não sendo indicado o uso de plantas leguminosas e frutíferas podendo causar grandes riscos, pois podem ser consumidas pela população. A mamona é um exemplo de planta para aplicação da fitorremediação, pois posteriormente pode ser utilizada para fabricação de biodiesel, pelo alto volume de óleo que pode ser extraído e outras utilidades certificadas pela ISO 14000 (SOUZA, 2010).

Esta técnica, em conjunto com a biorremediação, se mostra eficaz e oferece bom custo-benefício, com capacidade de atender uma grande demanda de área. Suas vantagens são o baixo custo, controle do processo erosivo e hídrico e maior facilidade de aplicação quando comparado ao emprego de microrganismos. Tem como desvantagens as condições climáticas da região, que interferem diretamente no crescimento das plantas e o longo tempo para despoluição satisfatória (SOUZA, 2010).

Biorreatores

A utilização de biorreatores em processos de biorremediação de grandes quantidades de solos contaminados surge como uma alternativa interessante quando comparado com às demais técnicas, apresentando como principais vantagens a possibilidade de monitoramento contínuo do desempenho do sistema, o controle das condições ideais do processo, imprescindíveis à manutenção da vida microbiana, e o reduzido tempo de remediação (ALEF; NANNIPIERI, 1995).

Nas técnicas clássicas de tratamento biológico de solos contaminados é comum encontrar problemas relacionados à manutenção adequada da homogeneização do solo durante o tratamento. A primeira dificuldade na introdução é a concentração localizada de poluentes em algumas regiões do sistema, porém, esses problemas podem ser reduzidos através do uso de biorreatores, onde o material é misturado de forma mais efetiva (SALVI, 2013). Isto permite uma amostragem mais significativa e uma medida mais realista do sucesso do processo de descontaminação. Além disto, no interior do biorreator, as condições ambientais de pH, a disponibilidade de nutrientes, a aeração e a temperatura são controladas para otimizar o crescimento microbiano, sendo possível também a inoculação de microrganismos comprovadamente degradadores dos contaminantes (JACQUES *et al.*, 2007). Em geral, as taxas e a extensão da biodegradação nesta técnica são altas, em vista do controle sobre fatores abióticos e até bióticos no interior do biorreator, o que resulta no tratamento do solo num curto período.

Entretanto, essa técnica apresenta algumas desvantagens, como a limitação da quantidade de solo tratado devido ao tamanho do equipamento. Em alguns casos, deve-se primeiramente realizar um pré-tratamento do solo para a remoção de compostos tóxicos aos microrganismos e redução da quantidade dos componentes do solo. Além disso, apresenta um custo elevado devido à alta tecnologia utilizada (SALVI, 2013). Dessa forma, essa técnica restringe-se aos casos em que o solo está contaminado com altas concentrações do poluente e a utilização de outras técnicas, como a biorremediação, provavelmente não traria resultados satisfatórios, devendo-se levar em conta a natureza do contaminante, a composição da mistura a ser tratada, os microrganismos envolvidos, o grau de importância da aeração, o nível de necessidade de agitação, entre outros (DOELMAN; BREEDVELK, 1999).

Biopilhas

Esta tecnologia envolve o empilhamento de camadas de solo e a estimulação da atividade microbiana do solo pela aeração e/ou adição de minerais, nutrientes e umidade. As biopilhas são construídas sobre uma base impermeável para reduzir o potencial de migração dos lixiviados para o ambiente subsuperficial e são usadas para reduzir as concentrações de constituintes do petróleo em solos escavados, através do uso da biodegradação. Esta tecnologia tem demonstrado funcionar com sucesso para os hidrocarbonetos petrolíferos, hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA) e cloretos (CHEKOL, 2004 *apud* SOUZA, 2010).

Suas vantagens são o custo baixo comparado às outras técnicas convencionais; é efetiva para contaminantes com baixa taxa de biodegradação e tempo curto de tratamento, de 6 meses a 2 anos. Como desvantagens destacam-se a ineficiência para presença de metais em altas concentrações no petróleo (acima de 2500 ppm (partes por milhão)) e a geração de vapor durante o tratamento, que pode exigir tratamento prévio à emissão para o meio ambiente (SOUZA, 2010).

Landfarming

É uma técnica de remediação em que o solo contaminado é escavado em camadas finas sendo posteriormente espalhado sobre a superfície do solo. A atividade microbiana aeróbica faz a estimulação por intermédio da aeração e/ou adição de minerais, nutrientes e umidade. O "Landfarming" é empregado com eficiência no tratamento de rejeitos industriais. O rejeito é misturado ao solo por aração e dragagem e as condições físico-químicas do solo (água, aeração e nutrientes) são monitoradas para maximizar a atividade heterotrófica (SOUZA, 2010).

Suas vantagens são a simplicidade de execução, o tempo curto de tratamento, de 6 meses a 2 anos, tratamento de grandes volumes do solo, produção de pouco impacto ambiental e velocidade de biodegradação baixa para constituintes orgânicos. Como desvantagens destacam-se a toxicidade para a biota quando presença de metais pesados estão em concentrações superiores a 2500 ppm, a não biodegradação de constituintes voláteis, pois tendem a evaporar durante o processo, os custos da escavação e a alteração da qualidade do ar devido à geração de pós e poeiras durante a aeração.

Bioventilação

É uma técnica que aumenta a biodegradação natural dos hidrocarbonetos de petróleo através do fornecimento de oxigênio aos microrganismos aeróbios presentes no solo. Na

maioria dos casos, o oxigênio é suprido pela injeção direta de ar no solo contaminado, onde ocorre a biodegradação dos compostos orgânicos voláteis, que se movem lentamente através do solo biologicamente ativado (SOUZA, 2010).

Possui como vantagens o uso de equipamentos de fácil instalação, pouca intervenção no local contaminado e tempo curto de tratamento, de 6 meses a 2 anos. As desvantagens consistem na toxicidade aos microrganismos para concentrações elevadas dos constituintes, não ser aplicável em solo de baixa permeabilidade ou alto teor de argila e exigir autorização dos órgãos competentes para a injeção de nutrientes.

Portanto, este trabalho se baseia em estudos publicados na literatura sobre solos contaminados e análise dos resultados de tratamentos já empregados em outras regiões, de modo a definir, dentre as técnicas de biorremediação, fitorremediação e biorreatores, qual se mostra mais adequada para o solo da cidade de Brumadinho e propor um método para a sua recuperação que possa promover a degradação e a diminuição das concentrações de substâncias tóxicas presentes.

METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido consiste em levantamento bibliográfico narrativo acerca da recuperação de solos contaminados por metais pesados através do uso de plantas e microrganismos. Inicialmente, para uma contextualização acerca dos danos causados pelo rompimento da barragem de Brumadinho, buscou-se artigos, reportagens e estudos de caracterização da lama utilizando-se os termos “Brumadinho”, “Rompimento da Barragem de Brumadinho” e “Lama de Brumadinho” em websites como Google Acadêmico e em periódicos das plataformas CAPES e Scielo, no período de 2000 a 2022, sendo que referências anteriores a este período apenas foram utilizadas pela sua relevância.

Foram considerados dados que trouxeram informações sobre os metais pesados presentes na lama disposta no solo da cidade, levando à busca de possíveis tratamentos para a remoção, diminuição da concentração ou toxicidade desses metais. Para isso pesquisou-se por “Remediação de solos contaminados”, “Remediação de metais pesados”, “Biorremediação de metais pesados”, “Fitorremediação de Metais Pesados” em diversos periódicos, como os acima citados.

Considerou-se como critério para classificação e seleção dos artigos encontrados aqueles nos quais os métodos de tratamento foram devidamente descritos, contendo as espécies de plantas ou microrganismos utilizados, as taxas de remoção para cada um dos metais pesados, a facilidade e viabilidade de aplicação de cada um dos diferentes tipos de tratamentos propostos, bem como vantagens e desvantagens, do ponto de vista econômico e ambiental.

Por fim, procurou-se abordar, de acordo com as informações encontradas, todos os processos necessários para a aplicação das técnicas apresentadas e o funcionamento básico de cada uma, para que fosse possível propor, a partir dos estudos bibliográficos, uma maneira eficaz de tratar o solo de Brumadinho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desastres como o ocorrido em Brumadinho têm consequências principalmente na Saúde, a médio e longo prazos, visto que causam muito sofrimento aos envolvidos e provocam mudanças radicais na organização social e no modo de viver e trabalhar da região, além de traumas e lesões, aumento ou agravamento de condições crônicas como hipertensão, aumento

da poluição atmosférica causando crises de asma e dermatites, poluição hídrica, intoxicação química, perdas econômicas, além de provocar transtornos mentais e depressão (SILVA *et al.*, 2020).

Impacto Social e Econômico

Anteriormente ao desastre, a região continha plantações de alimentos orgânicos e agroecológicos, sem uso de agrotóxicos. Não obstante, muitos prejuízos foram contabilizados devido à perda de maquinário e depreciação do valor imobiliário. A agricultura local ficou com atividade impactada, principalmente os pequenos produtores, pois a passagem do rejeito causou graves danos aos agricultores da região (SILVA *et al.*, 2020).

A mineração apresenta grande importância econômica no Brasil sendo que, conforme revela o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2021), o setor minerário é responsável por mais de 2 milhões de postos de trabalho diretos, indiretos ou induzidos, sendo que no ano de 2020 a indústria mineral representou 5% do PIB do Brasil. A infraestrutura (Figura 1 (a)) também foi afetada, inclusive na dificuldade de deslocamento de veículos, em função da perda de pontes e da obstrução de estradas. Após o rompimento da barragem houve grande impacto na cidade com desemprego. A empresa Vale S.A. gerava cerca de 2.000 empregos entre funcionários e terceirizados e aquecia a economia local, sendo útil para pequenos e grandes comerciantes locais (MENDONÇA, 2019).



Figura 1 - (a) Danos à infraestrutura; (b) Área atingida pelo rompimento (IBAMA, 2019)

Impacto Ambiental

O rompimento da barragem de contenção de rejeitos provocou uma expressiva mudança na paisagem, com claros impactos sobre a vegetação presente nas proximidades da barragem (Figura 1 (b)), reduzindo populações bióticas. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), um dos impactos associados à perda de cobertura vegetal é a impermeabilização do solo, impedindo a infiltração da água da chuva, que acaba sendo escoada na superfície causando redução da recarga dos aquíferos, erosão dos solos, aumento da ocorrência de enchentes e assoreamento dos cursos d'água (MMA, 2007).

Um levantamento realizado pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), lista como os principais impactos ambientais ao longo da Bacia do rio Paraopeba, a poluição hídrica, perda da flora e fauna, diminuição da qualidade do ar, contaminação no solo e perda de

patrimônio cultural. A lama destruiu cerca de 133,27 hectares de Mata Nativa e 70,65 hectares de área preservada ao longo dos cursos d'água foram afetados (IBAMA, 2019).

Seis dias após o rompimento da barragem em Brumadinho, a fim de se realizar a caracterização química da lama, o Ministério da Saúde (MS) solicitou a coleta de 10 amostras de rejeitos ao longo de todo o trajeto percorrido por ele. Após a análise realizou-se a comparação com os valores de prevenção, definidos pelo Conama, e com os teores médios dos solos de Brumadinho levantados pelo banco de solo da Universidade Federal de Viçosa (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Os dados obtidos estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Concentração em ppm de alguns elementos presentes no rejeito de brumadinho.

Parâmetros Unidades	Alumínio (Al) mg/kg	Bário (Ba) mg/kg	Cobre (Cu) mg/kg	Ferro (Fe) mg/kg	Manganês (Mn) mg/kg
Conama 420/2009 Valor de Prevenção	-	150	60	-	-
Teor médio dos solos de Brumadinho*	30.126	71	45	64.726	512
1	5215	56	11	93827	2859
2	12561	110	40	90285	4596
3	9506	106	61	118304	6878
4	8486	111	63	119950	7241
5	5503	91	45	104621	5461
6	8371	122	64	141232	9658
7	9686	55	28	63581	3068
8	10334	149	101	130662	10287
9	7292	153	74	148029	13951
10	9909	137	92	132636	9862

Fonte: Oliveira *et al.* (2019)

Como observado na Tabela 1, a amostra 9 apresentou teor elevado para o bário e as amostras 3, 4, 6, 8, 9 e 10 teores de cobre acima dos parâmetros definidos pelo Conama. Além disso, o MS evidenciou a presença de ferro, manganês, cobre e bário com concentrações acima do normal no solo de Brumadinho (SILVA *et al.* 2020; IBAMA, 2019).

Entre 28 de janeiro e 13 de fevereiro de 2019, foram realizadas coletas periódicas em 17 pontos da Bacia do rio Paraopeba para o monitoramento dos teores de contaminantes presentes no solo e na água do rio, calculadas medianas, em ppm, para cada um dos contaminantes e os valores comparados aos dados das medianas da bacia entre os anos de 2009 e 2011. A pesquisa foi realizada por Viglio (2019) e equipe e os dados dispostos na Tabela 2 foram adaptados de Pereira (2020).

Tabela 2 – Caracterização da lama de rejeitos de Brumadinho.

Elemento	Mediana de rejeito (ppm)	Mediana da bacia após o acidente (ppm)	Mediana da bacia (ppm)	Elemento	Mediana de rejeito (ppm)	Mediana da bacia após o acidente (ppm)	Mediana da bacia (ppm)
Al (%)	1,365	0,515	1,300	In	23,10	3,35	12,60
As	17	5	3	Li	25,85	8,70	15,00
Ba	159,5	31,5	51,0	Mn	6831	459	351
Be	2,0	0,5	0,5	Mo	1,675	0,430	0,350
Cd	29,75	6,85	7,20	Ni	0,07	0,01	0,02
Co	0,405	0,030	0,030	P	28,5	3,7	6,0
Cu	88,75	7,30	7,30	Pb	936,0	219,5	214,0
Fe	68,45	17,38	17,38	Sr	15	2	7
Hg	0,145	0,020	0,020	Zn	71,5	23,5	29,0

Fonte: Pereira (2020).

Com os dados obtidos e tabulados é possível observar que embora na caracterização de Viglio (2019) a concentração de Alumínio (Al) tenha apresentado valor maior que a mediana da bacia, na caracterização do Ministério da Saúde, nenhuma das amostras apresentou teor superior ao médio do solo. Os metais Arsênio (As) e Bário (Ba) apresentaram concentrações bem próximas ao limite de prevenção definido pelo Conama (2009). Dentre as 10 amostras analisadas pelo Ministério da Saúde, 6 apresentaram concentrações de Cobre (Cu) acima do Valor de Prevenção do Conama (2009), juntamente com a mediana encontrada por Viglio (2019), que foi 12,15 vezes maior que a mediana da bacia entre 2009 e 2015.

Os Metais Ferro (Fe), Manganês (Mn), Chumbo (Pb) e Cádmiio (Cd) são os de maior importância, visto que ambos apresentaram altas concentrações nas caracterizações. O ferro e o manganês não possuem valor de referência postulados pelo Conama, entretanto apresentaram teores superiores aos médios do solo em todas as 10 amostras, tendo o ferro e o manganês uma média, de 1,77 e 14,43 vezes maior que a do solo na caracterização do Ministério da Saúde e 3,94 e 19,46 na caracterização de Viglio (2019), respectivamente.

Cádmiio e chumbo apresentaram médias superiores aos valores de prevenção do Conama, sendo para o cádmio 1,3 ppm e chumbo 72 ppm e encontrados 29,75 ppm e 936 ppm respectivamente. O Mercúrio, embora seja um dos metais mais tóxicos e preocupantes e tenha apresentado mediana 7,25 vezes maior que o teor médio da bacia, não ultrapassou o valor de prevenção do Conama de 0,5 ppm.

Dessa forma, o tratamento proposto neste trabalho teve como foco a remoção dos metais Ferro, Manganês, Chumbo e Cádmiio, visto seu alto teor no solo e os riscos que podem trazer à saúde da população, com destaque para os dois últimos.

Adsorção dos metais pela técnica de biorremediação

A biorremediação baseia-se num processo biológico de remoção da poluição e restauração da qualidade ambiental por meio de degradação dos poluentes utilizando microrganismos de ocorrência natural, como bactérias e fungos. No solo podem ser encontrados vários tipos de microrganismos como bactérias, fungos e protozoários de vida livre. Os microrganismos do solo são componentes essenciais para o funcionamento sustentável dos ecossistemas, sendo fundamentais no processo de fragmentação e decomposição da matéria orgânica e na disponibilização de nutrientes (REIS, 2013).

Vários microrganismos são utilizados para o processo de recuperação de metais e, de um modo geral, esses microrganismos são acidófilos (que vivem pH ácido), quimiotróficos (aqueles que obtêm sua energia através de compostos inorgânicos) ou autotróficos (que são capazes de sintetizar seu próprio alimento). Eles são classificados de acordo com a temperatura em que se desenvolvem, distinguindo-se em: mesófilos (se desenvolvem em temperatura entre 15 até 40°C), termófilos moderados (entre 40 a 50°C) e termófilos extremos (entre 55 a 80°C). As bactérias mais frequentemente isoladas e utilizadas são mesófilas e suas linhagens são das espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*. Essas bactérias, geralmente, coexistem intensificando o processo de biolixiviação. A *A. ferrooxidans* apresenta como característica marcante a resistência a altas concentrações de íons metálicos, já a *A. thiooxidans* produz e tolera altas concentrações de ácido sulfúrico e a bactéria *L. ferrooxidans* tem a capacidade de oxidar maiores taxas de íons Fe (II) (SILVA, 2014).

Takamatsu (1995) utilizou em seus estudos bactérias do gênero *Thiobacillus* para a extração dos metais pesados Cd, Zn, Cu, Pb, através da biolixiviação de lodos ativados. A descontaminação do lodo se deu em cubas de 2,5 litros, tendo sido necessária a correção do pH para 4 com a adição de ácido sulfúrico. A bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* realiza a oxidação de íons de Fe (II) utilizando como substrato para seu crescimento sulfetos metálicos. Entretanto, o rendimento energético da oxidação de compostos inorgânicos é menor que o da utilização de substratos orgânicos, fazendo com que seja necessário um tempo maior de incubação para o crescimento de uma biomassa razoável.

A biolixiviação a partir de *Thiobacillus ferrooxidans* pode se dar em pilhas, onde o meio é empilhado e irrigado de maneira contínua com líquido contendo a bactéria, coletado na base, podendo ser reutilizado após a extração dos metais. Já na lixiviação *in situ*, o líquido é bombeado através de passagens construídas e coletado ao final do processamento. Após extração dos metais, o líquido pode ser reutilizado após passar por novo processo de enriquecimento bacteriano (TAKAMATSU, 1995).

Conicelli (2017) estudou o mecanismo envolvido no processo de biossorção dos íons Pb (II) e Hg (II), em meio aquoso, através da bactéria *Cupriavidus metallidurans*, linhagens selvagens (CH34) e recombinantes (CH34/pcm3) e evidenciou que os resultados indicam que a *Cupriavidus metallidurans* (CH34/pcm3) pode ser uma boa opção para biossorção de íons metálicos por meio de biorreator.

A Biossorção trata-se da utilização de biomassa (viva ou morta) na adsorção de compostos de forma passiva, isto é, por meio de interações físico-químicas entre os grupos funcionais na superfície do biossorvente (VOLESKY, 2001 *apud* CONICELLI, 2017). A remoção de íons metálicos ocorre por meio do contato com a superfície celular. O valor do pH da solução é um dos fatores que mais afeta a adsorção de metais, pois com altos valores de pH ocorre o aumento da densidade de cargas negativas na solução, gerando sítios ativos para interação com o metal e, conseqüentemente, aumentando as taxas de adsorção.

Os resultados obtidos por Conicelli (2017) evidenciaram que a bactéria *C. metallidurans*, quer na sua forma selvagem (CH34), ou na forma geneticamente modificada (CH34/pcm3), apresentou altas taxas de remoção dos íons estudados, mantendo-os retidos ao longo de seis meses. A *C. metallidurans* (CH34/pcm3) possui uma capacidade máxima de adsorção de Mercúrio de 3,45 mg/g, e de 172,4 mg/g, para Pb (II), demonstrando a possibilidade de ser utilizada como biorremediadora em diversas áreas de elevada contaminação, entretanto, alterações no meio de tratamento comprometem a eficiência da adsorção, sendo necessário a realização de controle das condições físico-químicas, como o pH, demonstrando que o processo de descontaminação deve ser realizado em biorreatores (CONICELLI, 2017).

Absorção dos metais pela técnica de Fitorremediação

A fitorremediação consiste na utilização de plantas para redução de teores de metais pesados para níveis aceitáveis à saúde da população, melhorando as características físicas, químicas e biológicas do local. Esta técnica possui baixo custo e pode ser utilizada não apenas nos solos como também no ar e meio aquático. Em contrapartida, ela leva mais tempo para que os efeitos sejam percebidos.

Pensando nos metais encontrados no solo de Brumadinho e nas condições climáticas da região, buscou-se na literatura algumas plantas que podem reduzir consideravelmente a porcentagem desses contaminantes. A maioria das plantas fitorremediadoras conhecidas são em sua maioria de clima temperado. Uma planta hiperacumuladora deve possuir as seguintes características: alta taxa de acumulação mesmo em baixas concentrações do contaminante, acumular diversos contaminantes concomitantemente, alta taxa de crescimento e produção de biomassa, resistência a pragas e doenças e tolerância ao contaminante (GAERTNER, 2016). Os próximos itens apresentarão espécies de plantas usadas na fitorremediação e suas propriedades.

Eucalyptus

É um gênero de planta com flor pertencente à família *Myrtaceae*, conhecida pelo nome eucalipto, originada na Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania, o qual se adapta facilmente aos tipos de solo e clima, necessitando de profundidade maior que um metro para seu plantio. Algumas espécies de árvores foram testadas quanto à capacidade de crescerem em solo contaminado com metais pesados, dentre elas, as espécies *Eucalyptus torelliana*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus camaldulensis* mostraram-se capazes de tolerar esta condição de estresse. Devido às características de crescimento rápido, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de adaptação a condições estressantes, o eucalipto apresenta-se com grande potencial para emprego em programas de recuperação de áreas degradadas pela deposição de metais pesados no solo (MAGALHÃES, 2008).

Um estudo envolvendo a extração de nutrientes pela espécie *Eucalyptus grandis* demonstrou que para o Mn e Zn não há acumulação crescente com o aumento dos anos, e que o ponto de máxima velocidade de acumulação para o manganês ocorreu aos 4,2 anos de idade com uma taxa de 51,9% do total extraído. Para o zinco, entre 1,0 e 2,0 anos de idade ocorreu a maior variação na taxa de acumulação, que foi de 30,2%. As quantidades de manganês acumuladas pela parte aérea foram, em mg por planta, de 3158,93 no primeiro ano e 4069,05 no segundo ano, enquanto o Zn apresentou no primeiro ano acúmulo de 61,56 mg e 175,56 mg por planta no segundo ano. Aos 6 anos de idade, 98,8% do manganês total foi extraído, e aos 5 anos de idade, 99,4% do zinco total foi extraído (MAGALHÃES, 2008).

Nalon (2008), em estudo do potencial do eucalipto na fitorremediação de solo contaminado por chumbo, evidenciou que a espécie *Eucalyptus grandis* é hiperacumuladora deste metal, onde acumulou cerca de 248,7 mg por planta de chumbo em solo com concentração de 1429 ppm e 714,77 mg por planta em solo contaminado com 3782 ppm. Vale destacar que o acúmulo se deu em grande maioria nas raízes da planta, 96,4%. O eucalipto geralmente é plantado com espaçamento de 3m x 2m, sendo possível o plantio de aproximadamente 1.666 plantas por hectare, se tornando uma alternativa promissora devido ao seu reaproveitamento para produção de celulose e papel por indústrias desse setor.

Ricinus communis

Conhecida como mamona, esta planta é oleaginosa, originária da Ásia de clima tropical e seu crescimento é rápido. A germinação das sementes é do tipo epígea e podem ser observadas de 8 a 18 dias após a semeadura. A mamona tem grande facilidade de adaptação a diferentes condições do ambiente, possui bom desenvolvimento em climas tropicais e subtropicais admitindo uma faixa de temperatura entre 20 e 33° C, sendo resistente à seca (TÁVORA, 1982; BELTRÃO *et al.*, 2010).

No Brasil, o cultivo da mamona tem sido praticado pelos pequenos e médios produtores, constituindo-se numa cultura importante no âmbito social. Na região Nordeste, a cultura da mamona apresenta uma grande oportunidade de rentabilidade, devido ao seu elevado grau de adaptabilidade às condições climáticas da região (SALVI, 2013).

A mamona apresenta boa rentabilidade de extração de seu óleo, o qual pode ser usado na lubrificação de motores com alta rotação, matéria prima para a produção de biodiesel, fabricação de plásticos biodegradáveis, fabricação de tintas e vernizes e como adubo orgânico, chamado de torta, devido à sua composição rica em nitrogênio. Somado a essas aplicações, o óleo da mamona pode ser aplicado para a produção de remédios, cosméticos, na construção civil, na indústria automobilística, no revestimento de poltronas e paredes de avião e vidros a prova de balas. O óleo é extraído pela prensagem das sementes e contém 90% de ácido graxo ricinoleico, o que lhe confere características singulares e versáteis, possibilitando uma ampla gama de utilização industrial com utilidade comparável à do petróleo, com a vantagem de ser um produto renovável e barato (SOUZA, 2007).

Estudos levantados mostram que a mamona é uma hiperacumuladora de Cd. Além disso, os resultados para o BCF (fator de bioconcentração) da mamona foram muito superiores aos de outras plantas hiperacumuladoras, como *Solanum nigrum* para As (Arsênio), que indicaram valores de BCF entre 0,09 e 0,48, mas valores semelhantes para Cd, variando entre 5,23 e 18,5, (SALVI, 2013).

Em um estudo realizado em solo contaminado com lodo de destilaria, contendo os metais Fe, Ni, Zn, Cr, Cd, Pb, Cu e Mn, foi avaliado que a mamona concentrou 5655 mg.kg⁻¹ de Ferro nas raízes, 4785 mg.kg⁻¹ nas folhas e 4515 mg.kg⁻¹ no caule (CHANDRA, 2016 *apud* SILVA, 2019). Seu plantio deve ter espaçamento de 3m entre as linhas de mamona, no mínimo. Dessa forma, devido às suas características, a cultura de mamona se torna uma alternativa com potencial do ponto de vista econômico e estratégico para a região de Brumadinho.

Helianthus annuus

Conhecida como girassol, a *Helianthus annuus* é originária da América e foi muito utilizada como alimento pelos índios. Sua cultura é de suma importância no mundo devido a

qualidade do óleo comestível que se extrai das sementes, o ciclo vegetativo é curto e se adapta perfeitamente às condições do solo e clima pouco favorável. Pode ser usado em rotação de culturas, pois diminui a incidência de pragas, doenças e ervas daninhas. Também pode ser utilizado como adubação verde, pois se decompõe rapidamente em adubo orgânico, dessa forma favorece o plantio direto (MARTINS, 2015).

O girassol é uma cultura melhoradora da qualidade do solo, porque promove a ciclagem de nutrientes ao longo do perfil do solo e disponibiliza uma grande quantidade de nutrientes pela mineralização dos restos culturais, beneficiando o desenvolvimento e a melhoria do estado nutricional das culturas subsequentes (LEITE *et al.*, 2007 *apud* MARTINS, 2015).

Ressalta-se que os artigos encontrados destacam o uso de girassol na descontaminação de solos impactados por compostos inorgânicos, como urânio, selênio, plutônio, cádmio, cromo, cobre, céσιο, entre outros. Entretanto, poucos trabalhos relatam o uso dessa planta na fitorremediação de poluentes orgânicos. Em um estudo foi observado o perfil molecular da comunidade rizosférica de plantas de girassol e sua participação na fitorremediação de seis HPAs contidos no solo, na concentração inicial de $21,75 \pm 0,9 \text{ mg.kg}^{-1}$. A concentração de HPAs reduziu 93%, em 90 dias, na presença de girassol, enquanto na ausência da planta essa redução foi de 77% (TEJEDA-AGREDANO *et al.*, 2012 *apud* MARTINS, 2015)

Outro estudo avaliou o potencial fitoextrator de chumbo pelo girassol, vetiver e mamona, com amostras de solo da área da empresa de reciclagem de baterias automotivas concluindo-se que o girassol foi a espécie que apresentou maior teor de Pb na avaliação da planta inteira, com uma taxa de remoção de 8700 mg.kg^{-1} (MARQUES, 2009).

Essa oleaginosa que vem sendo utilizada na fitorremediação de sítios contaminados por metais pesados e tem se mostrado muito promissora economicamente, através de seu principal produto, o óleo, produzido de suas sementes, e ração animal (MARTINS, 2015). Pode, portanto, se tornar uma opção para o solo de Brumadinho.

Zea mays

Conhecida como milho, esta planta é originária do México, se constituindo um produto de suma importância para a agricultura brasileira e um dos cereais mais cultivados em todo o mundo, principalmente nos países em desenvolvimento. Seu cultivo ocorre em todas as regiões do país, sendo uma das principais fontes de alimento para o ser humano, podendo ser usado na alimentação animal e como fonte de matéria prima para uma infinidade de produtos, tais como combustíveis, bebidas, polímeros etc. (IBRAHIM *et al.*, 2015; MIRANDA, 2018).

O espaçamento do plantio do plantio deve ser em linha, usando 6 a 7 sementes.m⁻¹ entre linhas de 0,90 m, totalizando cerca de 55.555 plantas por hectare. Alguns estudos identificaram sinalização positiva dessa espécie em programas de fitorremediação, no entanto, não pode ser consumida como alimento devido à transferência dos metais para o organismo, trazendo riscos à saúde (ROCHA, 2018).

Proposta de tratamento

Os danos causados ao solo de Brumadinho têm prejudicado a retomada de atividades econômicas da população local. Pensando nisso, foram apresentados alguns dos possíveis mecanismos de tratamento do solo da cidade, para ajudar no processo de recuperação socioeconômica e ambiental da região. Para a elaboração da proposta foram considerados o custo-benefício, a taxa de absorção dos metais, a facilidade na aplicação da técnica e o retorno

financeiro para a cidade. A Tabela 3 faz uma relação entre as técnicas e os parâmetros utilizados na seleção.

Tabela 3 – Relação entre Técnicas e parâmetros de seleção.

	Custo-benefício	Absorção de metais	Facilidade de aplicação	Retorno financeiro
Biorremediação	X	X		
Fitorremediação	X	X	X	X
Biorreatores		X		

Fonte: Próprio autor.

Através da análise da tabela é possível concluir que o método de tratamento que melhor se aplica na região é a de fitorremediação, visto que a técnica de biorremediação *in situ* faz com que seja necessário realizar um bom controle do pH do solo, tendo grande interferência da temperatura local e da concentração de componentes orgânicos dispostos no solo.

O uso de biorreatores, apesar de possuir excelentes taxas de remoção de contaminantes, necessita de um alto investimento financeiro para sua construção, além de se fazer necessário o “manuseio e transporte” do solo, gerando alto custo para o município, sem retorno financeiro.

A fitorremediação é uma técnica que está sendo muito utilizada em países desenvolvidos como os Estados Unidos e o Canadá. No entanto, aqui no Brasil ela é pouco conhecida, mesmo sendo considerado um país com condições climáticas favoráveis. As atividades de plantio são de baixa complexidade, podendo ser realizadas pela própria população.

A escolha das plantas deve se basear nas suas propriedades bioacumuladoras, no seu reaproveitamento para geração de renda e na sua adaptação ao clima da região. O eucalipto, por exemplo, pode ser utilizado em indústrias de papel e celulose, os óleos extraídos da mamona, do milho e do girassol podem ser utilizados na produção de biodiesel.

Na escolha dos locais de plantio de cada uma das espécies de plantas é necessário considerar a característica da área, como a forma do solo e a distância de fontes de água, assim como a adaptabilidade de cada espécie. Propõe-se a rotação de culturas entre eucalipto, mamona e girassol. O eucalipto, pelo fato de ser uma planta que se adapta bem ao local onde é plantado, pode ser aplicado em cerca de 94 hectares. O girassol, que realiza a fitorremediação do chumbo, em cerca de 50 hectares e a mamona, que se demonstrou eficaz em descontaminar o Cd, em cerca de 60 hectares. O milho, embora indicado como potencial fitorremediador de solos contaminados com metais pesados, não deve ser selecionado para integrar a proposta, pelo risco de seu consumo como alimento.

Vale ressaltar que a aplicação da técnica pode ser custeada por empresas com interesse na utilização das plantas como matéria-prima. Foi avaliado que a utilização do eucalipto como matéria prima gera como resíduos tocos, galhos e serragem. Na extração dos óleos de mamona e girassol, os resíduos gerados são cascas e farelos. As cascas da Mamona podem servir de adubo para outras plantas, já as cascas e farelos do Girassol podem ser destinados à produção de ração animal e plástico. A torta da mamona pode ser usada como matéria prima para a produção de aminoácidos, plásticos, em especial os biodegradáveis, colas e inseticidas. Além disso, todos os resíduos ligno-celulósicos podem ser utilizados como biomassa na produção de etanol de segunda geração (GENTIL *et al.*, 2012).

Estima-se que a descontaminação através do eucalipto se dá após 5 anos de plantio, a mamona, após nove meses do plantio, podendo ser colhida e realizada uma nova plantação. O Girassol tem tempo de colheita semelhante, cerca de 90 dias. Estudos complementares devem ser realizados para avaliar se os resíduos gerados pela queima do biodiesel produzido pelos óleos vegetais liberariam novamente esses metais no meio ambiente.

CONCLUSÃO

O trabalho realizado buscou avaliar, através de referenciais teóricos, a situação do solo de Brumadinho após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos da mineração e consequente disposição deste rejeito sobre o solo. A grande preocupação acerca deste tema se deu devido a potencialidade tóxica de alguns componentes do rejeito, como os metais pesados. Estudos de caracterização do rejeito evidenciaram altas concentrações de diversos metais, com destaque para Ferro, Chumbo, Manganês e Cádmiio.

O ferro e o manganês não possuem valores de referência postulados pelo Conama e apresentaram, respectivamente, médias de 1,77 e 14,43 vezes maior que a do solo na caracterização do Ministério da Saúde e 3,94 e 19,46 na caracterização de Viglio. Cádmiio e chumbo apresentaram médias superiores aos valores de prevenção do Conama, sendo 1,3 ppm para o Cd e 72 ppm para o Pb, sendo encontrados 29,75 e 936 ppm, respectivamente.

Após os estudos realizados verificou-se um maior potencial na aplicação da técnica de fitorremediação, devido ao alto custo-benefício, maior facilidade de aplicação e possibilidade de retorno financeiro a partir da utilização das plantas como matérias primas. O eucalipto, após dois anos do seu plantio, pode acumular até 4069,05 mg de manganês e 714,77 mg de chumbo por planta, variando de acordo com a concentração do contaminante no solo. A mamona se demonstrou hiperacumuladora de cádmio, com fatores de bioconcentração entre 5,23 e 18,5 acumulando até 5655 mg.kg⁻¹ de ferro nas raízes, 4785 mg.kg⁻¹ nas folhas e 4515 mg.kg⁻¹ no caule. O girassol apresentou uma taxa de remoção de chumbo de 8700 mg.kg⁻¹ na avaliação da planta inteira.

A proposta desenvolvida se baseou apenas levantamento bibliográfico, não sendo realizadas visitas de campo para avaliação da real situação do solo da cidade. Os estudos de caracterização da lama datam de dias ou meses após a disposição do rejeito sobre o solo, sendo necessária, antes da aplicação da técnica de descontaminação, um novo estudo de avaliação das atuais taxas de contaminantes presentes no solo. Considera-se também necessário realizar um levantamento prático, em escala laboratorial, das taxas de absorção dos metais pesados do solo pelas plantas propostas.

Destaca-se que as plantas escolhidas para recuperar o solo da cidade de Brumadinho podem gerar retorno financeiro através da utilização como matérias primas para indústrias de papel e celulose (eucalipto) ou em indústrias de biocombustíveis (mamona e girassol). A aplicação da Fitorremediação poderá ser realizada pelos próprios moradores da região, visto que muitos perderam seus empregos após o rompimento da barragem, servindo como espécie de retomada da economia de Brumadinho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade São Francisco pelo apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

ALEF, Kassem; NANNIPIERI, Paolo. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, 1995, 576p.

BELTRÃO, N. E. M.; VALE, L. S.; MARQUES, L. F. CARDOSO, G. D.; SOUTO, J. S. Consórcio mamona e amendoim: opção para a agricultura familiar. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 5, n. 4, p. 35, 2010.

BRASIL, Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Um ano do desastre da Vale: Organização e resposta do Ministério da Saúde: **Boletim Epidemiológico**, Brasília, DF, ano 2020, número especial. Disponível em: <http://www.saude.gov.br/boletins-epidemiologicos>. Acesso em: 8 ago. 2022.

BRAUN, A. B.; TRENTIN, A. W. S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Biorremediação como alternativa de tratamento de solos contaminados com metais tóxicos. **Revista CIATEC - UPF**. Passo Fundo, RS, v. 11, n. 2, p. 73 - 87, 2019.

CETESB. **Governo do Estado de São Paulo**. Áreas contaminadas. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/o-que-sao-areas-contaminadas/>. Acesso em: 10 out. 2022.

CONAMA. Resolução No 420/2009, 28/12/2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas**, DOU, n. 249, p. 81-84, 30 dez. 2009. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>. Acesso em: 8 ago. 2022.

CONICELLI, B. P. **Biossorção de chumbo e mercúrio pelas linhagens selvagem e recombinante de C. metallidurans em meio aquoso**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

COSTA, R. N. T.; NUNES, K. G. **Riscos de metais pesados no ambiente**. GPEAS - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.

DOELMAN, P.; BREEDVELD, G. In situ versus on site practices. **Bioremediation of contaminated soils**, v. 37, p. 539-558, 1999.

GAERTNER, Mario Juliano Nunes; **Projeto de fitorremediação de área degradada pela disposição de resíduos sólidos urbanos**. Prefeitura Municipal de Glorinha, RS, 2016. Disponível em: <http://www.glorinha.rs.gov.br/gov/tp2019/projeto004.pdf>. Acesso em: 31 out. 2021.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASO, M. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 36-43, 2005.

GENTIL, R. M.; SERRA, J. C. V.; CASTRO, R. B. Resíduos sólidos orgânicos provenientes da extração de oleaginosas para biodiesel e seus potenciais de uso. **Geoambiente On-line**, n. 18, p. 1-16, 2012.

IBAMA. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. [S. l.]: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 30 jan. 2019. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectare>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Brumadinho - MG. Principais informações sobre o município**. [S. l.], 10 jul. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/brumadinho.html>. Acesso em: 3 out. 2022.

IBRAHIM, K. N.; YET, Z. R.; SOM, A. M.; RAZALI, N.; RAHAIZAH, N. A. M.; OTHMAN, E. N.; YAHYA, T. F. T. Heavy metal concentration (Pb, Cu, Fe, Zn, Ni) in plant parts of *Zea mays L.* cultivated in agricultural area near Alor Gajah, Melaka, Malaysia. **American Journal of Environmental Engineering**, v. 5, n. 3A, p. 8-12, 2015.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números**. [S. l.], 30 dez. 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>. Acesso em: 8 fev. 2022.

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

LIMA, V. F.; MERÇON, F. Metais pesados no ensino de química. **Química nova na escola**, v. 33, n. 4, p. 199-205, 2011.

MAGALHÃES, M. O. L. **Avaliação do potencial de espécies de eucalipto na remediação de áreas contaminadas com metais pesados**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARQUES, L. F. **Fitoextração de chumbo por girassol, vetiver, trigo mourisco, jureminha e mamona em áreas contaminadas**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2009.

MARTINS, C. D. C. **Fitorremediação de solo oriundo de área industrial multicontaminado com metais pesados e hidrocarbonetos do petróleo por girassol (*Helianthus annuus*)**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MENDONÇA, H. Em luto, Brumadinho também teme por seu futuro econômico. **El País**, [S. l.], p. 1-5, 2 fev. 2019. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2019/02/01/politica/1549043753_076295.html. Acesso em: 3 set. 2019.



MIRANDA, R. D. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v. 74, n. 829, p. 24-27, 2018.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido**. [S. l.], 2007. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf. Acesso em: 12 jul. 2022.

MOSCHEM, J. C.; GONÇALVES, P. R. Impacto Toxicológico de Metais Pesados: Uma Análise de Efeitos Bioquímicos e Celulares: Impact of Heavy Metals: An Analysis of Biochemical and Cellular Effects. **Health and Biosciences**, v. 1, n. 2, p. 88-100, 2020.

NALON, L. **Potencial do eucalipto na fitorremediação de um solo contaminado por chumbo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Federal Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, SP, 2008.

OLIVEIRA, W. K.; ROHLFS, D. B.; GARCIA, L. P. O desastre de Brumadinho e a atuação da Vigilância em Saúde. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 28, 2019.

PEREIRA, A. R. B.; FREITAS, D. A. F. Uso de micro-organismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 995-1006, 2012.

PEREIRA, C. C. Caracterização geotécnica e geoquímica dos rejeitos da barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), em decorrência do desastre de 25/01/2019. **XXVIII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp**. Campinas, SP. 2020.

REIS, K. C. **Seleção de Bactérias Resistentes a Fe²⁺ com potencial aplicação em biorremediação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2013.

ROCHA, A. M. **Potencial fitorremediador de variedades de milho crioulo em agroecossistemas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, MG, 2018.

SALVI, M. B. **Otimização de biorremediação de solo contaminado com organoclorados utilizando basidiomicetos em biorreatores**. Tese (Doutorado) - Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2013.

SILVA, J. C.; Bactérias Mineradoras. **Rev. Temas Atuais em Biologia**. São Carlos, SP. v. 2, n. 1, 2014. Disponível em: <http://www.temasbio.ufscar.br/?q=artigos/bact%20C3%A9rias-mineradoras>. Acesso em 5 set. 2022.

SILVA, M. C. F. **Potencial fitorremediador de *Ricinus communis* L. (mamona) em solo contaminado pela presença de ferro (Fe²⁺), oriundo de rejeito de minério, em Minas do Camaquã - RS**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, 2019.

SILVA, M. A.; FREITAS, C. M.; XAVIER, D. R.; ROMÃO, A. R. Sobreposição de riscos e impactos no desastre da Vale em Brumadinho. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 72, n. 2, p. 21, 2020.

SOUZA, A. S.; TÁVORA, F. J. A. F.; PITOMBEIRA, J. B.; BEZERRA, F. M. L. Épocas de plantio e manejo da irrigação para a mamoneira. II–crescimento e produtividade. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 4, p. 422-429, 2007.

SOUZA, M. R. F. **Fitorremediação de solos contaminados por metais pesados**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, Belo Horizonte, 2010.

TAKAMATSU, A. A. **Avaliação da biolixiviação de metais pesados por bactérias do gênero *Thiobacillus* em lodos biológicos para utilização agrícola como fertilizante**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1995.

TÁVORA, F. J. A. F. **A cultura da mamona**. Fortaleza: Epace, 1982, 112p.

VALE, S. A. **Brumadinho**. [S. l.], 1 jan. 2021. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/Brumadinho.aspx>. Acesso em: 14 set. 2021.

VIGLIO, E. P.; PIMENTEL, M. A.; MARMOS, J. L.; QUINTARELLI, J. M. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba: Relatório 02 – Monitoramento Geoquímico**. Ministério de Minas e Energia. Cprm – Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, MG, 2019. 24p.

Publicado em: 16/11/2022