

Métodos Baseados em Imagem Digital: das Considerações Gerais ao Ensino de Química

Methods Based on Digital Image: from General Considerations to Chemistry Teaching

Claudinéia Rosa da Silva Oliveira,^a William Toito Suarez,^a Helena Rosa dos Anjos Nahas,^a Fábio Junior Moreira Novaes,^a João Paulo Barbosa de Almeida,^b Wagner Bezerra dos Santos^{b,*}

^a Universidade Federal de Viçosa, Cidade Universitária, Departamento de Química, CEP 36570-900, Minas Gerais – MG, Brasil

^b Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, Departamento de Química Fundamental, CEP 50740-600, Recife - PE, Brasil

*E-mail: wagner.bsantos@ufpe.br

Recebido: 12 de Maio de 2023

Aceito: 20 de Outubro de 2023

Publicado online: 10 de Novembro de 2023

This work is a bibliographic review of the Digital Image Based (DIB) from fundamental research to chemistry teaching, with an emphasis on analytical chemistry regarding qualitative and quantitative approaches and for chemistry teaching. Therefore, an exploratory and descriptive study on the state-of-art was carried out. The principles to obtain a digital image, electronic devices used, chambers, sample platform, precision, accuracy, color models, data treatment, and apps available are discussed. The applications of digital images to medical, geology, physics, pharmaceutical, biochemical, food science, forensic science, environmental, teaching and other applications are discussed. Moreover, chemistry teaching is enriched when digital images are employed, which can increase the motivation and enthusiasm of students, making classes more attractive and ensuring better learning. Since there is a growing number of publications in the field of “digital imaging”, it is essential to state that it is an area with enormous potential and much to offer for research and teaching.

Keywords: Digital image analysis; smartphone; chemistry teaching; analytical chemistry.

1. Introdução

A disciplina Química é vista com certo receio pelos estudantes por apresentar alto nível de abstração e complexidade.¹ Contudo, seu estudo é essencial para o entendimento de fenômenos que ocorrem no cotidiano, como as reações de maturação e decomposição de alimentos, do envelhecimento da pele, os princípios que determinam as velocidades de uma reação. São estudos igualmente importantes a composição química e as propriedades de certos materiais, bem como as reações associadas às variações climáticas que contribuem para o aquecimento global, e estudos termodinâmicos para entendimento do porquê da ocorrência das reações químicas por meio das constantes de equilíbrio.² Portanto, compreender os conceitos fundamentais da Química é de extrema importância para o estudante, podendo ser trabalhados de forma mais ilustrativa, rápida, acessível, e de baixo custo, usando imagens digitais, por exemplo.

Nos últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia e popularização, a utilização de smartphones cresceu, sendo mais acentuada no ano de 2020, em virtude da pandemia provocada pelo novo coronavírus (Covid-19), quando grande parte dos serviços foram desenvolvidos de forma remota ou on-line.³ Assim, parte da população que já utilizava seu celular para atividades pessoais, passou também a utilizá-lo para o trabalho e para a educação. Além disso, os smartphones têm sido lançados com maior tecnologia, elevadas resoluções de suas câmeras, maior capacidade de armazenamento de dados, aplicativos para fins diversos, tornando-o um poderoso instrumento analítico de análises químicas qualitativas e quantitativas.^{4,5}

As primeiras imagens físicas foram desenvolvidas durante os séculos XIX e XX a partir dos experimentos da câmera escura de orifício.⁶ Em 1822 com a descoberta química da imagem através do químico Louis Jacques Mandé Daguerre, que comercializou o daguerreótipo, um instrumento que permitia fixar as imagens projetadas por meio da luz⁶, o qual foi o pioneiro na imagem colorida e gravação usando as cores vermelho, verde e azul.⁷ Em meados da década de 70 do século XX foi desenvolvido um sensor de imagem que hoje conhecemos como sensor CCD (*Charged Coupled Device*, dispositivo acoplado de carga), fruto de um projeto dos físicos Willard Boyle e George Smith, vindo em 2009 a ganhar o prêmio Nobel de física pelo invento.⁸ Em um sensor CCD os elétrons são gerados após a incidência da radiação em sua superfície, em seguida, ocorre a amplificação do sinal, usando um amplificador operacional integrado na saída

do dispositivo, e logo ocorre a conversão analógica/ digital.⁹ Com a capacidade da conversão da radiação eletromagnética em sinal elétrico quase instantaneamente, isso culminou como um dos maiores marcos para a revolução da fotografia digital com a criação das primeiras câmeras de TV e fotografias digitais.

Já o sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, óxido de metal semiconductor complementar) foi desenvolvido por Erick R. Fossum, que teve o sensor CCD como parâmetro para o seu desenvolvimento em meados do final da década de 80 para o início da década de 90. Os sensores CMOS têm em cada pixel um circuito constituído de fotodiodos, capacitores e transistores interligados. Em 1990 o CMOS teve um grande avanço em torno de seu concorrente, CCD, que estavam presentes em todas as máquinas fotográficas, perdendo sua hegemonia para o CMOS que apresentavam mais vantagens como o baixo consumo de energia, e redução do tamanho do sistema de imageamento, levando a uma revolução na miniaturização dos dispositivos, tornando-os compactos e leves.¹⁰ Portanto, o uso de imagens digitais está associado à evolução de hardwares e softwares. Essas imagens podem ser facilmente obtidas por meio de equipamentos eletrônicos que empregam CCD ou CMOS. O uso de câmeras com sensor CCD, ou CMOS^{11,12} têm sido introduzido na química analítica por diversos motivos, tais como aquisição rápida de sinal, baixo sinal de fundo devido ao controle da radiação espúria, e boa sensibilidade e linearidade. Esses parâmetros são fundamentais para desenvolvimento de métodos analíticos juntamente com respostas precisas que garantem adequada repetibilidade e reprodutibilidade.¹³

Diversos métodos analíticos vêm sendo utilizados e constantemente desenvolvidos baseados em reações químicas que geram produtos coloridos, reações estas que são denominadas de reações colorimétricas. Estas reações visíveis ao olho nu podem ser facilmente registradas por webcams, scanners, câmeras digitais, e smartphones, os quais atualmente empregam detectores do tipo CMOS. O método DIB (*Digital Image Based*) é caracterizado por seu baixo custo, acessibilidade, rapidez, interatividade, e portabilidade quando comparado aos métodos que empregam espectrofotômetros convencionais utilizados em laboratórios, podendo ser aplicado nas mais diversas áreas¹⁴⁻¹⁷ para quantificação de determinada espécie química de interesse. O método DIB visa obter imagens mediante a ocorrência de reações colorimétricas, pela presença de cromóforos nas espécies químicas¹⁸ e, mais recentemente, através da fluorescência, onde nesse caso, o método é denominado de FDIB (*Fluorescence Digital Image-Based*).^{14,15} Na fluorescência, fótons são emitidos pela matéria quando a mesma é submetida a radiação eletromagnética. Essa radiação possui energia quantizada para promover a excitação dos elétrons, e quando esses elétrons retornam do menor estado de energia vibracional excitado para determinado estado vibracional fundamental, sem mudar a orientação de spin do elétron excitado,

emitem radiação, e assim, o fenômeno de fluorescência pode ser observado. A fluorescência pode ser emitida por algumas espécies químicas, e recentemente tem chamado a atenção científica, a emissão fluorescente devido à algumas nanopartículas fluorescentes, como os pontos quânticos (*Quantum Dots*, QD), principalmente aqueles à base de carbono (*Carbon Quantum Dots*, CQD) por conta da biocompatibilidade, os quais têm sido detectados, empregando tradicionalmente espectrofluorimetria, contudo, com FDIB outras características além de baixo custo são possíveis, como a possibilidade de análises em campo, ou em tempo real.^{14,15,19-24}

Os primeiros trabalhos baseados em DIB surgiram em meados do início do século XXI, mais precisamente em 2004 com o trabalho do Maleki *et al.*,²⁵ seguido em 2005 com o trabalho de Gaiao *et al.*²⁶ Maleki *et al.*²⁵ desenvolveram um modelo de rede neural artificial (ANN) para determinação simultânea de íons Al^{3+} e Fe^{3+} em ligas usando o reagente cromogênico, cromo azurolo S, que reage com os íons Al^{3+} e Fe^{3+} para formar complexos coloridos solúveis em água. As intensidades da cor dos dois complexos dependem da concentração dos íons Al^{3+} e Fe^{3+} . Para isso, desenvolve-se uma titulação baseada em imagens digitais para a determinação da concentração de HCl e H_3PO_4 , bem como o grau de alcalinidade em amostras de águas minerais e de torneira, usando uma WebCam de sensor CCD como um detector colorimétrico. Neste trabalho vermelho de fenol, verde de bromocresol e alaranjado de metila foram usados como indicadores na titulação. Quatro anos depois, em 2009, Lyra *et al.*²⁷ desenvolveram um método de emissão atômica com atomização por chama (flame emission spectrometry, FES) com detecção por imagens digitais (DIB-FES) para análise quantitativa de lítio, sódio e cálcio em antidepressivos, soro fisiológico e água potável de uma estação de tratamento de água, respectivamente. Foi uma das primeiras aplicações de DIB com emissão atômica na literatura.

No início, o método DIB estava apenas restrito a poucos grupos de pesquisas, uma vez que apenas estes grupos detinham o conhecimento para a obtenção de dados de sistemas de cores, por meio de uma Engenharia reversa, por transformarem as imagens digitais obtidas em dados analíticos. Para isso, algoritmos eram desenvolvidos em Delphi, Matlab entre outros.²⁷ Anos depois, com o avanço no desenvolvimento de dispositivos de captura de imagens com maiores resoluções, capacidade de processamento de dados, softwares e aplicativos que facilitam a obtenção de dados, popularizou-se o uso desse novo método analítico.^{16,28,29} O método DIB padrão, usando uma câmera digital para a captura de uma imagem de uma reação colorimétrica, tem como princípio norteador para seu funcionamento o fenômeno da reflectância,^{17,18,29} diferentemente das técnicas espectrofotométricas tradicionais como, por exemplo, espectrofotometria ultravioleta-visível (UV/Vis) que se baseiam no princípio da transmitância, e por fim, sua conversão em absorbância.^{29,30} Na reflectância, a medição é realizada através de fótons que foram refletidos por um

determinado meio parcialmente absorvente. O fenômeno da reflexão geralmente ocorre na interface ar-superfície e também na interface parede-solução com um ângulo entre a radiação incidente e emitida diferente de 180° (Figura 1A).³¹ Já a transmitância, T , é definida como a relação entre a radiação emitida, I , e a radiação incidente, I_0 , com um ângulo de 180° formado entre as duas, de acordo com a Equação 1 (Figura 1B).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

A absorbância corresponde ao logaritmo decimal negativo da transmitância, de acordo com a Equação 2:

$$A = -\log T = -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2)$$

Contudo, sabe-se que existe uma correlação entre reflectância e absorbância, pois, quanto maior for a absorbância de fótons em um meio, menor será sua reflectância. Assim, é necessário distinguir os dois processos físicos e usar o termo transmitância e absorbância para espectrometria UV-Vis, e reflectância para métodos baseados em imagens digitais, onde a simples captura da imagem é obtida pelo dispositivo.^{27,31} O espectrofotômetro é um instrumento que mede a quantidade de fótons absorvidos depois que passam pela solução que contém a amostra absorvente determinando sua concentração, de acordo com a medida da intensidade da radiação detectada.

Uma câmera de smartphone², ou uma webcam posicionada a um ângulo de 180° com a fonte de radiação (Figura 1 B) podem ser utilizadas como detectores, nesse caso, seria mais recomendado usar o termo transmitância ou absorbância nos dados obtidos³², contudo, essa configuração precisa ser precisamente descrita, caso contrário, o simples uso do dispositivo eletrônico para obter uma fotografia do meio reacional colorimétrico, refere-se a medida de um fenômeno de reflectância.

2. Conhecendo um Pouco Mais Sobre Imagens e Processamento de Imagens Digitais

A percepção e interpretação das cores pelo cérebro humano constitui um fenômeno ainda não plenamente compreendido. A natureza física da cor é formalmente expressa com base em resultados experimentais e teóricos, onde a radiação cromática engloba o espectro de energia eletromagnética em uma região que vai de aproximadamente 400 a 700 nm, três valores básicos são utilizados para descrever a qualidade de uma fonte de radiação cromática: a radiância, a luminância e o brilho.³³ A *radiância* é a quantidade total de energia que flui da fonte de radiação e é medida em *watts* (W). A *luminância*, por sua vez, é medida em *lumens* (lm), que mede a quantidade de energia que um

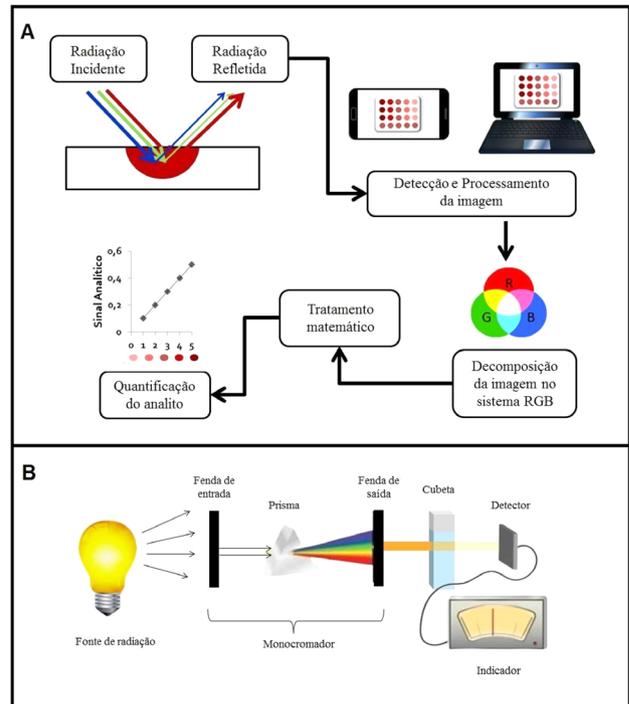


Figura 1. A) Emprego do fenômeno da reflectância utilizado pelo método DIB, através da captura pela câmera do smartphone da radiação refletida pela amostra e posterior uso do sistema RGB para decomposição da imagem e quantificação do analito; B) Empregos do fenômeno da transmitância/absorbância utilizando um espectrofotômetro UV-Vis com seus principais componentes internos. Nota: A decomposição da imagem pode ser feita usando um aplicativo de smartphone ou a imagem pode ser transferida para um computador, e ser usado um software que decompõe essa imagem

observador percebe de uma fonte de luz. Por fim, o brilho é um parâmetro subjetivo, que incorpora a noção acromática de intensidade e é um dos principais fatores na descrição da sensação de cores.³³

O objetivo de um modelo de cores (também chamado de *espaço de cores* ou *sistema de cores*) é facilitar a especificação das cores em alguma forma padronizada, amplamente aceita.²⁷ Essencialmente, um modelo de cores é uma especificação de um sistema de coordenadas e um subespaço dentro desse sistema no qual cada cor é representada por um único ponto. Entre os diferentes sistemas de cores mais utilizados estão o RGB (vermelho, verde e azul), o CMYK (ciano, magenta, amarelo e cor chave – preto), o CMY (ciano, magenta e amarelo), o HSL (matiz, saturação e luminosidade), o HSV (matiz, saturação e brilho) entre outros.²⁷

2.1. Sistema RGB

O RGB é o sistema de cores mais utilizado em DIB. Nesse, cada cor aparece em seus componentes espectrais do vermelho, verde e azul. As intensidades das cores geradas são armazenadas em 256 níveis, em uma escala de 0 a 255 para cada canal de cor (vermelho, verde e azul), onde a combinação desses três canais leva a um valor de equivalente a $(256)^3 = 16.777.216$ cores, cobrindo todo o

espectro eletromagnético visível ao olho humano.³⁴ O valor 0 para todos os canais representa a cor preto, enquanto o valor 255 para todos os canais representa a cor branca.^{18,35,36}

O modelo RGB também pode ser representado sobre coordenadas cartesianas, onde o subespaço de cores de interesse é ilustrado como um cubo (Figura 2A), contendo os valores RGB nos três vértices; as cores ciano, magenta e amarelo estão em outros três vértices; o preto está na origem; o branco está no vértice mais distante da origem. Nesse modelo, a escala de cinza (pontos de valores RGB iguais) estende-se do preto até o branco ao longo do segmento de reta que une esses dois pontos. As diferentes cores nesse modelo são pontos no cubo ou dentro dele e são definidas por vetores que se estendem a partir da origem. Por conveniência, assume-se que todos os valores de cor foram normalizados, de forma que o cubo apresentado na Figura 2A é um cubo unitário, isto é, assume-se que todos os valores de R, G e B estejam no intervalo [0, 1].³⁴

2.2. Sistema CMY e CMYK

A maioria dos dispositivos que depositam pigmentos coloridos sobre o papel, como impressoras e copiadoras coloridas, requer dados de entrada nas cores ciano, magenta e amarelo (do inglês *cyan, magenta and yellow*, CMY) ou realizam internamente uma conversão de RGB a CMY. Essa conversão é realizada utilizando a Equação 3, um modelo subtrativo, e assim é possível encontrar e definir a cor preto.

$$[C M Y] = - [R G B] \quad (3)$$

A Equação 3 demonstra que a radiação refletida de uma superfície coberta com ciano puro, por exemplo, não contém vermelho (uma vez que, $C = 1 - R$ na equação). De forma similar, o magenta puro não reflete o verde, e o amarelo puro não reflete o azul.³⁴ A Equação 3 também revela que valores de RGB podem ser facilmente obtidos a partir de um conjunto de valores CMY subtraindo os valores CMY individuais de 1. Na prática, a combinação dessas cores para a impressão produz um preto de aparência

turva. Dessa forma, para produzir o verdadeiro preto (que é a cor predominante na impressão), uma quarta cor, o *preto*, é adicionada, gerando o modelo de cores CMYK (K, do inglês Key).

2.3. Sistema HSV

O modelo HSV é definido pelos parâmetros: matiz (H, *hue*), saturação (S, *saturation*) e valor (V, *value*). A Figura 2B mostra uma representação gráfica 3D do sistema HSV no formato de uma pirâmide hexagonal derivada do cubo RGB. Os diferentes valores de matizes estão representados na parte superior da pirâmide, a saturação é medida ao longo do eixo vertical, o qual passa pelo centro da pirâmide. Nessa base hexagonal da pirâmide, cada vértice corresponde a uma das cores do sistema RGB ou às cores complementares (ciano, magenta e amarelo), sendo o ângulo entre eles de 60°. De acordo com a Figura 2B, o vermelho é dado pelo ângulo 0°, o amarelo equivale a 60° e assim por diante.³⁷⁻³⁹

A saturação varia de 0 a 1, e corresponde a “pureza” da cor, quanto menor esse valor, mais próximo do tom de cinza aparecerá a imagem, quanto maior esse valor, mais “pura” a cor será. O valor (brilho) varia de 0 (pico da pirâmide), que representa a cor preto, a 1 (base da pirâmide), onde as intensidades das cores são máximas.³⁷⁻³⁹

2.4. Modelo RGB em DIB e FDIB

Os modelos CMY e CMYK são muito similares entre si, a diferença consiste que no último se usa o preto, referente a key, e são modelos subtrativos, cuja cor é obtida pela subtração das cores em cada canal.³⁷⁻³⁹ O modelo HSV, usa informações de matiz, saturação e valor de cor. Esses modelos não trazem uma compreensão direta da cor, que é a radiação emergida por uma solução (no caso de aplicações químicas), ou a cor complementar. A seguinte explicação ajuda a entender o porquê do sistema RGB ser mais usado: Quando uma solução é vermelha, o canal R (Red) é o de maior valor, associado ao fenômeno de

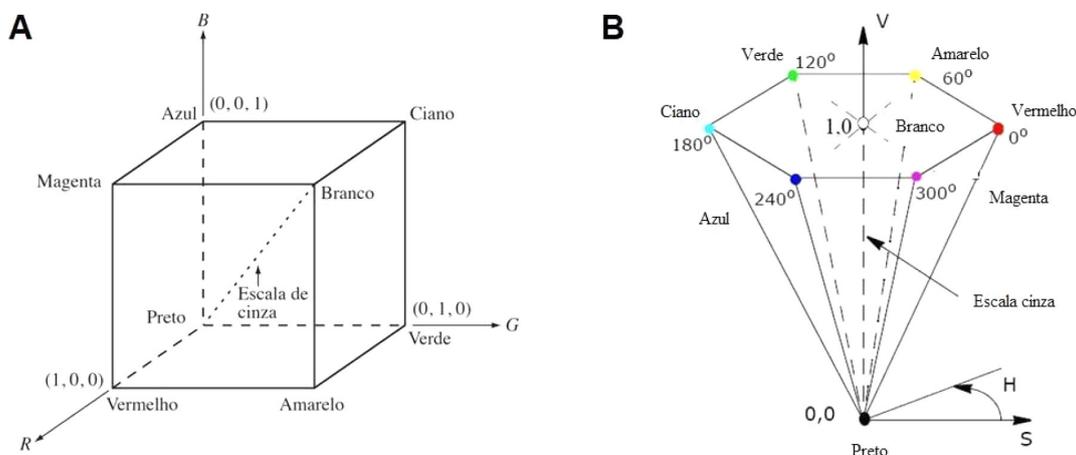


Figura 2. Representação esquemática do A) cubo para o sistema de cores RGB e do B) prisma para o sistema HSV

reflectância da radiação branca incidente que apresenta absorção desprezível de fótons da região do vermelho (650-700 nm), e maior absorção no canal G (Green) e um pouco menos intensa no canal B (Blue). Com isso, pode-se rapidamente e facilmente entender, que qual região espectral está ocorrendo absorção e reflectância da solução. Esse entendimento é crucial para o ensino de química.²

3. Aparatos Para a Captura das Imagens Digitais

Para as aplicações envolvendo o método DIB, frequentemente é empregado o uso de plataformas de suporte, *Spot Test* (testes locais ou pontuais), para acomodar a solução contendo o analito. Para esta finalidade estas plataformas devem ser construídas à base de materiais inertes a fim de evitar reações indesejadas com o analito sob análise e, para isso, materiais como papel,⁴⁰⁻⁴² placas cerâmicas,⁴³ microplacas de poliestireno,³⁶ estão entre os materiais mais utilizados. Contudo, em aplicações fora do contexto de *Spot test*, cubetas de quartzo ou vidro⁴⁴ convencionais usadas em espectrofotometria podem ser utilizadas. Devido a versatilidade desses materiais e suas características, muitas aplicações com DIB têm sido empregadas como novos métodos para os clássicos *Spot Test*.^{18,43} Recentemente foi observado o uso de polímeros, como o ácido polilático (PLA) (Polylactic acid),^{14,15} um material biodegradável, estando em conformidade com a química verde. As plataformas de PLA podem ser obtidas através de impressoras 3D por meio de extrusão por filamento fundido, possibilitando construir diferentes formas e volumes, moldes customizados, leves, resistentes, ambientalmente amigáveis, além de facilitar a miniaturização e sua utilização para análises *in situ*.^{14,15}

Outro fator que merece destaque é no que se refere à radiação incidente na amostra em análise, visto que o controle/homogeneização da radiação para a captura da imagem digital é de fundamental importância, a fim de evitar a radiação espúria, que é definida como a radiação do instrumento que está fora da banda de comprimento de onda nominal escolhida para a determinação.³¹ A negligência desses cuidados pode acarretar baixa acurácia e precisão do método comprometendo os resultados das análises.^{14,45} Assim, para contornar esses inconvenientes, faz-se necessário o emprego de câmaras fechadas,^{15,43} e que nelas, a radiação proveniente do ambiente seja evitada, e que uma luminosidade uniforme seja aplicada. Para isso, LEDs (*Light Emitting Diodes*) são geralmente usados. Contudo, efeitos indesejados de reflexão dos LEDs também devem ser evitados para diminuir a radiação espúria, usando a conhecida região de interesse, que é a quantidade de pixels a ser selecionada na análise, onde não existam imperfeições nas imagens, ou seja, uma imagem representativa e uniforme da cor da amostra analisada.⁴⁶

Entre os dispositivos utilizados para a captura das imagens digitais, pode-se destacar a webcam,²⁶ o scanner,⁴⁷ a

câmera digital,⁴⁸ e o smartphone.^{15,49} Com o desenvolvimento tecnológico, estes dispositivos apresentaram uma melhora tanto na sua estrutura, havendo redução dos seus tamanhos e, por consequência, maior portabilidade, assim como a evolução do seu hardware, equiparando-se a microcomputadores com elevada memória interna (capacidade de armazenamento de dados) e câmeras de alta resolução, proporcionando o emprego desses dispositivos em aplicações fotométricas, espectrofotométricas, colorimétricas e fluorescentes.^{14,50}

Um estudo realizado por Benedetti *et al.*⁴⁶ mostrou que câmeras com diferentes qualidades de resolução não comprometem as análises químicas, assim como não dão resultados divergentes. Mas deve-se enfatizar que essa diferença de resolução, implica em precisões diferentes, na medida que smartphone ou outro dispositivo de captura com câmeras de alta resolução favorece uma maior precisão na obtenção dos dados de uma imagem, por gerar melhor definição nos pixels analisados, em detrimento de dispositivos com câmeras de baixa resolução. Contudo, os resultados mostraram que todos os modelos de smartphones e câmeras digitais testados, com resolução variando de modelos com 0.3 a 12 M pixels, podem ser usados, desde que sua configuração de imagem, foco, tratamento da imagem não sejam alterados durante os experimentos.

4. Aplicativos e Softwares Para a Conversão das Imagens em Sistema Numérico

A imagem digital pode ser utilizada em diversas áreas, desde que se possa obter os dados de decomposição dessas imagens. Para isso, pode ser empregado algum software ou aplicativo que gere dados nos sistemas: RGB (vermelho, verde e azul), HSV (matiz, saturação, brilho), HSI (matiz, saturação, intensidade), HLS (matiz, luminosidade, saturação), tais como: Color Grab^{13,51}, ColorX⁵², PhotoMetrix^{®53}, PhotoMetrix PRO^{54,55}, PhotoMetrix UVC^{56,57}, *Color Name*⁴⁹, *ImageJ Software*⁵⁸⁻⁶², entre outros. Assim, através dos tratamentos das imagens digitais é possível determinar a presença e concentração de determinados analitos em amostras variadas.

Cada software citado acima foi desenvolvido com a finalidade de utilizar este recurso para trabalhos acadêmicos e/ou profissionais. O *software* ImageJ (Figura 3A), foi desenvolvido por Wayne Rasband (Instituto Nacional de Saúde Mental, Bethesda, Maryland/EUA) na linguagem Java, que permite ser executado em qualquer sistema operacional em computadores, notebook ou no *smartphone*.⁶³ Este pode ser utilizado com macros, tem o recurso de adicionar *plugins* e é bem disseminado na literatura.⁶⁴ Além disso, fornece métodos simplificados de análise de imagem, por ser de código aberto, possui facilidade de operação e de compartilhamento.⁶⁵

O aplicativo PhotoMetrix (Figura 3B) foi desenvolvido por Gilson A. Helfer e colaboradores das Universidades

de Santa Cruz do Sul, Luterana do Brasil e Federal do Rio Grande do Sul, para plataformas *Windows Mobile*, *iOS* e *Android*, utilizando linguagem C++ e Java. O aplicativo está disponível na *Play Store* ou *Apple Store* de forma gratuita, e instruções de uso.⁶⁶ As imagens podem ser adquiridas pela câmera do celular (versão PhotoMetrix PRO[®]) ou por uma câmera externa acoplada no celular (versão PhotoMetrix UVC). Nas duas versões é possível realizar a calibração univariada e multivariada por mínimos quadrados parciais,^{28,67} medir os valores de RGB e as outras formas já mencionadas.

O *software* ColorX foi desenvolvido por Silvija Šafranko e colaboradores da Universidade de Osijek (Croácia) e Faculdade de Tecnologia de Alimentos Osijek (Croácia) para coleta e análise de dados através do algoritmo criado a partir dos valores de RGB. Esse *software* foi elaborado utilizando linguagem de programação Visual Basic, possui interface gráfica de fácil entendimento, permite a importação de imagens do celular ou aquisição de uma a partir de uma câmera digital conectada via USB.⁵² O aplicativo ColorGrab (Figura 3C) foi elaborado pela Equipe Loomatix (2012). Este pode ser utilizado para obter dados nos sistemas RGB, HSV, HEX, entre outros, em tempo real, reconhece as cores e possui uma versão de acessibilidade, em que é possível ouvir o que é feito. Está disponível para *softwares Android*, onde é possível exportar para outros aplicativos e importar da sua galeria para analisar os canais RGB.⁶⁸

Em geral, estes *softwares/aplicativos* vieram para facilitar o trabalho do analista, permitindo controlar e interpretar os resultados obtidos, além de serem de fácil operação, gratuita e de resposta rápida.

4.1. Aquisição e tratamento dos dados do DIB em sistema RGB

Para a construção das curvas analíticas a fim de determinar a concentração do analito de interesse, faz-se necessário lançar mão de ferramentas matemáticas que correlacione os valores do RGB das imagens obtidas com a concentração do analito. Se o objetivo é usar todos os

dados do sistema RGB, uma forma possível é usar o cálculo do vetor (v), que é simplesmente uma distância euclidiana, conforme Equação 4^{14,43}:

$$v = \sqrt{(R - R_0)^2 + (G - G_0)^2 + (B - B_0)^2} \quad (4)$$

onde os parâmetros R , G e B representam os valores referentes aos canais vermelho, verde e azul, respectivamente obtidos da imagem e os parâmetros R_0 , G_0 e B_0 representam os valores do RGB da solução do branco, aquela isenta do analito. Com todos esses parâmetros conhecidos, uma curva do vetor *versus* concentração do analito pode ser traçada e, por conseguinte, a quantificação da espécie de interesse pode ser determinada. Essa forma de tratamento muitas vezes se revela imprescindível para uma análise, podendo em alguns casos, obter maior sensibilidade ou precisão. Vale salientar que há uma relação diretamente/inversamente proporcional, a depender das espécies presentes na matriz, entre a variação da concentração do analito e a variação dos valores de RGB que nesse caso é utilizado para fins de quantificação.^{14,15}

Outra maneira comumente utilizada para construção de curvas analíticas se dá através de equações logarítmicas, como na relação entre $-\log(I/I_0)$, que é a razão entre as intensidades da radiação refletida diante da presença do analito, I , com a intensidade da radiação refletida sem a presença do analito, I_0 , (branco) *versus* a concentração do analito.⁴⁸ Contudo, mesmo usando a conhecida relação $-\log(I/I_0)$, os dados são de reflectância, apenas foi normalizado e aplicado logaritmo em base 10. Vale lembrar que, se o DIB é usado com um detector posicionado similar a um detector de um espectrofotômetro, pode-se atribuir esse cálculo como transmitância, como é normalmente feito em espectrofotometria, por existir uma configuração tal que, existe um ângulo de 180° entre a fonte de radiação e o detector, e a radiação incidente é transmitida por uma amostra parcialmente absorvente, e essa radiação é medida no detector.^{32,69} Existem outras formas possíveis para quantificação, como usar o valor bruto do sistema RGB¹⁵ ou fazer o uso da multiplicação dos valores ($R \times G \times B$), conhecido como valor de cor.²⁶ Para esse último cálculo,

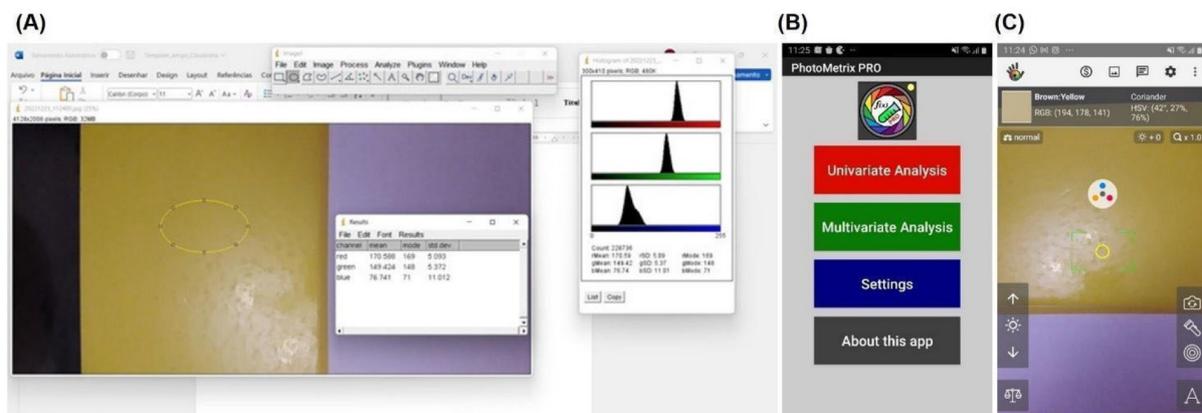


Figura 3. Vista da tela das interfaces dos softwares (A) ImageJ no ambiente Windows de um computador e dos aplicativos (B) PhotoMetrix e (C) ColorGrab em um smartphone

os valores de RGB podem chegar à ordem de 10^7 e, com isso, todos os valores gerados pelo modelo RGB serão utilizados. A vantagem deste último modo de tratamento é que ele apresenta uma sensibilidade maior para pequenas variações do sistema RGB, quando comparada ao modo dos valores brutos, porém este modo da multiplicação dos canais trabalha com escala de valores alta,²⁶ o que pode dificultar os cálculos. Entretanto, a forma mais simples é empregar sem qualquer cálculo os valores reais do RGB, o que facilita os cálculos, e o entendimento dos fenômenos envolvidos de reflectância e absorvância.¹³

Seja qual for a forma de cálculo com os valores obtidos, e seja qual for o sistema de decomposição de imagem usado, os dados são sempre referentes a um fenômeno físico de reflectância, a não ser que o DIB esteja configurado para medir sinais transmitidos, e assim, os dados são de transmitância, e podendo ser convertidos em absorvância.⁴⁸ Já para FDIB, os sistemas de decomposição de imagens digitais são os mesmos já empregados nos aplicativos e softwares de DIB, contudo em FDIB, não se tem o fenômeno de cor complementar. Os dados de FDIB são simplesmente associados aos fótons emitidos pelo material fluorescente excitado, dando por exemplo dados nos canais R, G e B (sistema RGB), com intensidade dos canais proporcional a cor da radiação emitida, tal como é o registro num espectrofluorímetro, desde que o detector de FDIB esteja posicionado a 90° em relação a radiação de excitação.^{14,15}

5. Uso da Imagem Digital: um Panorama Geral da Pesquisa ao Ensino de Química

Este é um estudo de revisão crítica e descritiva concebido através da produção científica indexada na base de dados *Web of Science*, com uma visão geral sobre o uso da ferramenta em áreas científicas relacionadas ao tema. Além disso, pretende-se quantificar o número de publicações realizadas nos últimos anos relacionado à imagem digital de maneira geral e na grande área de Química, e por fim, artigos relacionados ao ensino de química, neste último caso com um olhar mais qualitativo e didático-pedagógico.

Desse modo, o presente artigo tem também como objetivo exploratório-descritivo, evidenciar e discutir algumas percepções sobre o uso de métodos baseados em imagens digitais, desde aspectos gerais até sua aplicação ao ensino da Química, baseando na problemática “Como a imagem digital tem sido utilizada na identificação/quantificação de analitos, ou no ensino de Química para o Ensino Médio e Superior?”. Para esta finalidade, foi realizada uma pesquisa no banco de dados indicado, utilizando a palavra-chave “*digital image*” a fim de analisar de forma qualitativa/quantitativa a relevância deste tema no âmbito acadêmico. Na Figura 4 tem-se os dados extraídos desta plataforma, em que, pode-se observar um crescimento exponencial em termos de publicações desde 1999 até 2022 para trabalhos científicos que envolvem

imagens digitais nas mais diversas áreas (Figura 4A), trabalhos que aplicam imagens digitais apenas na química (Figura 4B), bem como trabalhos envolvendo imagens digitais no ensino de química (Figura 4C).

Observando a Figura 4, em termos gerais, DIB tem alcançado números impressionantes de mais de 10.000 publicações/ano desde 2015, inclusive, com números especiais em revistas científicas, como a *Microchemical Journal* da Elsevier^{70,71}, e artigos de DIB como capa de revista como a *Analytical Methods* da Royal Society of Chemistry em 2023⁷². Isso deve aproximar o tema das escolas, salas de aulas e uma tendência de maior produção científica⁷³. De fato, pode-se observar que publicações de imagens digitais no ensino de química sempre teve uma baixa produção até antes de 2018, devido possivelmente este ser um método relativamente novo na ciência, prestes a completar 20 anos em 2024, em relação a espectrometria que é um método consolidado a mais de 100 anos. A popularização das câmeras digitais, webcams, e mais especificamente os celulares, e sobretudo, os smartphones com aplicativos têm permitido o desenvolvimento de métodos com DIB no ensino, principalmente a partir de 2018, somados a literatura já consolidada em pesquisas, equações bem estabelecidas, entendimento dos processos de reflectância e absorvância.

5.1. DIB em pesquisa

O uso de imagens digitais vem sendo trabalhado nas mais diversas áreas científicas com objetivos específicos, por exemplo, Kelly *et al.*⁷⁴ utilizaram as imagens digitais para medir deformações em superfícies de uma coluna vertebral. Em ciência forense, animais em seus habitats também foram registrados⁵¹ para identificar morfologicamente espécies de vida selvagem. Ainda com relação à ciência forense, imagens digitais de cabelos foram usadas para obtenção de evidências de crimes.^{75,76}

No campo de informática voltada a patologia, Yao *et al.*⁷⁷ elaboraram o método ThinPrep para preparar análises de imagens digitais na citomorfologia da tireoide, podendo quantificar informações morfológicas para fins de diagnósticos. Stone *et al.*⁷⁸ utilizaram DIB para análise de dados de 10 pacientes com problemas cutâneos, incluindo alopecia mucinosa, psoríase e nevos displásicos, a fim de acompanhar as lesões. As imagens digitais também tiveram aplicações urológicas⁷⁹ ao contribuir com a prática cirúrgica, na medida em que os urologistas podiam ter a certeza de obter imagens de vídeos em tempo real e com clareza, melhorando o diagnóstico e o tratamento.

No campo de ciência arqueológica, Trimmis⁸⁰ utilizou imagens digitais para estudar o *kernoi*, que são lajes de pedra com marcas de taças arranjadas circularmente durante a Idade do Bronze, localizadas no mar Egeu. Já no campo da comunicação, Evsutin *et al.*⁸¹ trataram da importância da marca d'água nas imagens digitais a fim de garantir direitos autorais e combate à falsificação. Na Ciência

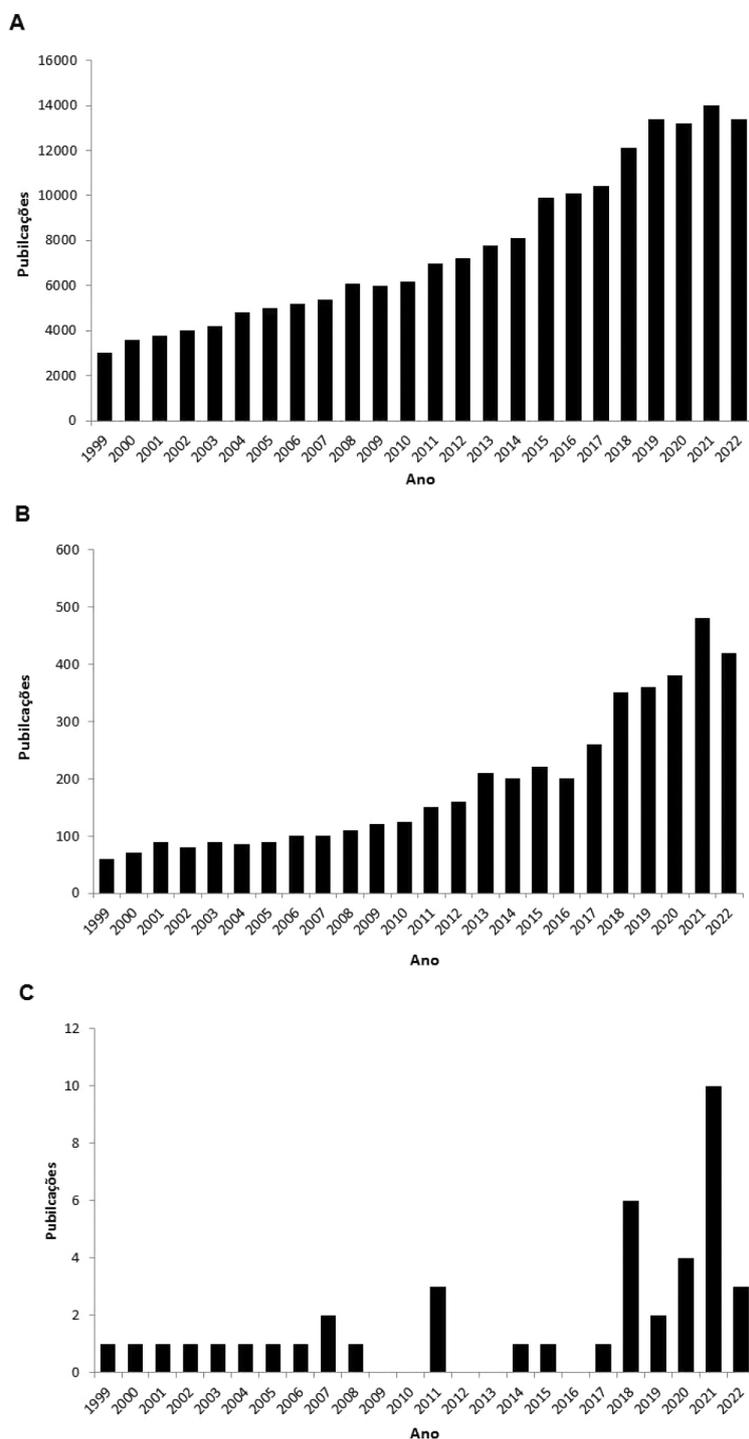


Figura 4. Número de publicações por ano (1990-2022) obtidos da plataforma *Web of Science*, utilizando a palavra-chave “digital image” para diversas áreas da ciência (A), em particular para química (B) e ensino de química (C)

da computação de Materiais, Thoby *et al.*⁸² utilizaram o método de correlação de imagens digitais para calcular campos cinemáticos de espécimes. Na agronomia o DIB tem sido empregado para análises do carbono orgânico do solo de acordo com os níveis de iluminação,⁸³ bem como para a quantificação do teor de ferro presente no solo.⁸⁴ Na engenharia civil, Jo *et al.*⁸⁵ utilizaram imagens digitais para avaliar a força de tensão de cabos em pontes estaiadas. Uma

vez que o uso do smartphone garante vantagens como o baixo custo, portabilidade e ter facilidade de uso, pode-se utilizá-lo em qualquer área para finalidades infinitas.⁸⁶

Os exemplos anteriores mostram como é ampla a aplicabilidade das imagens digitais, no entanto, ainda há muitos exemplos, mas não é o objetivo desta revisão uma exaustiva descrição dos mais de 10.000 artigos/ano sobre o tema, e sim, demonstrar algumas potencialidades do método

em diferentes nichos científicos, com ênfase em Química e ensino de Química.

Franco *et al.*¹³ através de reações colorimétricas conseguiram detectar quantitativamente o cobre em aguardente de cana-de-açúcar. Em outra publicação, os autores¹³ utilizaram o DIB para determinar o teor de açúcares redutores em cachaça, a saber glicose e frutose por meio da reação de redução de Cu(II) a Cu (I) e demonstração da potencialidade em detectar adulteração de bebidas de alto valor agregado.

Böck *et al.*⁶⁷ utilizaram o método de baixo custo para determinar cobre em aguardente de cana-de-açúcar, utilizando o *software* PhotoMetrix UVC® instalado no smartphone, através da reação de complexação entre o cobre e a cuprizona, que apresenta uma coloração azul, possibilitando também a leitura dos canais e suas cores. Oliveira *et al.*³⁶ apresentaram pela primeira vez um método para determinar a acidez total da laranja, limão e maracujá a partir da microtitulação utilizando antocianinas como indicador biodegradável com detecção por DIB. Resque *et al.*⁴³ verificaram a conformidade de produtos alvejantes contendo o hipoclorito de sódio. O método consistia em capturar uma imagem digital da reação colorimétrica do hipoclorito com antocianinas usando um smartphone como detector. Patari *et al.*⁸⁷ desenvolveram um dispositivo em 3D a base de papel para detecção de leite adulterado. Neste trabalho foram detectados simultaneamente vários adulterantes químicos do leite como: a ureia, detergentes, sabão, amido, peróxido de hidrogênio, hidrogenocarbonato de sódio e sal. Soares *et al.*¹⁷ propuseram um método para quantificação de biodiesel em misturas de diesel. A análise baseou-se em uma reação de complexação entre o Fe(III) e o íon hidroxamato produzido através da reação entre os ésteres alquílicos proveniente do biodiesel e a hidroxilamina. Para a captura das imagens foi utilizada a câmera de um smartphone, sendo a imagem posteriormente decomposta no sistema RGB pelo aplicativo PhotoMetrix. O limite de detecção encontrado para um nível de confiança de 99,7% foi de 1,0% (v/v) de biodiesel.

De Almeida *et al.*¹⁵ determinaram o tempo de eficácia de uma solução sanitizante à base de hipoclorito de sódio em tapetes sanitizantes. Hipoclorito é um biocida utilizado no combate à microorganismos patógenos e foi monitorado através da fluorescência dos *carbon quantum dots* (CQD), mediante ao efeito *quenching* (supressão da fluorescência) uma vez que o hipoclorito de sódio por ser um agente oxidante forte, retira elétrons dos CQDs contribuindo para a diminuição da fluorescência. Os CQD são uma classe de nanomateriais de carbono que apresentam propriedades luminescentes e vantagens de baixa toxicidade, compatibilidade com o meio ambiente, baixo custo, fotoestabilidade quando comparado aos Quantum Dots de semimetals tradicionais. Como essa variação da fluorescência está diretamente atrelada à concentração do hipoclorito de sódio, fica acessível a determinação da concentração do agente sanitizante *in loco*.

Dos Santos *et al.*⁸⁸ desenvolveram um trabalho usando smartphone como um detector para determinar o ácido ascórbico (AA) em frutas nativas e exóticas da Amazônia. A reação consistiu na redução de Fe(III) por AA e posterior complexação com 1,10-fenantrolina. Araújo *et al.*⁸⁹ propuseram um método quimiométrico para identificar adulteração em açaí, utilizando uma webcam para a captura das imagens digitais. Neste estudo foram considerados dois adulterantes, a farinha de trigo e de mandioca. Foi empregado a análise de componentes principais (PCA) e os modelos SIMCA (Modelagem Independente Suave por Analogia de Classes) e o PLS (Análise Discriminante Por Mínimos Quadrados Parciais). Foi empregado o sistema RGB, HSI e modelos de cores em tons de cinza. O modelo SIMCA se mostrou uma estratégia quimiométrica eficaz no acesso às informações químicas contidas nas imagens digitais. Maroubou & Melchert⁹⁰ desenvolveram um método alternativo para a extração das sulfonamidas (SAs) através da microextração sólido-líquido em carnes, uma vez que as SAs são antimicrobianos sintéticos de baixo custo amplamente utilizados na medicina veterinária para tratar doenças e prevenir infecções. No entanto, longos períodos de exposição às SAs podem causar efeitos adversos. Para a quantificação do teor de sulfonamidas foi empregado uma reação colorimétrica, tendo como base a formação de um composto rosa, um sal de imina. Para a captura das imagens foi empregado um smartphone e o Color Grab foi utilizado para o tratamento das imagens através do sistema RGB.

Da Silva *et al.*¹⁴ quantificaram através do FDIB, sulfato de quinina em bebidas tônicas. Para esta análise foi empregada uma câmara UV (ultravioleta) com quatro diodos emissores de radiação UV de alto brilho com comprimento de ondas máximo de emissão a 370 nm. Os sinais de fluorescência foram medidos no sistema RGB, sendo utilizado o canal azul, uma vez que este apresentou uma maior sensibilidade comparado aos outros canais. Soares & Rocha¹⁷ elaboraram um método para determinação do ácido úrico na saliva como forma de detectar disfunções renais. Esse método foi baseado em uma reação colorimétrica através da redução de Cu(II) a Cu(I) pelo ácido úrico, seguida pela complexação com ácido 2,2-biquinolina-4,4-dicarboxílico (BCA), resultando em um complexo violeta.

Kajornklin *et al.*⁹¹ por sua vez utilizaram imagens digitais para quantificar o valor da constante de equilíbrio de uma reação do complexo cobalto (II) e da reação de formação do complexo cobalto ferro(III)-tiocianato, através do software ImageJ. Já Böck *et al.*⁹² utilizaram o software PhotoMetrix PRO para quantificar o teor de etanol, via colorimetria, através da reação de nitrato de amônio com o etanol produzindo um complexo de alcóxido de cério (IV) de cor vermelha, que teve sua intensidade de cor e RGB medidos.

Machado e Fonseca desenvolveram uma plataforma de sílica para separação cromatográfica e detecção de paracetamol, cafeína e ácido acetilsalicílico em comprimidos usando webcam e obtenção de dados de fluorescência baseados no sistema RGB, como um método rápido, simples

e de baixo custo para análise desses fármacos.⁹³ Em outro trabalho do grupo, o método de separação foi baseado em eletroforese em gel, aplicado em duas matrizes distintas, 1) detecção de Cu e Ni em ligas metálicas; 2) análises de corantes alimentícios em pó, ambos usando imagens digitais obtidas com webcam com dados do sistema RGB.⁹⁴

De modo geral, a imagem digital pode ser utilizada para detecção óptica⁹⁵, eletroquímica⁹⁶, neurocirurgia minimamente invasiva,⁷² em análises colorimétricas,^{3,48,73,74} fluorimétricas,^{10,41,75} espectrométrica,^{76,77} na patologia humana,^{78,79} na microscopia,⁸⁰ espectroscopia na região do infravermelho,⁸¹ potenciometria,^{82,83} e eletroforese em gel,⁸⁴ permitindo que diversas análises sejam realizadas *in loco* (no próprio local). Na Tabela 1 são apresentados os resultados de pesquisas sobre trabalhos na literatura que usam imagens digitais para diversas aplicações com o intuito de demonstrar sua ampla aplicabilidade, e algumas informações e resultados sobre os métodos aplicados.

5.2. DIB no ensino da Química

Segundo Souza,¹²³ para que o ensino da Química aconteça de forma significativa é interessante que se assuma um caráter dinâmico, que exige ações direcionadas para os alunos, a fim de que haja aprofundamento e ampliação do que lhe foi ensinado durante a prática do ensino e da aprendizagem. Desta forma, mais importante que apresentar os resultados de uma pesquisa, é dialogar, expor o conteúdo e explicar o que esse resultado quer dizer, por exemplo, como se faz a leitura de uma imagem digital e o que ela significa, quais os ganhos pedagógicos ao ensino de química? Nesse sentido, de Jesus, Soares e Mesquita,⁷³ têm avaliado o uso de celulares/smartphones e seu impacto no ensino de química. Segundo os autores, esses dispositivos são usados como um recurso didático e mediador entre o professor e o aluno, sendo muito positivo seu uso no ensino. Em outro artigo, dos Santos *et al.*² têm relatado

Tabela 1. Aplicações diversas usando imagens digitais

Método Analítico	Faixa Linear	LD	Aplicações	Dispositivo de captura de imagem	Ref.
FDIB	TMA-N 0-10,0 mmol L ⁻¹ TVB-N 0-10,0 mmol L ⁻¹	TMA-N 0,11mg 100g ⁻¹ TVB-N 0,27mg 100g ⁻¹	Determinação de nitrogênio em trimetilamina (TMA-N) e nitrogênio básico volátil total (TVB-N) para avaliação do frescor de peixes	Smartphone	97
DIB	--	--	Análise de matéria orgânica, sais minerais e poluentes no solo	Smartphone	98
DIB	3,12 x 10 ⁻⁵ -1,21 x 10 ⁻³ mol L ⁻¹	8,06 x 10 ⁻⁶ mol L ⁻¹	Determinação de captopril em formas farmacêuticas e urina sintética	Smartphone	99
DIB	4,5 kat mL ⁻¹ -6,5 kat mL ^{-1a}	3,09 x 10 ⁻⁶ kat mL ⁻¹	Ensaio da atividade de butirilcolinesterase em plasma de camundongo	Smartphone	100
DIB	0-30,0 mg L ⁻¹	1,2 mg L ⁻¹	Quantificação de tartrazina em refrigerante	Smartphone	101
DIB	0-6,0 mg L ⁻¹	--	Quantificação do azul de metileno em medicamentos	Smartphone	102
DIB	10,0-210,0 mg 100 g ⁻¹	6,49 mg 100 g ⁻¹	Determinação de esteróis totais em óleos vegetais	Smartphone	103
DIB	0,3-4,8 OD ₆₀₀ ^b	--	Detecção da <i>Escherichia coli</i> em águas contaminadas	Smartphone	104
DIB	1,0-4,0 µg L ⁻¹	0,86 µg L ⁻¹	Detecção de íons Hg ²⁺ em amostras de águas de rio	Smartphone	105
DIB	0,1-1,0 µg mL ⁻¹	0,012 µg mL ⁻¹	Determinação de Pb ²⁺ em mandioca	Smartphone	106
DIB	0-10,0 mg L ⁻¹	0,09 mg L ⁻¹	Detecção de íons Fe ²⁺ em amostras de águas ambientais	Smartphone	107
DIB	Cr ⁶⁺ 0-0,8 mg L ⁻¹ Fe ³⁺ 0-3,2 mg L ⁻¹	--	Determinação de Cr ⁶⁺ e Fe ³⁺ em águas ambientais	Câmera Digital	108
DIB	1,0-80,0 µg L ⁻¹	1,0 µg L ⁻¹	Detecção do herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético em águas ambientais	Smartphone	109
DIB	0,5-2,5 µg mL ⁻¹	0,11 µg mL ⁻¹	Determinação de sulfonamidas em formulações farmacêuticas e veterinárias	Smartphone	110

Tabela 1. Aplicações diversas usando imagens digitais (cont.)

Método Analítico	Faixa Linear	LD	Aplicações	Dispositivo de captura de imagem	Ref.
FDIB	Histamina 1,0-50,0 mg L ⁻¹ Tiramina 1,0-50,0 mg L ⁻¹	Histamina 0,3 mg L ⁻¹ Tiramina 0,19 mg L ⁻¹	Deteção de aminas biogênicas em amostras de queijos	Smartphone	71
DIB	50,0-200,0 unid./ mL ^{-1c}	--	Avaliação da atividade inibitória da tirosinase em extratos de Salak	Smartphone e Câmera Digital	111
DIB	10,0-130,0 mg dL ⁻¹	--	Monitoramento em tempo real da glicose no sangue	Smartphone	112
FDIB	17,44-90,0 µmol L ⁻¹	3,3 µmol L ⁻¹	Quantificação de hipoclorito de sódio em tapetes sanitizantes	Smartphone	15
DIB	8,0-140 mg L ⁻¹	2,6 mg L ⁻¹	Quantificação de sulfito em bebidas	Smartphone	48
DIB	1,0-60,0 mg L ⁻¹	0,005 mg L ⁻¹	Deteção do ácido ascórbico em sucos naturais de frutas	Webcam	113
DIB	10,0-300,0 mg L ⁻¹	--	Deteção de dióxido de enxofre em alimentos	Smartphone	114
DIB	0,5-5,0 mmol L ⁻¹	0,028 mmol L ⁻¹	Análise de componentes alimentares através da enzima desidrogenase	Smartphone	115
DIB	5,0-35,0 mg 100 mL ⁻¹	1,5 mg 100 mL ⁻¹	Determinação de metanol em cachaça	Smartphone	116
DIB	10,0-70,0 % (v/v)	1,72 % (v/v)	Determinação de etanol em cachaça	Smartphone	117
DIB	0,047-1,0 µg mL ⁻¹	46,5 µg mL ⁻¹	Deteção de Ferro total em amostras de água e alimentos	Scanner	118
DIB	--	3,72 x 10 ⁻² µmol L ⁻¹	Determinação do pesticida paraoxon	Smartphone	119
DIB	0-2,0 mg dm ⁻³	0,2 mg dm ⁻³	Deteção de Ferro em amostras de água de rio	Câmera Digital	120
DIB	Método DPD ^d 0,6-2,5 mg L ⁻¹ Método OT ^d 0,1-2,3 mg L ⁻¹	Método DPD 0,023 mg L ⁻¹ Método OT 0,077 mg L ⁻¹	Determinação de cloro livre em água potável	Smartphone	121
FDIB	0,1-0,5 mg mL ⁻¹	0,03 mg mL ⁻¹	Determinação de paracetamol em comprimidos	Webcam	122

^ammoles min⁻¹ = Kat. ^bDensidade óptica de uma amostra medida em um comprimento de onda de 600 nm. ^cUnidade de Tirosinase. ^dMétodo DPD (*N,N*-dietil-*p*-fenilenodiamina) e OT (orto-tolidina, 3,3-dimetilbenzidina) para deteção de cloro livre residual em água.

experiências em laboratórios de ensino de graduação, onde o smartphone têm sido uma ferramenta que propicia acesso à ciência, inclusão social, comprometimento, descobertas científicas, uma vez que os alunos podem usar seus próprios smartphones nos experimentos, independente dos recursos das universidades ou das escolas. Dessa forma, smartphones foram utilizados para obtenção da constante termodinâmica do equilíbrio químico de ácido-base da molécula do azul de bromotimol usando imagens digitais e obtenção de dados de RGB com o aplicativo gratuito Color Grab. Os ganhos didáticos foram obtidos por meio do entendimento dos conceitos de fotometria de absorção molecular, reflectância, absorvidade molecular, lei de Lambert-beer, discussão de cor complementar.

Outros exemplos do impacto do método baseado em imagens digitais no ensino de química são reportados nesta revisão. Para isso, fez-se uma busca sobre trabalhos que são desenvolvidos, principalmente, em aulas práticas de Química. Nesse sentido, Safranko *et al.*⁵² utilizaram o

aplicativo ColorX para determinar os valores de RGB através da imagem digital, a fim de quantificar a concentração de KMnO₄, CuSO₄, NiSO₄ e CoSO₄ em soluções aquosas, durante uma aula prática de química analítica.

Ademais, Gamonchuang *et al.*¹²⁴ utilizaram a colorimetria de imagem digital baseada na reação de diazotização e a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) para fins de triagem rápida para quantificação de carbamato em frutas e vegetais. Destaca-se o trabalho realizado por Ledesma *et al.*,¹²⁵ em que os alunos conseguiram determinar o conteúdo fenólico total em cervejas usando um ensaio de Folin-Ciocalteu, que é um complexo amarelo que reage com fenóis transformando-o em um complexo azul, medindo os valores do canal R usando ImageJ e o plugin ReafPlate. De modo semelhante, Zhao *et al.*¹²⁶ determinaram o teor de vitamina C em frutas e vegetais a partir do DIB e obtiveram limites de deteção (LD) e quantificação (LQ) iguais a 0,24 µg mL⁻¹ e 0,81 µg mL⁻¹, respectivamente, indicando que o método da imagem digital

se mostrou sensível à baixas concentrações do analito, comparando-se a métodos de referência e tradicionais que usam um espectrofotômetro comercial. Similarmente, Coutinho *et al.*¹²⁷ utilizaram o DIB como método analítico para quantificação de ácido ascórbico, usando o método de referência, baseado em espectrofotometria UV-Vis, para fins de comparação. Trivellini *et al.*¹²⁸ utilizaram das vantagens do DIB para analisar o teor de antocianinas em pétalas de hibisco, que devido a sua simplicidade, versatilidade e baixo custo, torna-se uma forma eficiente para avaliar as características químicas desta flor, uma vez que, para realizar as análises é necessário apenas poucos reagentes, um celular e/ou um computador para tratar os dados. Ling *et al.*¹²⁹ também trabalharam com seus alunos e construíram microdispositivos, a base de células de eletrolise caseiras, a fim de eletrolisar convenientemente a água e usaram o DIB para analisar de bolhas de gases gerados, e encontrar o volume de gás hidrogênio e oxigênio na amostra.

Uma prática comum em aulas práticas de Química Analítica é a determinação da dureza da água via titulação do íon cálcio. Lopez-Molinero *et al.*¹³⁰ conseguiram determinar Ca^{2+} pelo método colorimétrico usando RGB e obtiveram LD de $0,07 \text{ mg L}^{-1}$. Nesta análise utilizou-se o método cromogênico formado pela reação entre íons Ca(II) , hidróxido de sódio (NaOH) e glioxal-bis(2-hidroxianil), resultando em uma solução com coloração laranja-avermelhada em meio alcalino. O método apresentou um comportamento linear em função da concentração dos íons Ca(II) , com uma faixa de $0,2\text{-}2,0 \text{ mg L}^{-1}$, com resultados compatíveis com Absorção Atômica em Chama (FAAS).

Outra prática popular é o estudo do pH em amostras aquosas. Damasceno *et al.*¹⁰ propuseram uma atividade laboratorial em que os estudantes teriam que analisar dados obtidos usando DIB para determinar o valor de pH de amostras de água potável. Uma calibração com soluções tampões fosfato (pH 5,00 a 9,02) foi feita, e utilizou-se azul de bromotimol como indicador ácido-base. As soluções de referência e as amostras foram transferidas para uma microplaca de poliestireno de alta transparência e colocadas no centro de um *scanner* de mesa (HP 2400). As imagens foram analisadas pelo *software* GNU Octave que analisou os valores de RGB. Este trabalho obteve valores de pH equivalentes ao método potenciométrico usado como método de referência, o qual usa um eletrodo convencional de vidro combinado para medir a atividade do íon H_3O^+ , e assim, o pH da solução.

Em aulas de Bioquímica e na área alimentícia é habitual se estudar os processos de escurecimento enzimático em frutas. Pensando nisso, Lupetti *et al.*¹³¹ realizaram um experimento simples e didático para monitorar por meio de imagens digitais esse efeito nas frutas, iniciado devido a reação de oxidação enzimática de compostos fenólicos (*polifenóis oxidados* PPO). A análise foi otimizada padronizando a luminosidade do local pelo uso de uma lâmpada de luz branca, temperatura, uma câmera digital e o corte de maçã, banana e pera. Em uma placa adicionaram

uma fatia da fruta, sobre a qual adicionaram soluções de um antioxidante, mantendo-a protegida durante a reação e a partir das imagens analisaram a intensidade das cores e correlacionaram com o escurecimento. Desse modo, foi possível a criação de estratégias e metodologias para ensinar e demonstrar como as reações de oxi-redução enzimáticas com polifenóis naturais acontecem e suas principais variáveis.

A quantificação de aspirina em comprimidos farmacêuticos¹³² foi realizada por um grupo de estudantes utilizando um *scanner* de mesa. Os autores realizaram uma reação colorimétrica onde o ácido acetilsalicílico foi hidrolisado a salicilato, em meio alcalino, reagindo em seguida com uma solução ácida de Fe^{3+} para formar um complexo violeta. Os resultados obtidos com o método proposto e o método por Espectrofotometria UV/Vis foram comparados usando um Teste-F e um Teste-T. Ambos os métodos mostraram acurácia e precisão equivalentes ao nível de confiança de 95%.

Kohl *et al.*¹³³ elaboraram um experimento simples para aulas de Química envolvendo o princípio da lei de Lambert-Beer, para isso, uma solução estoque de água com corante alimentício amarelo foi preparada e, a partir dela, foram feitas diluições em água. As soluções foram fotografadas e analisadas pelo *software* ImageJ, sendo possível analisar os canais RGB, sendo o canal azul aquele com maior linearidade ($R^2 = 0,9996$, demonstrando a possibilidade da aplicação do método DIB na determinação das concentrações corantes em amostras de alimentos).

Filgueiras M. F. *et al.*¹⁶ trabalharam com seus alunos um método para a quantificação de nitrito em amostras de alimentos. Para esse, foi utilizado o ensaio de Griess, sendo a análise quantitativa realizada usando a absorbância medida em 540 nm (método padrão) e pelas imagens da placa de 96 poços (método proposto) obtidas com um *scanner* de mesa. Os limites de detecção e quantificação para o método proposto e para o método padrão foram de $1,6$ e $4,1 \mu\text{mol L}^{-1}$ contra $1,1$ e $3,4 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente. Gee *et al.*⁴⁴ descreveram dois métodos colorimétricos comuns para a quantificação de proteínas através do smartphone. Outros trabalhos referentes à quantificação e detecção de proteínas também são reportados na literatura.¹³⁴ Filgueiras *et al.*¹³⁵ propuseram um método para quantificação de ferro em suplementos alimentares utilizando quatro ensaios colorimétricos. Esses ensaios foram seletivos a Fe^{3+} , sendo este complexado por tiocianeto, salicilato, ácido gálio e Fe(CN)_6^{4-} , gerando soluções de coloração vermelho-sangue, vermelho, violeta e complexos azuis, respectivamente. Cada imagem digital foi obtida por um *scanner* de mesa. O ensaio envolvendo o $\text{K}_4[\text{Fe(CN)}_6]$ se mostrou inofensivo e mais barato comparado aos outros três. Todos os ensaios mostraram uma alta especificidade para o Fe(III) .

Yadav *et al.*¹³⁶ desenvolveram um método simples para aulas práticas para quantificação de fluoreto em água potável, mediante o emprego do quimiossensor

carbotoioamida. A determinação de conteúdo fenólico total em cervejas¹²⁵ foi realizada por estudantes usando o ensaio de Folin-Ciocalteu, que é um complexo amarelo em meio alcalino e reage com fenóis e substâncias redutoras não fenólicas para formar um complexo azul. Colzani *et al.*¹³⁷ desenvolveram uma metodologia para ser aplicada em aulas experimentais de química que consistiu na determinação percentual em massa de manganês em baterias. Os autores usaram imagens obtidas de um scanner de mesa. Para essa finalidade 100 mg dos insumos que constituem a bateria foram digeridos em ácido nítrico e posteriormente oxidado com MnO_4^- usando IO_4^- . As soluções foram armazenadas em uma plataforma de 96 poços, onde tiveram seus valores de RGB extraídos pelo software ImageJ.

Trabalhos como este são muito eficientes para serem empregados em locais com poucos recursos, sendo uma ótima estratégia para exemplificação de um conteúdo presente nos cursos de Química. Assim, como o experimento realizado por Colzani *et al.*,¹³⁸ uma turma de engenharia química utilizou o método do azul de molibdênio para quantificar o teor de fósforo em refrigerantes (Pepsi, coca-cola, coca-cola zero e guaraná black). A extração dos valores de RGB foi realizada utilizando o software ImageJ. Esse experimento foi categorizado como simples e de baixo custo, uma vez que, se utiliza apenas 50 μL de reagente para análises.

Santos *et al.*¹³⁹ que trabalharam com a webcam para determinar nitrato e nitrito em águas naturais, utilizando o Software ImageJ para quantificação. Enquanto isso, De Souza *et al.*¹⁴⁰ utilizaram um *scanner* para determinar quantitativamente Fe(II) em amostras farmacêuticas, na qual obteve valor semelhante ao método mais robusto, espectrofotométrico. Da mesma maneira, Da Silva *et al.*⁵⁸ utilizaram um *scanner* de mesa convencional para análises qualitativas e quantitativas dos corantes de amino-

nitroquinozalina. Em ambos os casos, DIB foi empregado usando dados de RGB, com base nesses valores, criou-se as curvas analíticas que possibilitaram as outras análises, isto é: cinética química, absorvância e a curva de correlação, por exemplo.

Com base nos trabalhos descritos, utilização da análise digital como método analítico se destaca devido a sua praticidade e alta acessibilidade.¹²⁷ Pode-se afirmar que a utilização do DIB em análises químicas é explorada de forma qualitativa e quantitativa, obtendo resultados satisfatórios, com comportamento linear, LD e LQ baixos e erros relativos inferiores a 5%, como apresentado para as referências citadas anteriormente.

Devido às características das análises por DIB é possível a quantificação de adulterantes em leite cru,⁵⁶ detecção de ozônio e hipoclorito em águas,¹⁴¹ entre outros analitos e matrizes, viabilizando a utilização deste método em sala de aula, e em campo, uma vez que, podem substituir o uso do espectrofotômetro (instrumento de alto custo para escolas públicas de algumas regiões e de reduzida portabilidade). FDIB chega a ser ainda mais atrativo pois o custo de um espectrofluorímetro é no mínimo o triplo de um espectrofotômetro, o que torna ainda mais inviável o uso de um espectrofluorímetro para fins de ensino em muitas instituições de ensino superior, e mais agravante em escolas públicas do ensino médio.^{2,14,15,32}

Assim, foi possível visualizar a aplicação em diversas áreas de estudo, principalmente pelo baixo custo do equipamento, uma vez que, é utilizado apenas um equipamento de captura de imagem (celular/scanner/câmera digital) e um *software* capaz de fazer as leituras em diversos canais de imagem, com imagens obtidas em um meio de iluminação controlada, e uniforme. Outros trabalhos referentes às aplicações de DIB no ensino da química estão listados na Tabela 2.

Tabela 2. Alguns dos trabalhos reportados na literatura acerca da utilização do método usando imagens digitais aplicado ao ensino da Química, com ou sem a participação de alunos.

Analito (s)	Aplicação	Dispositivo	Participação dos alunos	Ref.
Ácido gálico	Determinar o conteúdo fenólico total em cervejas	scanner	sim	125
Azul de Timol	Determinar o pKa do indicador Azul de Timol	smartphone	sim	142
Amônia, Brometo, Fosfato e Nitrato	Quantificar de forma econômica e em microescala componentes presentes na água	scanner	sim	143
Aspirina	Quantificar ácido salicílico na aspirina comercial	scanner	sim	144
Biodiesel	Estudar o efeito solvatocrômico do corante Cloreto do nilo	smartphone	sim	59
Caseína	Quantificar o teor de proteína na cerveja, leite e leite em pó	scanner	sim	134
Corante alimentar amarelo	Construir um espectrofotômetro artesanal e validar a lei de Lambert-Beer	câmera digital	sim	145
Corante alimentício amarelo	Demonstrar a lei Lambert-Beer	câmera digital	-	133
Corante alimentício verde	Determinar figuras de mérito analítico	smartphone	sim	60
Ferro	Quantificar ferro (III) dissolvido em soluções aquosas	smartphone	sim	61

Tabela 2. Alguns dos trabalhos reportados na literatura acerca da utilização do método usando imagens digitais aplicado ao ensino da Química, com ou sem a participação de alunos. (cont.)

Analito (s)	Aplicação	Dispositivo	Participação dos alunos	Ref.
Ferro	Identificar a estabilidade do complexo na determinação do número de ligantes	smartphone	sim	146
Flúor	Quantificar íons de flúor na água	smartphone	sim	136
Fosfato	Determinar fosfato em refrigerantes	scanner	-	138
Oxigênio	Determinar o volume de um gás em um dispositivo de eletrólise miniaturizado	smartphone	sim	129
Sódio	Quantificar sódio em água de coco	smartphone	sim	147
KMnO ₄	Construir um fotômetro e determinar concentração de uma amostra desconhecida	smartphone	sim	148
KMnO ₄	Incentivar e explorar aplicações com o DIB	smartphone	sim	149
Manganês	Quantificar Manganês em pilhas	scanner	-	137
Mercúrio	Usando AgNPs para determinação de mercúrio (II)	câmera digital	sim	150
Nanopartículas de ouro	Quantificar nanopartícula de ouro em suplementos alimentares	smartphone	sim	151
Nitrato	Apresentar um espectrofotômetro de baixo custo e demonstrar a lei de Lambert-Beer	smartphone	sim	152
Permanganato de potássio	Medir coeficientes de difusão binários de soluções líquidas	smartphone	sim	153
Proteína BSA	Quantificar a concentração de proteínas pelo método Biureto	smartphone	sim	44
Caseína	Quantificação da proteína caseína do soro do leite	smartphone	sim	154
Ferro III	Determinar teor de Fe(III) usando papel de curcumina	smartphone	sim	155
Hidróxido de Sódio	Comparar o método de titulação tradicional com titulação via DIB	smartphone	sim	156
Violeta cristal	Determinar leis da velocidade	smartphone	sim	157
Vitamina C	Determinar o teor de vitamina C em frutas e vegetais	câmera digital	não	126
Zinco	Determinar óxido de zinco em pomadas	webcam	não	158
Azul de Bromotimol	Determinar o pKa do Azul de Bromotimol	smartphone	sim	2
Amarelo-Laranja S	Quantificar o corante Amarelo-Laranja S em suco em pó	smartphone e scanner	sim	159

^a variação da 1,10-fenantrolina em volume. ^b % (v/v)

6. Conclusões

A imagem digital é uma excelente alternativa a instrumentação analítica convencional, uma vez que se pode medir determinados analitos em amostras diversas para fins qualitativos e quantitativos. A abordagem geralmente emprega softwares gratuitos e instrumentação simples para realização da atividade. O Uso de DIB traz vantagens como instrumentação analítica simples, de baixo custo, acessível, frente aos equipamentos de referência, os benefícios que a ferramenta traz para o ensino são imensuráveis, pois permite uma riqueza de detalhes e aplicações práticas aos alunos, com melhorias na aprendizagem do aluno no campo da química, o que diminui consideravelmente o nível de abstração das aulas.

Assim, o uso da imagem digital pode conferir aos alunos do ensino médio, técnico e superior uma maior motivação, altruísmo e possibilidades, tornando a química mais atrativa e garantindo um melhor aprendizado. Além disso, é uma excelente ferramenta alternativa para diversas análises que possuem custo relativamente alto, é portátil, de fácil operação, simples e dedutiva, podendo ser otimizada e melhorada a qualidade de suas imagens por softwares e aplicativos gratuitos e leves para download, e que podem ser utilizados os próprios celulares dos alunos, cujo acesso hoje é amplo. Por ser acessível, métodos baseados em imagens digitais permitem diminuir desigualdades econômicas, tecnológicas, inserção e inclusão científica, levando a ciência às escolas, a feiras de ciências, comunidades, centros sociais, entre outros ambientes sensíveis, invisíveis, negligenciados ou marginalizados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (421147/2018-0), FACEPE (APQ-0942-1.06/22, APQ-0413-1.06/21), NUQAAPE/FACEPE (APQ-0346-1.06/14), INCT-Onseadpata e FAPEMIG (APQ-01889-21) pelos recursos e a CAPES (Finance Code 001), pelas bolsas concedidas.

Contribuições do Autor

Claudinéia Rosa da Silva Oliveira: Conceituação, Pesquisa, Visualização, Redação do rascunho original, Redação-revisão, Edição. **Willian Toito Suarez:** Curadoria de dados, Administração de projetos, Aquisição de financiamento para análise formal, Administração de projetos, Supervisão, Redação-revisão, Edição. **Helena Rosa dos Anjos Nahas:** Redação-revisão. **Fábio Junior Moreira Novaes:** Curadoria de dados, Visualização, Supervisão, Redação-revisão. **Vagner Bezerra dos Santos:** Curadoria de dados, Administração de projetos, Aquisição de financiamento para análise formal, Administração de projetos, Supervisão, Redação-revisão, Edição. **João Paulo Barbosa de Almeida:** Curadoria de dados, Visualização, Redação-revisão, Edição.

Referências Bibliográficas

- Klein, V.; Barin, C. S. Histórias em quadrinhos como elemento de flexibilização do ensino de química. *Rev. Bras. Ensino Ciência e Tecnol.* **2019**, *12*, 54. [[Crossref](#)]
- dos Santos, V. B.; de Oliveira, W.; de Almeida, J. P.; Foguel, M.; Suarez, W.; de Oliveira, J. RGB-LED-Photometer and the digital image-based method using a smartphone for chemistry and physics teaching. *Quim. Nova* **2023**, *9*, 924. [[Crossref](#)]
- Kobayashi, R.; Goumans, T. P. M.; Carstensen, N. O.; Soini, T. M.; Marzari, N.; Timrov, I.; Poncé, S.; Linscott, E. B.; Sewell, C. J.; Pizzi, G.; Ramirez, F.; Bercx, M.; Huber, S. P.; Adorf, C. S.; Talirz, L. Virtual Computational Chemistry Teaching Laboratories - Hands-On at a Distance. *J. Chem. Educ.* **2021**, *98*, 3163. [[Crossref](#)]
- Delamuta, B. H.; Neto, J. C.; Junior, S. L. S.; Assai, N. D. de S. O uso de aplicativos para o ensino de Química: *Rev. Estud. e Pesqui. sobre Ensino Tecnológico* **2021**, *7*, e145621. [[Crossref](#)]
- Firdaus, M. L.; Saputra, E.; Ginting, S. M.; Wyantuti, S.; Eddy, D. R.; Rahmidar, L.; Yuliarto, B. Smartphone-based digital image colorimetry for non-enzymatic detection of glucose using gold nanoparticles. *Sens. Bio-Sensing Res.* **2022**, *35*, 5. [[Crossref](#)]
- Mentienne, A. *La Découverte de la Photographie en 1839* 1892.
- Hauron, A. D.; Hauron, L. D. T. Traité pratique de photographie des couleurs: système de héliochromie. *Ariane Isler-de Jong.* **1878**, *35*, 247. [[Link](#)]
- Nobel Prize.org; Prêmio Nobel de Física 2009. **2023**, *1*. [[Link](#)]
- Palum, R. Image Sampling with the Bayer Color Filter Array. *Soc. Imaging Sci. Technol. Image Process. Image Qual. Image Capture, Syst. Conf.* **2001**, 239.
- Damasceno, D.; Toledo, T. G.; Godinho, M. S.; Da Silva, C. P.; De Oliveira, S. B.; De Oliveira, A. E. Análise multivariada de imagens na química: um experimento para determinação do pH de águas potáveis. *Quim. Nov.* **2015**, *38*, 836. [[Crossref](#)]
- Hirayama, T. The evolution of CMOS image sensors. *Proc. 2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conf. A-SSCC 2013* **2013**, *5*. [[Crossref](#)]
- Magnan, P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **2003**, *504*, 199. [[Crossref](#)]
- Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; dos Santos, V. B.; Resque, I. S. A novel digital image method for determination of reducing sugars in aged and non-aged cachaças employing a smartphone. *Food Chem.* **2021**, *338*, 127800. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- da Silva, E. K. N.; dos Santos, V. B.; Resque, I. S.; Neves, C. A.; Moreira, S. G. C.; Franco, M. de O. K.; Suarez, W. T. A fluorescence digital image-based method using a 3D-printed platform and a UV-LED chamber made of polyacid lactic for quinine quantification in beverages. *Microchem. J.* **2020**, *157*. [[Crossref](#)]
- de Almeida, J. P. B.; dos Santos, V. B.; do Nascimento, G. A.; Suarez, W. T.; de Azevedo, W. M.; Ferreira, A. F.; Maia, M. V. A fluorescence digital image-based method using carbon quantum dots to evaluate the compliance of a biocidal agent. *Anal. Methods* **2022**, *14*, 2631. [[Crossref](#)]
- Filgueiras, M. F.; de Jesus, P. C.; Borges, E. M. Quantification of Nitrite in Food and Water Samples Using the Griess Assay and Digital Images Acquired Using a Desktop Scanner. *J. Chem. Educ.* **2021**, *98*, 3303. [[Crossref](#)]
- Soares, S.; Rocha, F. R. P. Spot test for determination of uric acid in saliva by smartphone-based digital images: A new proposal for detecting kidney dysfunctions. *Microchem. J.* **2021**, *162*. [[Crossref](#)]
- Pessoa, K. D.; Suarez, W. T.; dos Reis, M. F.; Franco, M. O. K.; Moreira, R. P. L.; dos Santos, V. B. A digital image method of spot tests for determination of copper in sugar cane spirits. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2017**, *185*, 310. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Curbani, L.; Gelinski, J. M. L. N.; Borges, E. M. Determination of Ethanol in Beers Using a Flatbed Scanner and Automated Digital Image Analysis. *Food Anal. Methods* **2020**, *13*, 249. [[Crossref](#)]
- Li, W.; Hu, X.; Li, Q.; Shi, Y.; Zhai, X.; Xu, Y.; Li, Z.; Huang, X.; Wang, X.; Shi, J.; Zou, X.; Kang, S. Copper nanoclusters @ nitrogen-doped carbon quantum dots-based ratiometric fluorescence probe for lead (II) ions detection in porphyrin. *Food Chem.* **2020**, *320*, 126623. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Shan, Y.; Wang, B.; Huang, H.; Jian, D.; Wu, X.; Xue, L.; Wang, S.; Liu, F. On-site quantitative Hg²⁺ measurements based on selective and sensitive fluorescence biosensor and miniaturized smartphone fluorescence microscope. *Biosens. Bioelectron.* **2019**, *132*, 238. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Wang, S.; Huang, Y.; Zhang, L.; Li, F.; Lin, F.; Wang, Y.; Chen, X. Highly selective fluorescence turn-on determination of Pb (II) in Water by in-situ enrichment of Pb (II) and MAPbBr

- 3 perovskite growth in sulfhydryl functionalized mesoporous alumina film. *Sensors Actuators B. Chem.* **2021**, 326, 128975. [[Crossref](#)]
23. Zhao, Z.; Wei, L.; Cao, M.; Lu, M. A smartphone-based system for fluorescence polarization assays. *Biosens. Bioelectron.* **2019**, 128, 91. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
24. Sun, Y.; Wei, M.; Liu, R.; Wang, H.; Li, H.; Kang, Q.; Shen, D. A smartphone-based ratiometric fluorescent device for field analysis of soluble copper in river water using carbon quantum dots as luminophore. *Talanta* **2019**, 194, 452. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
25. Maleki, N.; Safavi, A.; Sedaghatpour, F. Single-step calibration, prediction and real samples data acquisition for artificial neural network using a CCD camera. *Talanta* **2004**, 64, 830. [[Crossref](#)]
26. Gaião, E. da N.; Martins, V. L.; Lyra, W. da S.; de Almeida, L. F.; da Silva, E. C.; Araújo, M. C. U. Digital image-based titrations. *Anal. Chim. Acta* **2006**, 570, 283. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
27. Silva Lyra, W.; dos Santos, V. B.; Dionízio, A. G. G.; Martins, V. L.; Almeida, L. F.; Nóbrega Gaião, E.; Diniz, P. H. G. D.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U. Digital image-based flame emission spectrometry. *Talanta* **2009**, 77, 1584. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
28. Böck, F. C.; Helfer, G. A.; da Costa, A. Ben; Dessuy, M. B.; Ferrão, M. F. PhotoMetrix and colorimetric image analysis using smartphones. *J. Chemom.* **2020**, 34, 1. [[Crossref](#)]
29. Suarez, W. T.; Pessoa-Neto, O. D.; dos Santos, V. B.; de Araujo Nogueira, A. R.; Faria, R. C.; Fatibello-Filho, O.; Puyol, M.; Alonso, J. A compact miniaturized continuous flow system for the determination of urea content in milk. *Anal. Bioanal. Chem.* **2010**, 398, 1525. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
30. Pessoa-Neto, O.; dos Santos, V. B.; Vicentini, F.; Suarez, W.; Alonso-Chamarro, J.; Fatibello-Filho, O.; Faria, R. A low-cost automated flow analyzer based on low temperature co-fired ceramic and LED photometer for ascorbic acid determination. *Cent. Eur. J. Chem* **2014**, 12, 341. [[Crossref](#)]
31. Skoog, D. A.; Holler, F. J.; Crouch, S. R. *Análise Instrumental*, Brooks/Col, 2007.
32. Silva, W. R. F.; Suarez, W. T.; Reis, C.; dos Santos, V. B.; Carvalho, F. A.; Reis, E. L.; Vicentini, F. C. Multifunctional Webcam Spectrophotometer for Performing Analytical Determination and Measurements of Emission, Absorption, and Fluorescence Spectra. *J. Chem. Educ.* **2021**, 98, 1442. [[Crossref](#)]
33. Machado, A. M. L.; Mitishita, E. A. Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados lidar. *Bol. Ciências Geod.* **2006**, 12, 215. [[Link](#)]
34. Gonzalez, R.C.; Woods, R. . *Processamento digital de imagens*. 3a. Ed. Pearson: São Paulo, 2010.
35. Capitán-Vallvey, L. F.; López-Ruiz, N.; Martínez-Olmos, A.; Erenas, M. M.; Palma, A. J. Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review. *Anal. Chim. Acta* **2015**, 899, 23. [[Crossref](#)]
36. de Oliveira, L. M. A.; dos Santos, V. B.; da Silva, E. K. N.; Lopes, A. S.; Dantas-Filho, H. A. An environment-friendly spot test method with digital imaging for the micro-titration of citric fruits. *Talanta* **2020**, 206, 120219. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
37. Fan, Y.; Li, J.; Guo, Y.; Xie, L.; Zhang, G. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: A review. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **2021**, 171, 108829. [[Crossref](#)]
38. Machado, A. M. L.; Mitishita, E. A. Detecção Automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LiDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas [em linea]*. 2006, v. 12(2), 2006, 215-233. ISSN: 1413-485. [[Link](#)]
39. Ibraheem, N. a; Hasan, M. M.; Khan, R. Z.; Mishra, P. K. Understanding Color Models : A Review. *ARPJ. Sci. Technol.* **2012**, 2, 265. [[Link](#)]
40. Li, W.; Zhang, X.; Miao, C.; Li, R.; Ji, Y. Fluorescent paper-based sensor based on carbon dots for detection of folic acid. *Anal. Bioanal. Chem.* **2020**, 412, 2805. [[Crossref](#)]
41. Mahato, K.; Chandra, P. Paper-based miniaturized immunosensor for naked eye ALP detection based on digital image colorimetry integrated with smartphone. *Biosens. Bioelectron.* **2019**, 128, 9. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
42. Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; dos Santos, V. B.; Resque, I. S.; dos Santos, M. H.; Capitán-Vallvey, L. F. Microanalysis based on paper device functionalized with cuprizone to determine Cu²⁺ in sugar cane spirits using a smartphone. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2021**, 253. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
43. Resque, I. S.; dos Santos, V. B.; Suarez, W. T. An environmentally friendly analytical approach based on spot test and digital image to evaluate the conformity of bleaching products. *Chem. Pap.* **2019**, 73, 1659. [[Crossref](#)]
44. Gee, C. T.; Kehoe, E.; Pomerantz, W. C. K.; Penn, R. L. Quantifying Protein Concentrations Using Smartphone Colorimetry: A New Method for an Established Test. *J. Chem. Educ.* **2017**, 94, 941. [[Crossref](#)]
45. Paciornik, S.; Yallouz, A. V.; Campos, R. C.; Gannerman, D. Scanner image analysis in the quantification of mercury using spot-tests. *J. Braz. Chem. Soc.* **2006**, 17, 156. [[Crossref](#)]
46. Benedetti, L. P. dos S.; dos Santos, V. B.; Silva, T. A.; Filho, E. B.; Martins, V. L.; Fatibello-Filho, O. A digital image-based method employing a spot-test for quantification of ethanol in drinks. *Anal. Methods* **2015**, 7, 4138. [[Crossref](#)]
47. Mohamed, A. A.; Shalaby, A. A. Digital imaging devices as sensors for iron determination. *Food Chem.* **2019**, 274, 360. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
48. Benedetti, L. P. dos S.; dos Santos, V. B.; Silva, T. A.; Benedetti-Filho, E.; Martins, V. L.; Fatibello-Filho, O. A digital image analysis method for quantification of sulfite in beverages. *Anal. Methods* **2015**, 7, 7568. [[Crossref](#)]
49. Maia, M.V.; Toito Suarez, W.; dos Santos, V. B.; Paulo Barbosa de Almeida, J. Carbon dots on paper for determination of Cu²⁺ in Sugar Cane Spirits samples for fluorescence digital image-based method. *Microchem. J.* **2022**, 179, 107500. [[Crossref](#)]
50. McCracken, K. E.; Yoon, J.-Y. Recent approaches for optical smartphone sensing in resource-limited settings: a brief review. *Anal. Methods* **2016**, 8, 6591. [[Crossref](#)]
51. Franco, M. O. K.; Dias Castro, G. A.; Vilanculo, C.; Fernandes, S. A.; Suarez, W. T. A color reaction for the determination of Cu²⁺ in distilled beverages employing digital imaging. *Anal. Chim. Acta* **2021**, 1177, 338844. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]

52. Šafranko, S.; Živković, P.; Stanković, A.; Medvidović-Kosanović, M.; Széchenyi, A.; Jokić, S. Designing ColorX, Image Processing Software for Colorimetric Determination of Concentration, to Facilitate Students' Investigation of Analytical Chemistry Concepts Using Digital Imaging Technology. *J. Chem. Educ.* **2018**, [Crossref]
53. Nogueira, S.; Sousa, L.; Silva, N.; Rodrigues, P.; Coltro, W. Monitoring Acid–Base Titrations on Wax Printed Paper Microzones Using a Smartphone. *Micromachines* **2017**, *8*, 139. [Crossref]
54. von Mühlen, L.; Prestes, O. D.; Ferrão, M. F.; Sirtori, C. Miniaturized Method for Chemical Oxygen Demand Determination Using the PhotoMetrix PRO Application. *Molecules* **2022**, *27*. [Crossref]
55. De Lourenço, E. C.; De Paula, S.; De Setti, G. O.; Toci, A. T.; Padilha, J. C.; Da Silva, E. M.; Boroski, M. Determination of iron content using the PhotoMetrix PRO® application: Technology in favor of teaching chemistry. *Rev. Virtual Quim.* **2021**, *13*, 192. [Crossref]
56. Da Costa, A. B.; Helfer, G. A.; Barbosa, J. L. V.; Teixeira, I. D.; Santos, R. O.; Dos Santos, R. B.; Voss, M.; Schlessner, S. K.; Barin, J. S. Photometrix uvc: A new smartphone-based device for digital image colorimetric analysis using pls regression. *J. Braz. Chem. Soc.* **2021**, *32*, 675. [Crossref]
57. Böck, F. C.; Helfer, G. A.; da Costa, A. B.; Dessuy, M. B.; Ferrão, M. F. Low cost method for copper determination in sugarcane spirits using Photometrix UVC® embedded in smartphone. *Food Chem.* **2022**, *367*, 1. [Crossref] [PubChem]
58. Da Silva, L. C.; De Lima, D. F.; Silva, J. A.; De Moraes, C. L. M.; Albuquerque, B. L.; Bortoluzzi, A. J.; Domingos, J. B.; Araújo, R. M.; Menezes, F. G.; Lima, K. M. G. Quantification of synthetic amino-nitroquinoxaline dyes: An approach using image analysis. *J. Braz. Chem. Soc.* **2016**, *27*, 1067. [Link]
59. Dos Santos, R. C.; Cabral Cavalcanti, J. N.; Werneck Do Carmo, E. C.; De Souza, F. C.; Soares, W. G.; Gimenes De Souza, C.; França De Andrade, D.; D'Avila, L. A. Approaching Diesel Fuel Quality in Chemistry Lab Classes: Undergraduate Student's Achievements on Determination of Biodiesel Content in Diesel Oil Applying Solvatochromic Effect. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97*, 4462. [Crossref]
60. Destino, J. F.; Cunningham, K. At-Home Colorimetric and Absorbance-Based Analyses: An Opportunity for Inquiry-Based, Laboratory-Style Learning. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97*, 2960. [Crossref]
61. Kehoe, E.; Penn, R. L. Introducing colorimetric analysis with camera phones and digital cameras: An activity for high school or general chemistry. *J. Chem. Educ.* **2013**, *90*, 1191. [Crossref]
62. Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; dos Santos, V. B.. Digital Image Method Smartphone-Based for Furfural Determination in Sugarcane Spirits. *Food Anal. Methods* **2017**, *10*, 508. [Crossref]
63. Moodley, K.; Murrell, H. A colour-map plugin for the open source, Java based, image processing package, ImageJ. *Comput. Geosci.* **2004**, *30*, 609. [Crossref]
64. Lind, R. *Open Source Software in Life Science Research*; Harland, L.,; Forster, M., orgs.; Woodhead Publishing, 2012.
65. Patntirapong, S.; Chanruangvanit, C.; Lavanrattanukul, K.; Satravaha, Y. Assessment of bisphosphonate treated-osteoblast behaviors by conventional assays and a simple digital image analysis. *Acta Histochem.* **2021**, *123*, 151659. [Crossref] [PubChem]
66. Helfer, G. A.; Magnus, V. S.; Böck, F. C.; Teichmann, A.; Ferrão, M. F.; Da Costa, A. B. PhotoMetrix: An application for univariate calibration and principal components analysis using colorimetry on mobile devices. *J. Braz. Chem. Soc.* **2017**, *28*, 328. [Link]
67. Böck, F. C.; Helfer, G. A.; Adilson, B.; Dessuy, M. B.; Ferrão, M. F. Método de baixo custo para determinação de cobre em aguardente de cana de açúcar usando Photometrix UVC® embutido no smartphone. *Food Chem.* **2022**, *367*, 130669. [Crossref]
68. LOOMATIX. *Acessado 20 maio 2022*. **2022**. [Link]
69. Fonseca, A.; Raimundo, I. M. A simple method for water discrimination based on an light emitting diode (LED) photometer. *Anal. Chim. Acta* **2007**, *596*, 66. [Crossref]
70. Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; Pereira, G. R. P.; Vilanculo, C. B.; Vieira, M. C. R.; dos Santos, V. B.; de Almeida, J. P. B. Using colorimetric spot test and digital imaging-based technique for volatile acidity determination in cachaça with the aid of a smartphone. *Microchem. J.* **2023**, *187*. [Crossref]
71. dos Santos, V. B.; Campos, E. F. S.; de Almeida, J. P. B.; Suarez, W. T.; Oliveira, C. R. S.; de Oliveira, S. C. B. Fluorescence digital image-based method to measure biogenic amines in Buffalo Mozzarella and other cheeses produced in Brazil. *Microchem. J.* **2023**, *189*. [Crossref]
72. Franco, M. O. K.; Cardoso, W. J.; Vilanculo, C. B.; dos Santos, V. B.; de Almeida, J. P. B.; Capitán-Vallvey, L. F.; Suarez, W. T. Using a biphasic system and digital imaging analysis with chemometric tools for simultaneous determination of Cu²⁺ and furfural in cachaça. *Anal. Methods* **2023**, *187*, 2300. [Crossref]
73. de Jesus, C. F. A.; Soares, M. H. F. B.; Mesquita, N. A. S.. O celular como possibilidade didática: instrumento mediador no processo de ensino aprendizagem de química. *Enseñanza de las ciencias. N. Extraordinário* **2017**, 1235. [Link]
74. Kelly, B. P.; Silva, C. R.; Lehrman, J. N.; Sawa, A. G. U.; de Andrada Pereira, B.; Godzik, J.; Turner, J. D. Use of digital imaging correlation techniques for full-field strain distribution analysis of implantable devices and tissue in spinal biomechanics research. *J. Biomech.* **2022**, *135*, 111025. [Crossref]
75. Brooks, E.; Comber, B.; McNaught, I.; Robertson, J. Digital imaging and image analysis applied to numerical applications in forensic hair examination. *Sci. Justice* **2011**, *51*, 28. [Crossref] [PubChem]
76. Vaughn, M. R.; van Oorschot, R. A. H.; Baidur-Hudson, S. A comparison of hair colour measurement by digital image analysis with reflective spectrophotometry. *Forensic Sci. Int.* **2009**, *183*, 97. [Crossref] [PubChem]
77. Yao, K.; Jing, X.; Cheng, J.; Balis, U. G. J.; Pantanowitz, L.; Lew, M. A Study of Thyroid Fine Needle Aspiration of Follicular Adenoma in the "Atypia of Undetermined Significance" Bethesda Category Using Digital Image Analysis. *J. Pathol. Inform.* **2022**, *13*, 100004. [Crossref]
78. Stone, J. L.; Peterson, R. L.; Wolf, J. E. Digital imaging techniques in dermatology. *J. Am. Acad. Dermatol.* **1990**, *23*, 913. [Crossref]
79. Kuo, R. L.; Preminger, G. M. Current Urologic Applications of Digital Imaging. *J. Endourol.* **2001**, *15*, 53. [Crossref]

80. Trimmis, K. P. An elegy of stone and light: Applying digital imaging methods for the recording of the Aegean stone kernoi in the context of Akrotiri, Thera. *J. Archaeol. Sci. Reports* **2021**, *40*, 103249. [Crossref]
81. Evsutin, O.; Dzhnashia, K. Watermarking schemes for digital images: Robustness overview. *Signal Process. Image Commun.* **2022**, *100*. [Crossref]
82. Thoby, J.-D.; Fourest, T.; Langrand, B.; Notta-Cuvier, D.; Markiewicz, E. Robustness of specimen design criteria for identification of anisotropic mechanical behaviour from heterogeneous mechanical fields. *Comput. Mater. Sci.* **2022**, *207*, 111260. [Crossref]
83. Gozukara, G.; Hartemink, A. E.; Zhang, Y. Illumination levels affect the prediction of soil organic carbon using smartphone-based digital images. *Comput. Electron. Agric.* **2023**, *204*, 107524. [Crossref]
84. Rossel, R. A. V.; Fouad, Y.; Walter, C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosyst. Eng.* **2008**, *100*, 149. [Crossref]
85. Jo, H. C.; Kim, S. H.; Lee, J.; Sohn, H. G.; Lim, Y. M. Sag-based cable tension force evaluation of cable-stayed bridges using multiple digital images. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **2021**, *186*. [Crossref]
86. Firdaus, M. L.; Saputra, E.; Ginting, S. M.; Wyantuti, S.; Eddy, D. R.; Rahmidar, L.; Yulianto, B. Smartphone-based digital image colorimetry for non-enzymatic detection of glucose using gold nanoparticles. *Sens. Bio-Sensing Res.* **2022**, *35*, 100472. [Crossref]
87. Patari, S.; Datta, P.; Mahapatra, P. S. 3D Paper-based milk adulteration detection device. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 13657. [Crossref]
88. dos Santos, V. B.; da Silva, E. K. N.; de Oliveira, L. M. A.; Suarez, W. T. Low cost in situ digital image method, based on spot testing and smartphone images, for determination of ascorbic acid in Brazilian Amazon native and exotic fruits. *Food Chem.* **2019**, *285*, 340. [Crossref] [PubChem]
89. Araújo, A.; Marinho, W.; de Araújo Gomes, A. A Fast and Inexpensive Chemometric-Assisted Method to Identify Adulteration in Acai (*Euterpe oleracea*) Using Digital Images. *Food Anal. Methods* **2018**, *11*, 1920. [Crossref]
90. Maroubou, L.; Melchert, W. Development of an Environmentally Friendly Extraction Method Using Smartphone-Based Digital Images for the Determination of Total Sulfonamides in Meat Samples. *J. Braz. Chem. Soc.* **2023**, *34*, 6. [Crossref]
91. Kajornklin, P.; Jarujamrus, P.; Phanphon, P.; Ngernpradab, P.; Supasorn, S.; Chairam, S.; Amatatongchai, M. Fabricating a Low-Cost, Simple, Screen Printed Paper Towel-Based Experimental Device to Demonstrate the Factors Affecting Chemical Equilibrium and Chemical Equilibrium Constant, Kc. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97*, 1984. [Crossref]
92. Böck, F. C.; Helfer, G. A.; da Costa, A. B.; Dessuy, M. B.; Ferrão, M. F. Rapid Determination of Ethanol in Sugarcane Spirit Using Partial Least Squares Regression Embedded in Smartphone. *Food Anal. Methods* **2018**, *11*, 1951. [Crossref]
93. Machado, T. R.; Fonseca, A. A new alternative method for quantitative analysis by thin layer chromatography using a lab-made multi-track device and image-based chromatograms. *Microchem. J.* **2019**, *147*, 127. [Crossref]
94. Silva Neto, G.F.; Rodrigues, M. L. A.; Fonseca, A. A new quantitative gel electrophoresis method with image-based detection for the determination of food dyes and metallic ions. *Talanta* **2021**, *221*, 121602. [Crossref] [PubChem]
95. Bernacki, J. Digital camera identification based on analysis of optical defects. *Multimed. Tools Appl.* **2020**, *79*, 2945. [Crossref]
96. Bellin, D. L.; Sakhtah, H.; Zhang, Y.; Price-Whelan, A.; Dietrich, L. E. P.; Shepard, K. L. Electrochemical camera chip for simultaneous imaging of multiple metabolites in biofilms. *Nat. Commun.* **2016**, *7*. [Crossref] [PubChem]
97. Villarino, N.; Lavilla, I.; Pena-Pereira, F.; Bendicho, C. Droplet-based luminescent sensor supported onto hydrophobic cellulose substrate for assessing fish freshness following smartphone readout. *Food Chem.* **2023**, *424*, 136475. [Crossref] [PubChem]
98. Tobiszewski, M.; Vakh, C. Analytical applications of smartphones for agricultural soil analysis. *Anal. Bioanal. Chem.* **2023**, *415*, 3703. [Crossref]
99. Ravazzi, C. G.; Franco, M. O. K.; Vieira, M. C. R.; Suarez, W. T. Smartphone application for captopril determination in dosage forms and synthetic urine employing digital imaging. *Talanta* **2018**, *189*, 339. [Crossref] [PubChem]
100. Pohanka, M. Photography by cameras integrated in smartphones as a tool for analytical chemistry represented by an butyrylcholinesterase activity assay. *Sensors (Switzerland)* **2015**, *15*, 13752. [Crossref] [PubChem]
101. Jacinto, C.; Maza Mejía, I.; Khan, S.; López, R.; Sotomayor, M. D. P. T.; Picasso, G. Using a Smartphone-Based Colorimetric Device with Molecularly Imprinted Polymer for the Quantification of Tartrazine in Soda Drinks. *Biosensors* **2023**, *13*, 639. [Crossref]
102. Permana, M. D.; Sakti, L. K.; Luthfiah, A.; Lutfi Firdaus, M.; Takei, T.; Eddy, D. R.; Rahayu, I. A Simple Methods for Determination of Methylene Blue using Smartphone-Based as Digital Image Colorimetry. *Trends Sci.* **2023**, *20*, 4. 5149. [Crossref]
103. Resende, L. M. B.; Magalhães, E. J.; Nunes, C. A. Optimization and validation of a smartphone-based method for the determination of total sterols in selected vegetable oils by digital image colorimetry. *J. Food Compos. Anal.* **2023**, *117*. [Crossref]
104. Li, R.; Sun, X.; Jiang, Y.; Liu, L.; Li, Y.; Yu, D.; Zhu, J.; Dong, S. Application study of RGB colorextraction in water toxicity detection. *Bioelectrochemistry* **2023**, *149*, 108270. [Crossref] [PubChem]
105. Firdaus, M. L.; Aprian, A.; Meileza, N.; Hitsmi, M.; Elvia, R.; Rahmidar, L.; Khaydarov, R. Smartphone coupled with a paper-based colorimetric device for sensitive and portable mercury ion sensing. *Chemosensors* **2019**, *7*, 2, 25. [Crossref]
106. Wongthanyakram, J.; Masawat, P. Rapid Low-Cost Determination of Lead(II) in Cassava by an iPod-Based Digital Imaging Colorimeter. *Anal. Lett.* **2019**, *52*, 550. [Crossref]
107. Choodum, A.; Sriprom, W.; Wongniramaikul, W. Portable and selective colorimetric film and digital image colorimetry for detection of iron. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2019**, *208*, 40. [Crossref] [PubChem]
108. Firdaus, M. L.; Alwi, W.; Trinoveldi, F.; Rahayu, I.; Rahmidar, L. Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. *Procedia Environ. Sci.* **2014**, *20*, 298. [Crossref]

109. Wang, Y.; Zeinhom, M. M. A.; Yang, M.; Sun, R.; Wang, S.; Smith, J. N.; Timchalk, C.; Li, L.; Lin, Y.; Du, D. A 3D-Printed, Portable, Optical-Sensing Platform for Smartphones Capable of Detecting the Herbicide 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid. *Anal. Chem.* **2017**, *89*, 9339. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
110. Ait Errayess, S.; Idrissi, L.; Amine, A. Smartphone-based colorimetric determination of sulfadiazine and sulfasalazine in pharmaceutical and veterinary formulations. *Instrum. Sci. Technol.* **2018**, *46*, 656. [[Crossref](#)]
111. Moonrungsee, N.; Peamaroon, N.; Boonmee, A.; Suwanchaoren, S.; Jakmune, J. Evaluation of tyrosinase inhibitory activity in Salak (*Salacca zalacca*) extracts using the digital image-based colorimetric method. *Chem. Pap.* **2018**, *72*, 2729. [[Crossref](#)]
112. Erenas, M. M.; Carrillo-Aguilera, B.; Cantrell, K.; Gonzalez-Chocano, S.; Perez de Vargas-Sansalvador, I. M.; de Orbe-Payá, I.; Capitan-Vallvey, L. F. Real time monitoring of glucose in whole blood by smartphone. *Biosens. Bioelectron.* **2019**, *136*, 47. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
113. Porto, I. S. A.; Santos Neto, J. H.; dos Santos, L. O.; Gomes, A. A.; Ferreira, S. L. C. Determination of ascorbic acid in natural fruit juices using digital image colorimetry. *Microchem. J.* **2019**, *149*, 104031. [[Crossref](#)]
114. Fu, L. M.; Liu, C. C.; Yang, C. E.; Wang, Y. N.; Ko, C. H. A PET/paper chip platform for high resolution sulphur dioxide detection in foods. *Food Chem.* **2019**, *286*, 316. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
115. Monošík, R.; dos Santos, V. B.; Angnes, L. A simple paper-strip colorimetric method utilizing dehydrogenase enzymes for analysis of food components. *Anal. Methods* **2015**, *7*, 8177. [[Crossref](#)]
116. Franco, M. O. K.; Suarez, W. T.; Maia, M. V.; dos Santos, V. B. Smartphone Application for Methanol Determination in Sugar Cane Spirits Employing Digital Image-Based Method. *Food Anal. Methods* **2017**, *10*, 2102. [[Crossref](#)]
117. Pessoa, K. D.; Suarez, W. T.; Lopes, R. P.; Dos Reis, M. F.; Franco, M. O. K.; dos Santos, V. B. Desenvolvimento E Validação De Metodologia Analítica Baseada Em Imagens Digitais De Spot Tests Para Determinação De Etanol Em Cachaça. *J. Eng. Exact Sci.* **2017**, *3*, 0995. [[Crossref](#)]
118. Peng, B.; Chen, G.; Li, K.; Zhou, M.; Zhang, J.; Zhao, S. Dispersive liquid-liquid microextraction coupled with digital image colorimetric analysis for detection of total iron in water and food samples. *Food Chem.* **2017**, *230*, 667. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
119. Pohanka, M.; Zakova, J.; Sedlacek, I. Digital camera-based lipase biosensor for the determination of paraoxon. *Sensors Actuators, B Chem.* **2018**, *273*, 610. [[Crossref](#)]
120. Suzuki, Y.; Endo, M.; Jin, J.; Iwase, K.; Iwatsuki, M. Tristimulus Colorimetry Using a Digital Still Camera and Its Application to Determination of Iron and Residual Chlorine in Water Samples. *Anal. Sci.* **2006**, *22*, 410. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
121. Nascimento, M. C. G. M.; Vieira, M. C. R.; R. P. Rocha, F.; Almeida Silva, T.; Suarez, W. T. Flow-based green ceramics microdevice with smartphone image colorimetric detection for free chlorine determination in drinking water. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2023**, *287*. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
122. Moura, H. S. R. P.; Mól, A. R.; Sampaio, T. R.; Fonseca, A. Image-based luminescence detection for quantitative determinations in continuous flow analysis microsystems. *Anal. Methods* **2018**, *10*, 5571. [[Crossref](#)]
123. Souza, V. C. A. Utilização de modelos e modelagem na educação contemporânea : (re) pensando a interlocução do ensino de Ciências da Natureza em um “ novo ” contexto de aprendizagens O ensino de ciências e seus desafios frente a uma “ nova ” proposta para a educação científica. *Rev. Interlocução* **2009**, *1*, 19.
124. Gamonchuang, J.; Santaladchayakit, Y.; Burakham, R. Magnetic Solid-Phase Extraction of Carbamate Pesticides Using Magnetic Metal–Organic Frameworks Derived from Benzoate Ligands, Followed by Digital Image Colorimetric Screening and High-Performance Liquid Chromatography Analysis. *ACS Omega* **2022**. [[Crossref](#)]
125. Ledesma, C. M.; Krepsky, L. M.; Borges, E. M. Using a Flatbed Scanner and Automated Digital Image Analysis to Determine the Total Phenolic Content in Beer. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 2315. [[Crossref](#)]
126. Zhao, W. Z.; Cao, P. P.; Zhu, Y. Y.; Liu, S.; Gao, H. W.; Huang, C. Q. Rapid detection of Vitamin C content in fruits and vegetables using a digital camera and color reaction. *Quim. Nova* **2020**, *43*, 1421. [[Crossref](#)]
127. Coutinho, M. S.; Morais, C. L. M.; Neves, A. C. O.; Menezes, F. G.; Lima, K. M. G. Colorimetric determination of ascorbic acid based on its interfering effect in the enzymatic analysis of glucose: An approach using smartphone image analysis. *J. Braz. Chem. Soc.* **2017**, *28*, 2500. [[Crossref](#)]
128. Trivellini, A.; Gordillo, B.; Rodríguez-Pulido, F. J.; Borghesi, E.; Ferrante, A.; Vernieri, P.; Quijada-Morín, N.; González-Miret, M. L.; Heredia, F. J. Effect of salt stress in the regulation of anthocyanins and color of Hibiscus flowers by digital image analysis. *J. Agric. Food Chem.* **2014**, *62*, 6966. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
129. Ling, Y.; Chen, P.; Li, J.; Zhang, J.; Chen, K. Using Image Recognition and Processing Technology to Measure the Gas Volume in a Miniature Water Electrolysis Device Constructed with Simple Materials. *J. Chem. Educ.* **2020**, *97*, 695. [[Crossref](#)]
130. Lopez-Molinero, A.; Cubero, V. T.; Irigoyen, R. D.; Piazuolo, D. S. Feasibility of digital image colorimetry - Application for water calcium hardness determination. *Talanta* **2013**, *103*, 236. [[Crossref](#)] [[PubChem](#)]
131. Lupetti, K. O.; Carvalho, L. C. de; Moura, A. F. de; Fatibello-Filho, O. Análise de imagem em química analítica: empregando metodologias simples e didáticas para entender e prevenir o escurecimento de tecidos vegetais. *Quim. Nova* **2005**, *28*, 548. [[Crossref](#)]
132. da Silva, R. S.; Borges, E. M. Quantitative Analysis Using a Flatbed Scanner: Aspirin Quantification in Pharmaceutical Tablets. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 1519. [[Crossref](#)]
133. Kohl, S. K.; Landmark, J. D.; Stickle, D. F. Demonstration of absorbance using digital color image analysis and colored solutions. *J. Chem. Educ.* **2006**, *83*, 644. [[Crossref](#)]
134. Figueiras, M. F.; Borges, E. M. Quick and Cheap Colorimetric Quantification of Proteins Using 96-Well-Plate Images. *J. Chem. Educ.* **2022**, *99*, 1778. [[Crossref](#)]

135. Filgueiras, M. F.; Borges, E. M. Iron Quantification in Dietary Supplements using Four Colorimetric Assays. *J. Chem. Educ.* **2022**, *99*, 2067. [[Crossref](#)]
136. Yadav, P.; Laddha, H.; Agarwal, M.; Gupta, R. Fun with Smartphones: Handy Solution for Quantification of Debilitating Fluoride Ions in Drinking Water. *J. Chem. Educ.* **2022**, *99*, 2677. [[Crossref](#)]
137. Colzani, H.; Scolaro, A. M. T.; Gelinski, J. M. L. N.; Borges, E. M. Manganese determination in battery using a flatbed scanner. *Rev. Virtual Quim.* **2017**, *9*, 1672. [[Crossref](#)]
138. Colzani, H.; Rodrigues, Q. E. A. G.; Fogaça, C.; Gelinski, J. M. L. N.; Pereira-Filho, E. R.; Borges, E. M. Determinação de fosfato em refrigerantes utilizando um scanner de mesa e análise automatizada de dados: um exemplo didático para ensino de química. *Quim. Nova* **2017**, *40*, 833. [[Crossref](#)]
139. Santos, J. L. O.; Leite, O. D.; Vieira, A. D. M.; Jesus, D. S.; Kamogawa, M. Y. Use of a digital image in flow analysis: Determination of nitrite and nitrate in natural waters. *J. Braz. Chem. Soc.* **2016**, *27*, 70. [[Crossref](#)]
140. De Souza, F. R.; Junior, G. F. D.; De Tarso Garcia, P.; Coltro, W. K. T. Avaliação de dispositivos de captura de imagens digitais para detecção colorimétrica em microzonas impressas. *Quim. Nova* **2014**, *37*, 1171. [[Crossref](#)]
141. Zampier, L.; Fernando de Oliveira, A.; Heleno, F.; de Queiroz, M. E.; Neves, A. A.; Olivo, S. Determination of Ozone or Hypochlorite in Waters Based on Digital Images Analysis Using Same Reagent. *J. Braz. Chem. Soc.* **2021**, *32*, 2140. [[Crossref](#)]
142. Yimkosol, W.; Dangkulwanich, M. Finding the pKa Values of a Double-Range Indicator Thymol Blue in a Remote Learning Activity. *J. Chem. Educ.* **2021**, *98*, 3930. [[Crossref](#)]
143. Soldat, D. J.; Barak, P.; Lepore, B. J. Microscale colorimetric analysis using a desktop scanner and automated digital image analysis. *J. Chem. Educ.* **2009**, *86*, 617. [[Crossref](#)]
144. Da Silva, R. S.; Borges, E. M. Quantitative Analysis Using a Flatbed Scanner: Aspirin Quantification in Pharmaceutical Tablets. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 1519. [[Crossref](#)]
145. Quagliano, J. M.; Marks, C. A. Demystifying Spectroscopy with Secondary Students: Designing and Using a Custom-Built Spectrometer. *J. Chem. Educ.* **2013**, *90*, 1409. [[Crossref](#)]
146. De Moraes, C. D. L. M.; Silva, S. R. B.; Vieira, D. S.; Lima, K. M. G. Integrating a Smartphone and Molecular Modeling for Determining the Binding Constant and Stoichiometry Ratio of the Iron(II)-Phenanthroline Complex: An Activity for Analytical and Physical Chemistry Laboratories. *J. Chem. Educ.* **2016**, *93*, 1760. [[Crossref](#)]
147. Moraes, E. P.; da Silva, N. S. A.; de Moraes, C. de L. M.; Neves, L. S. das; Lima, K. M. G. de Low-Cost Method for Quantifying Sodium in Coconut Water and Seawater for the Undergraduate Analytical Chemistry Laboratory: Flame Test, a Mobile Phone Camera, and Image Processing. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 1958. [[Crossref](#)]
148. Diawati, C.; Liliyasi; Setiabudi, A.; Buchari Using Project-Based Learning to Design, Build, and Test Student-Made Photometer by Measuring the Unknown Concentration of Colored Substances. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 468. [[Crossref](#)]
149. Šafranko, S.; Živković, P.; Stanković, A.; Medvidović-Kosanović, M.; Széchenyi, A.; Jokić, S. Designing ColorX, Image Processing Software for Colorimetric Determination of Concentration, to Facilitate Students' Investigation of Analytical Chemistry Concepts Using Digital Imaging Technology. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 1928. [[Crossref](#)]
150. Firdaus, M. L.; Parlindungan, D.; Sundaryono, A.; Rahmidar, L.; Maidartati, M.; Farid, M.; Amir, H. Development of Low-Cost Spectrophotometry Laboratory Practice Based on the Digital Image for Analytical Chemistry Subject. *Proc. 3RD ASIAN Educ. Symp. (AES 2018)* **2018**, 253, 156.
151. Campos, A. R.; Knutson, C. M.; Knutson, T. R.; Mozzetti, A. R.; Haynes, C. L.; Penn, R. L. Quantifying Gold Nanoparticle Concentration in a Dietary Supplement Using Smartphone Colorimetry and Google Applications. *J. Chem. Educ.* **2016**, *93*, 318. [[Crossref](#)]
152. Bogucki, R.; Greggila, M.; Mallory, P.; Feng, J.; Siman, K.; Khakipoor, B.; King, H.; Smith, A. W. A 3D-Printable Dual Beam Spectrophotometer with Multiplatform Smartphone Adaptor. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 1527. [[Crossref](#)]
153. Rice, N. P.; De Beer, M. P.; Williamson, M. E. A simple educational method for the measurement of liquid binary diffusivities. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 1185. [[Crossref](#)]
154. Assink Junior, E. J.; de Jesus, P. C.; Borges, E. M. Whey Protein Analysis Using the Lowry Assay and 96-Well-Plate Digital Images Acquired Using Smartphones. *J. Chem. Educ.* **2022**. [[Crossref](#)]
155. Wirojsaengthong, S.; Aeungmaitrepirom, W.; Unob, F.; Fuangwasdi, S.; Varanusupakul, P.; Mueangdech, K.; Treetos, T.; Puthongkham, P. Portable Quantitative Chemical Analysis: Digital Image Colorimetric Detection of Fe(III) with Curcumin Paper. *J. Chem. Educ.* **2023**, *100*, 3604. [[Crossref](#)]
156. Tee, N. Y. K.; Gan, H. S.; Li, J.; Cheong, B. H.-P.; Tan, H. Y.; Liew, O. W.; Ng, T. W. Developing and Demonstrating an Augmented Reality Colorimetric Titration Tool. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 393. [[Crossref](#)]
157. Knutson, T. R.; Knutson, C. M.; Mozzetti, A. R.; Campos, A. R.; Haynes, C. L.; Penn, R. L. A Fresh Look at the Crystal Violet Lab with Handheld Camera Colorimetry. *J. Chem. Educ.* **2015**, *92*, 1692. [[Crossref](#)]
158. da Silva Cunha, F. A.; de Almeida Junior, P. L.; Fernandes, J. P. A.; de Almeida, L. F.; de Araújo, M. C. U.; da Silva Lyra, W. Flow-batch digital image colorimetric system to zinc oxide determination in ointments. *Rev. Virtual Quim.* **2021**, *13*, 1062. [[Crossref](#)]
159. Barbosa, L. S. V.; Strauch, P.; Santos, D. C. M. B.; Korn, M. G. A.; Santana, R. M. M. Homemade Paper Analytical Device and Digital Image Colorimetry as Tools for Learning about Calibration Curve Methods during the COVID Pandemic: A Remote vs In-Person Class Evaluation. *J. Chem. Educ.* **2023**. [[Crossref](#)]