PIPELINE COMPUTACIONAL PARA CARACTERIZAÇÃO COLORIMÉTRICA DE INDICADORES ÁCIDO-BASE

Flaviane Mendonça Ambrozim, Lucimara Ribeiro Venial, Poliany de Oliveira Barbosa, Heitor Barbieiri do Nascimento, Maria Eduarda Lopes Fernandes, Maristela de Araújo Vicente, Maria de Fátima Pereira dos Santos

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Rodovia Governador Mário Covas, Km 60, s/n, Bairro Litorâneo, 29932-540, São Mateus-ES, Brasil, flaviane.ambrozim@ufes.br

Resumo
A identificação visual da mudança de cor de indicadores ácido-base pode ser influenciada pela percepção do observador e pelas condições de aquisição, introduzindo subjetividade na interpretação. Por isso, torna-se relevante desenvolver estratégias capazes de transformar essas alterações visuais em informações quantitativas e mais reprodutíveis. Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da análise digital de imagens para a caracterização objetiva das mudanças de cor de indicadores ácido-base em diferentes condições de pH. Foi desenvolvido um pipeline em MATLAB para segmentação da solução e extração de descritores RGB, HSV e CIELAB, aplicado a 20 imagens de verde de bromocresol e azul de bromotimol em meios ácido e básico. Todas as imagens foram processadas sem falhas, e os canais RGB apresentaram coeficientes de variação inferiores a 1%. Conclui-se que a abordagem apresenta potencial para reduzir a subjetividade da avaliação visual e fornecer uma caracterização colorimétrica automatizada e repetível dos indicadores em condições controladas.
Palavras-chave: Visão computacional. Indicadores ácido-base. Colorimetria digital. MATLAB. Processamento digital de imagens.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Química.

Introdução

Indicadores ácido-base, como o verde de bromocresol e o azul de bromotimol, são amplamente empregados em análises titulométricas devido às alterações de cor associadas às mudanças de pH. Entretanto, a avaliação visual da mudança cromática depende da percepção do observador e pode ser influenciada pelas condições de iluminação e aquisição. A análise digital de imagens constitui uma alternativa para essa avaliação mais objetiva, convertendo informações visuais em dados quantitativos de cor (Fan *et al*., 2021; García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025).

A colorimetria digital baseada em câmeras e smartphones apresenta baixo custo, portabilidade e possibilidade de extração de informações em diferentes espaços de cor. Fan *et al*., (2021) destacam, contudo, que a padronização da geometria e da iluminação é necessária para aumentar a robustez dos procedimentos. Cebrián *et al*., (2022) também demonstraram que diferenças entre dispositivos e iluminantes podem afetar a reprodutibilidade das medidas colorimétricas.

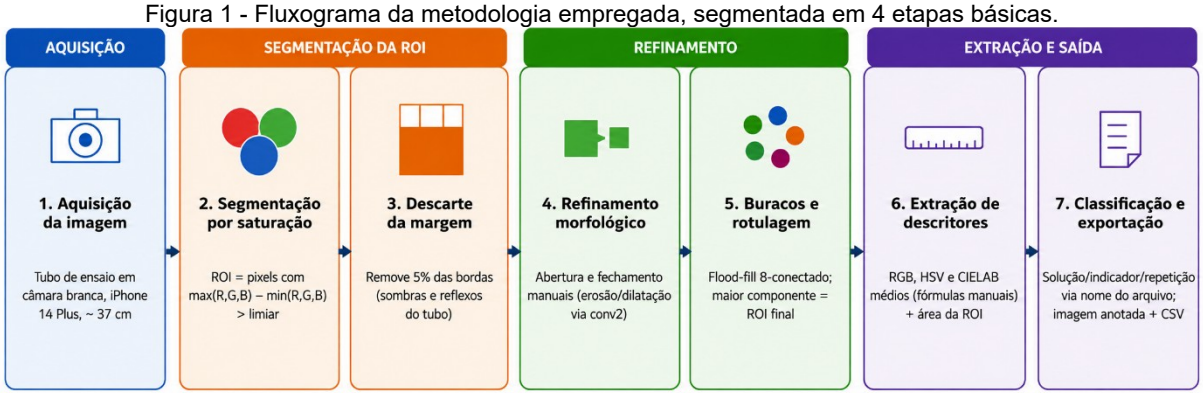
Em sistemas ácido-base, Chanla *et al*., (2019) utilizaram sinais RGB obtidos por smartphone em titulações, demonstrando elevada reprodutibilidade. Shalaby e Mohamed (2020), ao avaliarem indicadores incluindo o azul de bromotimol, verificaram concordância entre resultados de análise digital de imagens e dados espectrofotométricos. Além da aquisição, a delimitação adequada da região de interesse é essencial, pois a segmentação e a seleção do espaço de cor condicionam a informação quantitativa extraída da imagem (Woolf *et al*., 2021).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de uma abordagem computacional baseada em imagens digitais para a caracterização objetiva e repetível das alterações de cor de indicadores ácido-base em diferentes condições de pH.

Metodologia

A realização dos ensaios ocorreu em uma sequência de 4 etapas básicas, envolvendo o preparo das soluções e aquisição das imagens, a segmentação da região de interesse (ROI), o refinamento e extração dos descritores. A Figura 1 sintetiza essas etapas da do pipeline implementado, as quais estão detalhadas a seguir.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia empregada, segmentada em 4 etapas básicas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

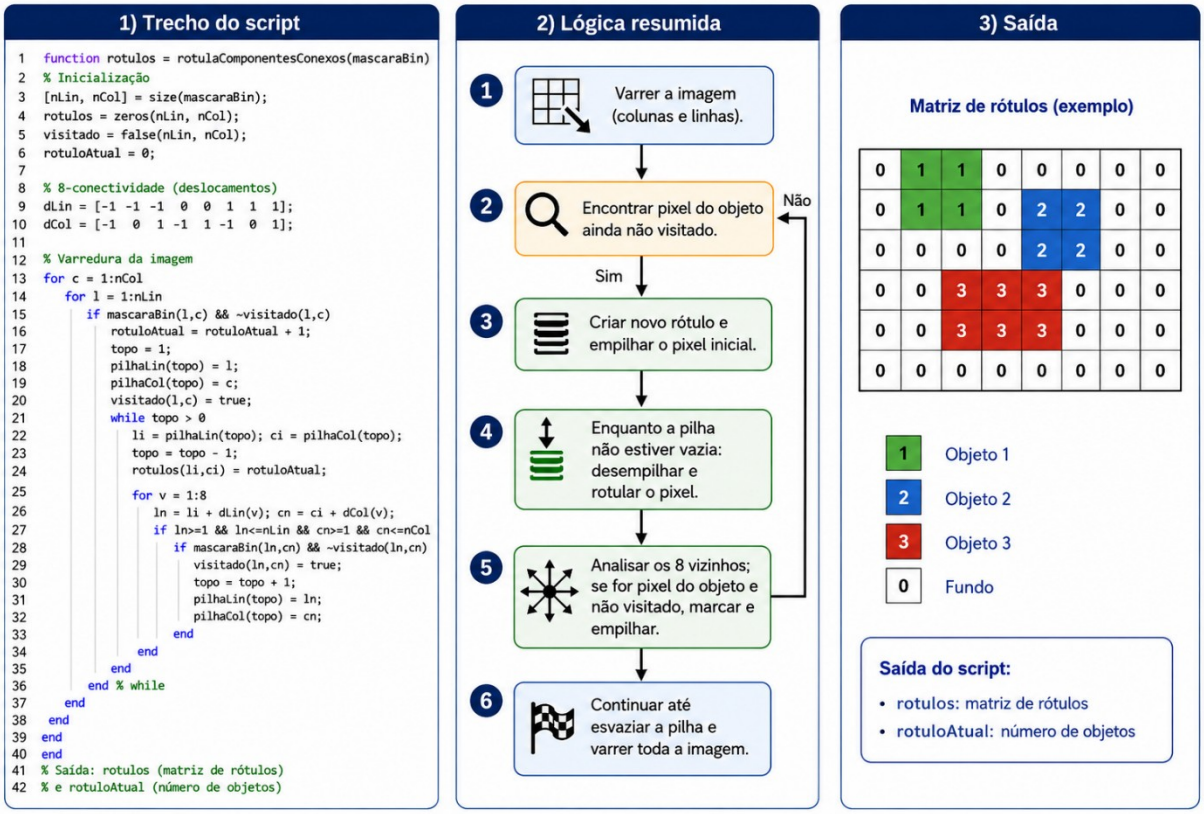
Etapa 1: Preparação das amostras e aquisição das imagens. Foram preparadas soluções de 30 mL de HCl 0,1 mol/L (pH 1,2) e NaOH 0,1 mol/L (pH 10,9), contendo cinco gotas de verde de bromocresol 0,1% ou azul de bromotimol 0,1%. De cada solução, 10 mL foram transferidos para tubo de ensaio. Para cada condição experimental, foi utilizada uma única preparação, fotografada cinco vezes em câmara branca com iluminação controlada, utilizando um iPhone 14 Plus posicionado a aproximadamente 37 cm da amostra, mantendo-se constantes a distância, a iluminação e o posicionamento. Assim, as cinco observações de cada condição correspondem a repetições de aquisição de imagem da mesma preparação, e não a preparações experimentais independentes.

Etapa 2: Segmentação da ROI por saturação de cor: a região de interesse foi segmentada por um critério de saturação de cor: um pixel foi classificado como líquido quando a diferença entre o canal mais intenso e o menos intenso, max(R,G,B)- min(R,G,B), superou um limiar, previamente ajustado de 40 para 20 após observar que, em condições de saturação naturalmente mais baixa o limiar mais alto excluía parte real do líquido e gerava bordas serrilhadas. O mapa de saturação foi suavizado por um filtro de média antes da limiarização, reduzindo o efeito de blocos de compressão JPEG.

Etapa 3: Refinamento morfológico e rotulagem por algoritmo de preenchimento por inundação (*flood-fill*): a máscara resultante foi refinada por abertura e fechamento morfológicos manuais (erosão/dilatação via convolução) e por preenchimento de buracos internos via *flood-fill* a partir das bordas da imagem, seguindo os fundamentos clássicos de morfologia matemática e segmentação por regiões descritos por Gonzalez e Woods (2008). Os componentes conexos foram então rotulados por um algoritmo de preenchimento por inundação com 8-conectividade, programado com pilha própria (Figura 2), evidenciando a implementação própria do pipeline, e o maior componente foi selecionado como ROI final.

Etapa 4: Extração dos descritores de cor: para cada imagem foram extraídos RGB médio e desvio-padrão, HSV médio, obtido por fórmulas manuais, com média circular do matiz H para evitar distorção em torno de 0°/360°, seguindo a abordagem de segmentação por saturação em espaço HSV de Sural, Qian e Pramanik (2002), e CIELAB médio, aplicando a conversão manual RGB→XYZ→Lab, iluminante D65, além da área da ROI em pixels. A condição experimental (solução, indicador, repetição) foi extraída automaticamente do nome do arquivo. A Figura 3 ilustra as etapas de segmentação lado a lado para um exemplo ácido (amarelo) e um exemplo básico (azul).

Figura 2 – Resumo do *script* de rotulagem de componentes conexos por *flood-fill*, implementada com pilha própria, sem uso de bwlabel/bwconncomp.




```
function rotulos = rotulaComponentesConexos(mascaraBin)
% Inicialização
[nLin, nCol] = size(mascaraBin);
rotulos = zeros(nLin, nCol);
visitado = false(nLin, nCol);
rotuloAtual = 0;

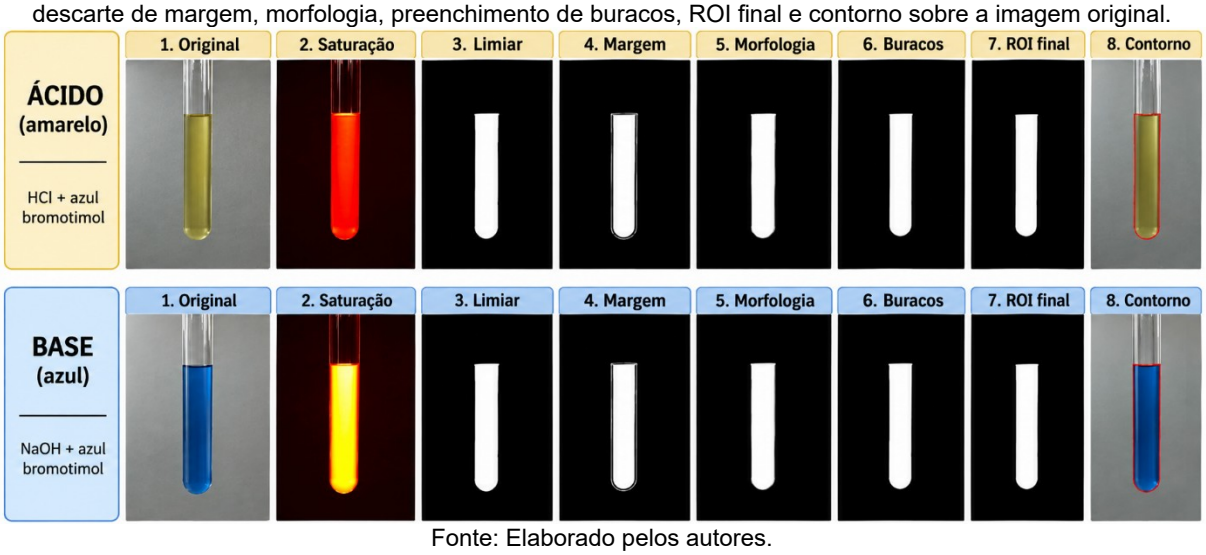
% 8-conectividade (deslocamentos)
dLin = [-1 -1 -1  0  0  1  1  1];
dCol = [-1  0  1 -1  1 -1  0  1];

% Varredura da imagem
for c = 1:nCol
   for l = 1:nLin
      if mascaraBin(l,c) && ~visitado(l,c)
         rotuloAtual = rotuloAtual + 1;
         topo = 1;
         pilhaLin(topo) = l;
         pilhaCol(topo) = c;
         visitado(l,c) = true;
         while topo > 0
            li = pilhaLin(topo); ci = pilhaCol(topo);
            topo = topo - 1;
            rotulos(li,ci) = rotuloAtual;

            for v = 1:8
               ln = li + dLin(v); cn = ci + dCol(v);
               if ln>=1 && ln<=nLin && cn>=1 && cn<=nCol
                  if mascaraBin(ln,cn) && ~visitado(ln,cn)
                     visitado(ln,cn) = true;
                     topo = topo + 1;
                     pilhaLin(topo) = ln;
                     pilhaCol(topo) = cn;
                  end
               end
            end
         end % while
      end
   end
end
% Saída: rotulos (matriz de rótulos)
% e rotuloAtual (número de objetos)
```

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 - Etapas do *pipeline* de segmentação aplicadas a um exemplo: imagem original, saturação, limiarização, descarte de margem, morfologia, preenchimento de buracos, ROI final e contorno sobre a imagem original.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Vale ressaltar que os principais parâmetros do *script* foram deixados ajustáveis no início do código, permitindo adaptação a novas condições de iluminação, resolução de câmera ou contraste líquido-fundo sem alterar a lógica do pipeline. A Tabela 1 lista os parâmetros ajustáveis e seus valores utilizados neste trabalho.

Tabela 1 - Parâmetros ajustáveis do script de extração automática de descritores de cor.

Parâmetro	Valor	Descrição

LIMIAR_SATURACAO	20	Limiar mínimo de max(R,G,B) − min(R,G,B) para o pixel ser classificado como líquido
JANELA_SUAVIZACAO	9 px	Tamanho do filtro de média aplicado à saturação antes da limiarização
MARGEM_BORDA_FRAC	0,05	Fração da largura/altura da imagem descartada em cada borda
AREA_MIN_PX	300 px	Área mínima aceita para um componente conexo ser candidato a ROI
RAIO_ELEM_ESTRUT	3 (janela 7×7)	Raio do elemento estruturante usado na morfologia manual

Fonte: Elaborado pelos autores.

Resultados

O *script* processou com sucesso as 20 imagens avaliadas, correspondentes a quatro condições experimentais com cinco repetições cada, sem ocorrência de falhas na segmentação da região de interesse. Esse desempenho indica que, nas condições de aquisição empregadas, o procedimento implementado foi capaz de identificar de forma consistente a região correspondente à solução no interior do tubo de ensaio.

A repetibilidade da extração colorimétrica foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV) dos canais R, G e B entre as cinco repetições de cada condição. Os valores permaneceram inferiores a 1% em todas as combinações avaliadas, variando de 0,03% a 0,80%, evidenciando baixa dispersão entre fotografias independentes de uma mesma condição experimental.

A Tabela 2 detalha o CV% por canal de cor em cada uma das 4 condições avaliadas. A análise estatística inferencial (teste t, ANOVA e comparações post-hoc) entre as condições ácido e básico é apresentada e discutida no resumo complementar deste grupo, dedicado à análise estatística dos resultados, de modo a não sobrepor os dois trabalhos.

Tabela 2 - Coeficiente de variação (CV%) dos canais R, G e B entre as 5 repetições de cada condição.

Condição	CV% R	CV% G	CV% B
HCl + azul bromotimol (pH 1,2)	0,03	0,04	0,06
HCl + verde bromocresol (pH 1,2)	0,37	0,32	0,36
NaOH + azul bromotimol (pH 10,9)	0,58	0,54	0,52
NaOH + verde bromocresol (pH 10,9)	0,80	0,71	0,79

Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante o desenvolvimento do *pipeline*, verificou-se que o limiar de saturação inicialmente definido em 40 resultava em segmentação incompleta em condições de menor saturação cromática. A redução desse parâmetro para 20 permitiu melhor delimitação da região líquida, especialmente para a condição contendo HCl e azul de bromotimol, reduzindo a exclusão de pixels pertencentes à amostra e a formação de bordas irregulares.

Discussão

Os baixos coeficientes de variação obtidos para os canais RGB demonstram elevada repetibilidade interna do procedimento de extração de cor nas condições experimentais avaliadas. Os valores entre 0,03% e 0,80% evidenciam baixa dispersão entre fotografias independentes de uma mesma condição. Esse comportamento é coerente com a importância atribuída ao controle da iluminação e da geometria de aquisição em colorimetria digital, fatores diretamente relacionados à robustez e à reprodutibilidade das medidas (Fan et al., 2021; Cebrián *et al*., 2022).

A repetibilidade observada também está de acordo com aplicações de análise digital de imagens em sistemas ácido-base. Chanla *et al*. (2019) relataram boa reprodutibilidade na utilização de sinais RGB obtidos por *smartphone* em titulações ácido-base, enquanto Shalaby e Mohamed (2020) demonstraram que dados RGB de indicadores, entre eles o azul de bromotimol, podem produzir resultados concordantes com medidas espectrofotométricas. Esses achados reforçam a capacidade dos descritores de cor de fornecer informação quantitativa sobre alterações cromáticas relacionadas ao equilíbrio ácido-base.

O processamento das 20 imagens sem falhas de identificação da região de interesse evidencia a viabilidade da estratégia de segmentação adotada. Entretanto, a redução do limiar de saturação de 40 para 20, necessária para melhorar a delimitação da condição HCl com azul de bromotimol, mostra que parâmetros fixos podem apresentar limitações diante de amostras com menor saturação ou contraste. A segmentação adequada da região analisada é etapa crítica para reduzir a interferência de áreas externas e padronizar a extração dos descritores colorimétricos (Woolf et al., 2021).

Embora o *script* também extraia descritores nos espaços HSV e CIELAB, a avaliação quantitativa de repetibilidade deste estudo foi realizada apenas para os canais RGB. Assim, os coeficientes de variação não devem ser extrapolados diretamente para os demais espaços de cor. Além disso, o uso de um único dispositivo e de uma configuração fixa de iluminação limita a avaliação da robustez externa do método. Estudos com diferentes câmeras, condições de aquisição e conjuntos amostrais mais amplos são necessários para verificar a capacidade de generalização do *pipeline*, considerando a influência do dispositivo, da iluminação e do espaço de cor sobre a resposta digital (Cebrián *et al*., 2022; García Ramos; Silva de Souza Júnior; Borges, 2025).

Conclusão

O *script* desenvolvido foi capaz de segmentar automaticamente a região de interesse e extrair descritores colorimétricos RGB, HSV e CIELAB das imagens de soluções de indicadores ácido-base, sem ocorrência de falhas no processamento das 20 imagens avaliadas. A baixa variabilidade observada nos canais RGB, com coeficientes de variação inferiores a 1%, evidenciou elevada repetibilidade da extração colorimétrica nas condições experimentais adotadas. Esses resultados demonstram o potencial do *pipeline* empregado como ferramenta objetiva para a caracterização colorimétrica de indicadores ácido-base em ambiente controlado, confirmando a repetibilidade do script quanto ao objetivo proposto e sustentando-o como etapa computacional de suporte à discriminação objetiva entre os meios ácido (pH 1,2) e básico (pH 10,9). A avaliação em diferentes dispositivos, condições de iluminação e conjuntos amostrais mais amplos poderá contribuir para estabelecer a robustez e a capacidade de generalização da rotina computacional.

Referências

CEBRIÁN, P.; PÉREZ-SIENES, L.; SANZ-VICENTE, I.; LÓPEZ-MOLINERO, Á.; DE MARCOS, S.; GALBÁN, J. Solving color reproducibility between digital devices: a robust approach of smartphones color management for chemical (bio)sensors. **Biosensors**, v. 12, n. 5, p. 341, 2022. DOI: 10.3390/bios12050341.

CHANLA, J.; KANNA, M.; JAKMUNEE, J.; SOMNAM, S. Application of smartphone as a digital image colorimetric detector for batch and flow-based acid-base titration. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 46, n. 5, p. 975-986, 2019.

FAN, Y.; LI, J.; GUO, Y.; XIE, L.; ZHANG, G. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: a review. **Measurement**, v. 171, p. 108829, 2021. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108829.

GARCÍA RAMOS, J.; SILVA DE SOUZA JÚNIOR, R.; BORGES, E. M. How digital images are transforming chemical education: a review of laboratory-based applications. **ACS Omega**, v. 10, n. 30, p. 32651-32672, 2025. DOI: 10.1021/acsomega.5c05125.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHALABY, A. A.; MOHAMED, A. A. Determination of acid dissociation constants of Alizarin Red S, Methyl Orange, Bromothymol Blue and Bromophenol Blue using a digital camera. **RSC Advances**, v. 10, n. 19, p. 11311-11316, 2020. DOI: 10.1039/C9RA10568A.

SURAL, S.; QIAN, G.; PRAMANIK, S. Segmentation and histogram generation using the HSV color space for image retrieval. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING**,

2002, Rochester. Proceedings [...]. p. II-589-II-592, 2002.

WOOLF, M. S.; DIGNAN, L. M.; SCOTT, A. T.; LANDERS, J. P. Digital postprocessing and image segmentation for objective analysis of colorimetric reactions. **Nature Protocols**, v. 16, p. 218-238, 2021. DOI: 10.1038/s41596-020-00413-0.

Agradecimentos

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