

USO DE BIOCARVÕES METALIZADOS ORIUNDOS DE BIOMASSA RESIDUAL DA AMAZÔNIA LEGAL NA REMOÇÃO DE CROMO(VI) EM ÁGUAS.

USE OF METALIZED BIOCHAR FROM LEGAL AMAZONIAN RESIDUAL BIOMASS FOR THE REMOVAL OF CHROMIUM (VI) IN WATERS.

USO DE BIOCARBONES METALIZADOS ORIGINARIOS DE BIOMASA RESIDUAL DE LA AMAZONÍA LEGAL PARA LA REMOCIÓN DE CROMO (VI) EN AGUAS.

Ester Silva Figueiredo

Graduanda em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins (UFT). E-mail: silva.ester@mail.uft.edu.br | <https://orcid.org/0009-0009-3337-0394>

Mariana de Souza Borges

Mestre em Ciências do Ambiente, Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente. Universidade Federal do Tocantins (UFT). E-mail: mariana.borgess@mail.uft.edu.br | <https://orcid.org/0000-0003-2311-883X>

Jéssyka Ribeiro Santos

Mestre em Ciências do Ambiente, Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente. Universidade Federal do Tocantins (UFT). E-mail: jessyka@uft.edu.br | <https://orcid.org/0000-0002-8961-4724>

Elisandra Scapin

Docente do Programa de Pós-graduação em Ciências do Ambiente e do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia BIONORTE. Responsável pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa em Produtos Naturais e Biomassa – LaPNaBio. Universidade Federal do Tocantins (UFT). E-mail: scapin@uft.edu.br / elisandrascapin2015@gmail.com | <https://orcid.org/0000-0001-7506-308X>

Resumo:

O biocarvão, subproduto de transformações termoquímicas como a pirólise, a partir de resíduos verdes, pode ser empregado em inúmeras aplicações ambientais, como no tratamento de águas contaminadas por metais tóxicos, devido à sua alta capacidade de adsorção. Diante disso, este estudo investigou o uso de biocarvão metalizado, derivado de biomassa residual legal amazônica (Baru e Cupuaçu), para a remoção de cromo (VI) de soluções aquosas. O biocarvão foi caracterizado, e sua capacidade de adsorção foi avaliada utilizando um planejamento experimental de Composição Central (DCC). Os resultados demonstraram alta eficiência na remoção de Cr(VI) (>98% para concentrações iniciais de 5 mg/L e >99% para 20 mg/L), em diversos níveis de pH e dosagens de biocarvão. Esta abordagem sustentável oferece uma solução economicamente viável e ambientalmente amigável para o manejo de resíduos agrícolas e a remediação de águas contaminadas com cromo.

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção; Baru; Cupuaçu; Tecnologia sustentável; Tratamento de água.

ABSTRACT:

Biochar, a byproduct of thermochemical transformations such as pyrolysis from green waste, can be used in numerous environmental applications, such as the treatment of water contaminated with toxic metals, due to its high adsorption capacity. Therefore, this study investigated the use of metalized biochar, derived from legal Amazonian residual biomass (Baru and Cupuaçu), for the removal of chromium (VI) from aqueous solutions. The biochar was characterized, and its adsorption capacity was evaluated using a central composite design (CCD) experimental plan. The results showed high efficiency in Cr(VI) removal (>98% for initial concentrations of 5 mg/L and >99% for 20 mg/L), at various pH levels and biochar dosages. This sustainable approach offers an economically viable and environmentally friendly solution for managing agricultural waste and remediating chromium-contaminated water.

KEYWORDS: Adsorption; Baru; Cupuaçu; Sustainable technology; Water treatment.

RESUMEN:

El biocarbón, subproducto de transformaciones termoquímicas como la pirólisis, a partir de residuos verdes, puede ser empleado en innumerables aplicaciones ambientales, como en el tratamiento de aguas contaminadas por metales tóxicos, debido a su alta capacidad de adsorción. Por lo tanto, este estudio investigó el uso de biocarbón metalizado, derivado de biomasa residual legal amazónica (Baru y Cupuaçu), para la remoción de cromo (VI) de soluciones acuosas. El biocarbón fue caracterizado, y su capacidad de adsorción fue evaluada utilizando un diseño experimental de composición central (DCC). Los resultados demostraron alta eficiencia en la remoción de Cr(VI) (>98% para concentraciones iniciales de 5 mg/L y >99% para 20 mg/L), a diversos niveles de pH y dosis de biocarbón. Este enfoque sostenible ofrece una solución económicamente viable y ambientalmente amigable para el manejo de residuos agrícolas y la remediación de agua contaminada con cromo.

PALABRAS-CLAVE: Adsorción; Baru; Cupuaçu; Tecnología sostenible; Tratamiento de agua

INTRODUÇÃO

A contaminação da água potável por metais pesados é uma questão recorrente e de grande preocupação para a saúde pública em todo o mundo devido aos seus impactos adversos na saúde humana (Sadeghi et al., 2018; Amen et al., 2020; Srivastav et al., 2021). As principais fontes de contaminação incluem atividades de mineração, industriais e de ensino/pesquisa (Zahoor et al., 2022).

Um grande exemplo de poluição hídrica por metais pesados é a contaminação por cromo, que é encontrado no ambiente nas formas estáveis de Cr(III) e Cr(VI) (Liang et al., 2021), sendo essa última, a forma mais tóxica do metal que impacta negativamente seres humanos e o meio ambiente (Sharma et al., 2022). Sua presença é predominantemente atribuída a atividades antropogênicas, resultantes de emissões provenientes de uma variedade de fontes industriais, como fabricação de cimento, indústria de galvanoplastia, fundições, processos de soldagem, mineração de cobre, gestão de resíduos urbanos e industriais, incineração, uso de fertilizantes e, notadamente, operações em curtumes, entre outras fontes (Elahi et al., 2020).

O Cr(VI) é comumente encontrado em soluções aquosas como cromato (CrO_4^{2-} , HCrO_4^-) e dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) conforme descrito por Fang et al., (2024). A forma hexavalente de cromo é reconhecida por suas propriedades oxidantes e impactos adversos sobre a saúde humana, afetando órgãos vitais como pulmões, rins e fígado (Simonetti et al., 2019).

A exposição a essa forma de cromo pode desencadear efeitos indesejados, incluindo o desenvolvimento de carcinomas brônquicos (Sharma et al., 2022). Os problemas de saúde associados ao Cr(VI) incluem desde erupções cutâneas e desconforto abdominal até dificuldades respiratórias, comprometimento do sistema imunológico, danos renais e hepáticos, até mesmo alterações genéticas e o risco de câncer pulmonar, podendo levar a consequências fatais (Simonetti et al., 2019).

Em resposta a essa preocupação com a saúde pública, a Resolução nº 430 de 13/05/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) estabelece um limite máximo de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ para a concentração desse composto após o

tratamento de efluentes contaminados, visando mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde humana. Dada a contaminação generalizada e alta toxicidade do Cr(VI), grande interesse tem sido visto entre os cientistas no desenvolvimento de tecnologias adequadas e eficazes para a remediação de águas contaminadas com o metal (Oliveira et al., 2021; Gamboa et al., 2021).

O biocarvão e o bio-óleo são subprodutos da transformação termoquímica, como pirólise, carbonização hidrotermal, gaseificação e torrefação e podem ser produzidos a partir de resíduos verdes, principalmente biomassa agrícola e resíduos sólidos, como lascas de madeira, palhas, conchas, bagaços, cascas, esterco e várias outras matérias-primas que estão entre os recursos renováveis mais ricos do ecossistema (Wang et al., 2020).

O biocarvão ativado é uma alternativa sustentável de carvão ativado que é amplamente utilizado para várias aplicações ambientais (Tan et al. 2015). A aplicação desse bioproduto é um dos subconjuntos emergentes com potencial a ser utilizado em tratamento de água e efluentes. Devido às propriedades de grande área de superfície e volume de poros, rico conteúdo de carbono orgânico e componentes minerais, grupos funcionais abundantes e diversos, o biocarvão apresenta uma capacidade de sorção proeminente para contaminantes inorgânicos e orgânicos em soluções aquosas (Ahmad et al., 2014). O processo de adsorção tem uma vantagem comparativa sobre outras técnicas utilizadas para remoção de Cr(VI). A absorção pode atingir altas taxas de remoção, tem fácil controle operacional, é barata e tem produção mínima de resíduos perigosos secundários e além disso, alguns adsorventes podem ser regenerados (Ali et al. 2014; Tangahu et al. 2011).

Espécies frutíferas como o barueiro (*Dipteryx alata* Vog.), pertencente à família Leguminosae, e o cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*), pertencente à família Malvaceae, importantes espécies vegetais arbóreas, bastante produtivas, produzem frutos bastante apreciados pelas populações locais e pela fauna silvestre (Vera e Souza, 2009; Bezerra et al., 2024). A exploração é feita principalmente via extrativismo, sendo por isso, informações sobre sua biologia e manejo indispensáveis para o uso e manejo sustentável dos mesmos (Sano et al., 2004).

A originalidade desse estudo está no desenvolvimento do processo e do produto. Apesar de existirem vários estudos com biocarvões na literatura, não há relatos do uso das cascas de biomassas como o baru e o cupuaçu como adsorventes de Cr(VI) em soluções aquosas. Considerando que cada biomassa apresenta uma particularidade em relação à sua estrutura e composição, as informações obtidas nessa pesquisa são de grande contribuição para a área de engenharia, química, saneamento, gestão de resíduos e saúde pública.

Diante disso, este trabalho considera o desenvolvimento de bioprodutos tendo como matéria-prima base biomassas residuais típicas da Amazônia legal, o baru e o cupuaçu, e a avaliação da aplicabilidade dos biocarvões desenvolvidos para remoção de metais, principalmente o Cr(VI), em soluções aquosas e águas residuais a fim de promover uma tecnologia simples e de baixo custo como opção de manejo de culturas nativas do Cerrado.

METODOLOGIA

Obtenção dos biocarvões metalizados

Os biocarvões utilizados neste estudo foram produzidos e caracterizados em estudo anterior realizado pelo grupo (Borges et al., 2025). Em resumo, a caracterização das biomassas realizada por Borges et al. (2025) incluiu análise físico-química, análise elementar e outras técnicas relevantes. O processo de pirólise lenta foi realizado em reator de leito fixo (marca FLYEVER, modelo FE50RPN, linha 05/50, São Paulo, Brasil), a uma temperatura de 650 °C com gás de arraste de vapor de água aquecido a 133 °C em autoclave, sob atmosfera inerte de 6 mL min⁻¹ por 30 min (Borges et al., 2025).

Metalização do carvão

A solução de FeCl₃ foi preparada seguindo a metodologia de He et al. (2018), onde: 100 g de FeCl₃.6H₂O foram diluídos em 1000 mL de água destilada, proporcionando assim uma solução com teor de 10% m/v da substância.

A metalização foi realizada segundo a metodologia de Cai et al. (2023) com adaptações: 20g de biocarvão foram adicionados a 100 mL de solução de

FeCl_3 (proporção de biocarvão $6\text{H}_2\text{O}$ e de 20% do peso) em agitador com rotação de 80 rpm, por 2h em temperatura ambiente de 25°C . Após o período de agitação, o material foi filtrado e o conteúdo retido no papel filtro foi seco em estufa a 70°C por 2h.

Planejamento experimental - Delineamento Composto Central (DCC)

Para cada biocarvão, foi realizado um planejamento experimental fatorial (Tab. 1), utilizando o programa Protimiza Experimental Design (PROTIMIZA, 2014). As variáveis analisadas foram dosagem do biocarvão metalizado ($3; 4,5; 6\text{ mg L}^{-1}$) e pH da solução ($3; 4,5; 6$) em soluções com duas concentrações diferentes de Cr(VI) (5 e 20 mg L^{-1}).

Tabela 1 - Variáveis do planejamento DCC para os ensaios de adsorção

Variáveis	Código	Níveis		
		-1	0	1
Dosagem do carvão (mg L^{-1})	x1	3,0	4,5	6,0
pH	x2	3,0	4,5	6,0

Fonte: Autor (2025).

Essas variáveis foram analisadas através de um delineamento composto central (DCC), ou seja, um 2^3 composto por 7 ensaios com 3 repetições no ponto central.

Ensaio de Adsorção

Inicialmente, foram preparadas soluções de Cr(VI) conforme metodologia padrão APHA - *American Public Health Association* (1995), onde foram diluídos 1,414 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (dicromato de potássio) em 100 mL de água destilada, resultando em uma solução com concentração de 50 mg L^{-1} de Cr(VI) . Foram preparadas soluções de H_2SO_4 10% (v/v) e NaOH 1M para regulagem do pH especificado para cada ensaio. A solução de difenilcarbazida foi preparada de acordo com a metodologia de APHA (1995), onde 0,25 g de 1,5-difenilcarbazida foram dissolvidos em 50 mL de acetona e armazenada em frasco âmbar.

Para os ensaios de adsorção foram preparadas soluções de Cr(VI) nas concentrações de 5 e 20 mg L⁻¹ a partir de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 50 mg L⁻¹. A partir do programa Protimiza, e com o planejamento experimental DCC (Delineamento Composto Central), obteve-se as possíveis combinações de dosagem de carvão e pH variadas com concentrações iniciais diferentes de Cr(VI), permitindo uma análise detalhada dos efeitos desses fatores e suas interações sobre o processo de adsorção do metal analisado, resultando em 7 ensaios.

Os biocarvões foram pesados em frascos Erlenmeyers de 100 mL e para o teste de 5 mg L⁻¹ de Cr(VI), 10 mL de solução de dicromato e 90 mL de água destilada foram adicionados. Para a concentração de 20 mg L⁻¹ de Cr(VI), 40 mL de solução e 60 mL de água foram utilizados. O ajuste do pH foi realizado por meio do pHmetro, mediante a adição de soluções de H₂SO₄ 10% (v/v) e NaOH 1M, conforme determinado pelo programa Protimiza para cada ensaio em questão. Posteriormente, os ensaios foram devidamente selados e submetidos a um período de agitação em mesa agitadora, mantida a uma rotação constante de 80 rpm, por um intervalo de 2h, à temperatura ambiente de 25 °C.

Método colorimétrico para determinação de Cr(VI)

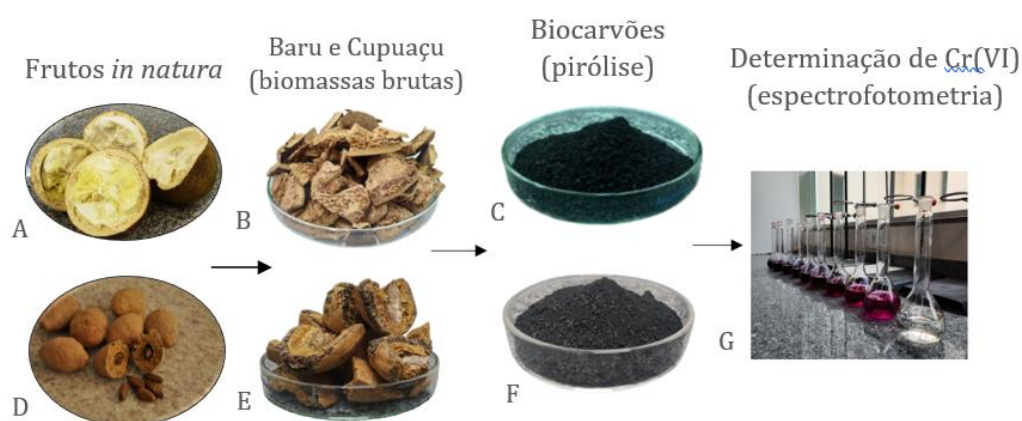
A quantificação do Cr(VI) foi conduzida em conformidade com a metodologia padrão APHA (1995), a qual implica na reação da 1,5-difenilcarbazida em meio ácido na presença do metal, gerando uma coloração violeta que constitui a base do referido método. Após o processo de adsorção, os ensaios foram previamente filtrados, sendo adicionados 0,25 mL de H₃PO₄ à fração líquida. A solução resultante foi então ajustada para um pH de 1,8 ~ 2,0, utilizando-se solução de H₂SO₄ 10% e um medidor de pH.

Posteriormente, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL, diluída até alcançar o volume total e homogeneizada. Seguiu-se a adição de 2,0 mL da solução de 1,5-difenilcarbazida, que foi misturada, seguida de um repouso de 5 a 10 minutos para assegurar o desenvolvimento pleno da coloração. Uma quantidade apropriada da solução foi então transferida para uma célula de absorção de 1 cm, e sua absorbância foi medida a 540 nm em espectrofotômetro

UV-Vis (HACH/Alemanha, DR5000), utilizando água destilada como referência.

A Figura 1 mostra as biomassas residuais utilizadas no trabalho, os biocarvões produzidos e as soluções preparadas para as análises espectrofotométricas.

Figura 1 – Etapas Simplificadas da Metodologia.



A: Cupuaçu *in natura*; B: Casca de Cupuaçu; C: Biocarvão de Cupuaçu; D: Baru *in natura*; E: Casca de Baru; F: Biocarvão de Baru; G: Soluções de 1,5-difenilcarbazida para determinação de Cr(VI) em espectrofotômetro.

Fonte: Autor (2025).

Construção da Curva de Calibração

Para a avaliação das análises de adsorção, procedeu-se à elaboração da curva de calibração utilizando o software Microsoft Excel. Através desta, foi obtida a equação da reta que foi empregada nos cálculos da concentração final de cromo após a adsorção com as amostras de cada biocarvão ativado, a partir dos valores de absorbância conhecidos. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro de absorção molecular na região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis), utilizando o comprimento de onda de 540 nm, a partir das soluções preparadas com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Planejamento experimental e análise da remoção de Cr(VI)

Os resultados obtidos no processo de adsorção de Cr(VI) por meio dos biocarvões metalizados foram submetidos à análise de variância. As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores de concentração do Cr(VI) final presente nas soluções, as porcentagens de remoção do metal após a adsorção com as diferentes combinações de dosagem de carvão e pH para cada ensaio realizado, com concentrações iniciais diluídas fixas de 5 e 20 mg L⁻¹ de Cr(VI), para cada biocarvão metalizado obtido após a otimização experimental descrita pelo DCC.

A análise foi aplicada para obtenção do modelo matemático com nível de significância $\alpha = 0,05$, com modelos de segunda ordem estabelecidos para os dois biocarvões e para as duas concentrações analisadas. O primeiro ponto a ser destacado a partir dos resultados é a eficiência do processo de adsorção dos dois biocarvões nas condições testadas (Tabela 2 e 3).

Tabela 2 –Eficiência da remoção de Cr(VI) utilizando biocarvão da casca do baru (BCD).

Ensaio	D.C.	pH	C _I Cr(VI) - 5 mg L ⁻¹		C _I Cr(VI) - 20 mg L ⁻¹	
			C _F Cr(VI)	Remoção (%)	C _F Cr(VI)	Remoção (%)
1	3	3	0,075	98,51	0,059	99,71
2	6	3	0,067	98,65	0,114	99,43
3	3	6	0,058	98,83	0,053	99,74
4	6	6	0,061	98,79	0,062	99,69
5	4,5	4,5	0,065	98,70	0,052	99,74
6	4,5	4,5	0,064	98,72	0,054	99,73
7	4,5	4,5	0,063	98,73	0,066	99,67

D.C.: dosagem do carvão (mg L⁻¹); C_I Cr(VI): concentração inicial de cromo hexavalente, C_F Cr(VI): concentração final de cromo hexavalente

Tabela 3 – Eficiência da remoção de Cr(VI) do biocarvão da casca do cupuaçu (BCC)

Ensaio	D.C.	pH	C _I Cr(VI) - 5 mg L ⁻¹		C _I Cr(VI) - 20 mg L ⁻¹	
			C _F Cr(VI)	Remoção (%)	C _F Cr(VI)	Remoção (%)
1	3	3	0,061	98,79	0,072	99,64
2	6	3	0,046	99,07	0,092	99,54
3	3	6	0,063	98,74	0,068	99,66
4	6	6	0,064	98,72	0,062	99,69
5	4,5	4,5	0,065	98,70	0,092	99,54
6	4,5	4,5	0,068	98,64	0,057	99,71
7	4,5	4,5	0,074	98,52	0,049	99,76

D.C.: dosagem do carvão (mg L⁻¹); C_I Cr(VI): concentração inicial de cromo hexavalente, C_F Cr(VI): concentração final de cromo hexavalente

Para a adsorção com uso do biocarvão da casca de baru, e concentração inicial de 5 mg L^{-1} do metal, todos os ensaios tiveram valor de remoção acima de 98%, independentemente da dosagem de carvão e do valor de pH empregado. Com o uso do adsorvente proveniente da casca de cupuaçu para a mesma concentração do metal, os ensaios também apresentaram teor de remoção acima de 98%, com destaque para o ensaio número 2 da concentração de 5 mg L^{-1} que obteve o maior valor de remoção de 99,07%.

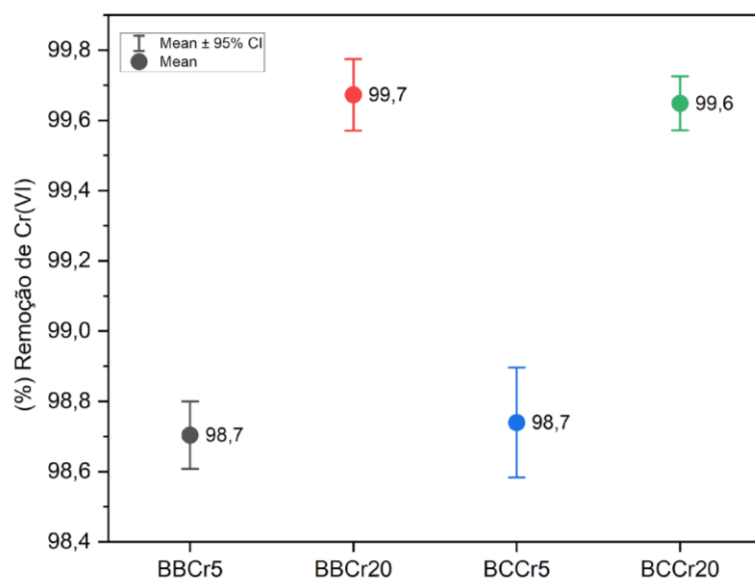
Resultados bastante satisfatórios e que corroboram com os valores encontrados na literatura para a adsorção de mesma concentração de Cr(VI), com remoção de 100% com o uso de carvão ativado granular (Oliveira e Féris, 2015), 97,7% utilizando a casca de arroz (Gamboa et al., 2021), e um valor de 74% foi alcançado utilizando mesocarpo de maracujá (Costa et al., 2015).

Na concentração de 20 mg L^{-1} de Cr(VI), a adsorção com os dois biocarvões (baru e cupuaçu) apresentaram uma proporção de remoção acima de 99% para todas as variações de quantidade de adsorventes adicionados e valor de pH empregados em cada ensaio. Para essa mesma concentração, podem ser encontrados na literatura remoções de 99% com o uso da castanha de caju (Carvalho, 2021) e 91,88% com a casca de mandioca (Albis, Cajar e Domínguez, 2015). Remoções de 97,75% foram alcançadas com o uso de Kala Jamun (*Syzygium cumini* L.) e 100% com o uso da casca de arroz, porém com concentrações iniciais diferentes (Silva e Silveira, 2019).

Os dados apresentados nas tabelas indicam que as concentrações avaliadas não demonstraram variações estatisticamente significativas, considerando que os resultados obtidos apresentam eficiência superior a 98% e 99%. Isso sugere que as diferenças entre as condições experimentais foram mínimas e não impactaram de forma substancial o desempenho do processo de adsorção.

A Figura 2 - Intervalo de Remoção de Cr(VI) mostra o gráfico de intervalo que ilustra a faixa de remoção percentual de Cr(VI) para cada um dos biocarvões e suas respectivas concentrações. Os pontos representam as médias, enquanto as barras verticais indicam o intervalo de confiança de 95%.

Figura 2 – Intervalo de Remoção de Cr(VI).

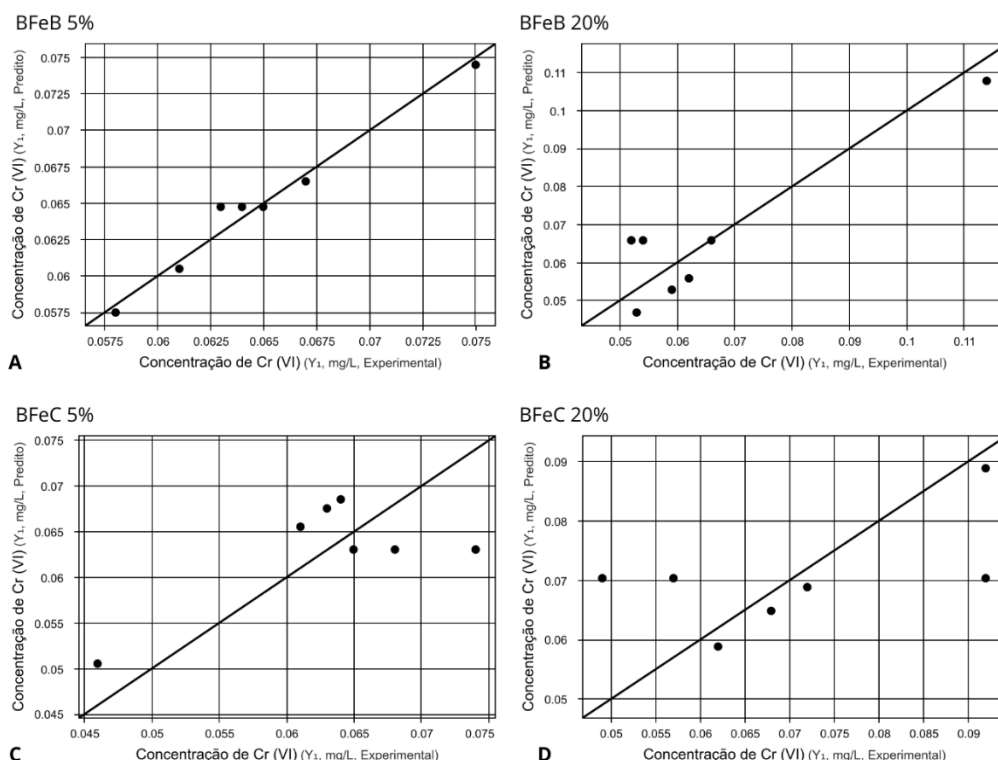


BBcr5: Biocarvão de Baru e concentração inicial de Cr(VI) de 5 mg.L⁻¹; BBcr20: Biocarvão de Baru e concentração inicial de Cr(VI) de 20 mg.L⁻¹; BCCr5: Biocarvão de Cupuaçu e concentração inicial de Cr(VI) de 5 mg.L⁻¹; BCCr20: Biocarvão de Cupuaçu e concentração inicial de Cr(VI) de 20 mg.L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

Os gráficos de valores experimentais *versus* valores preditos (Fig. 3) auxiliaram na análise dos resíduos de modelos de regressão e permitiu investigar a distribuição dos resíduos nos processos realizados.

Figura 3 – Gráficos de valores experimentais *versus* valores preditos



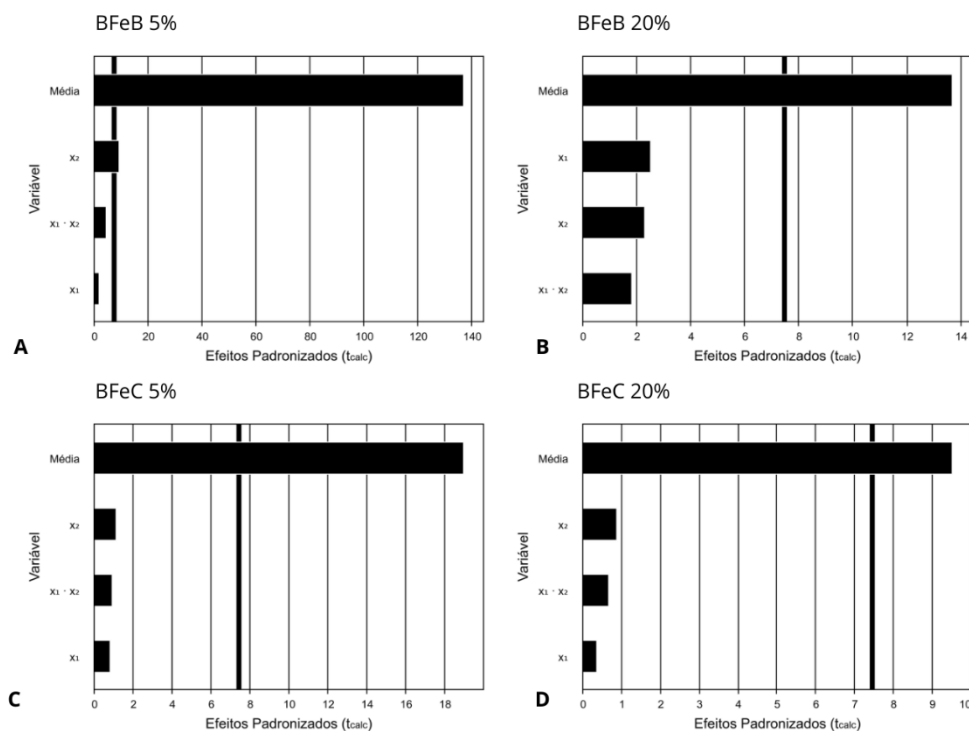
(A) BFeB 5% – Biocarvão de Baru impregnado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 5 mg.L⁻¹;
 (B) BFeB 20% – Biocarvão de Baru impregnado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 20 mg.L⁻¹;
 (C) BFeC 5% – Biocarvão de Cupuaçu impregnado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 5 mg.L⁻¹;
 (D) BFeC 20% – Biocarvão de Cupuaçu impregnado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 20 mg.L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

Nos gráficos (C) e (D) da Figura 3, que se refere ao biocarvão de cupuaçu (5 e 20 mg L⁻¹ respectivamente), é possível observar que um número maior de resultados se distancia da reta, ou seja, diferem dos resultados previstos no modelo estatístico. Em contrapartida, o gráfico (A) da Figura 3, que mostra os dados do biocarvão de baru na remoção de concentração a 5 mg L⁻¹, apresenta menor diferença entre os valores reais obtidos e os valores previstos no modelo matemático.

Os Diagramas de Pareto (Fig. 4) destacam a contribuição de cada variável na eficiência de adsorção para os dois tipos de biocarvão (baru e cupuaçu) analisados.

Figura 4– Diagrama de Pareto onde x1 é a dosagem do carvão e x2 o pH.



(A) BFeB 5% – Biocarvão de Barú metalizado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 5 mg.L⁻¹; (B) BFeB 20% – Biocarvão de Barú metalizado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 20 mg.L⁻¹; (C) BFeC 5% – Biocarvão de Cupuaçu metalizado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 5 mg.L⁻¹; (D) BFeC 20% – Biocarvão de Cupuaçu impregnado com cloreto férrico, Cr(VI) inicial: 20 mg.L⁻¹.

Fonte: Autor (2025).

Cada barra neste tipo de gráfico é proporcional ao efeito padronizado, que é o efeito estimado dividido pelo seu erro padrão (Borges et al., 2022). No diagrama (A), que representa o ensaio com biocarvão da casca de baru e uma concentração inicial de 5 mg L⁻¹ de Cr(VI), observa-se que o pH (x₂) foi a variável com maior influência na adsorção.

Tal influência já foi atestada em estudos anteriores, e confirma que o pH, quando ácido, favorece a remoção do metal, pois este, em solução ácida, (faixa de pH entre 2-6) encontra-se predominantemente nas formas HCrO₄⁻ e Cr₂O₇²⁻ (Benhammou et al., 2007). A redução do pH provoca a protonação dos grupos funcionais presentes na superfície do biocarvão, tornando-a carregada positivamente e ocasionando uma forte atração de espécies negativas, resultando na adsorção eficiente do Cr(VI) (Ries e Silveira, 2019; Beretta et al., 2021).

Considerando que a faixa de pH analisada neste estudo foi predominantemente ácida (3; 4, 5 e 6), pode-se compreender a alta eficiência dos biocarvões produzidos nos processos de remoção, nas condições analisadas. Outro fator a se considerar, é a modificação dos biocarvões a partir da metalização com cloreto férrico, que aumenta a eficiência de remoção, devido a afinidade entre o Cr(VI) e o Fe(III) (Cai et al., 2023).

Diante disso, embora o modelo matemático e o planejamento experimental não tenham sido plenamente eficazes para descrever os mecanismos de adsorção observados neste estudo, os resultados obtidos são de grande relevância. Os dois biocarvões avaliados demonstraram elevada eficiência na remoção de Cr(VI), com taxas superiores a 98% para a concentração inicial de 5 mg L⁻¹ e acima de 99% para a concentração inicial de 20 mg L⁻¹, evidenciando seu potencial como adsorvente altamente eficaz.

Curva de Calibração

Concentrações de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0 e 1,25 mg L⁻¹ de Cr(VI) incluindo o branco sem concentração do metal foram utilizadas para construção da curva de calibração a partir das leituras no espectrofotômetro especificadas na Tabela 4 utilizando o comprimento de onda de 540 nm. As soluções seguiram o mesmo padrão de tratamento dos ensaios, com adição da 1,5-difenilcarbazida e solução ácida.

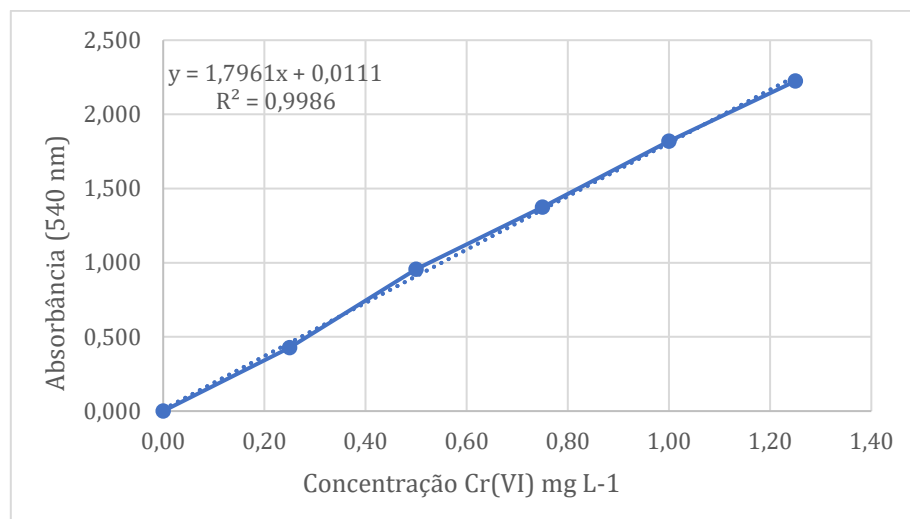
Tabela 4 – Curva de Calibração

Concentração (mg.L ⁻¹)	Absorbância (540 nm)
0,00	0,000
0,25	0,427
0,50	0,957
0,75	1,376
1,00	1,819
1,25	2,224

Fonte: Autor (2025).

O coeficiente de correlação (R²) obtido foi de 0,9986, enquanto os coeficientes angular e linear foram de 1,796 e 0,0111, respectivamente ($y = 1,7961x + 0,0111$, $R^2 = 0,9986$).

Figura 5 – Curva de calibração para detecção em espectrofotômetro



Fonte: Autor (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram uma eficiência extraordinária na remoção de Cr(VI), com médias superiores a 98% para soluções com concentração inicial de 5 mg L⁻¹ e 99% para aquelas com concentração inicial de 20 mg L⁻¹. Isso evidencia o potencial significativo do uso de resíduos lignocelulósicos, como a casca de baru e cupuaçu, na produção de adsorventes para o tratamento de efluentes contaminados por Cr(VI). Além de ser uma tecnologia de baixo custo e fácil operação, essa abordagem promove uma solução sustentável para o manejo de resíduos oriundos da Amazônia Legal.

Embora as variações de pH e dosagem de biocarvão não tenham apresentado impactos negativos nos resultados, tampouco foram observadas correlações significativas nas condições testadas. Concluímos, portanto, que os biocarvões metalizados produzidos a partir das cascas dos frutos investigados são alternativas viáveis para a remediação de águas contaminadas, contribuindo para um futuro mais sustentável e saudável para a sociedade.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Tocantins (UFT) pelo suporte técnico e infraestrutura, a Propesq/UFT por meio do Edital PROPESQ Nº 088/2022 -

Edital Universal De Pesquisa - UFT e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

Referências Bibliográficas

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2007. **Toxicological Profile for Arsenic (Update)**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service.
- AHMAD M., RAJAPAKSHA, A.U., LIM, J.E., ZHANG, M., BOLAN, N., MOHAN, D., VITHANAGE, M., LEE, S.S., OK, Y.S., 2014. Biocarvão as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere** **99**, 19e33.
- ALBIS, A.; CAJAR, L. V.; DOMÍNGUEZ, M. I. (2015). Análisis cinético de la Adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas a concentraciones de 10-20 mg/L con el uso de cáscara de yuca amarga (*Manihot esculenta*). **Prospectiva**, 13(2), 64-71. DOI: <https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.488>
- ALI I.; R.; AR, P.; CIAFFI, M.; NALI, C.; LORENZINI, G.; BADIANI, M. (2014) Removal of arsenic species from water by batch and col-umn operations on bagasse fly ash. **Environ Sci Pollut Res** 21(5):3218–3229. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2235-3>
- AMEN R.; BASHIR, H.; BIBI, I.; SHAHEEN, S. M.; NIAZI, N. K.; SHAHID, M.; RINKLEBE, J. (2020). A critical review on arsenic removal from water using biocarvão-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. **Chemical Engineering Journal**, 125195. doi:10.1016/j.cej.2020.125195.
- American Society for Testing and Materials – ASTM International. **ASTM D 3173-87**. Standard method for determination of moisture content in biomass; 2003.
- American Society for Testing and Materials – ASTM International. **ASTM D 3174-04**. Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke; 2004.
- American Society for Testing and Materials – ASTM International. **ASTM D 3175-07**. Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal; 2007.
- APHA. (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (19^a ed.). Washington, EUA.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official methods of analysis**. 16.ed. Washington, D.C.: AOAC, 1995. 1094p.
- BENHAMMOU, A. YAACoubi, A., NIBOU, L., e TANOUTI, B. Chromium(VI) adsorption from aqueous solution onto Moroccan Al-pillared and cationic surfactant stevensite. **Journal of Hazardous Materials**, v. 140, n. 1–2, p. 104–109, fev. 2007.
- BERETTA, G. Z., ABILIO, T. E., GABRIEL, L., LABUTO, G., e CARRILHO, E. N. V. M. Adsorção competitiva de Cr(III) e Cr(VI) por bagaço de cana-de-açúcar nanomodificado magneticamente em meio aquoso: Um estudo de pH. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, 31 ago. 2021.
- BEZERRA, J. D.; CORRÊA, R. F.; SANCHES, E. A.; LAMARÃO, C. V.; STRINGHETA, P. C.; MARTINS, E.; CAMPELO, P. H. “Cupuaçu” (*Theobroma grandiflorum*): A brief review on chemical and technological potential of this Amazonian fruit. **Food Chemistry Advances**, v. 5, p. 100747, dez. 2024.
- BORGES, M.; BARBOSA, R. S.; RAMBO, M. K.; RAMBO, M. C.; SCAPIN, E. (2022). Evaluation of residual biomass produced in Cerrado Tocantinense as potential raw biomass for

biorefinery. **Biomass Conversion and Biorefinery**. In press. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-020-00892-x>.

BORGES, M. S.; SANTOS, J. R.; PEDROZA, M. M.; RAMBO, M. K.; BERTUOL, D. A.; FRIZZO, C. P.; BURROW, R. A.; SCAPIN, E. Exploring the Potential of Waste Biomass from the Brazilian Legal Amazon in Bioproducts Production: a Comprehensive Analysis and Promising Perspectives. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 36, n. 5, p. e-20240202, 2025.

CAI, Y.; RAN, Z.; CANG, Y.; CHEN, X.; SHAABAN, M.; PENG, Q. A. Efficient removal of Cr(VI) and As(V) from an aquatic system using iron oxide supported typha biocarvão. **Environmental Research**, v. 225, p. 115588–115588, 1 maio 2023.

CARVALHO, S. C. F. de. Resíduos da indústria de beneficiamento de castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.) como adsorvente de cromo (VI) em solução aquosa. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido; 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a **Resolução nº 357/2005 do CONAMA**, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Seção 1, p. 81.

COSTA, Y.; SOUZA, T. F.; REIS, E. N.; SANTOS, E. J. Estudo cinético e de equilíbrio da biossorção de Cr(VI) de soluções aquosas usando mesocarpo de maracujá-amarelo como biossorvente. **Scientia Plena**, 11(12), 124201. (2015). DOI: 10.14808/sci.plena.2015.124201.

DEKA, Sumi; BHATTACHARYYA, Krishna G. Removal of Cr (VI) by Adsorption on Kala Jamun (*Syzygium cumini* L.) Bark Powder.

ELAHI, A.; AROOJ, I.; BUKHARI, D. A.; REHMAN, A. Successive use of microorganisms to remove chromium from wastewater. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 9, p. 3729–3743, maio 2020.

FANG, W.; WU, H.; MA, K.; ZUO, B.; SHE, D.; GENG, Z.; LIANG, H. Efficient selective adsorption of Cr (VI) by S-doped porous carbon prepared from industrial lignin: Waste increment and wastewater treatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134765, 2024.

GAMBOA, V. S.; RIES, L. A. D. S.; GASPARIN, F. P.; KINAST, É. J.; BENVENUTTI, E. V.; da SILVA RIES, L. A. Aplicação da casca de arroz como adsorvente para remoção de CR (VI) em soluções aquosas. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 8, n. 3, p. 206-217, 2022.

HE, R.; PENG, Z.; LYU, H.; HUANG, H.; NAN, Q. e TANG, J. Synthesis and characterization of an iron-impregnated biocarvão for aqueous arsenic removal. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 1177-1186, 2018.

LIANG, J.; HUANG, X.; YAN, J.; LI, Y.; ZHAO, Z.; LIU, Y.; WEI, Y.. A review of the formation of Cr(VI) via Cr(III) oxidation in soils and groundwater. **Science of The Total Environment**, 774, 145762, 2021.

DE SOUZA, D. R.; DE MENEZES BENEDITO, E. M.; DE PAULA SALES, J. V.; DA SILVA, L. Z.; SILVA, N. S.; YAMATO, M. A. C.; CARDOSO, M. A. P. Avaliação do Potencial de Adsorção de Cromo (VI) através da semente da *Moringa oleifera*. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e40610212591-e40610212591, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12591>.

PROTIMIZA. Protimiza experimental design. Campinas: PROTIMIZA, 2014. Versão 1. Disponível em: Acesso em: 05 jun. 2019.

RAMBO, M.; RAMBO, M. C.; MELO, P. M.; OLIVEIRA, N. M. L. D.; NEMET, Y. K., SCAPIN, E.; BERTUOL, D. A. Sustainability of Biorefinery Processes Based on Baru Biomass

Waste. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. doi: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190169>, 2020.

RAMBO, M. K. D.; NOVOTNY, E.; CANELLAS, L.; AGUIAR, N.; AUCAISSE, R.; MKD RAMBO, U. F. T.; R AUCAISSE, U. E. P. G. Production of biocarvão and chemical products from banana and coffee residues after acid hydrolysis. www.alice.cnptia.embrapa.br, 2014.

RAMBO, M. K. D.; COSTA RODRIGUES ALMEIDA, K. J., DIEL RAMBO, M. C.; BARUQUE FILHO, E. A. The Response Surface Methodology as a tool to optimize the extraction and acid hydrolysis processes applied to babassu residues. **Revista Brasileira de Pós-graduação**, [s.l.], v. 13, n. 32, p.807-825, 2017.

RAMBO, M.K.D.; SCHMIDT, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. **Talanta**, [s.l.], v. 144, p.696-703. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.045>, 2015.

RIES, L. A. D. S.; SILVEIRA, J. H. D. Remoção de Cr(VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 6477–6494, 2019.

SADEGHI F. S., et al. (2018) Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessments of arsenic contamination in drinking water of Ardabil city in the Northwest of Iran, **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 53:5, 421-429, DOI:10.1080/10934529.2017.1410421, 2009.

SANO, S. M., RIBEIRO, J. F., e BRITO, M. A. **Baru: biologia e uso**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 51p.

SCAPIN, E.; RAMBO, M. K.; VIANA, G. C.; BORGES, M. S.; RAMBO, M. C.; CARNEIRO, C. Production of Furanic Compounds and Organic Acids from Brazilian Pequi (*Caryocar brasiliensis* Camb.) **Residues Using Green Chemistry. Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2020.

SHARMA, P. SINGH, S. P.; PARAKH, S. K.; TONG, Y. W. Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 4923–4938, 2022.

SIMONETTI B. J.; SCHÄFER, M. G.; NEGRETE, B. B.; HERINGER, T. A.; HORN, R. C. Intoxicação por Cromo e Seus Efeitos no Organismo. **Revista de Toxicologia**, 45(2), 123-138. DOI: 10.1590/1234567890123456, 2019.

SILVA RIES, Lúcia Allebrandt da; SILVEIRA, Joyce Helena da. Remoção de Cr(VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 6, p. 6477-6494, jun. 2019.

SOUZA, R. S.; CARVALHO, S. M. L.; GARCIA JÚNIOR, M. R. L.; SENA, R. S. F. Adsorção de cromo (VI) por carvão ativado granular de soluções diluídas utilizando um sistema batelada sob pH controlado. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 3, p. 661–668, set. 2009.

SRIVASTAV, A.L.; PHAM, T. D.; IZAH, S. C.; SINGH, N.; SINGH, P. K. Biocarvão Adsorbents for Arsenic Removal from Water Environment: A Review. **Bulletin Environmental Contamination and Toxicology**. v. 108, n. 4, p. 616-628, 2022.

TAN X.; LIU, S. B.; LIU, Y. G.; GU, Y. L.; ZENG, G. M.; HU, X. J.; JIANG, L. H. Biocarvão as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage. **Bioresource technology**, v. 227, p. 359-372, 2017.

TAN X, LIU Y.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X., GU, Y.; YANG, Z. Application of biocarvão for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TANGAHU B.V.; SHEIKH ABDULLAH, S. R.; BASRI, H.; IDRIS, M.; ANUAR, N.; MUKHLISIN, M. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. **International journal of chemical engineering**, v. 2011, n. 1, p. 939161, 2011.

VERA, R., SOUZA, E. R. B. (2009) Baru. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Vol. 31 (1), 001-295. <https://doi.org/10.1590/S0100-2945200900010000>.

WANG X.; GUO, Z.; HU, Z.; ZHANG, J. Recent advances in biocarvão application for water and wastewater treatment: a review. **PeerJ**, v. 8, p. e9164, 2020.

ZAHOOR, A.; MAO, G.; JIA, X.; Xiao, X.; CHEN, J. L. Global research progress on mining wastewater treatment: a bibliometric analysis. **Environmental Science: Advances**, v. 1, n. 2, p. 92-109, 2022.