



## I-335 - REMOÇÃO DE ARSÊNIO NA PRESENÇA DE ÂNIONS COEXISTENTES EM ÁGUAS UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO POR BIOADSORVENTE SELETIVO

### **Luisa Cardoso Maia<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Itajubá. Mestra e Doutora em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior<sup>(2)</sup>**

Engenheiro de Produção pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro e técnico em Meio Ambiente pelo Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro. Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **Liliane Catone Soares<sup>(3)</sup>**

Bacharel em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestra em Química Inorgânica e Doutora em Química Analítica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora do Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **Amália Luísa Pedrosa Xavier<sup>(4)</sup>**

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto e Engenheira Química pelo Centro Universitário de Belo Horizonte. Mestra em Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto.

### **Leandro Vinícius Alves Gurgel<sup>(5)</sup>**

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto. Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto. Doutor em Ciências (Físico-Química) pela Universidade de São Paulo. Professor associado II da Universidade Federal de Ouro Preto, trabalhando nas áreas de adsorção de metais tóxicos e corantes industriais e produção de bioetanol a partir de biorresíduos.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Grupo de Físico-Química Orgânica (GFQO), Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas – Universidade Federal de Ouro Preto – Campus Morro do Cruzeiro, s/nº – Bauxita – Ouro Preto – MG – CEP: 35400-000 – Brasil – e-mail: [luisa.maia@aluno.ufop.edu.br](mailto:luisa.maia@aluno.ufop.edu.br)

## **RESUMO**

A contaminação de águas por arsênio representa um grave problema ambiental e de saúde pública que afeta diversas regiões em todo o mundo. Esse problema é agravado pela ausência de técnicas sustentáveis, flexíveis e de baixo custo capazes de promover a remoção de arsênio de águas utilizadas para consumo humano (concentrações da ordem de microgramas por litro). Um destaque é dado para a técnica de adsorção, que possibilita a aplicação de novos bioadsorventes, produzidos a partir de rotas sustentáveis e baseadas nos princípios da economia circular, para adequação da potabilidade de águas contaminadas por arsênio. No entanto, a remoção de arsênio pela técnica de adsorção tem como grande desafio a seletividade do adsorvente na presença de ânions comumente presentes na água, como sulfato e fosfato. Nesse sentido, o presente trabalho visa avaliar o potencial de aplicação de uma nova tecnologia de adsorção, desenvolvida a partir de bagaço de cana-de-açúcar (BC), para potabilização de águas contaminadas por arsênio. O biomaterial foi sintetizado e caracterizado, sendo aplicado para remoção de arsênio em escala de laboratório (solução contendo os íons arsenato, sulfato e fosfato) e em ambiente relevante (água subterrânea contaminada por arsênio). Os resultados mostraram que o bioadsorvente, quando em presença de íons sulfato, apresentou uma redução expressiva da capacidade de adsorção de As(V) devido a um efeito antagônico. No entanto, mesmo na presença de fortes competidores, o biomaterial ainda foi capaz de remover arsênio. Para se comprovar a capacidade de remoção de arsênio mesmo na presença de ânions coexistentes na água, o desempenho do biomaterial foi avaliado por meio de estudos de adsorção em batelada utilizando-se amostras de água subterrânea contaminadas por arsênio (concentrações entre 30 e 40  $\mu\text{g L}^{-1}$ ), cujos resultados demonstraram o potencial de aplicação do biomaterial para adequação ao padrão de potabilidade (concentrações inferiores a 10  $\mu\text{g L}^{-1}$  foram alcançadas) em regiões onde há contaminação por arsênio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adsorção Competitiva, Sulfato, Fosfato, Arsenato, Tratamento de água.



## INTRODUÇÃO

A contaminação de mananciais por elementos de elevada toxicidade como o arsênio representa um sério problema de saúde pública que atinge diversas regiões em todo o mundo, exigindo, portanto, tratamento adequado para atender aos mais rigorosos padrões de potabilidade de água.

Segundo Abdolali *et al.* (2014), as tecnologias convencionais de tratamento são ineficientes para remoção de elementos tóxicos em concentrações abaixo de  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , como é o caso do arsênio, que pode ser encontrado em corpos d'água em concentrações que variam entre  $10$  e  $2.030 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  (BANG *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2015; KEIM, 2011; MAJI *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a adsorção se evidencia como uma eficiente técnica de tratamento avançado para fins de adequação da potabilidade dentro de um sistema de tratamento de água, seja num sistema convencional ou numa solução alternativa. Trata-se de uma tecnologia de mais baixo custo e de fácil implantação e operação, que apresenta comprovada eficácia e flexibilidade operacional, capaz de produzir um efluente tratado de elevada qualidade (KUMAR *et al.*, 2019).

Apesar dos diversos adsorventes já disponíveis no mercado (carvões ativados, alumina ativada, resinas e zeólitas), ainda se faz necessário o desenvolvimento de novos adsorventes que sejam renováveis e de baixo custo, capazes de serem regenerados e reutilizados a médio e longo prazo, superando os gargalos ainda recorrentes aos adsorventes convencionais (MONDAL e GARG, 2017).

Para garantir a sua eficiência na remoção de ânions de elevada problemática ambiental como o arsênio, o adsorvente precisa ser seletivo mesmo na presença de ânions coexistentes na água, como sulfato e fosfato, por exemplo. Esses ânions são comumente encontrados nas águas em concentrações dez a cem vezes superiores à de arsênio (PINCUS *et al.*, 2020), competindo pelos sítios ativos do adsorvente e reduzindo sua eficiência na remoção de arsênio.

Além da seletividade, um adsorvente sustentável precisa ser produzido a partir de materiais precursores de baixo custo e de recursos renováveis amplamente disponíveis no mundo, destacando-se o bagaço de cana-de-açúcar (BC) como um potencial material suporte para produção de novos bioadsorventes seletivos para remoção de arsênio de águas e efluentes (MAIA, SOARES e GURGEL, 2021).

O BC é composto majoritariamente por celulose, hemiceluloses e lignina, o que possibilita sua utilização em diversas aplicações tecnológicas, ressaltando-se o seu emprego como suporte sólido para produção de novos adsorventes por meio da inserção de grupos funcionais seletivos nas funções hidroxilas presentes na celulose. Com isso, é possível transformar parte do BC excedente da indústria sucroalcooleira em um subproduto de elevado valor agregado, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias nacionais, de base renovável, e fortalecendo a bioeconomia e a economia circular no país.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial de aplicação de uma nova tecnologia de adsorção, desenvolvida a partir da modificação química de biomassa lignocelulósica, para potabilização de águas contaminadas por arsênio.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O BC utilizado no presente estudo foi cedido pela Usina Jatiboca Açúcar e Álcool (Urucânia, Minas Gerais, Brasil). Primeiramente, foram realizadas etapas de pré-tratamento do BC, que foi moído e submetido a um peneiramento a seco para separação da fração de 100 mesh (0,149 mm). Essa fração foi lavada com água destilada sob agitação constante a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  por 60 min para solubilização dos açúcares residuais e outros contaminantes do processo de moagem. Em seguida, realizou-se a extração em aparelho *Soxhlet* por 240 min utilizando-se uma mistura de solventes contendo cicloexano e EtOH (1:1, v/v), obtendo-se, então, o BC livre de contaminantes e possíveis interferentes no processo de preparação do bioadsorvente de arsênio.

Os reagentes arsenato de sódio heptahidratado ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio micropérolas (NaOH) foram adquiridos da Neon (Brasil). O fosfato de sódio monobásico ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) e o

sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) foram adquiridos da Synth (Brasil). O papel de filtro quantitativo faixa preta (modelo JP-41) foi adquirido da Jprolab (Brasil). Todas as soluções foram preparadas com água purificada pelo sistema Milli-Q (Millipore, modelo Milli-Q Simplicity®).

O presente trabalho dividiu-se em duas etapas principais, sendo elas: a preparação do bioadsorvente e a análise do seu desempenho frente à remoção de ânions. As etapas de trabalho serão descritas a seguir:

### PRIMEIRA ETAPA: PREPARAÇÃO DO BIOADSORVENTE

A rota de síntese do novo bioadsorvente de arsênio foi desenvolvida de modo a se obter um adsorvente funcionalizado com grupos amônio quaternário, que são carregados positivamente independentemente do pH, possibilitando a remoção de arsênio em uma ampla faixa de pH. Para isso, utilizou-se o BC (10,0 g) como matéria prima, realizando-se uma reação de modificação química com epicloridrina – EPI (128,0 mL) e trietilamina – TEA (220,0 mL) em presença de *N,N*-dimetilformamida – DMF (200 mL). A reação foi executada em duas etapas, ambas a 100 °C, realizando-se primeiramente a reação de eterificação do BC com a EPI (30 min), a qual foi sucedida pela etapa de aminação com a TEA (120 min). O BC funcionalizado (Figura 1) foi lavado para eliminação de possíveis reagentes residuais e seco em estufa sob pressão reduzida a 35 °C.

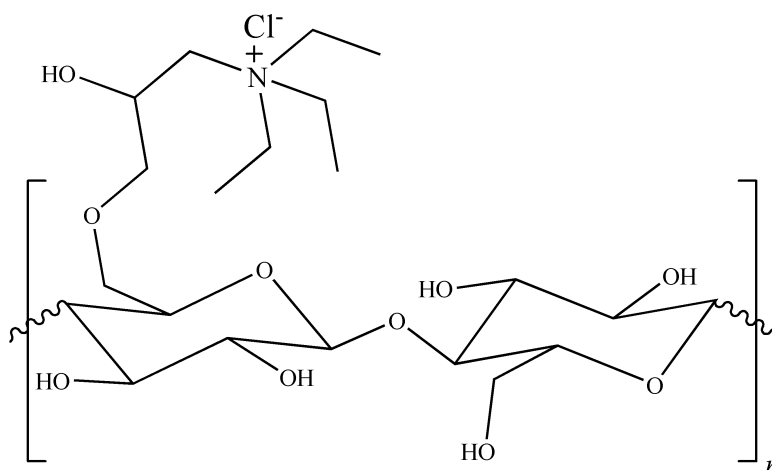


Figura 1: Estrutura química do bioadsorvente de As(V) desenvolvido a partir de BC.

### SEGUNDA ETAPA: ADSORÇÃO DE ARSÊNIO NA PRESENÇA DE ÂNIONS COEXISTENTES NA ÁGUA

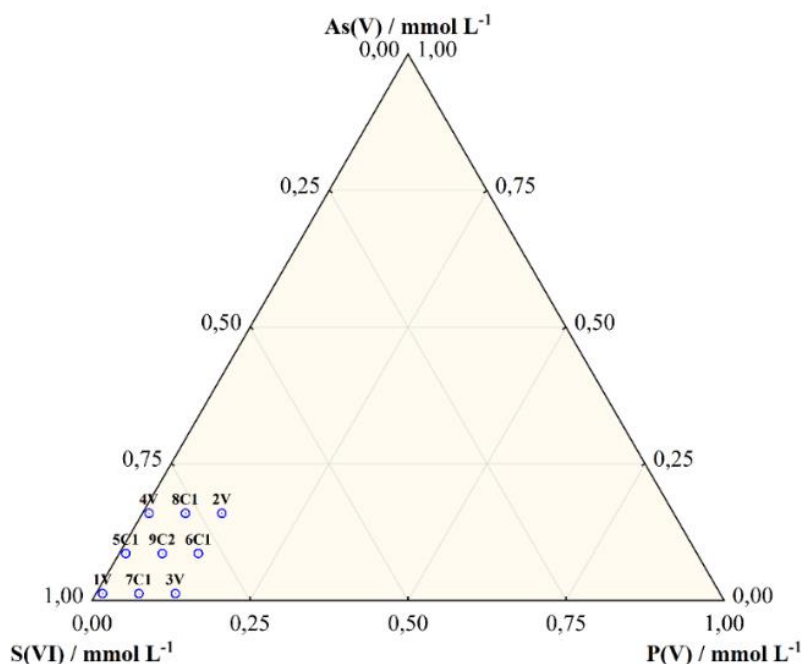
O desempenho do bioadsorvente foi avaliado em sistemas multicomponente por meio de um planejamento de mistura com restrições inferiores e superiores para misturas contendo os íons arsenato, sulfato e fosfato em proporções molares distintas (Figura 2). O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do íon sulfato, encontrado naturalmente em concentrações bem mais elevadas do que as concentrações dos íons arsenato e fosfato, sobre a adsorção desses dois últimos ânions, que possuem estruturas químicas similares e, conseqüentemente, uma especiação semelhante.

Os experimentos foram conduzidos sem o uso de solução tampão, adotando-se um tempo de equilíbrio de 30 min e uma dose aplicada de bioadsorvente de 0,2 g L<sup>-1</sup>. As soluções foram preparadas a partir dos sais arsenato de sódio heptahidratado, sulfato de sódio e de fosfato de sódio monobásico. O pH das soluções foi ajustado para 8,00 ± 0,01 de modo a garantir predominância das espécies de interesse em solução (íons em sua forma divalente).

Diferentes proporções da mistura foram avaliadas de modo a se obter uma mistura ternária em todos os pontos experimentais, cuja o somatório das concentrações fosse igual a 1,0 mmol L<sup>-1</sup> e que apresentasse a



predominância do íon sulfato frente aos outros íons da mistura (arsenato e fosfato), assim como observado em ambiente relevante (água contaminada por arsênio).



**Figura 2: Planejamento de mistura ternária com restrições inferiores e superiores para os componentes S(VI), P(V) e As(V).**

Em seguida, o desempenho do bioadsorvente foi testado em ambiente relevante (água subterrânea contaminada por arsênio) e comparado a outros três adsorventes comerciais (carvão ativado de casca de coco, alumina ativada e quartzo revestido com óxido de manganês). Os experimentos de adsorção foram realizados em batelada utilizando-se amostras de água contendo uma concentração de arsênio de  $39 \pm 4 \mu\text{g L}^{-1}$  e pH 6,95, adotando-se um tempo de equilíbrio de 60 min e uma dose aplicada de adsorvente de  $0,2 \text{ g L}^{-1}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, o bioadsorvente foi sintetizado e caracterizado, comprovando-se a efetividade da reação de modificação química proposta para funcionalização do BC. Em seguida, o desempenho do bioadsorvente na remoção de As(V) foi avaliado em sistemas mono- e multicomponente, uma vez que sua eficiência pode ser influenciada por efeitos antagônicos ou sinérgicos causados por ânions coexistentes na água.

A competição pelos sítios ativos do bioadsorvente precisa ser criteriosamente investigada, uma vez que pode impactar a operação do biomaterial em modo contínuo (colunas de adsorção) e conduzir a um fenômeno conhecido como *overshooting*, o que resultaria num aumento da concentração de saída do elemento inicialmente adsorvido devido a sua liberação para a solução.

A matriz experimental construída por meio do planejamento de mistura ternária é apresentada na Tabela 1. A maior remoção de As(V) foi obtida no experimento 8C1, que apresentou uma concentração inicial de S(VI) cinco vezes superior à de As(V) e uma concentração de P(V) 2,4 vezes inferior à de As(V) (Tabela 1). Nesse ponto, foi alcançada uma das menores remoções de sulfato, com uma redução da capacidade de adsorção total ( $Q_{\text{total}}$ ) do bioadsorvente, sugerindo que a adsorção foi mutualmente afetada.

Em termos de eficiência de remoção ( $E$ ), nota-se que a diferença de desempenho obtida para cada um dos três ânions foi pouco expressiva, o que mostra que embora haja um efeito antagônico no sistema, o bioadsorvente ainda é capaz de remover arsênio mesmo na presença de outras espécies aniônicas no meio. Os valores de  $E$  podem ser melhorados otimizando-se a dose de bioadsorvente aplicada para o tratamento de água.

**Tabela 1: Matriz experimental para o planejamento de mistura com limites superiores e inferiores de três componentes para adsorção de sulfato, fosfato e arsenato (pH 8,00, 25,0 ± 0,1 °C, 200 rpm, 30 min, dose aplicada de 0,2 g L<sup>-1</sup>).**

Ensaio	Concentração / mmol L <sup>-1</sup>			Q <sub>máx</sub> / mmol g <sup>-1</sup> (d)				Eficiência de remoção (E) / %		
	C <sub>i, S(VI)</sub>	C <sub>i, P(V)</sub>	C <sub>i, As(V)</sub>	Q <sub>máx,S(VI)</sub>	Q <sub>máx,P(V)</sub>	Q <sub>máx,As(V)</sub>	Q <sub>total</sub>	S(VI)	P(V)	As(V)
1V <sup>(a)</sup>	0,977	0,010	0,013	0,724	0,002	0,005	0,731	13,8	4,4	7,4
				0,693	0,002	0,004	0,699	13,2	4,1	6,1
2V <sup>(a)</sup>	0,715	0,125	0,160	0,436	0,016	0,043	0,495	11,2	3,0	5,0
				0,411	0,016	0,045	0,472	10,6	3,0	5,2
3V <sup>(a)</sup>	0,862	0,125	0,013	0,593	0,022	0,003	0,618	12,8	4,0	4,8
				0,557	0,019	0,003	0,579	12,0	3,5	3,9
4V <sup>(a)</sup>	0,830	0,010	0,160	0,489	0,001	0,039	0,529	11,0	3,0	4,6
				0,482	0,0004	0,038	0,521	10,7	0,9	4,5
5C1 <sup>(b)</sup>	0,904	0,010	0,087	0,646	0,002	0,027	0,675	13,2	5,8	5,9
6C1 <sup>(b)</sup>	0,789	0,125	0,087	0,512	0,024	0,022	0,558	12,2	4,5	4,9
7C1 <sup>(b)</sup>	0,920	0,068	0,013	0,690	0,014	0,004	0,707	14,0	4,7	6,0
8C1 <sup>(b)</sup>	0,773	0,068	0,160	0,439	0,028	0,083	0,551	10,6	9,4	9,9
9C2 <sup>(c)</sup>	0,846	0,068	0,087	0,545	0,014	0,028	0,587	12,0	5,0	6,1
Observações:										
(a) Vértices extremos do planejamento de mistura.										
(b) Centróide do planejamento de mistura.										
(c) Centróide global do planejamento de mistura.										
(d) Variáveis resposta utilizadas para construção dos modelos cúbicos especiais.										

A capacidade de adsorção de cada um dos ânions investigados no planejamento de mistura também foi avaliada em sistema monocomponente com base nas concentrações definidas pelo centróide global (C2) (Tabela 1). Os resultados indicaram que o bioadsorvente apresentou uma maior afinidade por íons sulfato, espécie cujo valor de Q<sub>máx</sub> no sistema monocomponente foi o mais próximo dos valores de Q<sub>total</sub> no sistema tricompente (Tabela 2).

**Tabela 2: Valores de capacidade de adsorção dos íons sulfato, fosfato e arsenato em sistema monocomponente (pH 8,00, 25,0 ± 0,1 °C, 200 rpm, 30 min, dose aplicada de 0,2 g L<sup>-1</sup>).**

Sistema monocomponente	Concentração inicial / mmol L <sup>-1</sup>	Q <sub>máx</sub> / mmol g <sup>-1</sup>	E / %
S(VI)	0,846	0,59 ± 0,02	13 ± 1
P(V)	0,068	0,27 ± 0,01	87 ± 2
As(V)	0,086	0,35 ± 0,01	80,8 ± 0,3

No entanto, é importante ressaltar que os sistemas monocomponente em questão foram realizados utilizando-se uma concentração inicial de S(VI) 12,5 e 9,8 vezes superior à de P(V) e à de As(V), respectivamente. No sistema monocomponente, a capacidade de adsorção de S(VI) foi 2,2 e 1,7 vezes superior à de P(V) e As(V), respectivamente, o que mostra que, mesmo sob condições de equilíbrio menos favoráveis, o bioadsorvente apresentou consideráveis capacidades de adsorção de As(V), como comprovado pela elevada eficiência de remoção (E = 80,8 ± 0,3%) alcançada nessas condições experimentais.

A qualidade estatística dos modelos construídos a partir das variáveis resposta investigadas foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA), observando-se que apenas os modelos de regressão construídos para as variáveis Q<sub>máx,S(VI)</sub> e Q<sub>total</sub> apresentaram significância estatística, sendo capazes de descrever bem os dados



experimentais (Tabela 3). Os modelos de regressão construídos para as variáveis  $Q_{\text{máx,P(V)}}$  e  $Q_{\text{máx,As(V)}}$  apresentaram falta de ajuste ( $p > 0,05$ ) e, por isso, não foram considerados para otimização (Tabela 3).

**Tabela 3: ANOVA dos modelos cúbicos especiais de regressão construídos para as variáveis resposta do planejamento de mistura ternária.**

Variável resposta: $Q_{\text{máx,S(VI)}}$ (espécie aniônica $\text{SO}_4^{2-}$ )					
Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calc}}$	$p$ -valor
Regressão	0,1332	6	0,0222	49,96	0,00002
Resíduos	0,0031	7	0,0004		
Falta de ajuste	0,0008	2	0,0004		
Erro puro	0,0023	5	0,0005	0,86	0,48
SQ Total	0,1363	13	0,0105		
Variação explicada ( $R^2$ ) = 0,9772 / Variação explicada ajustada ( $R^2_{\text{adj}}$ ) = 0,9576					
Variável resposta: $Q_{\text{máx,P(V)}}$ (espécie aniônica $\text{HPO}_4^{2-}$ )					
Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calc}}$	$p$ -valor
Regressão	0,0010	6	0,0002	9,84	0,004
Resíduos	0,0001	7	0,00002		
Falta de ajuste	0,0001	2	0,00006		
Erro puro	0,000007	5	0,000001	40,43	0,0008
SQ Total	0,0011	13	0,00009		
Variação explicada ( $R^2$ ) = 0,8940 / Variação explicada ajustada ( $R^2_{\text{adj}}$ ) = 0,8032					
Variável resposta: $Q_{\text{máx,As(V)}}$ (espécie aniônica $\text{HAsO}_4^{2-}$ )					
Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calc}}$	$p$ -valor
Regressão	0,0059	6	0,0010	8,81	0,006
Resíduos	0,0008	7	0,0001		
Falta de ajuste	0,0008	2	0,0004		
Erro puro	0,000004	5	0,000001	491,96	0,000002
SQ Total	0,0067	13	0,0005		
Variação explicada ( $R^2$ ) = 0,8830 / Variação explicada ajustada ( $R^2_{\text{adj}}$ ) = 0,7828					
Variável resposta: $Q_{\text{total}}$					
Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calc}}$	$p$ -valor
Regressão	0,0838	6	0,0140	21,39	0,0004
Resíduos	0,0046	7	0,0007		
Falta de ajuste	0,0023	2	0,0011		
Erro puro	0,0023	5	0,0005	2,43	0,18
SQ Total	0,0884	13	0,0068		
Variação explicada ( $R^2$ ) = 0,9483 / Variação explicada ajustada ( $R^2_{\text{adj}}$ ) = 0,9039					

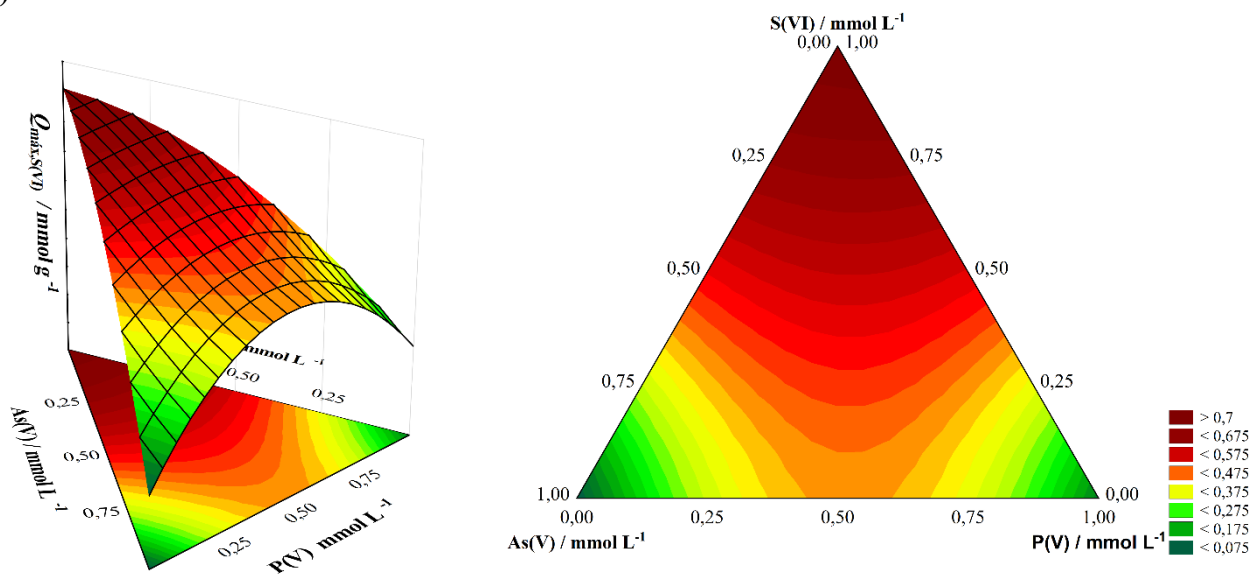
Com isso, foram geradas as superfícies de resposta e as curvas de contorno para as variáveis  $Q_{\text{máx,S(VI)}}$  e  $Q_{\text{total}}$ , as quais indicaram regiões ótimas bem definidas, cujos pontos críticos equivalem ao ponto de máximo. As maiores capacidades de adsorção de S(VI) foram alcançadas nas regiões de maiores concentrações de S(VI) e menores concentrações de As(V) (Figuras 3(a) e (b)), o que pode ser justificado pelo efeito antagônico causado pela inibição da adsorção de uma espécie pela outra. Uma maior influência da concentração de As(V) foi observada na superfície de resposta construída para a variável  $Q_{\text{total}}$  (Figuras 3(c) e (d)), que foi favorecida por maiores concentrações de S(VI), cujo equilíbrio químico foi propositalmente favorecido.

Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira *et al.* (2020), que relataram um efeito antagônico causado por íons  $\text{SO}_4^{2-}$  na adsorção de As(V) na forma de  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  (pH 4,0) em celulose microcristalina modificada

com etilenodiamina, o que, segundo os mesmos autores, pode estar relacionado a fatores como a carga e o tamanho do raio iônico hidratado de cada ânion.

Como demonstrado, a capacidade de adsorção de arsênio do bioadsorvente é impactada pelo efeito antagônico causado pela presença de íons sulfato no sistema. No entanto, o biomaterial é capaz de remover arsênio mesmo na presença de íons sulfato no meio. A concentração de arsênio em amostras de água é da ordem de microgramas por litro, o que faz com que o biomaterial seja capaz de removê-lo mesmo na presença de outros ânions como o sulfato.

(a)



(b)

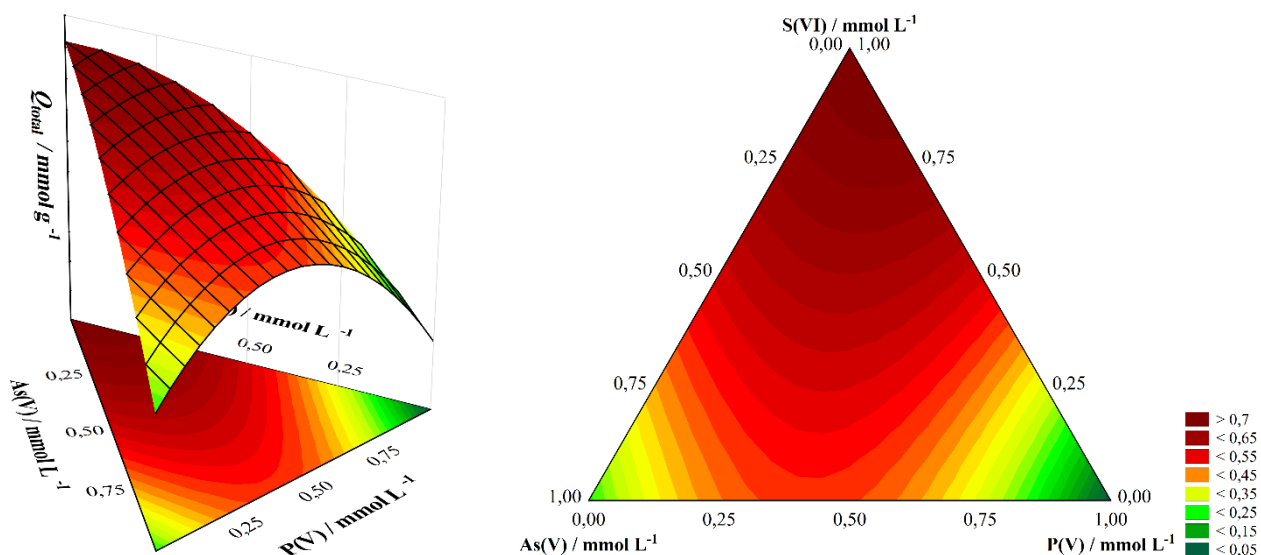


Figura 3: Superfícies de resposta e curvas de contorno dos modelos obtidos para as variáveis (a)  $Q_{\text{máx,S(VI)}}$  e (b)  $Q_{\text{total}}$ .

Para comprovar essa hipótese, o bioadsorvente foi aplicado no tratamento de amostras de água subterrânea contaminadas por arsênio que foram coletadas no município de Ouro Preto/MG. Outros materiais adsorventes,



de origem comercial, também foram testados sob as mesmas condições para se avaliar o desempenho do bioadsorvente frente às atuais soluções de mercado (Tabela 4).

Como pode ser observado, os únicos adsorventes capazes de promover a adequação ao padrão de potabilidade brasileiro foram a alumina ativada e o bioadsorvente, responsáveis por alcançar elevadas eficiências de remoção ( $92 \pm 8\%$  e  $85 \pm 5\%$ , respectivamente). O carvão ativado, tido como o adsorvente universal, e o quartzo revestido com óxido de manganês apresentaram desempenhos bastante inferiores aos seus concorrentes, não sendo capazes de atender ao Valor Máximo Permissível (VMP) do padrão de potabilidade ( $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ).

**Tabela 4 – Comparação do bioadsorvente BTEA com adsorventes comerciais na remoção de arsênio de águas contaminadas (pH  $6,95 \pm 0,01$ , 60 min, dose aplicada de  $0,2 \text{ g L}^{-1}$ , 200 rpm a  $25,0 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ).**

Adsorvente	$C_i / \mu\text{g L}^{-1}$ <sup>(d)</sup>	$C_t / \mu\text{g L}^{-1}$	$q_t / \mu\text{g g}^{-1}$	$E / \%$
BTEA	$39 \pm 4$	$6 \pm 2$	$165 \pm 10$	$85 \pm 5$
CA <sup>(a)</sup>		$30 \pm 3$	$43 \pm 11$	$23 \pm 7$
ALA <sup>(b)</sup>		$3 \pm 3$	$180 \pm 18$	$92 \pm 8$
QM <sup>(c)</sup>		$25 \pm 2$	$72 \pm 10$	$37 \pm 5$
Observações:				
<sup>(a)</sup> CA = carvão ativado preparado a partir de casca de coco.				
<sup>(b)</sup> ALA = alumina ativada importada.				
<sup>(c)</sup> QM = quartzo revestido com óxido de manganês.				
<sup>(d)</sup> Concentração de arsênio encontrada em amostras de águas coletadas no município de Ouro Preto/MG.				

Portanto, os resultados de adsorção de arsênio em batelada em sistema relevante (amostra de água contaminada) comprovaram a eficiência da tecnologia de adsorção, evidenciando seu potencial competitivo frente aos materiais comerciais avaliados.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

No sistema multicomponente, o bioadsorvente apresentou maior afinidade por íons sulfato e, portanto, a capacidade de adsorção de As(V) foi impactada pela inibição da adsorção de uma espécie em detrimento à outra.

No entanto, mesmo sob condições de equilíbrio extremamente desfavoráveis, o bioadsorvente teve sua capacidade de adsorção total influenciada pela concentração de As(V), mostrando ser capaz de remover tal elemento mesmo em presença de fortes competidores como o sulfato.

O bioadsorvente comprovou sua seletividade na remoção de arsênio em ambiente relevante, apresentando um desempenho superior ao carvão ativado de casca de coco e quartzo revestido com óxido de manganês, sendo estatisticamente semelhante à alumina ativada, material importado, comercializado nos Estados Unidos.

Além de se tratar de uma tecnologia de base renovável, o bioadsorvente é uma tecnologia nacional, cujo potencial pode ser explorado em prol de melhorias na qualidade de vida de populações vulneráveis que se utilizam de fontes de abastecimento alternativas e inseguras de água.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BANG, S.; PATEL, M.; LIPPINCOTT, L.; MENG, X. Removal of arsenic from groundwater by granular titanium dioxide adsorbent. *Chemosphere*, v. 60, n. 3, p. 389-397, 2005.
2. COSTA, R. d. V. F. d.; LEITE, M. G. P.; MENDONÇA, F. P. C.; NALINI, H. A. Geochemical mapping of arsenic in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 68, p. 43-51, 2015.
3. KEIM, C. N. Arsenic in biogenic iron minerals from a contaminated environment. *Geomicrobiol. J.*, v. 28, n. 3, p. 242-251, 2011.
4. KUMAR, R.; PATEL, M.; SINGH, P.; BUNDSCHUH, J.; PITTMAN, C. U.; TRAKAL, L.; MOHAN, D. Emerging technologies for arsenic removal from drinking water in rural and peri-urban areas: Methods, experience from, and options for Latin America. *Sci. Total Environ.*, v. 694, p. 133427, 2019.
5. PEREIRA, A. R.; SOARES, L. C.; TEODORO, F. S.; ELIAS, M. M. C.; FERREIRA, G. M. D.; SAVEDRA, R. M. L.; SIQUEIRA, M. F.; MARTINEAU-CORCOS, C.; DA SILVA, L. H. M.; PRIM, D.; GURGEL, L. V. A. Aminated cellulose as a versatile adsorbent for batch removal of As(V) and Cu(II) from mono- and multicomponent aqueous solutions. *J. Colloid Interface Sci.*, v. 576, p. 158-175, 2020.
6. PINCUS, L. N.; PETROVIĆ, P. V.; GONZALEZ, I. S.; STAVITSKI, E.; FISHMAN, Z. S.; RUDEL, H. E.; ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. Selective adsorption of arsenic over phosphate by transition metal cross-linked chitosan. *J. Chem. Eng.*, v. 412, p. 128582, 2021.
7. MAJI, S. K.; KAO, Y.-H.; WANG, C.-J.; LU, G.-S.; WU, J.-J.; LIU, C.-W. Fixed bed adsorption of As(III) on iron-oxide-coated natural rock (IOCNR) and application to real arsenic-bearing groundwater. *J. Chem. Eng.*, v. 203, p. 285-293, 2012/09/01/ 2012.
8. MAIA, L. C.; SOARES, L. C.; GURGEL, L. V. A. A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption. *J. Environ. Manage.*, v. 288, p. 112397, 2021.
9. MONDAL, M. K.; GARG, R. A comprehensive review on removal of arsenic using activated carbon prepared from easily available waste materials. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, v. 24, n. 15, p. 13295-13306, 2017.
10. SILVA, D. d. C.; BELLATO, C. R.; MARQUES NETO, J. d. O.; FONTES, M. P. F. Trace elements in river waters and sediments before and after a mining dam breach (Bento Rodrigues, Brazil). *Quim. Nova*, v. 41, n. 8, p. 857-866, 2018.