AVALIAÇÃO DE ECOTOXICIDADE EM ALLIUM CEPA EM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM BTEX

ECOTOXICITY ASSESSMENT OF ALLIUM CEPA IN A WATER TREATMENT SYSTEM CONTAMINATED WITH BTEX

EVALUACIÓN DE LA ECOTOXICIDAD DE ALLIUM CEPA EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA CONTAMINADO CON BTEX

10.56238/IIMultiCientifica-027

Marcelo Oliveira Caetano
Doutor em Engenharia
Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos
E-mail: mocaetano@unisinos.br

Luciana Paulo Gomes
Doutora em Engenharia Civil
Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos
E-mail: lugomes@unisinos.br

Alexya da Silva Lague
Mestre em Engenharia Civil
Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos
E-mail: alexyalague@hotmail.com

Elisa Kerber Schoenell
Doutora em Qualidade Ambiental
Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos
E-mail: ekschoenell@unisinos.br

Amanda Gonçalves Kieling
Doutora em Engenharia
Instituição: Universidade do Vale do Rio dos Sinos
E-mail: amandag@unisinos.br

RESUMO
Este trabalho estudou a remoção dos compostos BTEX em água, utilizando equipamento compacto composto por sucção à vácuo, aeração e sistema de adsorção com 50% de carvão ativado e 50% de cinza de casca de arroz. A concentração dos BTEX foi determinada por Cromatografia Gasosa. Os testes de ecotoxicidade avaliaram o comprimento da raiz da Allium Cepa, considerando a amostra bruta 100% (BTEX100) e as diluições de 50% (BTEX50) e de 25% (BTEX25). Executaram-se 03 ensaios com duração total de 240 minutos, com amostragens nos tempos de monitoramento de 0 minutos (T0), 120 minutos (T120) e 240 minutos (T240). Os resultados mostraram eficiências de remoção superiores a 99% das concentrações dos compostos BTEX estudados, o que está associado,

principalmente, ao processo de sucção à vácuo. No entanto, os testes de ecotoxicidade indicaram a necessidade de incluir a etapa de adsorção ao tratamento, visando a redução da toxicidade da água tratada.

Palavras-chave: Água Subterrânea. BTEX. Toxicidade. Adsorção. Cinza da Casca de Arroz. Allium Cepa.

ABSTRACT
This study investigated the removal of BTEX compounds from water using a compact device consisting of vacuum suction and an adsorption system with activated carbon and rice husk ash. These were followed by ecotoxicity tests that assessed the root length of Allium cepa, considering the raw sample at 100% (BTEX100) and the 50% (BTEX50) and 25% (BTEX25) dilutions. Samples were collected at the following points: A1 – suction well; A2 – vacuum system; A3 – adsorption filter. Three trials were conducted with a total duration of 240 minutes, with sampling at monitoring times of 0 minutes (T0), 120 minutes (T120), and 240 minutes (T240). The results showed removal efficiencies greater than 99% of the concentrations of the compounds studied using the compact device. This decrease is mainly attributed to the vacuum suction process. However, the ecotoxicity tests indicated the need for the adsorption step to reduce the toxicity of the treated water.

Keywords: Groundwater. BTEX. Toxicity. Adsorption. Rice Husk Ash. Allium Cepa.

RESUMEN
Este estudio investigó la eliminación de compuestos BTEX del agua mediante un equipo compacto que consta de succión al vacío, aireación y un sistema de adsorción con 50 % de carbón activado y 50 % de ceniza de cáscara de arroz. La concentración de BTEX se determinó por cromatografía de gases. Se realizaron pruebas de ecotoxicidad para evaluar la longitud de la raíz de Allium cepa, considerando la muestra cruda al 100 % (BTEX100) y diluciones al 50 % (BTEX50) y al 25 % (BTEX25). Se llevaron a cabo tres pruebas con una duración total de 240 minutos, con muestreo a los 0 minutos (T0), 120 minutos (T120) y 240 minutos (T240). Los resultados mostraron eficiencias de eliminación superiores al 99 % de las concentraciones de los compuestos BTEX estudiados, lo cual se asocia principalmente al proceso de succión al vacío. Sin embargo, las pruebas de ecotoxicidad indicaron la necesidad de incluir una etapa de adsorción en el proceso de tratamiento, con el fin de reducir la toxicidad del agua tratada.

Palabras clave: Agua Subterránea. BTEX. Toxicidad. Adsorción. Ceniza de Cáscara de Arroz. Allium Cepa.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente número de uso, transporte, armazenamento e descarte de produtos derivados do petróleo, a poluição de solos e águas tornou-se um fator ambiental crítico decorrente de acidentes e atividades humanas envolvendo esses produtos (Li et al., 2020).

A gasolina e o óleo diesel são constituídos de hidrocarbonetos derivados do petróleo como os compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno e os isômeros (o, m, p) xilenos, também conhecidos como BTEX. A presença dos BTEX em águas subterrâneas é proveniente de vazamentos de combustíveis em tanques de armazenamento subterrâneos, localizados em postos de combustíveis, vazamentos em tubulações e derramamentos em superfícies. A gravidade destas contaminações ocorre pela toxicidade desses produtos que podem causar sérios problemas ambientais e na saúde pública (Yang et al., 2020; Khudur et al., 2019; Batista, Barros, Bárbara, 2021; Poddar et al., 2022; Flores-Chaparro et al., 2021).

Os BTEX possuem densidade mais baixa do que a água, portanto, formam uma pluma de contaminação nos lençóis freáticos e migram facilmente com o movimento das águas subterrâneas podendo atingir grandes extensões de contaminação (Yang et al., 2020). Desta maneira, técnicas de remediação física, química e biológica são aplicadas para a recuperação dos locais contaminados (Li et al., 2020).

Existem inúmeras tecnologias para a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos. Alguns métodos de tratamento, como biorremediação, oxidação química, Air Stripping e adsorção já foram empregados e obtiveram sucesso na remoção destes contaminantes em água (Chiu et al., 2017). Caetano et al. (2016) empregaram um sistema compacto de tratamento de águas subterrâneas contaminadas com BTEX e Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (TPH) utilizando sistema de sucção a vácuo, aeradores e filtros de adsorção. Os resultados mostraram eficiências superiores a 90% na remoção dos compostos. Cardoso, Lodi e Barros (2017) também relatam eficiência no tratamento de águas subterrâneas utilizando tratamento por Bombeamento e Tratamento (Pump And Treat), Air Sparging, Processos de Oxidação Avançada (POA) e Biorremediação.

A técnica Pump and Treat consiste no bombeamento da água subterrânea para a superfície e na aplicação de outros métodos de tratamento, amplamente aplicada para os compostos orgânicos voláteis (COVs) ou semi-voláteis em água. Outra técnica frequentemente utilizada é o Air Stripping através da introdução de uma corrente de ar na água contaminada, promovendo a liberação e o transporte desses contaminantes para o ar.

No processo de adsorção ocorre a transferência do contaminante do meio líquido para a superfície do material adsorvente. O carvão ativado (CA) é o mais utilizado devido a suas propriedades de sorção, hidrofobicidade, elevada área superficial e estrutura microporosa (Ossai et al., 2020). Porém, devido ao seu alto custo de obtenção, dificuldade de regeneração e aos impactos ambientais

negativos gerados em sua produção, materiais alternativos, renováveis e de baixo custo como resíduos industriais e agrícolas são estudados para tratamento de águas e efluentes (Foo; Hameed, 2009).

Neste cenário, tem-se como alternativa a cinza da casca de arroz (CCA), um resíduo industrial usualmente originado em caldeiras pelo uso para geração de energia térmica. Este material tem destinação final tradicional a dispersão em solo agrícola ou aterros industriais, sendo uma fonte de poluição pelo teor de sílica e carbono em sua composição (Camargo et al., 2018; Foo; Hameed, 2009). No entanto, essas características permitem a valorização do resíduo para aproveitamento como coproduto (Camargo et al., 2018; Foletto et al., 2005).

A utilização da CCA como adsorvente no tratamento de águas e efluentes tem sido estudada. Para Foo e Hameed (2009), mostrou ser um adsorvente alternativo em potencial para o tratamento de águas residuais na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos. Kieling, Mendes e Caetano (2018) apresentaram remoções entre 43% e 100% para efluentes contaminados por Cromo VI com uso da CCA como adsorvente. Schmitt, Kieling e Caetano (2020) aplicaram a CCA para a remoção de contaminantes emergentes em solução aquosa. As pesquisas de Gomes et al. (2016), Caetano et al. (2016) e Caetano et al. (2018) mostraram remoções superiores a 90% com uso de CCA no tratamento de águas subterrâneas contaminadas por BTEX e TPH.

No Brasil, a principal legislação aplicável a águas e solos contaminados é a Resolução do CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009). Já o lançamento de efluente em recursos hídricos deve atender os requisitos da Resolução do CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011). Além dos tradicionais parâmetros físicos, químicos e biológicos, esta última aborda a necessidade de testes de ecotoxicidade para a avaliação da ação tóxica de contaminantes. (García-Medina et al., 2020).

Para a verificação da toxicidade em águas e efluentes, o uso de bioindicadores se destaca como metodologia. A Allium Cepa (cebola) é muito utilizada nessa aplicação devido a ser facilmente cultiva e os custos serem baixos (Caetano et al., 2018).

Fiskesjö (1985) estudou o crescimento de raízes da Allium cepa para avaliar a toxicidade em efluentes. Conforme o autor, quanto mais baixas as concentrações dos contaminantes em efluentes, maior foi o comprimento das raízes. Esta técnica também foi adotada nas pesquisas de Mazzeo et al. (2010), Caetano et al. (2018)e Kieling, Mendel e Caetano (2018).

Neste contexto, esta pesquisa estudou a utilização de um sistema de tratamento em escala piloto para remoção de BTEX presentes em água subterrânea contaminada por gasolina e óleo diesel. O sistema empregado era composto por sucção à vácuo, aeração e filtro de adsorção com composição de 50% CA e 50% CCA. A eficiência do sistema foi avaliada pela remoção de BTEX e pelo teste de ecotoxicidade com Allium Cepa.

2 METODOLOGIA

2.1 APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO PILOTO

Os ensaios foram realizados em escala piloto (Caetano, 2014), em um sistema de remediação instalado na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). O equipamento de tratamento desenvolvido é subdividido em três sistemas: tratamento à vácuo, aeradores e filtro de adsorção. A Figura 1 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 1: Equipamento de tratamento utilizado nos ensaios.



Legenda: 1 – Reservatório de mistura de água e contaminantes; 2 - Poço de sucção; 3 – Bomba de recalque; 4 – Sistema de sucção à vácuo; 5 – Aeradores; 6 – Filtro de Adsorção; 7 – Reservatório de água tratada.
Fonte: Autores (2026)

A descrição dos componentes do equipamento apresentam-se a seguir:

- 1 - Reservatório de 5.000L para armazenamento da água contaminada com diesel e gasolina comum (R1): para confecção da água contaminada utilizou-se água da chuva e uma mistura de 2,5L de gasolina comum e 2,5L de diesel comum simulando simular uma água subterrânea contaminada por vazamentos em postos de combustíveis. A mistura era realizada por 30 minutos através de uma bomba submersa em temperatura ambiente.
- 2 – Poço de Sucção (Ponto de coleta A1): fez-se uma simulação de perfil de solo e um poço de sucção instalado. O perfil de solo foi executado dentro de uma tubulação de PVC de 500 mm. Era constituído de camadas de solo sintético de horizontes A (espessura de 0,2 m), B (espessura de 1,7 m) e C (espessura de 0,1 m). Em meio ao perfil de solo, instalou-se um poço de sucção composto por um tubo de 50 mm de diâmetro.
- 3, 4 – Sistema de sucção (Ponto de coleta A2): efetuou-se o processo de bombeamento por sucção da água utilizando injetor tipo “venturi”. O tratamento ocorria em parte pela volatilização de compostos orgânicos pela pressão negativa proporcionada (- 700 mm Hg) e em parte por *Air Stripping*. A saída dos gases ocorria pelo dreno no topo do equipamento e tratados por filtros de adsorção de carvão ativado em pó. A vazão de água neste ponto era de cerca de 0,027 L/s.

- 5 – Aeradores: processo de aeração por ar difuso (aeradores por aspiração). A hélice imersa no líquido criava uma subpressão succionando o ar atmosférico de uma ranhura situada na parte superior. O ar difundia-se no meio líquido em pequenas bolhas, oxigenando e misturando a massa líquida. O processo de remoção dos COVs, da mesma forma que a etapa de sucção, era por *Air Stripping*, porém, com ingresso apenas de oxigênio. A saída dos gases ocorria pelo dreno no topo do equipamento. A vazão de água no aerador 1 era de 0,026 L/s e do aerador 2 de 0,40 L/s.
- 6 – Filtro de Adsorção (Ponto de coleta A3): a água fluía através da coluna mista (adsorventes: 50% CA e 50% CCA). Os contaminantes eram adsorvidos pela coluna, tratando a água progressivamente até a saída do filtro. Utilizou-se a massa de adsorvente de 33,1 kg de CCA e 29,6 kg de CA. Correspondendo a um volume de adsorvente de 0,034 m³. A vazão de entrada de água foi igual a 0,04 L/s e a velocidade de percolação foi de 0,08 cm/s.
- 7 – Reservatório de 5.000L para armazenamento de água tratada (R2): reserva de 5.000 litros para a água tratada.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADSORVENTES

Apresentam-se as características do CA e da CCA na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Características do carvão ativado (CA) e da cinza de casca de arroz (CCA).

Parâmetro	CA Granular	CA Fino	CCA	Metodologia de caracterização
pH	7,10	2,85	8,0	Ng Chilton et al. (2002)
Condutividade (µS/cm)	866,5	1470	81,70	Ng Chilton et al. (2002)
Massa específica (g/cm³)	1,5135	1,7043	19	ABNT NBR-6508/1984 ASTM D850, 2002
Granulometria (mm)	4,05 - 0,425	0,297 – 0,044	1,70 - 0,053	ABIFA, 2003
Percentual de perda ao fogo (%)	86,23	67,49	7,20	ABIFA, 2003

Fonte: Autores (2026)

O CA utilizado é proveniente da ativação química de casca de coco queimado do fornecedor do Estado do Paraná, Brasil. Já a CCA é resultante da combustão em caldeira de uma empresa do ramo alimentício no Rio Grande do Sul, Brasil, que utiliza casca de arroz como combustível. A casca de arroz é alimentada automaticamente em sistema contínuo, com condição de queima de 900°C durante 9 minutos. A CCA foi utilizada na sua forma natural, sem tratamento químico ou térmico e foi segregada para melhorar a uniformidade do material, retirando partículas indesejáveis, como as cascas de arroz não queimadas. A segregação foi realizada por agitador de peneiras (malha de 1,2 mm) durante 5 minutos.

A análise química (Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu) indica que o componente majoritário encontrado na CCA é o silício (85%),

apresentando traços de outros elementos como ferro, manganês, cálcio, potássio e fósforo. Para o CA, a fração inorgânica apresentou silício, enxofre, ferro, cobre, cálcio, potássio e fósforo. Se observou uma maior concentração de potássio, que associado ao pH alcalino do material, indica uma possível ativação com hidróxido de potássio.

Nos ensaios de DRX (difratômetro Siemens D5000), observou-se que a CCA bruta e a CCA segregada apresentaram o halo de amorfismo que corresponde ao desvio da linha base entre os ângulos de 15º e 30º, indicando, a amorficidade do material. De acordo com os picos apresentados, a sílica desta cinza pode estar presente na forma de cristobalita. Já o difratograma do CA indicou que o material é amorfo.

Uma análise da microestrutura da CCA (Equipamento MEV, marca Shimadzu SSX-550) demonstrou que a queima não é uniforme, resultando em partículas com granulometria diferentes decorrentes da temperatura e tempo de residência durante o processo de combustão. Observou-se que as partículas de CCA são formadas por duas partes: uma externa, formada por uma estrutura mais densa; outra interna, mais porosa que indica o potencial do seu uso como adsorvente.

Os estudos cinéticos demonstraram que a CCA e o CA apresentam capacidades de adsorção altas e semelhantes no tempo de equilíbrio de 120 minutos. De forma geral, a remoção se deu na seguinte ordem: etilbenzeno > xileno > tolueno > benzeno. O modelo cinético de Pseudo-segunda ordem (Tabela 2) apresentou a melhor correlação para todos os ensaios.

Tabela 2: Constantes para Pseudo-segunda ordem para monocompostos.

Composto	C_0 (mg/L)	CCA				CA			
		q_e (mg/g)	K_2 (g.min/mg)	h_2 (mg/g.min)	R^2	q_e (mg/g)	K_2 (g.min/mg)	h_2 (mg/g.min)	R^2
Benzeno	1	0,0971	8,5804	0,0809	0,9999	0,0984	2,0758	0,0201	0,9989
	5	0,4914	1,0647	0,2571	0,9998	0,5106	0,2880	0,0751	0,9981
	10	0,9739	0,218	0,2068	0,9988	1,047	0,0418	0,0459	0,9804
	20	1,7658	0,1434	0,4473	0,9992	2,1083	0,0156	0,0693	0,9665
Tolueno	1	0,0997	15,5431	0,1545	0,9999	0,1005	2,8415	0,0287	0,9994
	5	0,4919	0,9497	0,2298	0,9998	0,4989	0,2523	0,0628	0,9969
	10	0,9706	0,6154	0,5798	0,9999	1,0018	0,1157	0,1162	0,9967
	20	1,8814	0,2737	0,9688	0,9998	2,0759	0,0271	0,1168	0,987
Etilbenzeno	1	0,10005	48,8011	0,4885	0,9999	0,1015	0,1941	0,002	0,9987
	5	0,4967	18,9404	4,6728	0,9999	0,5031	0,4302	0,1089	0,999
	10	0,9964	1,8823	1,8688	0,9999	0,9989	0,2894	0,2888	0,9994
	20	1,9908	0,4864	1,9278	0,9999	2,012	0,1724	0,6979	0,9996
Xileno	1	0,10009	58,1652	0,5827	0,9999	0,1007	1,4989	0,0152	0,9979
	5	0,501	2,8581	0,7174	0,9999	0,5049	0,5962	0,152	0,9996
	10	0,9906	0,7963	0,7814	0,9999	1,0039	0,3043	0,3067	0,9996
	20	1,95	0,1811	0,6889	0,9996	1,9896	0,0776	0,3073	0,9975

Legenda: k_2 é a constante da velocidade de adsorção (g.min/mg); q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g); h é a velocidade de adsorção inicial (mg/g.min); R^2 é o coeficiente de correlação.
Fonte: Autores (2026)

As isotermas experimentais obtidas para os monocompostos caracterizam a adsorção em superfícies porosas com formação de monocamada. Os ajustes aos modelos teóricos não apresentaram unanimidade, observando em algumas situações uma correlação adequada para Langmuir e Freundlich (Tabela 3).

Tabela 3: Parâmetros dos modelos para monocompostos.

Modelo de Langmuir								
Compostos	**CCA**				**CA**			
	Q_o (mg/g)	**K_L (L/mg)**	**R_L**	**R^2**	**Q_o (mg/g)**	**K_L (L/mg)**	**R_L**	**R^2**
Benzeno	13,33	0,1643	0,8762	0,9505	13,51	0,2054	0,8504	0,7675
Tolueno	0,7868	14,233	0,2863	0,9387	0,7636	11,299	0,2820	0,9291
Etilbenzeno	0,8795	63,16	0,3134	0,9604	15,97	0,2208	0,9615	0,988
Xileno	1,64	14,89	0,4927	0,9137	3,22	0,853	0,7822	0,9704
Modelo de Freundlich								
Compostos	**CCA**				**CA**			
	n	**K_F $(mg/g)(L/mg)^{1/n}$**		**R^2**	**n**	**K_F $(mg/g)(L/mg)^{1/n}$**		**R^2**
Benzeno	1,6482	0,9669		0,9204	1,9094	0,9519		0,8458
Tolueno	1,6382	25,351		0,9591	1,569	1,2525		0,924
Etilbenzeno	1,6866	3,619		0,9942	0,8309	6,1108		0,9616
Xileno	2,47	1,8736		0,9589	1,2993	1,9023		0,9174

Legenda: Q_0 é a capacidade máxima de adsorção (mg/g); K_L são as forças de interação adsorvente-adsorbato (L/mg); R_L é um parâmetro de equilíbrio; K_F é a distribuição dos sítios ativos de adsorção$(mg/g)(L/mg)^{1/n}$; n é a capacidade de adsorção do adsorvente.
Fonte: Autores (2026)

2.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO POR VÁCUO E ADSORÇÃO

Antes do início da primeira amostragem, fez-se uma recirculação de 1h30min em todo o equipamento para uniformização da água contaminada. O abastecimento do sistema foi contínuo durante todos os testes. Foram três ensaios com duração de 240 minutos cada. A água contaminada era transferida do reservatório de 5.000L (1) para o poço de sucção (2), conforme a Figura 1. Portanto, a concentração inicial de BTEX para os três ensaios e nos três tempos monitorados foram distintas entre si.

As coletas foram realizadas nos pontos A1- poço de sucção; A2 – sistema de vácuo; A3 – filtro de adsorção. As amostragens foram realizadas nos tempos de monitoramento 0 minutos (T_0), 120 minutos (T_{120}) e 240 minutos (T_{240}). Para tal, utilizou-se frascos âmbar de 1L, os quais foram refrigerados entre 0ºC e 6ºC.

Para a quantificação dos contaminantes, as amostras foram transferidas para vials com 5mL de solução de NaCl saturada, para aumentar a força iônica da solução, enriquecendo a fase gasosa através da redução da solubilidade dos hidrocarbonetos pela alteração do equilíbrio entre as fases (Nogueira, 2006).

A concentração dos BTEX foi determinada utilizando um Cromatógrafo Gasoso (CG) com Detector de Ionização de Chama (FID), marca DANI, com Headspace Dinâmico Master DHS da mesma marca. A coluna utilizada foi da marca DANI DN-WAX com as seguintes características: 30 m de comprimento, 0,25 mm de diâmetro interno, 0,25 µm da espessura do filme, 40°C de limite inferior de temperatura e 250 °C de limite superior de temperatura.

O método de análise foi adaptado da metodologia proposta pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, método nº 8260C. A adaptação foi necessária devido às condições da coluna utilizada, promovendo uma melhor qualidade do cromatograma.

As amostras foram injetadas automaticamente através de amostrador Headspace com temperatura do forno de 40ºC, sem tempo de incubação e sem shaking. As condições operacionais utilizadas no GC foram: Gás de arraste – Nitrogênio; taxa de fluxo – 0,7 mL/min durante 6 minutos, 2mL/min até o fluxo de 1mL/min; temperatura do injetor - 200°C; temperatura do detector FID - 280°C; Split ratio - 1:50; temperatura inicial de 40°C, isoterma de 1 min, 2°C/min até 70 °C e 50°C/min até 220°, para um volume injetado de amostra de 100 µL. A identificação e quantificação das substâncias (BTEX), obtidas pelo DHS CG-FID, bem como o gerenciamento do DHS e do CG-FID, foram realizadas com o software para o sistema computacional Windows Clarity™ versão 4.0.04.987.

2.4 TESTES DE ECOTOXICIDADE

Os testes de ecotoxicidade foram realizados com base no método proposto por Fiskesjö (1985), cujo parâmetro macroscópico avaliativo e responsável pela conclusão quanto à toxicidade do efluente corresponde ao comprimento da raiz da *Allium Cepa* (cebola comum) ao término dos ensaios.

As unidades de *Allium Cepa* utilizadas no ensaio foram selecionadas buscando-se bulbos de pequenos diâmetros (cerca de 20 à 30mm), secos e com ausência de folhas ou raiz. As camadas exteriores e raízes foram removidas, mantendo intacto o anel primordial, a partir de onde se desenvolvem novas raízes. Utilizou-se tubos de ensaio para a execução do teste (Ø: 2,50cm e h: 15,00cm).

Avaliou-se os pontos de coletas A1, A2 e A3, nos tempos de monitoramento T_0, T_{120} e T_{240}. Foram analisadas amostras com 25% ($BTEX_{25}$), 50% ($BTEX_{50}$) e 100% ($BTEX_{100}$) de solução BTEX, sendo as diluições realizadas com água potável. Foram monitoradas cinco réplicas para cada diluição e tempo de ensaio. Como amostra de controle negativo, utilizou-se água potável.

Os bulbos de *Allium Cepa* foram dispostos em contato com as diluições e levados para a câmara de germinação em temperatura ambiente controlada (+20°C), protegidas da luz do sol, com fotoperíodo de 16 horas luz e 8 horas escuro, por um período de 96 horas.

O volume perdido por evaporação ou absorção pelo bioindicador era reposto uma vez ao dia com as respectivas diluições, armazenadas em um refrigerador à temperatura de +4°C. Ao término do período realizou-se cinco medições referentes as cinco maiores raízes em comprimento de cada *Allium Cepa* com uso de régua comum.

Por fim, o Índice de Controle Relativo (ICR), que relaciona o comprimento das raízes das soluções com a amostra de controle foi calculado conforme apresentado na Equação 1 e o Índice de Inibição (Ii), que representa à resistência ao crescimento das raízes, foi calculado conforme Equação

2. Aplicou-se o teste de normalidade para verificar se os dados eram normalmente distribuídos e para análise de variância utilizou-se o método ANOVA e análise de TUKEY considerando o nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

$$ICR = \frac{Lm}{Lc} \quad (1)$$

$$Ii = 100 - \left(\frac{Lm}{Lc}\right) \quad (2)$$

Onde:

ICR: Índice de crescimento relativo (%);

Ii: Índice de Inibição (%)

Lm: Comprimento médio das raízes da amostra (cm);

Lc: Comprimento médio das raízes do controle (água potável) (cm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CONCENTRAÇÃO INICIAL DE BTEX (A1)

Avaliou-se a concentração inicial de BTEX na entrada do sistema pelo poço de sucção, denominado como Amostra A1. A Tabela 4 apresenta o monitoramento nos tempos 0, 120 e 240 minutos, considerando as médias obtidas nos três ensaios realizados.

Tabela 4: Concentração inicial média de BTEX (Amostra A1) para os três ensaios realizados.

Parâmetro (mg/L)	**T_0**	**T_{120}**	**T_{240}**	**Média**	**Desvio padrão**	**Nível de Investigação (CONAMA 420/2009)**
Benzeno	0,422	0,950	1,247	0,873	0,418	0,005
Tolueno	1,572	3,894	4,695	3,387	1,622	0,700
Etilbenzeno	0,175	0,381	0,470	0,342	0,151	0,300
p-xileno	1,569	2,593	3,149	2,437	0,801	-
m-xileno	2,388	4,210	4,993	3,864	1,337	-
o-xileno	3,550	6,197	7,232	5,660	1,899	-
Xileno Total	7,507	12,999	15,373	11,960	4,035	0,500

Fonte: Autores (2026)

As concentrações de BTEX utilizadas são baseadas em estudos que monitoraram a presença desses compostos em áreas contaminadas. Conforme a EPA (1997), nos Estados Unidos relatam a presença de concentrações de BTEX variando entre 6 e 24 mg/L. Também nos Estados Unidos, Bass et al. (2000) apresentaram concentrações entre 0,024 e 198 mg/L, com o monitoramento em 49 áreas contaminadas.

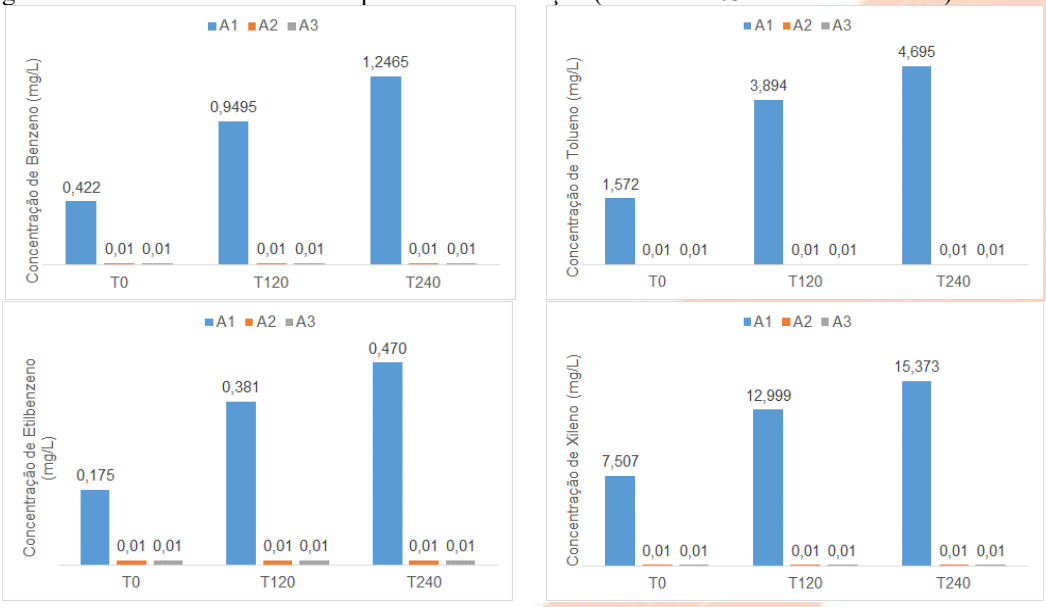
Afferden et al. (2011), na Alemanha, encontraram concentração inicial de benzeno na ordem de 13,046 – 18,625 mg/L, tolueno entre 0,0067 – 0,008 mg/L, etilbenzeno entre 0,031 – 0,050 mg/L e xileno entre 0,0637 – 0,0825 mg/L. Já na Áustria, Wirthensohn et al. (2009) avaliaram águas subterrâneas contaminadas com concentrações de BTEX entre 0,295 – 0,806 mg/L. E em Taiwan, Chen et al. (2010) observaram concentrações de BTEX entre 0,0039 – 2,838 mg/L. No Brasil, estudos como o de Gomes et al. (2014) e Caetano et al. (2016) também citam significativas contaminações das águas subterrâneas por hidrocarbonetos.

Conforme a Tabela 4, as concentrações de BTEX avaliadas nos ensaios são superiores aos níveis de investigação exigidos pela legislação nacional, neste caso, a resolução do CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009). São valores que representam a realidade em áreas contaminadas, atendendo a proposta da pesquisa no que tange a avaliação de um sistema de tratamento eficiente para remoção des hidrocarbonetos voláteis.

3.2 TRATAMENTO POR SUCÇÃO À VÁCUO (A2) E ADSORÇÃO (A3)

Os resultados médios das concentrações de BTEX, considerando os 3 ensaios realizados, apresentam-se na Figura 2. Como o tratamento era abastecido continuamente pela água contaminada armazenada no Reservatório de 5.000L (Figura 1), a concentração inicial da água bruta foi distinta para cada tempo monitorado.

Figura 2: Resultados do tratamento por vácuo e adsorção (média dos 03 ensaios realizados) em BTEX.



Legenda: A1- poço de sucção; A2 – sistema de vácuo; A3 – filtro de adsorção.
Fonte: Autores (2026)

A Figura 2 demonstra a eficiência do tratamento por sucção à vácuo (A2) com o decréscimo das concentrações de BTEX próximo a 100%. Os resultados encontrados são mais efetivos em

comparação aos apresentados por Caetano et al. (2016), na ordem de 67,4% para Escala Piloto e 96,66% para Escala Real.

A utilização de *Air Stripping* ou *Air Sparging* para a redução da concentração de COV's são relatados como processos eficientes de remoção. Outras pesquisas que utilizaram essas tecnologias apresentam níveis de redução da concentração de BTEX na ordem de 94,25% (EPA, 1997); 99,8%-99,9% (Khan; Husain; Hejazi, 2004), 30%-100% (Juneau Jr; Moyer; O'Connell, 2007), 95%–100% (Wirthensohna et al., 2009), 97%–100% (Afferden et al., 2011), e 100% (Franco; Chairez; Poznyaka; Poznyaka, 2012).

Com relação ao tratamento por adsorção, as remoção dos compostos obtidas são coerentes com outros trabalhos similares, como exemplo, as pesquisas de Ayotamuno et al. (2006), Wirthensohn et al. (2009), Juneau et al. (2007), Caetano (2014), Gomes et al. (2014), Kieling (2016), and Caetano et al. (2016).

Após o tratamento executado, a redução das concentrações de tolueno, etilbezeno e xileno são suficientes para atendimento do Nível de Investigação previsto pela Legislação Nacional, Resolução do CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009). Com relação ao benzeno, não é possível estabelecer uma conclusão precisa devido ao limite de detecção do método ser de 0,01 mg/L e a CONAMA 420/2009 relatar o nível de investigação para este parâmetro de 0,005 mg/L.

3.3 TESTES DE ECOTOXICIDADE

O crescimento das raízes não foi uniforme e, em função disso, utilizou-se diversas unidades de *Allium Cepa* para obtenção de um resultado mais preciso, conforme recomendação da metodologia de Fiskesjö (1985). Para a análise estatística foi aplicado todos os dados dos Ensaios 1, 2 e 3, visto que, foram similares.

Os resultados do crescimento das raízes apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5: Valores dos comprimentos das raízes do Controle (Água Potável) e Amostras de BTEX.

BTEX	Ensaio	Tempo (min.)	Crescimento das Raízes (cm)					
			A1		A2		A3	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Controle	1	-	5,3	1,3	5,3	1,3	5,3	1,3
	2	-	2,8	1,1	2,8	1,1	2,8	1,1
	3	-	3,7	1,1	3,7	1,1	3,7	1,1
BTEX25%	1	0	2,9	1,3	4,3	1,6	2,9	1,4
		120	1,8	1,3	4,2	1,6	1,9	1,4
		240	2,0	1,2	4,0	1,4	2,1	1,6
		Média	2,2	1,3	4,2	1,5	2,4	1,4
	2	0	1,6	1,5	2,4	0,6	2,2	1,1
		120	1,2	0,5	1,2	1,0	3,0	0,5
		240	1,9	1,1	1,1	1,3	2,4	0,8
		Média	1,5	1,1	1,6	1,1	2,6	0,9
	3	0	1,0	1,4	4,2	1,3	3,5	1,3
		120	1,7	0,8	3,8	0,6	3,0	1,0
		240	1,6	1,0	3,7	1,2	3,5	1,0
		Média	1,5	1,1	3,9	1,2	3,5	1,1
BTEX50%	1	0	2,0	0,9	4,0	1,4	5,0	1,2
		120	1,4	0,7	2,9	1,1	4,3	1,2
		240	1,4	0,9	3,2	0,9	4,0	1,0
		Média	1,6	0,9	3,3	1,1	4,3	1,2
	2	0	0,8	0,5	2,7	0,4	2,5	0,7
		120	0,4	0,2	0,7	0,7	1,6	1,2
		240	0,0	0,2	2,5	1,0	2,7	0,5
		Média	0,3	0,4	2,2	1,1	2,5	1,0
	3	0	1,0	1,1	4,1	1,6	4,3	0,4
		120	0,4	0,3	3,4	0,6	3,5	0,6
		240	0,7	0,3	3,1	0,8	3,6	0,3
		Média	0,7	0,7	3,5	1,1	3,9	0,6
BTEX100%	1	0	0,5	1,0	3,9	1,5	4,1	0,9
		120	0,1	0,9	3,3	1,4	4,0	0,7
		240	1,5	0,9	3,3	1,4	3,6	0,7
		Média	0,8	0,9	3,4	1,4	3,8	0,8
	2	0	0,3	0,2	2,5	0,6	1,9	0,8
		120	0,2	0,2	2,5	0,9	1,8	0,7
		240	0,0	0,2	2,3	0,6	2,1	0,6
		Média	0,2	0,2	2,5	0,7	2,0	0,7
	3	0	0,3	0,3	4,3	0,8	4,2	1,3
		120	0,0	0,2	3,0	0,7	4,8	0,7
		240	0,4	0,3	2,5	0,9	4,0	0,7
		Média	0,3	0,3	3,0	1,1	4,2	1,0

Fonte: Autores (2026)

O teste ANOVA e de Tuckey mostraram diferenças significativas (p = 0,000) entre o crescimento de raízes das amostras “Controle” em relação as amostras $BTEX_{25}$, $BTEX_{50}$ e $BTEX_{100}$.

Na diluição $BTEX_{25}$, para os três ensaios realizados e considerando os tempos de tratamento T_{120} e T_{240}, os testes mostraram que não há diferenças significativas entre o crescimento de raízes para as amostras A1 x A2 (T_{120} - p = 0,275; T_{240} – p = 365), A1 x A3 (T_{120} - p = 0,210; T_{240} – p =0,410) e A2 x A3 (T_{120} - p = 0,246; T_{240} – p =0,294). Este é o mesmo resultado para o T_0 comparando os tratamentos A1 x A2 (T_0 - p = 0,882) e A2 x A3 (T_0 - p = 0,620). Contudo, os testes estatísticos mostraram diferença significativa comparando as amostras T_0 - A1 x A3 (p = 0,012) indicando a necessidade do tratamento por adsorção para redução da ecotoxicidade pelo BTEX, considerando a

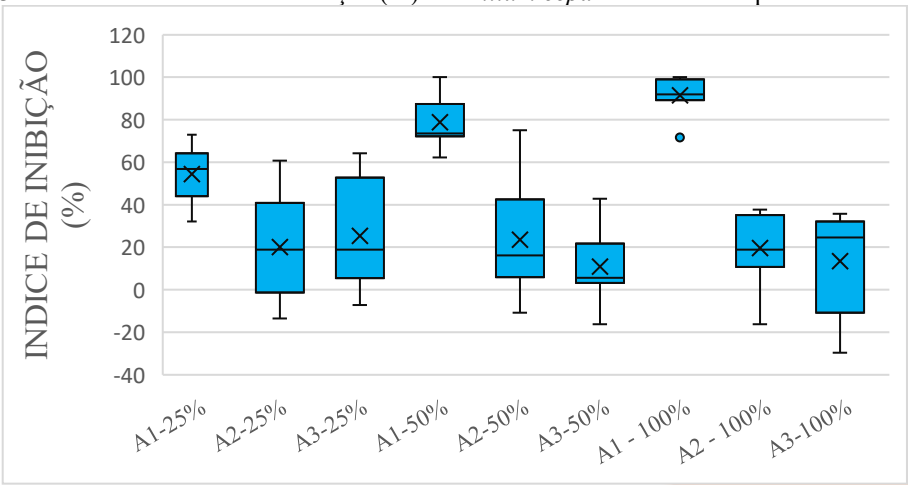
diluição de 25%. A eficiência do tratamento por adsorção utilizando CCA e CA na redução da ecotoxicidade (teste com *Allium Cepa*) também foi obtida por Caetano et al. (2018).

Confirma-se esta afirmação ao analisar a diluição $BTEX_{50}$. Os testes ANOVA e Tuckey mostraram diferenças significativas para as amostras A1 x A2 (T_{120} – p = 0,000); A1 x A3 (T_{120} – p = 0,011; T_{240} – p = 0,000); A2 x A3 (T_0 – p = 0,000; T_{120} – p = 0,000).

Por fim para $BTEX_{100}$, foram obtidas diferenças significativas para o T_{120} comparando as amostras A1 x A2 (p = 0,004) e A2 x A3 (p = 0,017). Assim, com uma maior concentração de voláteis, a utilização do tratamento à vácuo possui significativa diferença na eficiência do tratamento, fato abordado por Caetano et al. (2016).

Na Figura 3 apresentam-se os resultados da Média do Indice de Inibição dos três ensaios de toxicidade, considerando a concentração de BTEX (25%, 50% e 100%) das três amostras estudadas (A1, A2 e A3).

Figura 3: Resultados do índice de inibição (%) em *Allium cepa* do tratamento por vácuo e adsorção.



Fonte: Autores (2026)

O índice de inibição (Ii) obtido indica a resistência do processo de crescimento que ocorre nas raízes de *Allium Cepa.* Neste sentido, quanto maior o valor de Ii, menor será o tamanho das raízes. Os resultados indicam os maiores valores de Ii para as amostras A1 (sem tratamento), com decréscimo do Ii, à medida que ocorre a diluição da concentração de BTEX, sendo a amostra A1- 100% a que apresenta maior índice de inibição (91,51%). Para as amostras A2 (tratamento à vácuo), as médias encontradas para os valores de Ii apresentaram valores aproximados, sendo de 20,01% para 25% de BTEX, 23,58% para 50% de BTEX e 19,59% para 100% de BTEX, indicando que o tratamento aplicado contribui para a redução do índice de inibição, considerando o decréscimo em relação às amostras do conjunto A1. Em relação às amostras A3 (adsorção), os valores médios para o índice de inibição foram de 25,35% para 25% de BTEX, 10,90% para 50% de BTEX e 13,43% para 100% de BTEX, indicando que o processo de adsorção pode contribuir para um maior crescimento das raízes,

considerando o decréscimo observado entre as amostras A2 e A3 na concentração de 50% e 100% de BTEX.

De forma geral, os ensaios contribuíram para avaliar a toxicidade do BTEX na germinação e no crescimento das raízes de *Allium Cepa,* visto que, foram observadas diferenças quantitativas no número de raízes e no comprimento das mesmas, considerando as concentrações de BTEX avaliadas. No trabalho de Mazzeo et al. (2010) foi observado que com a biodegradação de BTEX presente em água, ocorre uma redução dos danos genotóxicos das células de *Allium cepa.* Estes resultados indicam que *Allium Cepa* é um bom indicador de toxicidade de água contaminada por BTEX, assim como, um meio eficiente de se avaliar a remoção desses compostos no sistema estudado.

4 CONCLUSÃO

O Equipamento compacto composto por sucção à vácuo, aeração e adsorção (CA e CCA) se mostrou eficiente, obtendo elevado desempenho para remoção de contaminantes orgânicos presentes em água. O índice de decréscimo das concentrações de BTEX foi na ordem de 99% em todos os ensaios realizados. Verificou-se que a etapa de tratamento "Sucção à vácuo" foi a principal responsável por tal eficiência, sendo essencial para o atendimento ao nível de investigação previsto pela legislação nacional (Resolução do CONAMA nº 420/2009).

Os ensaios de ecotoxicidade, utilizando *Allium Cepa* como organismo teste, confirmaram a redução da toxicidade da água contaminada após a sucção (A2) e adsorção (A3). Adicionalmente, as análises estatísticas (ANOVA e Tuckey) indicaram a necessidade de um polimento do tratamento após a sucção, utilizando o filtro de adsorção composto por 50%-CCA e 50%-CA. Embora a maior parte da concentração de BTEX tenha sido removida no tratamento "Sucção à vácuo", para as diluições $BTEX_{25}$ e $BTEX_{50}$, verificou-se diferenças significativas de toxicidade comparando as amostras A2 e A3. Reforçando a necessidade do processo de adsorção para a redução de toxicidade da água contaminada.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil).

REFERÊNCIAS

AFFERDEN, Manfred van; RAHMAN, Khaja Z.; MOSIG, Peter; BIASE, Cecilia De; THULLNER, Martin; OSWALD, Sascha E.; MÜLLER, Roland A. (2011). Remediation of groundwater contaminated with MTBE and benzene: The potential of vertical-flow soil filter systems. Water Research, 45, 5063-5074.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 120: Materiais para Fundição – Determinação da Perda ao Fogo. ABIFA, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP (Comissão de Estudos de Matérias Primas) n° 081 Materiais para Fundição: Determinação da Distribuição Granulométrica. ABIFA, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma NBR 6508 – Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. 1984.

AYOTAMUNO, M. J.; KOGBARA, R.B.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Petroleum contaminated ground-water: Remediation using activated carbon. Applied Energy. 83, 1258-1264, 2006.

BATISTA, Fernanda Viana; BARROS, Rosana Gonçalves; BARBARA, Viniciu Fagundes. Contaminação da água subterrânea e do solo por hidrocarbonetos oriundos de postos de serviços de Brasília, distrito federal, Brasil. Caminhos de Geografia, [s.l.], v. 22, n. 82, p. 256-272, ago. 2021.

CAETANO, M. O. Equipamento compacto para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas por BTEX e TPH. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2014.

CAETANO, M. O. et al. A compact remediation system for the treatment of groundwater contaminated with BTEX and TPH. Environmental Technology. [s.I.]. v. 38, n 11, p. 1408-1420, set. 2016.

CAETANO, M. O. et al. Ecotoxicity tests with Allium cepa to determine the efficiency of rice husk ash in the treatment of groundwater contaminated with benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene. Environmental Science and Pollution Research, [s.I.], v. 25, n. 13, p. 12849-12858, fev. 2018.

CAMARGO, Aline F. et al. Uma revisão sobre a influência dos processos de queima na composição da cinza da casca de arroz visando produção de sílica. Revista CIATEC – UPF, [s.l.], v.10, n. 2, p.42-57, set. 2018.

CARDOSO, J. E. T.; LODI, P. C.; BARROS, A. M. T. C. Técnicas Associadas de Remediação de Contaminação da Água e do Solo por Hidrocarbonetos: Estudo de Caso em Posto de Combustível. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades. [s.I.]. v. 5, n. 36, p. 18-28. dez. 2017.

CHEN, Ku-Fan; KAO, Chih-Ming; CHEN, Chiu-Wen; SURAMPALLI, Rao Y.; LEE, Mu-Sheng. (2010). Control of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater by intrinsic and enhanced bioremediation. Journal of Environmental Sciences, 22(6), 864–871.

CHIU, H. Y. et al. Using intrinsic bioremediation for petroleum–hydrocarbon contaminated groundwater cleanup and migration containment: Effectiveness and mechanism evaluation. Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers, [s.I.], v. 72, p.53-61, mar. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601. Acesso em: 04 de abril de 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627. Acesso em: 04 de abril de 2025.

EPA – United States Environmental Protectons Agency (1997) Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction. Reporte EPA-542-R-97-007, 246pp.

FISKESJÖ, G. The Allium test as a standard in the environmental monitoring. Hereditas, [s.I.], v. 102, p. 99-112, 1985. http://dx.doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x

FOLETTO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. Química Nova. [s.I.]. v. 28. n. 6. p. 1055-1060. ago. 2005.

FOO, K.y.; HAMEED, B.h.. Utilization of rice husk ash as novel adsorbent: A judicious recycling of the colloidal agricultural waste. Advances In Colloid And Interface Science, [s.I.], v. 152, n. 1-2, p.39-47, nov. 2009.

FRANCO, M.; CHAIREZ, I.; POZNYAKA, T.; POZNYAKA, A. BTEX decomposition by ozone in gaseous phase. Journal of Environmental Management, 95, S55 - S60, 2012.

FLORES-CHAPARRO, Carlos E. et al. Chitosan-macroalgae biocomposites as potential adsorbents of water-soluble hydrocarbons: organic matter and ionic strength effects. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 197, p. 633-642, out. 2018.

GARCÍA-MEDINA, Sandra et al. The relationship between cyto-genotoxic damage and oxidative stress produced by emerging pollutants on a bioindicator organism (Allium cepa): The carbamazepine case. Chemosphere, [s.I.], abr. 2020.

JUNEAU JR, Armand A.; MOYER, Ellen, O´CONNELL, Joseph E. Case Study of Ex Situ Remediation and Conversion to a Combined In Situ/Ex Situ Bioremediation Approach at an Oxygenated Gasoline Release Site. Remediation. Spring, 19-37, 2007.

KHAN, Faisal I.; HUSAIN, Tahir; HEJAZI, Ramzi. An overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management. 71. 95-122, 2004.

KHUDUR, Leadin S. et al. The impact of lead co-contamination on ecotoxicity and the bacterial community during the bioremediation of total petroleum hydrocarbon-contaminated soils. Environmental Pollution, [s.l.], v. 253, p. 939-948, out. 2019.

KIELING, Amanda Gonçalves; MENDEL, Tatiana Mendel; CAETANO, Marcelo Oliveira (2018). Efficiency of rice husk ash to adsorb chromium (VI) using the Alliumcepa toxicity test. Environmental Science and Pollution Research, 26, 28491–28499. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3722-3

LI, Qian et al. Application of alkyl polyglycosides for enhanced bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil using Sphingomonas changbaiensis and Pseudomonas stutzeri. Science Of The Total Environment, [s.I.], v. 719, jun. 2020.

MAZZEO, D. E. C. et al. BTEX biodegradation by bacteria from effluents of petroleum refinery. Science of the Total Environment, [s.I.], v. 408, n. 20, p. 4334-4340, set. 2010.

NG CHILTON et. al. Physical and chemical properties of selected agricultural byproduct-based activated carbons and their ability to adsorb geosmin. Bioresource Technology. v. 84, p 177-185, 2002.

OSSAI, Innocent Chukwunonso et al. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. Environmental Technology & Innovation, [s.I.], v. 17, fev. 2020.

PODDAR, Mrinal et al. Environmental friendly Polyacrylonitrile nanofiber mats encapsulated and coated with green algae mediated Titanium oxide nanoparticles for efficient oil spill adsorption. Marine Pollution Bulletin, [s.l.], v. 182, p. 113971, set. 2022.

POI, Gregory et al. Large scale treatment of total petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using bioaugmentation. Journal Of Environmental Management, [s.I.], v. 214, p.157-163, maio 2018.

SCHMITT, Graziela Taís; KIELING, Amanda Gonçalves; CAETANO Marcelo Oliveira. Efficiency of Bacillus thuringiensis biofilters on 17β-estradiol removal. Acta Brasiliensis 4(2): 128-132, 2020 http://dx.doi.org/10.22571/2526-4338295

WIRTHENSOHNA, T.; SCHOEBERL, P.; GHOSHC, U.; FUCHSA, W. (2009). Pilot plant experiences using physical and biological treatment steps for the remediation of groundwater from a former MGP site. Journal of Hazardous Materials, 163, 43–52.

YANG, Zong-han et al. Remediation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using optimized in situ chemical oxidation system: Batch and column studies. Process Safety And Environmental Protection, [s.I.], v. 138, p.18-26, jun. 2020.