ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS NA QUANTIFICAÇÃO DE METAIS EM ÁGUA: MAPEAMENTO E LACUNAS NA REMOÇÃO

Autores: Elcy Disneth Serna Copete, Lucimara Ribeiro Venial, Poliany de Oliveira Barbosa, Pedro Henrique Fischer Ferreira, Maria de Fatima Pereira dos Santos, Maristela de Araujo Vicente

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro Universitário do Norte do Espírito Santo (CEUNES), Rodovia Governador Mário Covas, Km 60, Bairro Litorâneo - 29932-540 São Mateus - ES, Brasil, elcy.copete@edu.ufes.br

Resumo

A análise digital de imagens tem sido utilizada como alternativa portátil e de baixo custo para determinar metais em diferentes matrizes, especialmente aquosas. Este trabalho objetivou mapear suas aplicações na quantificação de metais e verificar o nível de integração com processos de adsorção e remoção em água. Foi realizado um mapeamento sistemático com análise descritiva de 4.065 registros obtidos nas bases Scopus e Web of Science, avaliando-se principalmente títulos e resumos, com palavras-chave como informação complementar. Após triagem estrita, 55 estudos (1,4%) foram selecionados. Destes, 49 (89,1%) concentraram-se na detecção e quantificação de metais, 40 (72,7%) utilizaram smartphones ou telefones móveis e 27 (49,1%) empregaram RGB ou outros espaços de cor. Biomateriais foram identificados em oito estudos (14,5%), adsorção ou retenção em quatro (7,3%), enquanto IA/ML e membranas ou filmes apareceram em três estudos cada (5,5%). Conclui-se que a quantificação de metais por imagens está bem estabelecida, mas sua aplicação no acompanhamento de processos de adsorção e remoção permanece pouco representada no conjunto analisado.

Palavras-chave: Colorimetria. Smartphone. Sensores ópticos. Aprendizado de máquina. Adsorção.

Área do Conhecimento: CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA (Química)

Introdução

A contaminação dos recursos hídricos por metais constitui um problema ambiental e sanitário, devido à toxicidade, persistência e possibilidade de bioacumulação de determinados elementos. Suas fontes incluem atividades industriais e minerárias, águas residuárias, escoamento urbano e processos naturais. Esse cenário exige tanto tecnologias eficientes de tratamento quanto métodos analíticos capazes de acompanhar a concentração dos contaminantes de forma rápida e economicamente viável (Adamo et al., 2021).

Métodos colorimétricos associados a câmeras digitais e smartphones têm sido investigados como alternativas portáteis e de menor custo para a análise de metais. Nesses sistemas, as alterações de cor produzidas por reações específicas são registradas como imagens e convertidas em informações quantitativas, frequentemente mediante valores RGB ou outros espaços de cor. Estudos demonstram aplicações na determinação de diferentes íons metálicos em amostras de água, inclusive com sensores em papel e etapas de pré-concentração analítica (Ichsan; Rodiah, 2024; Mejia-A et al., 2026; Phongsuwan; Ditcharoen; Valuvanathorn, 2026).

Entretanto, determinar a concentração de um metal em uma amostra não equivale a avaliar sua remoção. A detecção ou quantificação isolada informa a presença ou o teor do analito, enquanto a avaliação da remoção requer, no mínimo, a comparação entre as concentrações antes e após o tratamento, sob condições experimentais controladas. Da mesma forma, a adsorção empregada para pré-concentrar o analito e melhorar sua detecção possui finalidade distinta da adsorção destinada ao tratamento da água. Assim, este trabalho teve como objetivo mapear as aplicações da análise digital de imagens na quantificação de metais e verificar seu nível de integração com processos de adsorção, membranas e monitoramento da remoção.

Metodologia

O estudo foi conduzido como um mapeamento sistemático da literatura, de caráter descritivo, destinado a identificar aplicações da análise digital de imagens na quantificação de metais em matrizes aquosas e sua integração com processos de remoção. Foram consultadas as bases Scopus e Web of Science (WoS) até setembro de 2026. Não foram aplicados filtros relativos ao período de publicação, idioma, tipo de documento, área do conhecimento ou periódico. As buscas abrangeram os campos de título, resumo e palavras-chave. Foram executadas seis estratégias apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Equação de busca utilizadas.

Objetivo de Busca	Equação de busca	N.º de artigos
Colorimetria digital aplicada a metais	TITLE-ABS-KEY(("digital image colorimetry" OR "digital colorimetry" OR "image-based colorimetry" OR "smartphone colorimetry" OR "smartphone-based colorimetry" OR "digital image analysis") AND ("metal ion*" OR "iron" OR "lithium" OR "sodium" OR "magnesium" OR "calcium") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	203
Análise de imagens, cor e metais	TITLE-ABS-KEY(("image analysis" OR "digital image analysis" OR "image processing" OR "computer vision" OR "image-based detection") AND ("colorimetr*" OR "colorimetric" OR "RGB" OR "HSV" OR "color space") AND ("metal ion*" OR "iron" OR "lithium" OR "sodium" OR "magnesium" OR "calcium") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	195
Uso de smartphones e câmeras	TITLE-ABS-KEY(("smartphone*" OR "mobile phone*" OR "phone camera*" OR "digital camera*") AND ("colorimetr*" OR "image analysis" OR "image processing" OR "RGB" OR "HSV") AND ("metal ion*" OR "iron" OR "lithium" OR "sodium" OR "magnesium" OR "calcium") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	804
Inteligência artificial e aprendizado de máquina	TITLE-ABS-KEY(("machine learning" OR "deep learning" OR "artificial intelligence" OR "neural network*") AND ("colorimetr*" OR "image analysis" OR "image processing" OR "computer vision" OR "RGB") AND ("metal ion*" OR "iron" OR "lithium" OR "sodium" OR "magnesium" OR "calcium") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	220
Busca individual por metal[1]	TITLE-ABS-KEY(("digital image colorimetry" OR "digital colorimetry" OR "smartphone colorimetry" OR "image analysis" OR "image processing") AND ("iron" OR "Fe" OR "Fe(II)" OR "Fe(III)") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	4837
Aplicação em remoção ou adsorção de metais	TITLE-ABS-KEY(("digital image colorimetry" OR "smartphone colorimetry" OR "image analysis" OR "image processing") AND ("adsorption" OR "removal" OR "remediation" OR "treatment") AND ("metal ion*" OR "iron" OR "lithium" OR "calcium" OR "magnesium" OR "sodium") AND ("water" OR "wastewater" OR "aqueous solution*"))	1154
	TOTAL	**7413**

Fonte: elaborado pelo próprio autor. [1]Posteriormente, o bloco do analito foi substituído por "lithium" OR "Li+", "calcium" OR "Ca2+", "magnesium" OR "Mg2+" e "sodium" OR "Na+".

Na triagem, foram considerados não compatíveis os registros em que as imagens eram utilizadas apenas para caracterização morfológica ou estrutural dos materiais, como em análises por MEV, MET ou outras técnicas de microscopia, bem como os estudos com avaliação visual qualitativa, sem relação quantitativa calibrada entre a resposta da imagem e a concentração do metal. Também foram descartados trabalhos sobre analitos não metálicos e estudos de adsorção ou remoção nos quais a concentração do metal era determinada exclusivamente por técnicas instrumentais, enquanto as imagens serviam somente para caracterizar o adsorvente ou o processo.

Resultados

O somatório das buscas resultou em 7.413 ocorrências brutas, distribuídas entre as diferentes equações e bases. Esse valor representa o total recuperado antes da consolidação, incluindo sobreposições entre estratégias. Após a eliminação dos registros repetidos, 4.065 registros únicos foram submetidos ao mapeamento, o que corresponde à retirada de 3.348 ocorrências duplicadas ou redundantes. Cada registro foi classificado em uma das categorias compatível ou não compatível a depender do estudo no qual imagem, fotografia, câmera digital ou smartphone foi efetivamente utilizado para extrair informação quantitativa relacionada à concentração, quantidade, retenção ou remoção de um metal em matriz aquosa. A simples utilização de imagens para caracterização morfológica, ilustração visual ou registro experimental não foi considerada suficiente. Dos 4.065 registros avaliados, 55 (1,4%) foram classificados como compatíveis, 4.010 (98,6%) como não compatíveis. Entre os 55 artigos selecionados, 49 concentraram-se na detecção ou quantificação de metais. Os demais utilizaram adsorção ou retenção para pré-concentração analítica ou empregaram membranas e filmes como plataformas sensoras.

Os smartphones constituíram o principal dispositivo de captura, enquanto os canais RGB e outros espaços de cor foram as variáveis digitais mais frequentes. A inteligência artificial ou o aprendizado de máquina foi efetivamente empregado em três estudos, por meio de aprendizagem supervisionada, redes neurais convolucionais, máquina de vetores de suporte ou regressão polinomial. O ferro foi o metal mais investigado, aparecendo em 19 artigos, seguido por cobre, mercúrio, chumbo, cromo e cálcio. Como alguns estudos avaliaram simultaneamente diferentes íons, as frequências apresentadas na Tabela 2 podem se sobrepor.

Tabela 2 - Metais mais frequentes nos estudos selecionados.

Metal	Símbolo	Artigos (n)
Ferro	Fe	19
Cobre	Cu	14
Mercúrio	Hg	10
Chumbo	Pb	6
Cromo	Cr	6
Cálcio	Ca	5
Prata	Ag	3
Arsênio	As	3
Outros metais	—	Frequências inferiores a 3

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Foram identificados seis estudos metodologicamente mais próximos da integração entre análise de imagens, matrizes aquosas e materiais de retenção ou membranas. Suas principais características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Antecedentes mais próximos da proposta de monitoramento da remoção.

Antecedente	Metal	Metodologia principal	Propósito
Solid-phase extraction combined with digital image colorimetry for the analysis of lead in water samples	Pb	Extração em fase sólida com celulose, smartphone e intensidade de cor	Integra bioadsorvente, retenção e quantificação digital em água
Green determination of total iron in water by digital image colorimetry	Fe	Pré-concentração e colorimetria digital	Quantifica ferro após etapa de retenção analítica
Barcode readable assay and linear regression RGB analysis using a customized smartphone app in on-chip electromembrane extraction	Cr, Ni e Cu	Extração eletromembrana, aplicativo móvel, RGB, PCA e regressão linear	Integra membrana, extração e análise por smartphone
Solid sensory polymer substrates for the quantification of iron in blood,	Fe	Substrato polimérico sensorial, fotografia, RGB e	Utiliza filme sensor para quantificação em água

Antecedente	Metal	Metodologia principal	Propósito
wine and water by a scalable RGB technique		PCA	
Smartphone colorimetric detection of calcium and magnesium in water samples using a flow injection system	Ca e Mg	Sistema em fluxo, sensor colorimétrico e smartphone	Realiza quantificação contínua em amostras de água
Application of water beads as a novel and simple sorbent for smartphone-based colorimetric determination of iron in water	Fe	Esferas poliméricas, retenção, intensidade de cor e smartphone	Combina material sorvente e determinação digital de ferro

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nos estudos que utilizaram adsorção ou retenção, essa etapa esteve predominantemente relacionada à pré-concentração do analito para posterior determinação. Da mesma forma, as membranas e os filmes foram empregados principalmente como plataformas sensoras ou meios de extração.

Discussão

Os resultados demonstram que a literatura analisada está predominantemente orientada para a detecção e quantificação de metais, e não para o acompanhamento de processos de tratamento de água. Nos estudos selecionados, a imagem digital foi utilizada principalmente para relacionar alterações de cor com a concentração do analito, funcionando como alternativa portátil à espectrofotometria e a outras técnicas instrumentais. Assim, embora esses trabalhos contribuam para o monitoramento da qualidade da água, poucos avaliaram diretamente a eficiência de adsorção ou remoção.

O uso frequente de smartphones e variáveis RGB evidencia a busca por sistemas analíticos portáteis, rápidos e de baixo custo. Trabalhos como os de Masawat et al. (2017), Zhang, Zhang e Zhou (2019) e Adamo, Junger e De Jesus (2021) demonstraram a possibilidade de determinar metais em água mediante mudanças de intensidade ou composição da cor. Entretanto, a dependência de iluminação, distância de captura, características da câmera e processamento da imagem exige padronização experimental. Apesar da expansão das ferramentas computacionais, somente três estudos empregaram efetivamente inteligência artificial ou aprendizado de máquina. Os modelos foram utilizados principalmente para identificar metais, classificar níveis de concentração ou estimar quantitativamente os analitos a partir de diferentes espaços de cor, como observado em Ichsan e Rodiah (2024), Mejia-A et al. (2026) e Phongsuwan, Ditcharoen e Valuvanathorn (2026). Não foi identificada, a aplicação desses modelos para prever cinéticas, capacidades de adsorção ou eficiência de remoção. Portanto, o uso de IA/ML ainda se encontra mais associado ao aprimoramento da quantificação analítica do que à modelagem do tratamento.

O ferro e o cobre foram os metais mais frequentes. O ferro apareceu em aplicações envolvendo águas naturais, alimentos, substratos poliméricos e sistemas de pré-concentração, enquanto o cobre foi investigado por meio de sensores, nanopartículas, extrações e plataformas digitais. Essa predominância indica maior desenvolvimento de métodos baseados na resposta colorimétrica desses elementos. Contudo, o conjunto analisado não permite atribuir essa frequência exclusivamente às propriedades químicas dos metais ou concluir que outros elementos sejam necessariamente menos relevantes.

Nos estudos que empregaram adsorção ou retenção, essas operações foram utilizadas principalmente para concentrar o analito e melhorar sua detecção. Wu et al. (2025), por exemplo, combinaram celulose como bioadsorvente, extração em fase sólida e colorimetria digital para determinar Pb(II) em água. Adamo, Junger e De Jesus (2021) utilizaram esferas poliméricas como sorvente para a determinação de ferro por smartphone. Embora esses trabalhos se aproximem da proposta, a retenção teve finalidade predominantemente analítica, sem avaliação explícita do material como tecnologia de tratamento ou cálculo de sua eficiência de remoção. Também é necessário diferenciar membranas sensoras de membranas destinadas à remoção. Uma membrana sensora gera ou imobiliza uma resposta óptica proporcional à concentração do metal, como observado nos

substratos poliméricos estudados por Vallejos et al. (2013). Em contraste, uma membrana de tratamento deve reter ou separar o contaminante, sendo sua eficiência determinada pela comparação entre as concentrações inicial e final. O trabalho de Rezaei et al. (2024) utilizou extração eletromembrana associada à análise RGB por smartphone, mas seu objetivo principal permaneceu relacionado à determinação analítica dos metais.

A integração entre biomassa, membranas de remoção, imagens obtidas antes e depois do tratamento e cálculo da eficiência foi pouco representada no conjunto analisado. Esse resultado indica uma possível oportunidade para desenvolver métodos digitais voltados ao acompanhamento da remoção, incluindo avaliação temporal, balanço de concentração e comparação com técnicas instrumentais. Entretanto, essa baixa frequência não comprova automaticamente originalidade ou inexistência de estudos. A confirmação do possível gap exige buscas específicas em outras bases e análise de patentes.

Conclusão

A análise digital de imagens mostrou-se consolidada para a quantificação de metais, principalmente por meio de smartphones e variáveis RGB. Entretanto, sua aplicação no monitoramento de processos de adsorção e remoção ainda foi pouco representada. Esses resultados indicam uma possível oportunidade de pesquisa, cuja confirmação requer investigação bibliográfica e experimental mais aprofundada.

Referências

ADAMO, C. B.; JUNGER, A. S.; DE JESUS, D. P. Application of water beads as a novel and simple sorbent for smartphone-based colorimetric determination of iron in water. Química Nova, v. 44, n. 10, p. 1360-1363, 2021. DOI:https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170782.

ICHSAN, C.; RODIAH, S. The best performing color space and machine learning regression algorithm for the accurate estimation of chromium (VI) and iron (III) in aqueous samples using low-cost and portable flatbed scanner colorimetry. Journal of the Iranian Chemical Society, 2024. DOI:https://doi.org/10.1007/s13738-024-03073-z.

MASAWAT, P.; HARFIELD, A.; SRIHIRUN, N.; NAMWONG, A. Green determination of total iron in water by digital image colorimetry. Analytical Letters, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1174869.

MEJIA-A, J. et al. A facile one-pot synthesis of carbon dots as a multi-ion sensing platform: colorimetric/fluorometric detection and identification of eight metal ions using ML algorithms. Carbon, 2026. DOI:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2026.121674.

PHONGSUWAN, A.; DITCHAROEN, N.; VALUVANATHORN, S. Comparison of color space performance for colorimetric detection of heavy metals in drinking water using image processing and convolutional neural networks. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 2026. DOI: https://doi.org/10.55164/ajstr.v29i4.260866.

REZAEI, N.; DANESHVAR, S. S.; NASIHATKON, B.; SEIDI, S.; REZAZADEH, M. The application of barcode readable assay and linear regression RGB analysis using a customized smartphone app in on-chip electromembrane extraction for simultaneous determination of heavy metal ions. Microchemical Journal, v. 197, art. 109702, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109702.

VALLEJOS, S.; MUÑOZ, A.; IBEAS, S.; SERNA, F.; CLEMENTE GARCÍA, F.; MIGUEL GARCÍA, J. Solid sensory polymer substrates for the quantification of iron in blood, wine and water by a scalable RGB technique. Journal of Materials Chemistry A, v. 1, n. 48, p. 15435-15441, 2013. DOI: https://doi.org/10.1039/c3ta12703f.

WU, W.; MA, Z.; JING, X.; BI, X. Solid-phase extraction combined with digital image colorimetry for the analysis of lead in water samples. Separations, v. 12, n. 11, art. 319, 2025. DOI:https://doi.org/10.3390/separations12110319.

ZHANG, W.; ZHANG, H.; ZHOU, A. Smartphone colorimetric detection of calcium and magnesium in water samples using a flow injection system. Microchemical Journal, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.010.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Laboratório de Prepara de Amostras e Análises Químicas (LaPAQui), ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte institucional e infraestrutura concedidos para a realização desta pesquisa.