

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ANALÍTICO EM PAPEL PARA DETERMINAÇÃO COLORIMÉTRICA DE FOSFATO EM AMOSTRAS DE ÁGUA COM QUANTIFICAÇÃO DIGITAL POR *PHOTOMETRIX®*

GRAZIELA FRANCO ASSUMPÇÃO¹; WILIAM BOSCHETTI²; CLARISSA M. M. DOS SANTOS³.

¹Universidade Federal de Pelotas – graziassump@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – wiliamcaxias@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas - clafarm_mm@yahoo.com.br

1. DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

Nos últimos anos, a intensificação das atividades urbanas tem elevado a carga de contaminantes lançados nos corpos hídricos, transformando nutrientes como o fósforo em um problema ambiental (Hansen; Feiden, 2025). Em águas naturais, o fósforo se apresenta predominantemente como ortofosfato (PO_4^{3-}) e, devido ao uso de fertilizantes fosfatados, ocorreu o aumento da sua concentração, acelerando a eutrofização. Esse fenômeno promove proliferação de algas e outros organismos, reduzindo o oxigênio dissolvido e provocando a morte de organismos aquáticos, criando a necessidade de análises rápidas e confiáveis do íon (Vilmin *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, o fosfato é determinado por espectrometria de absorção molecular, que exige equipamentos caros e operadores qualificados, dificultando a realização *in loco* da análise. Um dos métodos mais empregados baseia-se na reação do fosfato com molibdato de amônio em meio ácido, na presença de antimônio, formando um complexo azul (Baxter *et al.*, 2018). Porém, mesmo seja um método muito utilizado, o antimônio é um elemento potencialmente tóxico, o que é incongruente quando se trata de análises que buscam o bem-estar ambiental.

Com o propósito de aproximar o método dos princípios da Química Verde, uma etapa preliminar deste estudo consistiu na substituição do composto de antimônio pelo emprego de aquecimento para favorecer o desenvolvimento da reação. A partir disso, a inovação proposta consiste no desenvolvimento de um dispositivo analítico microfluídico baseado em papel (μPAD) para a determinação colorimétrica de fosfato em amostras líquidas. O dispositivo deverá possibilitar análises rápidas, de menor custo e menor consumo de reagentes, associadas à quantificação digital por meio do aplicativo *PhotoMetrix®*, instalado em *smartphone*.

Os μPADs são constituídos por papel ou outras membranas porosas e permitem a realização de análises em pequenos volumes de amostras e reagentes. Esses dispositivos utilizam zonas de reação hidrofílicas delimitados por barreiras hidrofóbicas, como silicone, vidro, ceras ou polímeros, utilizando a capilaridade para a movimentação da amostra. Os reagentes colorimétricos são previamente imobilizados no papel, e o formato e as dimensões do dispositivo são definidos conforme as características da reação e a finalidade analítica (Nishat *et al.*, 2021).

Para a análise, o usuário aplica um volume conhecido de amostra na zona de entrada do dispositivo. À medida que o líquido migra por capilaridade até a zona de detecção, o fosfato interage com os reagentes, produzindo uma mudança de cor relacionada à sua concentração. Com o fim da reação colorimétrica, o tratamento de dados consiste em capturar a imagem por uma câmera de *smartphone* e processar no aplicativo *Photometrix®*, que permite extrair informações de intensidade de cor da imagem, que será relacionada à concentração de fosfato por meio de um modelo de calibração previamente construído (Bösch *et al.*, 2020).

Em comparação com tiras comerciais baseadas na interpretação visual, a proposta integra a portabilidade dos dispositivos ao processamento digital, reduzindo a subjetividade da avaliação visual e contribuindo para a obtenção de resultados quantitativos. Além disso, o menor consumo de reagentes e a eliminação do antimônio da reação estão alinhados aos princípios da Química Verde.

2. ANÁLISE DE MERCADO

O público-alvo é composto principalmente por agências de monitoramento ambiental, laboratórios de análises de águas, estações e indústrias de tratamento de efluentes, produtores rurais e controle de aquírios domésticos. A aplicação do dispositivo poderá proporcionar maior rapidez e autonomia analítica, além de reduzir custos operacionais e a dependência de infraestrutura laboratorial complexa, favorecendo a tomada de decisões no local da análise.

Atualmente, além dos métodos instrumentais, existem métodos comerciais rápidos para a determinação de fosfato, como kits colorimétricos e tiras de teste. Esses produtos utilizam a comparação visual da cor gerada na reação com uma escala de referência impressa, conforme ilustrado, de forma genérica, na Figura 1. Embora apresentem vantagens relacionadas à simplicidade e à portabilidade, os resultados podem sofrer influência da percepção individual do usuário, condições de iluminação e da diferenciação entre tonalidades semelhantes.

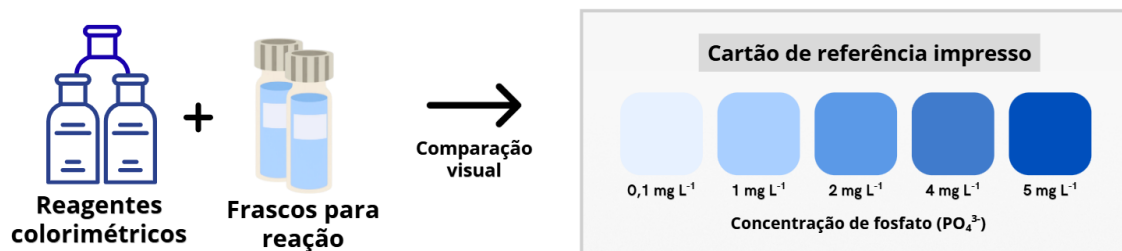


Figura 1. Representação do princípio de determinação colorimétrica de fosfato por comparação visual com uma escala de cores impressa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A solução proposta, baseada em μ PAD associado à colorimetria digital, busca combinar portabilidade, baixo consumo de reagentes e obtenção de resultados quantitativos. Contudo, seu desempenho analítico e suas possíveis vantagens em relação aos produtos comerciais deverão ser comprovados por estudos de validação e por comparações experimentais com métodos de referência.

3. ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

O desenvolvimento do projeto foi conduzido com base na escala *Technology Readiness Level* (TRL), composta por nove níveis de maturidade tecnológica. Atualmente, o dispositivo encontra-se no TRL 3, correspondente à prova de conceito experimental, contemplando a construção do protótipo, a seleção da membrana porosa para trabalho, a definição do *layout* e a realização de testes preliminares (INPI, 2026).

Para comercialização, propõe-se a venda direta do dispositivo pronto para uso, contemplando canais de comércio eletrônico destinados ao público em geral e a venda especializada para laboratórios de análises de águas, empresas responsáveis pelo tratamento de seus efluentes e órgãos de monitoramento

ambiental. A viabilidade econômica e a estimativa do custo por análise ainda deverão ser avaliadas e comparadas com aquelas dos métodos convencionais.

Atualmente, o projeto encontra-se na segunda fase. Inicialmente, avaliou-se a compatibilidade dos reagentes colorimétricos com dois tipos de papel: um papel-filtro comum da marca J. ProLab, com espessura de 0,15 mm e poro médio de 8 μm e um papel constituído de acetato de celulose, da fabricante Sartorius Stedim, com poro de 0,45 μm . Uma gota de cada reagente foi aplicada separadamente sobre os materiais e as alterações visuais foram acompanhadas durante sete dias.

O papel-filtro comum apresentou coloração azul-clara após o contato com a solução de molibdato de amônio, podendo indicar a redução espontânea do Mo(VI), possivelmente decorrente da presença de substâncias interferentes no papel. O papel de celulose, por sua vez, não apresentou alteração visual no período avaliado e, por esse motivo, foi selecionado para os experimentos subsequentes. Esses resultados são preliminares e deverão ser confirmados por ensaios com controles adequados e replicatas.

Após essa avaliação, foi construído uma configuração inicial de um protótipo simples para investigar a capacidade do aplicativo *PhotoMetrix*® em diferenciar concentrações de fosfato no papel e do comportamento do modelo de calibração. As dimensões das zonas de detecção foram estabelecidas considerando a distância mínima necessária para a focalização da imagem pela câmera do *smartphone* Samsung Galaxy A56, definida experimentalmente como 7,5 cm, e as dimensões da região de interesse (ROI) disponíveis no aplicativo. Para a aquisição das imagens, a ROI possui formato quadrado, única disponível no aplicativo.

Com o objetivo de realizar a leitura na região central das zonas de detecção e minimizar possíveis efeitos de borda, foram projetadas zonas circulares com diâmetros de 5 e 10 mm, correspondentes, respectivamente, às ROIs de 12 $\times$ 12 e 24 $\times$ 24 pixels nas condições de aquisição utilizadas. A configuração inicial, apresentada na Figura 2, foi vetorizado no programa Inkscape (versão 1.4.40.00) e contém dois conjuntos com cinco zonas de detecção, destinados à avaliação das duas dimensões propostas.

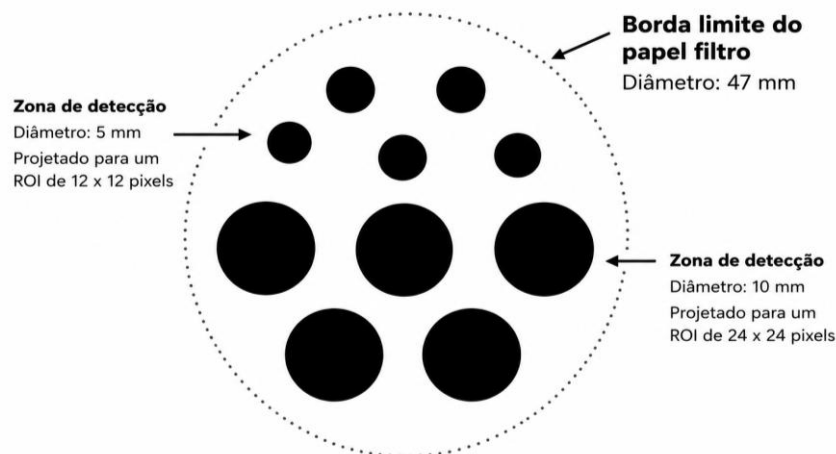


Figura 2. Configuração inicial do dispositivo microfluídico em papel para avaliação das dimensões das zonas de detecção e do processamento das imagens pelo aplicativo *PhotoMetrix*®.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTO

A integração do μPAD ao processamento de imagens por *smartphone* viabiliza a determinação rápida e *in loco* de fosfato em corpos hídricos, contribuindo para o monitoramento da qualidade da água e para a identificação de condições

associadas à eutrofização no cumprimento da legislação. Alinhada aos princípios da Química Verde, a proposta reduz o consumo de reagentes, minimiza a geração de resíduos potencialmente tóxicos e diminui a dependência de infraestrutura laboratorial complexa, tornando a análise mais acessível e sustentável.

No âmbito econômico, o dispositivo reduz os custos por análise em comparação com métodos instrumentais convencionais e apresenta potencial de comercialização e rentabilidade do produto. Como perspectiva de expansão, a proposta permite incorporar a determinação de outros parâmetros relevantes para a qualidade da água, como nitrato, nitrito e amônio, reunindo diferentes análises em um único dispositivo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares permitiram selecionar um substrato de celulose que não apresentou alteração visual após o contato isolado com os reagentes colorimétricos e projetar uma configuração inicial do dispositivo com zonas de detecção de diferentes dimensões. Essas etapas fornecem a base para avaliar a resposta colorimétrica do fosfato e o processamento digital das imagens pelo aplicativo *PhotoMetrix*®.

A plataforma apresenta potencial para constituir uma alternativa portátil e de baixo custo para a determinação de fosfato em amostras líquidas. Após a otimização das condições experimentais, a validação analítica e a comparação com um método de referência, espera-se obter um procedimento alinhado aos princípios da Química Verde, com menor consumo de reagentes, substituição do composto de antimônio e possibilidade de aplicação diretamente no local de coleta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAXTER, T. E.; BRAUON-HOWLAND, E. B.; LIPPS, W. C.; **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, 0American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23. ed, Washington - USA, 2017.

BÖCK, F. C.; HELFER, G. A.; DA COSTA, A. B.; DESSUY, M. B.; FERRÃO, M. F. *PhotoMetrix* and colorimetric image analysis using smartphones. **Journal of Chemometrics**, v. 34, n. 12, e3251, 2020.

HANSEN, J. P. M.; FEIDEN, A. A dinâmica do aporte de fósforo na qualidade dos recursos hídricos superficiais. **Aracê**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 7, p. 36576-36592, 2025.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (INPI). **Valorando a PI**. Rio de Janeiro, 2026. Acessado em 28 ago. 2026. Online. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/inpi-data/valor-economico-e-gestao-estrategica-da-pi/valorando-a-pi>

NISHAT, S.; JAFRY, A. T.; MARTINEZ, A. W.; AW, F. R. Paper-based microfluidics: Simplified fabrication and assay methods. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Paquistão, v. 336, 2021.

VILMIN, L., MOGOLLÓN, J. M.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F. Forms and subannual variability of nitrogen and phosphorus loading to global river networks over the 20th century. **Global Planetary Change**, Holanda, v. 163, p. 67–85, 2018.