

Escola Americana de Campinas

Daehyeon Kim

Diogo Bortoletto Silva

**Estudo comparativo da eficiência de resina de troca iônica e carvão ativado
na remoção de íons de cobre**

Campinas
2023

Daehyeon Kim
Diogo Bortoletto Silva

**Estudo comparativo da eficiência de resina de troca iônica e carvão ativado
na remoção de íons de cobre**

Projeto de pesquisa a ser apresentado na 11ª
Mostra de Ciências e Tecnologia do Instituto
3M na categoria Ciências Exatas e da Terra

Orientadora: Profª. Sarah Cardoso

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Gozzi

Campinas
2023

*Dedicamos esse trabalho aos nossos maiores
apoadores: nossos pais e Denny.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Maurício Gozzi por ter nos guiado a diferentes análises dos dados coletados no laboratório, além de nos mostrar que existem diferentes caminhos para chegar a uma conclusão. Ademais, agradecemos seu suporte ao nosso trabalho, mesmo fora do laboratório, estando sempre disposto a compartilhar seus conhecimentos exemplares na química.

Agradecemos também aos assistentes de laboratório, Renan e Erasmo, por sua disposição e trabalho incansável na configuração dos experimentos. Suas contribuições desempenharam um papel fundamental na obtenção dos resultados, e enriqueceram esse trabalho de pesquisa.

Finalmente, agradecemos à Prof^a. Sarah Cardoso, que nos incentivou a apresentar este trabalho, cedendo seu tempo e conhecimento e guiando-nos neste processo. Suas contribuições e palavras de incentivo nos motivaram a alcançar nossos objetivos e crescer como pesquisadores.

*"Water is life, and clean water means health."
Audrey Hepburn*

RESUMO

Este estudo abordou a eficiência de dois métodos distintos de remoção de íons de cobre de águas residuais: a resina de troca iônica de ácido sulfônico e a adsorção por meio de carvão ativado. O problema central reside na necessidade de eliminar o cobre de águas contaminadas para proteger tanto a saúde humana quanto o meio ambiente, dado o potencial risco associado à exposição a níveis elevados de cobre. A metodologia adotada consistiu na realização de experimentos nos quais ambos os métodos foram aplicados em condições controladas. Ambos os métodos foram testados em quantidade igual com uma solução de cloreto de cobre(II) de concentração uniforme. A eficiência de cada método foi então avaliada com base na quantificação dos íons de cobre remanescentes após o processo de remoção, medido usando a espectrofotometria. Embora os resultados tenham mostrado diferenças notáveis entre os dois métodos, é difícil comparar sua eficiência relativa na obtenção da remoção completa de íons de cobre devido a incerteza causada por um pequeno número de testes. No entanto, destacou-se a importância de considerar tanto a eficiência quanto o custo na escolha do método de tratamento de águas residuais. O estudo sugeriu que a resina de troca iônica poderia ser mais adequada em algumas situações que demandam uma remoção significativa de íons de cobre, quando considerando a relação custo-eficácia. Essa consideração foi particularmente relevante, pois influencia diretamente a viabilidade prática da aplicação de cada método em escala industrial. Portanto, este estudo contribui para a compreensão da seleção adequada de métodos de tratamento de águas residuais, considerando especificamente a remoção de íons de cobre. A pesquisa ressalta a complexidade da escolha entre resina de troca iônica e adsorção de carbono ativado, enfatizando a necessidade de investigações adicionais para uma avaliação mais completa e precisa desses métodos em diferentes cenários e condições.

Palavras-Chave: Resina de troca iônica de ácido sulfônico. Adsorção por carvão ativado. Remoção de íons de cobre.

ABSTRACT

This study addressed the efficiency of two distinct methods for removing copper ions from wastewater: sulfonic acid ion exchange resin and adsorption through activated carbon. The central problem lies in the need to eliminate copper from contaminated water to protect both human health and the environment, given the potential risk associated with exposure to elevated levels of copper. The adopted methodology consisted of conducting experiments in which both methods were applied under controlled conditions. Both methods were tested in equal quantities with a uniform concentration copper(II) chloride solution. The efficiency of each method was then evaluated based on the measurement of remaining copper ions after the removal process, measured using spectrophotometry. Although the results showed notable differences between the two methods, it is challenging to compare their relative efficiency in achieving complete copper ion removal due to uncertainty caused by a small number of tests. However, the importance of considering both efficiency and cost in the choice of wastewater treatment method was emphasized. The study suggested that ion exchange resin could be more suitable in some situations that require significant copper ion removal when considering cost-effectiveness. This consideration was particularly relevant as it directly influences the practical feasibility of applying each method on an industrial scale. Therefore, this study contributes to understanding the appropriate selection of wastewater treatment methods, specifically focusing on copper ion removal. The research highlights the complexity of choosing between ion exchange resin and activated carbon adsorption, emphasizing the need for further investigations for a more comprehensive and accurate assessment of these methods in different scenarios and conditions.

Key-Words: Sulfonic ion-exchange resin. Activated carbon. Removal of copper ions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Diagrama mostrando o mecanismo de reação de RTIS	14
Figura 2. Micrografia eletrônica de (a) carvão ativado e (b) carvão ativado funcionalizado	15
Figura 3. Espectro de absorção da solução de CuCl_2	19
Figura 4. Relação entre a concentração de soluções de CuCl_2 e sua absorbância a 823,2 nm	23
Figura 5. A relação entre a massa de substâncias e a eficiência de remoção de íons Cu^{2+} durante as reações	27
Figura 6. Relação entre o preço das substâncias e sua eficiência geral	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Curva de calibração da absorbância de soluções de CuCl_2 de diferentes concentrações a 823,2 nm.....	22
Tabela 2. Relação entre a massa de RTIS usada para reações e as absorbâncias das soluções de efluentes a 823,2 nm.....	24
Tabela 3. Relação entre a massa de CA usada para reações e as absorbâncias das soluções de efluentes a 823,2 nm.....	25
Tabela 4. Relações entre a massa de RTIS e CA adicionados e a porcentagem média de íons de cobre removidos durante a reação	26
Tabela 5. Relação entre a massa da RTIS e seu volume.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RTIS
CA

Resina de troca iônica de ácido sulfônico
Carvão ativado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	13
2 CONTEXTO	14
2.1 Resina de troca iônica	14
2.2 Carvão ativado	14
2.3 Espectrofotometria	15
3 METODOLOGIA	16
3.1 Precauções éticas e de segurança	16
3.2 Materiais necessários	17
3.3 Premissas	17
3.4 Variáveis	17
3.4.1 Variáveis independentes	17
3.4.2 Variáveis independentes	18
3.4.2 Variáveis controladas	18
3.5 Procedimento	19
3.5.1 Curva de calibração	19
3.5.2 Carvão Ativado	19
3.5.3 Resina de troca iônica	20
3.5.4 Medição de eficiência	20
3.5.5 Determinação da densidade da RTIS	21
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
4.1 Resultados e Discussão	22
4.1.1 Cálculo de incerteza para $[CuCl_2]$ e curva de calibração	23
4.1.2 Cálculo de eficiência de remoção de cada método	25
4.2 Análise das tendências gerais	27
4.2.1 Mecanismos de remoção de íons de cobre	28
4.3 Análise de custo-benefício	28
4.4 Conclusão	31
4.5. Avaliação	31
4.5.1 Erros aleatórios	31
4.5.2 Erros sistemáticos	32
4.5.2 Limitações	32
4.5.4 Sugestões para a continuidade da pesquisa	33
5 REFERÊNCIA	34

1 INTRODUÇÃO

O cobre é um dos metais mais comuns do mundo e desempenha um papel indispensável na sustentação da sociedade humana. Apesar de muitos não conhecerem sua importância nas nossas vidas, o cobre é considerado um mineral essencial para humanos (LENNTECH, [s.d.]), fazendo parte importante da nossa alimentação. Ademais, o cobre também é usado amplamente em telecomunicações e indústrias máquinas, devido à sua capacidade de formar ligas metálicas altamente dúcteis e maleáveis, e pela sua condutividade elétrica e térmica (FLANAGAN, [s.d.]). Apesar de seus enormes benefícios, o cobre também pode causar efeitos negativos severos quando liberado de forma imprópria no meio ambiente. Por exemplo, o consumo humano de apenas 10 mg de cobre por dia resulta em efeitos tóxicos incluindo tontura, vômito e diarreia (LENNTECH, [s.d.]). Esses efeitos se tornam ainda mais severos nas concentrações maiores, que podem levar a danos ao fígado e aos rins, ou até à morte (LENNTECH, [s.d.]). Por isso, a legislação brasileira estabelece limites rígidos para o lançamento de efluentes nos corpos hídricos (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011). Embora intencionalmente ou não, uma quantidade significativa de cobre ainda é liberada no meio ambiente. Isso ocorre tanto por atividades naturais, como a poeira soprada pelo vento, como por meio de atividades humanas, como a mineração. Outra parte significativa do cobre liberado é proveniente do descarte de águas residuais das indústrias anteriormente mencionadas (LENNTECH, [s.d.]). Esse vazamento de metal pesado pode influenciar gravemente a nossa saúde: íons de cobre são capazes de corroer os canos de abastecimento de água, assim contaminando a água potável que consumimos.

Para purificar a água para prevenir o consumo de cobre em excesso, vários métodos são adotados pelas estações de tratamento de água. Alguns dos métodos mais comuns são resinas de troca iônica e carvão ativado (WOŁOWIEC et al., 2019). No processo de troca iônica, a água residual é passada pela coluna de resinas de troca iônica. A coluna de resinas consiste de compostos orgânicos sinteticamente polimerizados que possuem zonas carregadas que atraem íons de carga oposta (“Ion-exchange resin”, 2012). Durante esse processo, as zonas negativamente carregadas atraem os íons de cobre que são positivamente carregados, deixando-os incapazes de se dissolverem na água. Semelhantemente, o carvão

ativado (CA) – o carbono superaquecido com rede compacta de poros – é usado para conduzir a adsorção. Durante esse processo, os íons de cobre são quimicamente presos na superfície de CA (NATHANSON, 2023). Tais processos resultam em água mais purificada, prevenindo o perigo de consumo excessivo de cobre.

1.1 Objetivo geral

Ao analisar várias publicações relacionadas a esse tópico, observou-se que algumas estações de tratamento de água optam pelo uso das resinas, enquanto outras escolhem usar o carvão ativado (POPESCU et al., 2017), indicando que cada método possui vantagens únicas. Para explorar isso em profundidade, este relatório discutirá a pergunta de pesquisa “Qual método, entre a resina de troca iônica e a adsorção de carbono, é mais eficiente na remoção de íons de cobre de águas residuais?” Adicionalmente, visto que o uso de carvão ativado é significativamente mais barato que o uso da resina de troca iônica, será conduzida uma análise de custo-benefício para determinar a eficácia geral de cada método.

2 CONTEXTO

2.1 Resina de troca iônica

A resina de troca iônica é o composto orgânico sinteticamente polimerizado com vários poros, com zonas positiva ou negativamente carregadas ("Ion-exchange resin", 2012). Vários grupos funcionais podem ser anexados com a resina para que ela obtenha tal característica. Nesse relatório, resinas com grupo funcional de ácido sulfônico (RTIS) serão investigadas. Esse contém grupos funcionais de ácidos sulfônicos que trocam os íons H^+ por outros cátions de solução circundante, removendo-os da solução através de processo de troca iônica (KAMRIN et al., 1991). O seu mecanismo de reação é visto na Figura 1:

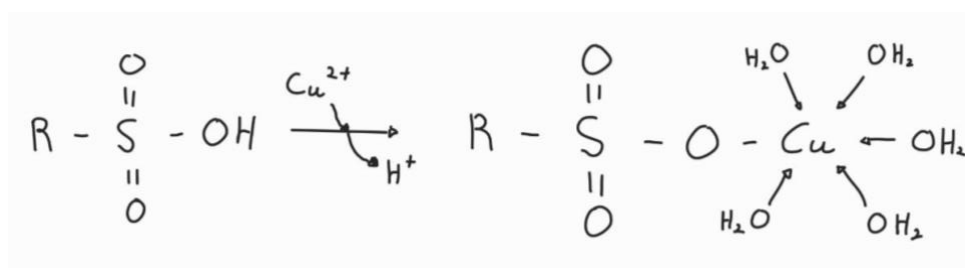


Figura 1. Diagrama mostrando o mecanismo de reação de RTIS

(CHEN; ZHONG, 2019)

2.2 Carvão ativado

O carvão ativado é um pó de carbono superaquecido que é extremamente poroso (KAMRIN et al., 1991). Esses poros fornecem uma grande área de superfície às partículas, permitindo que elas atraiam e prendam as partículas orgânicas de seus arredores, que são mantidas por forças Van der Waals (CECEN; AKTAS, 2011). Esse processo é chamado de adsorção. Portanto, quando colocado em solução, esse pó irá adsorver partículas livres em seu entorno: à medida que as partículas se movem aleatoriamente pelo carvão ativado, elas entram nos poros da superfície do carvão, e ficam capturadas na substância (CECEN; AKTAS, 2011). A micrografia do CA pode ser vista na **Figura 2**:

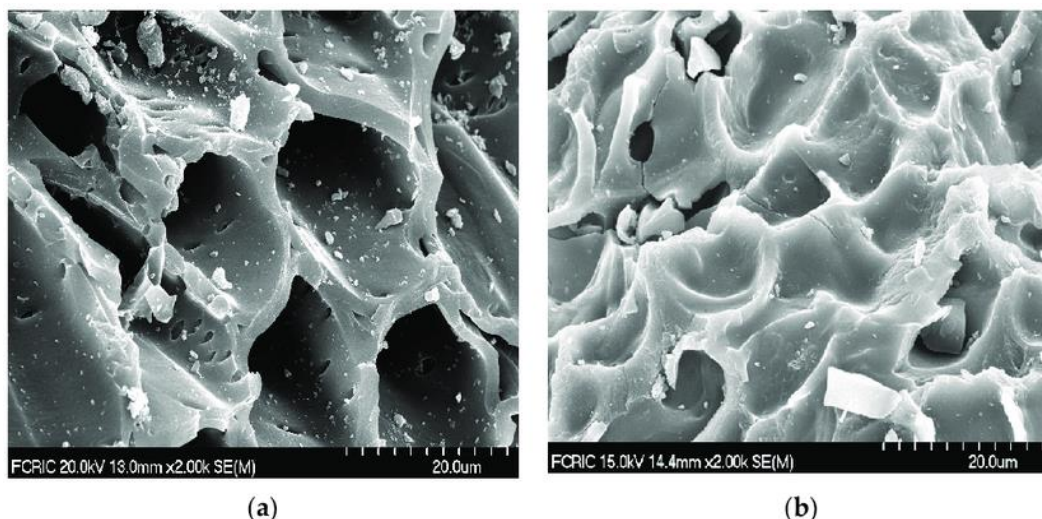


Figura 2. Micrografia eletrônica de (a) carvão ativado e (b) carvão ativado funcionalizado
(LALHMUNSIAMA et al., 2017)

2.3 Espectrofotometria

A espectrofotometria é uma técnica usada para determinar a quantidade de uma substância química em uma solução de amostra por meio da medição de sua absorvância usando um espectrofotômetro (“Principle of Spectrophotometer and its Applications”, [s.d.]). Um princípio fundamental desse método é a lei de Beer-Lambert, que afirma que a absorvância de uma solução é proporcional à sua concentração e à trajetória da luz; isso possibilita, portanto, que a concentração de diferentes soluções seja medida ao calcular a absorvância de cada comprimento de onda específico (CLARK, 2023). Então, para uma trajetória de luz fixa, a curva de calibração linear da absorvância de soluções com diferentes concentrações pode ser construída, facilitando a determinação da concentração.

3 METODOLOGIA

Para determinar a eficiência de cada método, CA e RTIS com a mesma massa foram colocados em diferentes béqueres com a solução de CuCl_2 com a mesma concentração e volume. Em seguida, eles reagiram por 4 minutos e a eficiência de cada método foi calculada pela detecção do número de íons de cobre no béquer após a reação. Esses valores foram dispostos em um gráfico para mostrar a diferença na eficiência de remoção dos dois métodos dentro da faixa pesquisada de valores de massa. Para uma investigação mais aprofundada, o custo-benefício foi levado em consideração e a eficiência geral de cada substância foi calculada.

3.1 Precauções éticas e de segurança

Quando liberado no meio ambiente, o cobre pode afetar negativamente a saúde humana e o meio ambiente. Por exemplo, o cobre pode prejudicar a atividade de minhocas e microrganismos, atrasando a decomposição de matéria orgânica em um ambiente (LENNTECH, [s.d.]). Além disso, a exposição constante ao cobre pode levar a danos renais graves ou até mesmo à morte de seres humanos (LENNTECH, [s.d.]). Por esse motivo, os óculos de segurança, jalecos e luvas foram usados para evitar o contato direto dos produtos químicos com a pele e todos os resíduos químicos produzidos no experimento foram rotulados e armazenados separadamente. Finalmente, todos os resíduos químicos produzidos nos experimentos foram transferidos por uma empresa licenciada de descarte de produtos químicos, que queimou e descartou esses resíduos.

3.2 Materiais necessários

Luvas	Óculos de segurança	Jaleco de laboratório
Balança eletrônica Ohaus	Papel-filtro	Espectrofotômetro modelo Vernier SpectroVis Plus
Bulbo de pipeta	Suporte de anel	Garra de laboratório
Funil	Barra de agitação magnética	Agitador magnético Lab1000, modelo MS-PB
Garrafa de lavagem	AC Synth	Cloreto de Cobre(II) Dihidratado
Água destilada	RTIS Dinâmica	Cilindro graduado 50.0 ± 0.5 mL
Frascos volumétricos 2000.0 ± 0.6 mL	Cubeta 3 mL	Pipeta volumétrica 100.00 mL ± 0.08
Frascos volumétricos 100.0 ± 0.1 mL	Béqueres 250 mL	

3.3 Premissas

A única pressuposição feita durante a coleta de dados para obter resultados mais precisos e aumentar a reprodutibilidade do experimento foi que, como a absorvância dos íons cloreto em 823,2 nm é muito próxima de 0 mesmo em altas concentrações, sua influência na absorvância da solução de CuCl_2 foi considerada insignificante nesse experimento.

3.4 Variáveis

3.4.1 Variáveis independentes

Amostras de CA e RTIS de massas variadas foram pesadas em gramas usando uma balança eletrônica.

3.4.2 Variáveis independentes

A absorbância das soluções foi medida com um espectrofotômetro no comprimento de onda de 823,2 nm. Usando a curva de calibração, isso foi convertido para a concentração restante de íons de cobre (mol dm^{-3}) nas soluções efluentes, permitindo a determinação da eficiência das reações.

3.4.2 Variáveis controladas

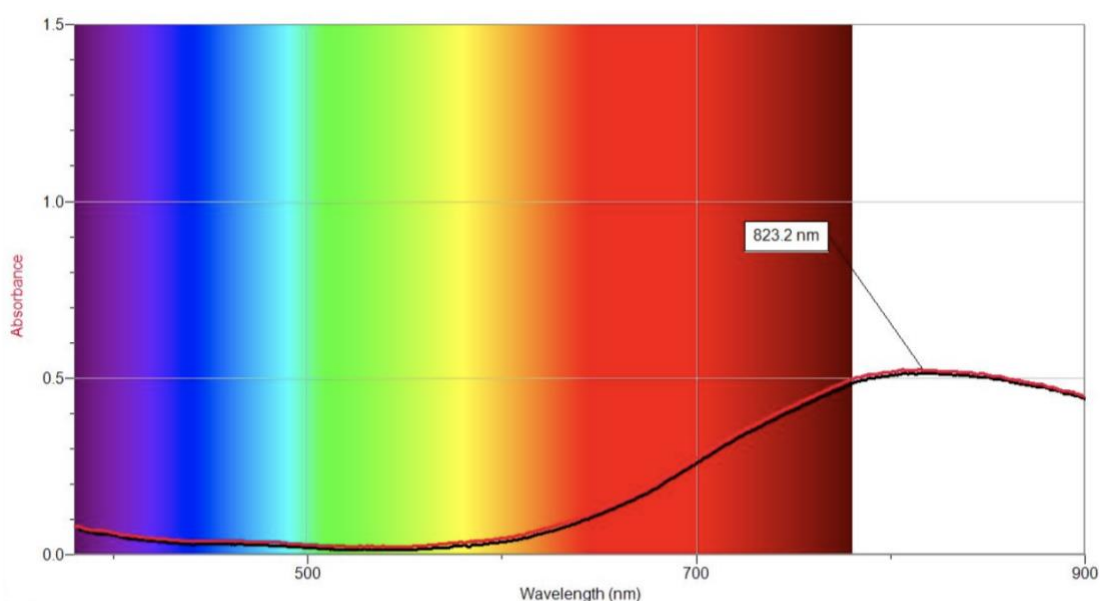
Volume de solução de CuCl_2	Esta variável foi controlada usando a pipeta volumétrica de 100 mL para garantir o volume constante de solução ao longo do experimento.
Concentração de solução de CuCl_2	Apenas soluções de CuCl_2 de concentração de $0.0300 \text{ mol.dm}^{-3}$ foram usadas nesse experimento. Isso foi controlado através de medição precisa de massa de cloreto de cobre(II) dihidratado usando uma balança eletrônica e um frasco volumétrico.
Tempo de reação	Todas as reações no experimento foram conduzidas por 4 minutos, tempo controlado cuidadosamente com um cronômetro.
Temperatura	A temperatura do laboratório foi controlada pelo sistema de ar condicionado, e pequenas variações de temperatura não foram significativas na coleta de dados.

3.5 Procedimento

3.5.1 Curva de calibração

1. Uma solução de CuCl_2 de concentração desconhecida foi preparada pela adição de água destilada ao cloreto de cobre (II) dihidratado em um béquer de 250 mL sem medições precisas.
2. Um espectro de absorbância total desta solução foi representado no **Figura 3** e mostrou absorbância máxima em 823,2 nm.

Figura 3. Espectro de absorção da solução de CuCl_2



3. Uma curva de calibração entre a absorbância das soluções de CuCl_2 e suas concentrações foi criada registrando-se os valores de absorbância das soluções de CuCl_2 das seguintes concentrações: $0,0100 \text{ mol dm}^{-3}$, $0,0200 \text{ mol dm}^{-3}$, $0,0300 \text{ mol dm}^{-3}$, $0,0400 \text{ mol dm}^{-3}$ e $0,0500 \text{ mol dm}^{-3}$ a 823,2 nm e plotando-os contra seus valores de absorbância.

3.5.2 Carvão Ativado

1. 2000,0 mL de solução de cloreto de cobre (II) de concentração $0,0300 \text{ mol dm}^{-3}$ foram preparados transferindo-se 10,229 g de cloreto de cobre(II) dihidratado para um balão volumétrico de 2000,0 mL e adicionando-se água

destilada até a marca. Esse processo foi repetido para produzir soluções adicionais de CuCl_2 .

2. Diferentes quantidades de CA foram pesadas em um béquer de 250 mL. Os valores de massa escolhidos foram 1,500 g, 2,250 g, 3,000 g, 3,750 g e 4,500 g.
3. 100,00 mL de solução de cloreto de cobre (II) $0,0300 \text{ mol dm}^{-3}$ foram pipetados com uma pipeta volumétrica e transferidos para cada um dos béqueres.
4. Esses béqueres foram agitados com um agitador magnético por 4 minutos em uma velocidade constante para todos os testes.
5. As soluções de efluentes foram filtradas com papel de filtro antes de medir sua absorbância.
6. Para obter um resultado mais preciso, foram realizados três testes para cada um dos valores de massa.

3.5.3 Resina de troca iônica

1. As mesmas etapas acima foram usadas ao trabalhar com a resina de troca iônica, mas o processo de filtração foi ignorado, pois a resina é significativamente mais densa do que o carbono, o que permitiu a coleta da solução purificada da superfície da solução.

3.5.4 Medição de eficiência

1. O espectrofotômetro foi calibrado usando uma cubeta com água destilada.
2. As cubetas com as soluções de efluentes foram inseridas em um espectrofotômetro e seus valores de absorbância foram registrados usando um espectrofotômetro após serem estabilizados por um período de tempo suficiente.
3. As concentrações de íons Cu^{2+} nas soluções de efluentes foram determinadas usando a curva de calibração e plotadas em um gráfico.

3.5.5 Determinação da densidade da RTIS

1. Um cilindro graduado de 50 mL foi enchido com RTIS.
2. A massa do RTIS foi medida usando uma balança eletrônica após a calibração do peso do cilindro usada para determinar sua densidade.

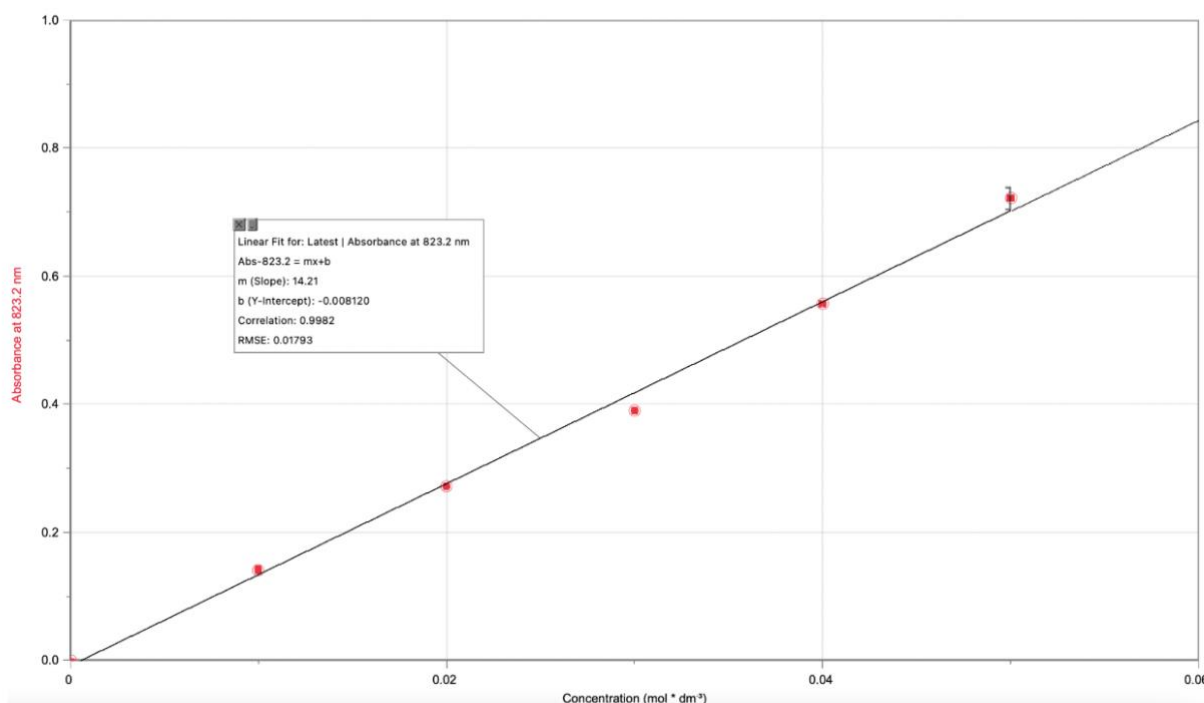
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Resultados e Discussão

Tabela 1. Curva de calibração da absorbância de soluções de CuCl_2 de diferentes concentrações a 823,2 nm

Concentração da solução de cloreto de cobre (II) em mol dm^{-3}	Absorbância a 823,2 nm ($\pm 0,001$)
0	0,000
$0,0100 \pm 0,0001$	0,142
$0,0200 \pm 0,0001$	0,272
$0,0300 \pm 0,0001$	0,390
$0,0400 \pm 0,0001$	0,577
$0,0500 \pm 0,0001$	0,722

Figura 4. Relação entre a concentração de soluções de CuCl_2 e sua absorvância a 823,2 nm



4.1.1 Cálculo de incerteza para $[\text{CuCl}_2]$ e curva de calibração

A incerteza percentual da concentração da solução de $0,0300 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ foi determinada usando a seguinte equação:

$$[\text{CuCl}_2] = \frac{0.511 \pm 0.001 \text{ g}}{170.48 \text{ g / mol}} \times \frac{1}{0.1000 \pm 0.0001 \text{ dm}^3}$$

Portanto, sua incerteza percentual foi de $\pm 0,296\%$, equivalente a $\pm 0,0001 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. As incertezas de outras soluções de diferentes concentrações foram determinadas seguindo a mesma equação.

O espectrofotômetro tinha uma incerteza absoluta de $\pm 0,001$, equivalente a $\pm 0,256\%$ de incerteza percentual. Para a criação da curva de calibração, a incerteza percentual da solução de $0,0300 \text{ mol.dm}^{-3}$ foi tomada como padrão para calcular a incerteza da curva de calibração. Portanto, ao somar suas incertezas, a incerteza percentual da curva de calibração foi determinada como sendo de $\pm 0,552\%$.

Tabela 2. Relação entre a massa de RTIS usada para reações e as absorbâncias das soluções de efluentes a 823,2 nm

Massa de RTIS adicionada a 100 mL de solução de cloreto de cobre (II) $0,0300 \text{ mol.dm}^{-3} / \text{g}$ ($\pm 0,001$)	Absorbância de soluções de efluentes a 823,2 nm ($\pm 0,001$)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Média
1,500	0,203	0,201	0,204	$0,203 \pm 0,002$
2,250	0,101	0,095	0,109	$0,102 \pm 0,007$
3,000	0,077	0,069	0,069	$0,072 \pm 0,004$
3,750	0,047	0,058	0,063	$0,056 \pm 0,008$
4,500	0,030	0,023	0,029	$0,027 \pm 0,004$

Tabela 3. Relação entre a massa de CA usada para reações e as absorvâncias das soluções de efluentes a 823,2 nm

Massa de CA adicionada a 100 mL de solução de cloreto de cobre (II) 0,0300 mol.dm ⁻³ / g (± 0,001)	Absorvância de soluções de efluentes a 823,2 nm (± 0,001)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Média
1,500	0,332	0,337	0,338	0,336 ± 0,003
2,250	0,287	0,303	0,294	0,295 ± 0,008
3,000	0,254	0,258	0,268	0,260 ± 0,007
3,750	0,221	0,220	0,223	0,222 ± 0,002
4,500	0,204	0,194	0,202	0,200 ± 0,005

4.1.2 Cálculo de eficiência de remoção de cada método

O cálculo de [Cu²⁺] da solução de efluente obedeceu à seguinte equação da função inversa da curva de calibração:

$$Y = 0,07014X + 0,00066$$

X = Absorvância da solução de efluente

Y = [Cu²⁺] da solução de efluente

Com relação às reações com 3,000 g de CA, a absorvância média das soluções de efluentes a 823,2 nm foi de 0,260 ± 0,007.

Portanto, a média de $[Cu^{2+}]$ da solução de efluentes = $0,07014 \times 0,260 + 0,00066 = 0,0189 \text{ mol.dm}^{-3}$. Como a incerteza da absorbância média das soluções foi de $\pm 2,69\%$, a incerteza percentual dessa concentração foi de $\pm 3,24\%$.

Portanto, a eficiência de remoção dos íons de cobre durante a reação foi calculada usando a seguinte equação:

$$(1 - 0,0189/0,0300) \times 100 = 37,0\%$$

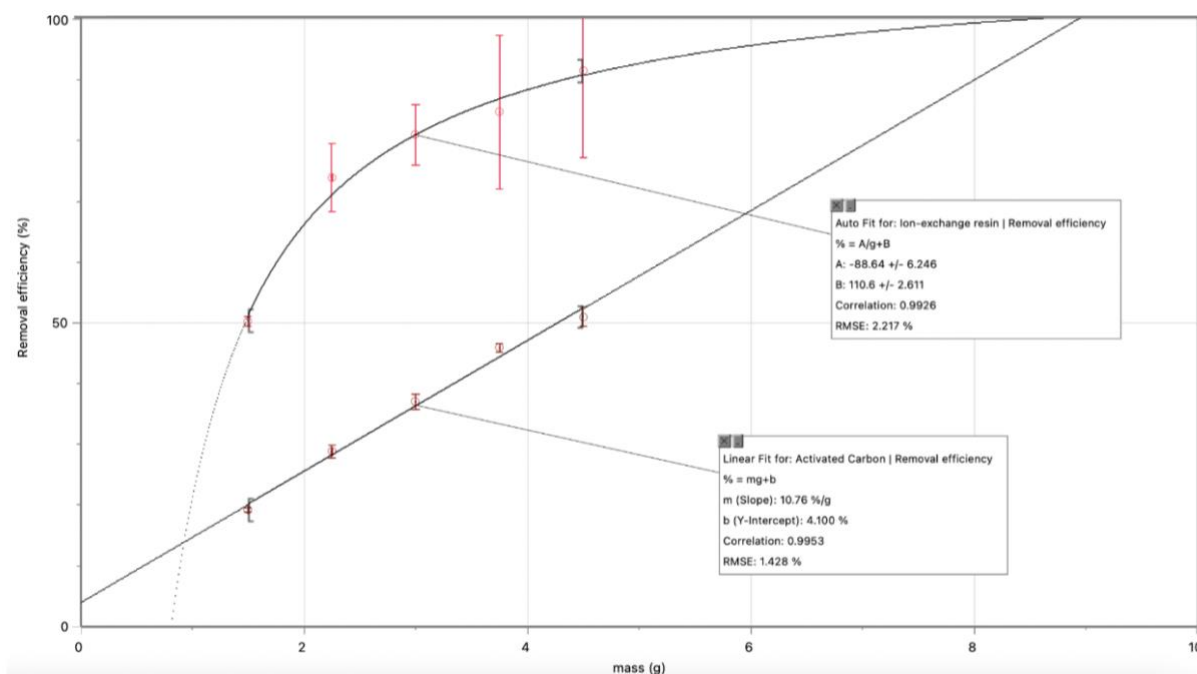
Considerando a incerteza da concentração original da solução preparada com cloreto de cobre (II) hidratado e um balão volumétrico de $2000,0 \pm 0,6 \text{ mL}$ e transferida usando uma pipeta volumétrica de $100,00 \pm 0,08 \text{ mL}$, a incerteza percentual dessa eficiência foi de $\pm 3,36\%$. As eficiências de outras condições foram calculadas juntamente com suas incertezas da mesma forma na **Tabela 4**.

Tabela 4. Relações entre a massa de RTIS e CA adicionados e a porcentagem média de íons de cobre removidos durante a reação

Massa de RTIS adicionada a 100 mL de solução de cloreto de cobre (II) $0,0300 \text{ mol.dm}^{-3} / \text{g}$ ($\pm 0,001$)	Porcentagem média de cobre removido durante a reação com RTIS / %	Massa de CA adicionada a 100 mL de solução de cloreto de cobre (II) $0,0300 \text{ mol.dm}^{-3} / \text{g}$ ($\pm 0,001$)	Porcentagem média de cobre removido durante a reação com CA / %
1,500	$50,3 \pm 0,8$	1,500	$19,2 \pm 0,3$
2,250	$74,0 \pm 5,6$	2,250	$28,8 \pm 1,0$
3,000	$81,0 \pm 5,0$	3,000	$37,0 \pm 1,2$
3,750	$84,7 \pm 12,7$	3,750	$45,9 \pm 0,7$
4,500	$91,5 \pm 14,2$	4,500	$51,0 \pm 1,6$

4.2 Análise das tendências gerais

Figura 5. A relação entre a massa de substâncias e a eficiência de remoção de íons Cu^{2+} durante as reações



Quando as eficiências de remoção de íons Cu^{2+} durante a reação com RTIS foram plotadas em relação aos seus valores de massa, elas mostraram uma tendência que se assemelhava muito a uma relação hiperbólica, com uma correlação de 0,9926. Por outro lado, quando as eficiências de remoção das soluções após as reações com CA foram plotadas em um plano em relação aos seus valores de massa, elas se assemelhavam claramente a uma tendência linear, com uma correlação de 0,9953. Dentro da faixa de valores de massa estudados, ficou claro que o RTIS foi muito mais eficiente do que o CA, pois teve uma eficiência de remoção maior do que o CA para cada massa acima de 0,917 g. Além disso, uma parte da incerteza de sua eficiência de remoção atingiu 100 já com 4,5 g de RTI, mostrando que ele pode ser mais adequado para os tratamentos de água reais, cujo objetivo é a remoção completa de compostos tóxicos de águas residuais.

4.2.1 Mecanismos de remoção de íons de cobre

A diferença na estrutura geral desses gráficos pode estar ligada aos diferentes mecanismos de reação de cada substância. Ao usar um RTIS, os íons de cobre são removidos à medida que são trocados com os íons H^+ nos grupos funcionais sulfônicos da resina ("Ion-exchange Resin", 2012). Portanto, pode-se supor que, à medida que mais RTIS for adicionado, mais íons H^+ serão liberados, aumentando a concentração do íon na solução e, portanto, influenciando a posição de equilíbrio químico e afetando a eficiência do RTIS. Por outro lado, os íons de cobre são removidos por adsorção quando reagem com o CA, durante o qual os íons de cobre são simplesmente presos em poros microscópicos localizados na superfície das partículas por forças intermoleculares (CECEN; AKTAS, 2011). Assim, como praticamente nenhum produto químico é liberado do CA durante esse processo, pode-se sugerir que o aumento de sua massa teria menos influência em seu equilíbrio químico, mostrando, portanto, uma tendência mais linear.

4.3 Análise de custo-benefício

Apesar de uma clara diferença entre a eficiência de remoção dentro da faixa de valores de massa pesquisados, as extrapolações altamente correlacionadas das tendências mostraram que ambas as substâncias podem ser capazes de alcançar a remoção completa de íons de cobre usando valores de massa muito semelhantes. Além disso, a diferença significativa no preço de cada substância torna a consideração de custo-benefício valiosa ao comparar sua eficiência relativa. Devido à grande variedade de preços, dependendo dos países, sites e fornecedores, os preços dos produtos usados neste experimento foram usados para o cálculo.

Tabela 5. Relação entre a massa da RTIS e seu volume

Volume do RTIS	Massa	Densidade do RTIS
50,0 ± 0,5 mL	39.677 ± 0,001 g	0,7935 ± 0,008 g / mL

Os 500 mL de RTIS fornecidos pela *Dinâmica* custaram R\$90,00. Como a densidade da RTIS foi determinada como sendo 0,7935 g/mL na Tabela 5, o preço da resina por unidade de massa foi deduzido de acordo com a seguinte equação:

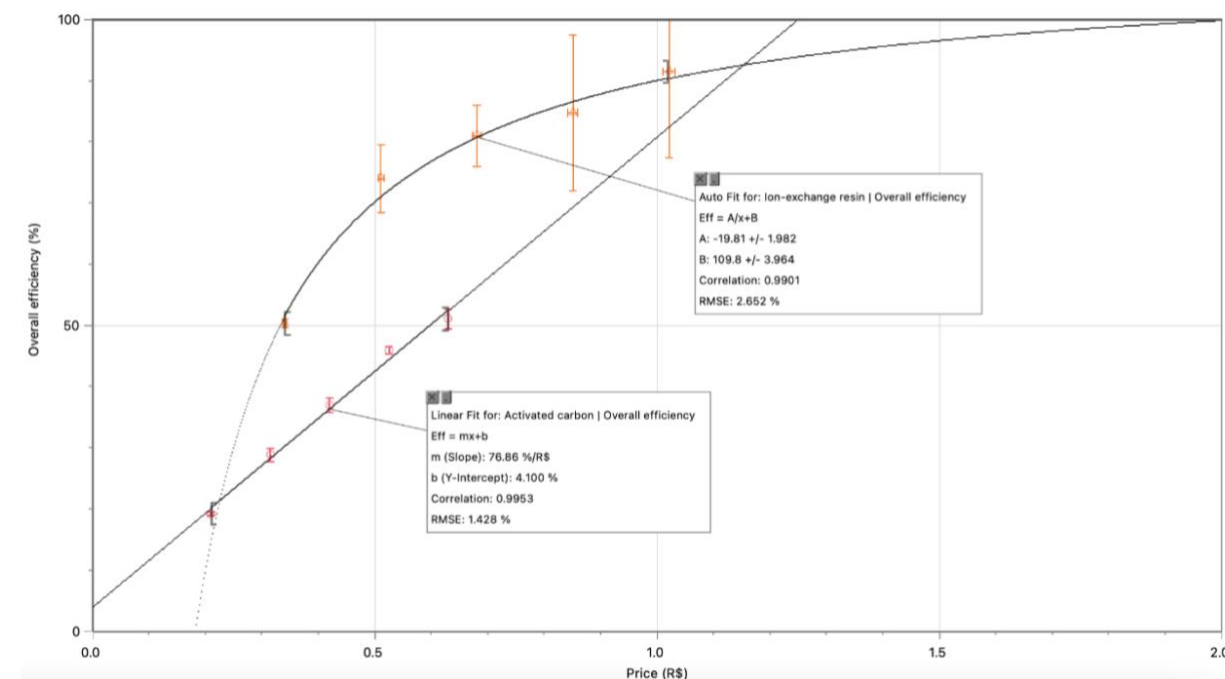
$$\text{R\$ } 90,00 / (500 \text{ mL} \times 0,7935 \text{ g / mL}) = \text{R\$ } 0,227 \pm 0,002 / \text{g}$$

Por outro lado, 500 g de CA fornecidos pela *Synth* custaram R\$ 70,00 e seu preço por unidade de massa foi determinado pela seguinte equação:

$$\text{R\$ } 70,00 / 500 \text{ g} = \text{R\$ } 0,140 / \text{g}$$

A massa de cada substância usada no experimento foi multiplicada por seu preço unitário para determinar o preço dos valores de massa pesquisados das substâncias. Em seguida, seus preços foram plotados em um plano em relação à sua eficiência geral de remoção.

Figura 6. Relação entre o preço das substâncias e sua eficiência geral



Quando o custo-benefício de cada substância foi considerado, as extrapolações de cada tendência sofreram pequenas alterações: O CA foi mais eficiente do que o RTIS para eficiências de remoção superiores a 92,5% e foi capaz de obter a remoção completa a um custo menor do que o RTI.

Por outro lado, quase todo o conjunto de dados originais foi colocado na seção entre as duas interseções dos gráficos, mostrando que todos os dados coletados comprovaram a vantagem do RTI. No entanto, a incerteza de 4,500 g de RTIS era muito grande para determinar claramente sua eficiência relativa, porque parte de sua incerteza estava acima de 100 e a outra parte estava abaixo da eficiência do CA do mesmo preço. Ainda assim, ficou claro que a RTIS seria muito mais eficiente até a eficiência de remoção de 3,750 g de RTI, o que corresponde a aproximadamente 84,7%, possivelmente sendo mais adequada para os tratamentos reais quando outras etapas de tratamentos forem realizadas.

4.4 Conclusão

Com base nos resultados do experimento, observou-se que, após a consideração do custo-benefício, as extrapolações altamente correlacionadas das tendências mostraram a vantagem do CA para eficiências de remoção superiores a 92,5%, sendo, portanto, possivelmente mais econômico para a remoção completa de íons de cobre. No entanto, isso é contradito pelo mesmo gráfico, devido à grande incerteza de 4.500 g de RTIS que incluiu a eficiência de remoção de 100% e as eficiências abaixo daquelas que podem ser obtidas usando CA do mesmo preço ao mesmo tempo. Portanto, como foram realizados apenas três testes por condição, espera-se que, com mais testes, a RTIS possa adquirir eficiências mais próximas de 100% a preços menores do que a CA. Dessa forma, é difícil comparar sua eficiência relativa na obtenção da remoção completa de íons de cobre devido a essa incerteza causada por um pequeno número de testes. No entanto, como a RTIS teve uma clara vantagem sobre a CA até a eficiência de remoção de cerca de 84,7%, ela seria muito mais adequada para tratamentos de águas residuais que envolvem várias etapas.

4.5. Avaliação

4.5.1 Erros aleatórios

Os valores de absorbância medidos usando um espectrofotômetro flutuam ligeiramente, mesmo para a mesma solução, possivelmente adicionando algum erro aos dados coletados. Por fim, como o experimento foi realizado por quase 6 meses, alguns fatores, como a umidade, podem ter mudado muito, possivelmente afetando a eficiência de cada método. Portanto, a solução para todos esses erros seria repetir mais testes para criar resultados mais precisos em um período de tempo mais curto, a fim de minimizar o impacto de fatores externos.

4.5.2 Erros sistemáticos

Devido às diferentes propriedades físicas do CA e do RTIS, as soluções que reagiram com CA tiveram de ser filtradas com papel de filtro antes de medir sua absorbância. Embora as primeiras gotas das soluções tenham sido coletadas em menos de 15 segundos para medir sua absorbância, o CA teria sofrido outras reações com íons de cobre na solução durante esse tempo. Isso poderia ser melhorado filtrando as soluções de efluentes também com o RTIS, pois isso minimizaria a diferença entre seus tempos de reação.

4.5.2 Limitações

Nesse experimento, as reações do RTIS e do CA ocorreram por apenas 4 minutos em um agitador magnético devido às limitações de tempo, já que os testes de cada condição tinham de ser concluídos no mesmo dia para minimizar o erro aleatório. Portanto, a solução poderia ser deixada por um período mais longo para garantir que as substâncias atingissem sua capacidade máxima de remoção.

Além disso, apenas os preços específicos de um CA e um RTIS dos produtos usados no experimento foram usados para produzir os dados finais. Entretanto, uma variação significativa nos preços desses produtos, dependendo dos países, sites e fornecedores, pode levar a conclusões diferentes se esse experimento for replicado.

Ao analisar os dados, os gráficos lineares e hiperbólicos foram escolhidos para extrapolar os dados coletados devido à sua alta correlação. Entretanto, outros tipos de gráficos, como os logarítmicos, poderiam ser usados para extrapolar essas tendências, possivelmente levando a resultados diferentes.

4.5.4 Sugestões para a continuidade da pesquisa

Para esclarecer a eficiência relativa entre CA e RTI, mais testes poderiam ser realizados por condições para obter resultados mais precisos. Além disso, esse experimento poderia ser repetido com outros tipos de agentes de purificação para comparar sua eficiência de remoção relativa.

Além disso, como apenas uma solução de CuCl_2 de $0,0300 \text{ mol.dm}^{-3}$ foi usada neste experimento, diferentes concentrações da solução podem ser investigadas para estudar as eficiências máximas das substâncias em diferentes condições. Além disso, outros fatores adicionais que possam afetar sua eficiência, como temperatura ou pH, podem ser considerados como uma variável independente em vez da massa, a fim de identificar as condições ideais para cada substância.

REFERÊNCIA

CHEN, S.; ZHONG, M. Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil. Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches, 27 nov. 2019.

CLARK, J. The Beer-Lambert Law. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy_Basics/The_Beer-Lambert_Law](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy_Basics/The_Beer-Lambert_Law)>. Acesso em: 4 out. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011 – Padrões de Lançamento de Efluentes. 13 maio 2011.

FERHAN CECEN; ÖZGÜR AKTAS. Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

FLANAGAN, D. Copper Statistics and Information | U.S. Geological Survey. Disponível em: <<https://usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>>. Acesso em: 4 out. 2023.

Ion-exchange resin. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/ion-exchange-resin>>. Acesso em: 4 out. 2023.

KAMRIN, M. et al. Home Water Treatment Using Activated Carbon. Disponível em: <<https://extension.purdue.edu/extmedia/WQ/WQ-13.html>>. Acesso em: 4 out. 2023.

LALHMUNSIAMA et al. Simultaneous Removal of Hg(II) and Phenol Using Functionalized Activated Carbon Derived from Areca Nut Waste. Metals, v. 7, n. 7, p. 248, 3 jul. 2017.

LENNTech. Copper (Cu) - Chemical properties, Health and Environmental effects. Disponível em: <<https://lenntech.com/periodic/elements/cu.htm>>. Acesso em: 4 out. 2023.

LENNTech. Recommended daily intake of vitamins and minerals. Disponível em: <<https://lenntech.com/recommended-daily-intake.htm>>. Acesso em: 4 out. 2023.

NATHANSON, J. Water supply systems - Chlorination, Purification and Treatment. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/water-supply-system/Chlorination#ref1084834>>. Acesso em: 4 out. 2023.

POPESCU, R. C. et al. Nanostructured membranes for the microbiological purification of drinking water. *Water Purification*, p. 421–446, 2017.

Principle of Spectrophotometer and its Applications. Disponível em: <<https://byjus.com/chemistry/spectrophotometer-principle>>.

WOŁOWIEC, M. et al. Removal of Heavy Metals and Metalloids from Water Using Drinking Water Treatment Residuals as Adsorbents: A Review. *Minerals*, v. 9, n. 8, p. 487, 14 ago. 2019.