



**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Instituto de Química**  
**Programa de Pós-Graduação em Química**

**SENSOR DE CORES RGB PARA DETERMINAÇÕES COLORIMÉTRICAS:  
AVALIAÇÃO E ANÁLISE QUANTITATIVA DE SOLUÇÕES COLORIDAS**

**GEANDRE DE CARVALHO OLIVEIRA**

Tese de Doutorado

**Uberlândia – MG**

**2022**

**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Instituto de Química**  
**Programa de Pós-Graduação em Química**

SENSOR DE CORES RGB PARA DETERMINAÇÕES COLORIMÉTRICAS:  
AVALIAÇÃO E ANÁLISE QUANTITATIVA DE SOLUÇÕES COLORIDAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Química.

**Aluno:** Geandre de Carvalho Oliveira  
**Orientador:** Prof. Dr. Sidnei Gonçalves da Silva  
**Área de concentração:** Instrumentação Analítica

Uberlândia - MG  
Fevereiro/2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2022	<p>Oliveira, Geandre de Carvalho, 1982- Sensor de cores RGB para determinações colorimétricas [recurso eletrônico] : Avaliação e análise quantitativa de soluções coloridas / Geandre de Carvalho Oliveira. - 2022.</p> <p>Orientador: Sidnei Gonçalves da Silva. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.136">http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.136</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Química. I. Silva, Sidnei Gonçalves da, 1980- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Química. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 54</p>
-------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Química  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 51 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4385 - www.cpgquimica.iq.ufu.br - cpgquimica@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, 124, PPGQUI				
Data:	Vinte e um de fevereiro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:08
Matrícula do Discente:	11713QMI004				
Nome do Discente:	Geandre de Carvalho Oliveira				
Título do Trabalho:	Sensor de cores RGB para determinações colorimétricas: avaliação e análise quantitativa de soluções coloridas				
Área de concentração:	Química				
Linha de pesquisa:	Instrumentação Analítica e Preparo de Amostras				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Internet das coisas aplicada em química analítica: desenvolvimento de sistemas analíticos portáteis				

Reuniu-se por meio de webconferência, Plataforma Google Meet, link [meet.google.com/cfi-tdnm-bwm](https://meet.google.com/cfi-tdnm-bwm), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Química, assim composta: Professores Doutores: Lucas Ferreira de Paula, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro; Diogo Librandi da Rocha, da Universidade Federal do ABC; André Luiz dos Santos e Regina Massako Takeuchi, da Universidade Federal de Uberlândia e Sidnei Gonçalves da Silva, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Sidnei Gonçalves da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Documento assinado eletronicamente por **Sidnei Gonçalves da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/02/2022, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Massako Takeuchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/02/2022, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Luiz dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/02/2022, às 18:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Librandi da Rocha, Usuário Externo**, em 21/02/2022, às 18:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Ferreira de Paula, Usuário Externo**, em 21/02/2022, às 20:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3341889** e o código CRC **9BA2BC8B**.

---

Referência: Processo nº 23117.006136/2022-35

SEI nº 3341889

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Professor Sidnei, pela amizade construída em meio a conversas bem-humoradas e sempre edificantes.

À minha esposa, Marvile, e minha filha, Aninha, por me apoiarem e compreenderem meus momentos de loucura.

Agradeço aos meus pais e meus sogros por garantirem todo suporte à minha filha e esposa, nos momentos em que eu estava ausente.

Ao meu grande amigo e parceiro de laboratório, Caio Sérgio, pelas soluções, conversas, marmitas e cafés compartilhados.

Ao meu irmão de coração, Alexandre, por sempre me incentivar e não me deixar desistir.

Agradeço aos membros da banca, que estiveram em minha qualificação, pelos apontamentos e discussões.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a construção desse trabalho.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro de projetos de pesquisa.

Ao IFTM – Campus Uberaba e ao Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia pela estrutura disponibilizada.

## RESUMO

Neste trabalho, um sensor RGB foi avaliado para análise quantitativa de soluções coloridas. Este sensor é constituído de um sistema de detecção e um LED que ilumina o ambiente. A capacidade do sensor em responder a variações de sinal analítico para diferentes soluções coloridas foi avaliada monitorando cada canal do sensor, quando submetidos à incidência de radiação eletromagnética para cada comprimento de onda da região do visível. A capacidade efetiva do sensor RGB, definida como a capacidade do sensor em iluminar e detectar radiações eletromagnéticas refletidas pelas amostras, foi observada na faixa de 415-564; 440-600 e 510-750 nm para canais azul, verde e vermelho, respectivamente, após comparação entre o espectro de emissão do LED e a capacidade de detecção do sensor. Esses resultados podem contribuir para o entendimento da interação entre a luz emitida pelo LED do sensor e os sinais obtidos pelos canais RGB para diferentes determinações quantitativas. Com o objetivo de investigar a interação entre o sensor RGB e as substâncias coloridas para aplicações quantitativas, corantes de diferentes cores foram escolhidos, abrangendo toda a região visível do espectro eletromagnético. Na avaliação do desempenho analítico do sensor obteve-se faixa linear no intervalo de 5,0 – 50,0  $\mu\text{mol L}^{-1}$  para as soluções do corante azul índigo e de 5,0 – 25,0  $\mu\text{mol L}^{-1}$  para as demais soluções. Aplicações quantitativas em amostras líquidas empregando o sensor RGB foram demonstrada pelo método colorimétrico para a determinação de ferro explorando a reação com tiocianato. O procedimento foi aplicado em amostras de solo e suplemento infantil. A utilização do sensor RGB para determinação colorimétrica apresentou desempenho analítico semelhante aos obtidos com espectrofotômetro comercial, não sendo necessário o uso de computadores para o processamento de imagens para obtenção dos valores de RGB. O dispositivo proposto apresenta baixo custo, cerca de US\$ 35,00, considerando o uso da placa controladora, o valor do sensor e a impressão do compartimento de amostra, esse valor é inferior ao de smartphones de entrada, disponíveis no mercado atualmente. Além disso, este sensor também contribui para atender aos requisitos de geração de uma Internet de Coisas Analíticas (IoAT) para análise quantitativa de soluções coloridas.

## ABSTRACT

In this work a RGB sensor has been evaluated for quantitative analysis of colored solutions. The response ability of the sensor to different colored solutions was carefully evaluated for a better understanding of which spectral bands are filtered and processed by each sensor channel. The effective RGB sensor capacity, which is the sensor's capability to illuminate and detect electromagnetic radiation reflected by samples, was observed in the range of 415-564; 440-600 and 510-750 nm for blue, green and red channels, respectively. These results can contribute to the understanding of the interaction between the light emitted by the built-in LED and the signals obtained by the RGB channels for different quantitative determinations. Aiming to investigate the interaction between the RGB sensor and colored substances and thereafter achieve quantitative optical analysis, different colored dyes were chosen for the RGB sensor capability evaluating, covering a range of colors. The analytical performance of RGB sensor yielded a linear range of 5.0 – 50.0  $\mu\text{mol L}^{-1}$  for indigo blue dyes solutions and 5.0 – 25.0  $\mu\text{mol L}^{-1}$  for the other dyes. The work ability of this sensor was demonstrated by colorimetric method for determinations of iron in soil and childish supplement samples by thiocyanate reaction. The use of RGB sensor for colorimetric determination presented an analytical performance similar to those obtained with a commercial spectrophotometer, and it is not necessary to use computers for image processing to acquire RGB values. The proposed device has a low cost, around US\$35,00, considering the use of Arduino controller board, the value of RGB sensor and the cuvette holder 3D printing, this value is lower than that of entry-level smartphones currently available on the market. In addition, this sensor also contributes to meeting the requirements of generating an Internet of Analytical Things (IoAT) for quantitative analysis of color solutions.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Anatomia resumida do olho humano: (A) Corte sagital do olho humano; (B) Destaque para as células presentes na retina <sup>10</sup> .....	15
<b>Figura 2</b> – Microcontrolador Arduino. ....	18
<b>Figura 3</b> – Evolução das publicações e citações usando microcontrolador Arduino em Química Analítica. Base de dados: <i>Web of Science</i> , palavras-chave: Arduino e <i>Analytical Chemistry</i> .....	19
<b>Figura 4</b> – Captura de tela do software utilizado para medidas de RGB: (A) modificações em tempo de integração e ganho. ....	28
<b>Figura 5</b> – Desenho para impressão do suporte de cubeta: (1) vista lateral oposta ao sensor; (2) vista lateral com a janela para acoplamento do sensor; (3) corte longitudinal. ....	29
<b>Figura 6</b> – Desenho para impressão do suporte de cubeta: (1) vista superior; (2) vista inferior. ....	29
<b>Figura 7</b> – Desenho para impressão da tampa do suporte de cubeta: (1) vista lateral; (2) vista superior; (3) vista inferior. ....	30
<b>Figura 8</b> – Montagem do dispositivo RGB: (A) microcontrolador (Arduino <sup>®</sup> ), (B) suporte com a cubeta, (C) sensor acoplado ao suporte e (D) tampa do suporte da cubeta. ....	30
<b>Figura 9</b> – Representação esquemática do circuito e conexões: (A) Arduino Uno. (B) Sensor RGB TCS34725. Conexões: Vermelho: alimentação do sensor (5V); Preto: aterramento; Branco e Laranja: transmissão de dados entre o sensor e o controlador...	31
<b>Figura 10</b> – Foto do sensor RGB TCS 34725 e o destaque do sistema de iluminação/detecção do sensor. No destaque do sistema de detecção composto da matriz 3x4 as cores vermelha, verde, azul e branca representam os filtros empregados e a disposição dos fotodiodos empregados como detectores. ....	33
<b>Figura 11</b> – Espectro de emissão do LED branco acoplado ao sensor RGB, obtido utilizando um espectrometro multicanal e substituindo a fonte do equipamento pelo LED do sensor. Os sinais foram normalizados. ....	34

<b>Figura 12</b> – Fotografia apresentando o posicionamento do sensor no espectrofotômetro: (a) Vista superior do sensor alocado no interior do espectrofotômetro, fixado dentro do suporte da cubeta. (b) Detalhe do alinhamento da radiação emitida pelo espectrofotômetro no detector do sensor. ....	35
<b>Figura 13</b> – Avaliação dos valores dos sinais de RGB em função do comprimento de onda para o sensor TCS34725 Adafruit®. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x. ....	36
<b>Figura 14</b> – Avaliação dos valores dos sinais de RGB em função do comprimento de onda para o sensor TCS34725 paralelo. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x. ....	37
<b>Figura 15</b> – Sensores RGB (a) TCS34725 Adafruit® e (b) TCS34725 (paralelo). ....	37
<b>Figura 16</b> – Espectro de capacidade efetiva do sensor RGB. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x. ....	39
<b>Figura 17</b> – Representação esquemática da incidência de luz emitida pelo LED do sensor em uma cubeta contendo solução colorida. ....	40
<b>Figura 18</b> – Espectros de absorção para as soluções de corantes: (—) Tartrazina; (—) Vermelho Ponceau; (—) Fenolftaleína; (—) Azul índigo; (—) Verde de bromocresol. ....	42
<b>Figura 19</b> – Espectro de absorção para a solução de corante tartrazina (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB. ....	46
<b>Figura 20</b> – Curva de calibração para o corante amarelo tartrazina empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x. ....	47
<b>Figura 21</b> – Espectro de absorção para a solução de corante azul índigo (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB. ....	48

<b>Figura 22</b> – Curva de calibração para o corante azul índigo empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para a as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x .....	49
<b>Figura 23</b> – Espectro de absorção para a solução de corante verde de bromocresol (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.....	50
<b>Figura 24</b> – Curva de calibração para o verde de bromocresol, empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para a as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x.....	51
<b>Figura 25</b> – Espectro de absorção para a solução de corante vermelho ponceau (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.....	52
<b>Figura 26</b> – Curva de calibração para o corante vermelho ponceau empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para a as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x.....	53
<b>Figura 27</b> – Espectro de absorção para a solução de corante fenolftaleína (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.....	54
<b>Figura 28</b> – Curva de calibração para a fenolftaleína empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para a as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x .....	55
<b>Figura 29</b> – Espectro de absorção do complexo $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]$ e resposta relativa dos canais do sensor RGB. A linha vermelha escura representa o espectro de absorção do complexo. As linhas pontilhadas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor para os canais R, G e B, respectivamente. Concentração reagentes: 0,2 mol L <sup>-1</sup> KSCN, 2,0 mg L <sup>-1</sup> de Fe(III) e 0,24 mol L <sup>-1</sup> de HNO <sub>3</sub> .....	57

**Figura 30** – Avaliação do efeito de alteração no ganho em função do sinal analítico. ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B). Concentração reagentes: 0,2 mol L<sup>-1</sup> KSCN, 2,0 mg L<sup>-1</sup> de Fe(III) e 0,24 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>. Tempo de integração: 101 milissegundos..... 58

**Figura 31** – Avaliação do efeito de alteração do tempo de integração no sinal analítico. ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B). Concentração reagentes: 0,2 mol L<sup>-1</sup> KSCN, 2,0 mg L<sup>-1</sup> de Fe(III) e 0,24 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>. Ganho: 60x..... 59

**Figura 32** – Fluxograma de determinação de ferro empregando sensor RGB. .... 60

**Figura 33** – Curva de calibração de Ferro (III) (mgL<sup>-1</sup>): (■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro. Concentração reagentes: 0,2 mol L<sup>-1</sup> KSCN e 0,24 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>. Tempo de integração: 50 ms; ganho: 60x. Espectrofotômetro em 480 nm. .... 61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Características analíticas do sensor RGB e procedimento espectrofotométrico para determinação de corantes coloridos.....	44
<b>Tabela 2:</b> Comparação entre o sensor RGB e determinação espectrofotométrica de ferro(III).....	62
<b>Tabela 3:</b> Determinação de ferro em polivitamínicos (P1 e P2) e em amostras de solo (S1 e S2) (valores médios e incertezas, n = 5) .....	63

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Lei de Beer-Lambert  $A = \epsilon bc$  ..... 14

Equação 2:  $S = -\log \frac{I}{I_0}$  ..... 43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RGB	Red (R), Green (G), Blue (B) (Em português: Vermelho (R), Verde (G), Azul (B))
RGBC	Red (R), Green (G), Blue (B), Clear (C) (Em português: Vermelho (R), Verde (G), Azul (B), Radiação não filtrada (C))
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IoT	Internet of Things (Em português: Internet das Coisas)
IoAT	Internet of Analytical Things (Em português: Internet das Coisas Analíticas)
RAM	Random Access Memory (Em português: memória de acesso aleatório)
ROM	Read Only Memory (Em português: memória somente de leitura)
USB	Universal Serial Bus (Em português: porta universal)
DIY	Do It Yourself (Em português: faça você mesmo)
LED	Light Emitting Diode (Em português: Diodo emissor de luz)
BLE	Bluetooth Low Energy (Em português: Bluetooth de baixa energia)
PAD	Paper-based analytical devices (Em português: dispositivo analítico em papel)
CCD	Charge-Coupled Device (Em português: Dispositivo de Carga Acoplada)
LD	Limite de Detecção
LQ	Limite de Quantificação
RSD	Relative Standard Deviation (Em português: Desvio Padrão Relativo)

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Colorimetria.....	14
1.2	O olho humano.....	15
1.3	Colorimetria por imagens digitais.....	16
1.4	Controlador Arduino.....	17
1.5	Sensor RGB.....	21
2	Objetivos.....	25
2.1	Objetivos Gerais.....	25
2.2	Objetivos específicos.....	25
3	Materiais e métodos.....	26
3.1	Materiais e Reagentes.....	26
3.2	Equipamentos Utilizados.....	27
3.3	Procedimento Experimental.....	31
4	Resultados e Discussões.....	32
4.1	Aspectos Gerais.....	32
4.2	Avaliação do sensor RGB.....	33
4.3	Avaliação da resposta do sensor RGB para soluções de corantes.....	40
4.4	Desempenho e validação do sistema RGB para análise quantitativa.....	56
5	Conclusões.....	65
6	Referências Bibliográficas.....	66

# 1 Introdução

## 1.1 Colorimetria

As técnicas analíticas baseadas em métodos colorimétricos são amplamente utilizadas em análises químicas quantitativas. A instrumentação comercial, usada para análises colorimétricas mais precisas, inclui espectrofotômetros, fotômetros e colorímetros<sup>1</sup>.

O colorímetro é um dispositivo relativamente simples que consiste em uma fonte de luz, suporte de amostra (cubeta), sensor de intensidade de luz e componentes para controlar a incidência de luz e registrar a intensidade da luz transmitida. A luz incidente é filtrada, permitindo apenas a passagem de uma faixa estreita de comprimentos de onda, próxima ao pico de absorbância, para uma determinada espécie dissolvida. O método requer uma solução para calibração e os resultados são obtidos em unidades de absorbância ou transmitância, sendo baseadas na Lei de Lambert-Beer para obtenção de dados quantitativos<sup>2</sup>.

Quando a luz, com um comprimento de onda específico, passa por uma amostra, ela pode ser absorvida pelas substâncias presentes nessa solução. Os equipamentos fazem as medições baseando-se nessa absorção da luz<sup>3,4</sup>. A lei de Beer ou Lambert-Beer faz a relação entre a absorbância de uma espécie química e a concentração desta espécie na solução, quando um feixe de luz monocromática passa por essa mesma solução.

Ao analisar a atenuação da luz através da solução, a concentração do analito na solução pode ser determinada. A lei de Lambert-Beer, é apresentada na Equação 1.

$$A = \epsilon bc \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $A$  é a absorbância,  $\epsilon$  é a absorvidade molar,  $b$  é o caminho óptico e  $c$  é a concentração do analito<sup>1-3,5</sup>. A partir da **Equação 1**, compreende-se que, a quantidade de luz absorvida é proporcional à quantidade de moléculas que absorvem luz no caminho óptico, enquanto a luz passa por uma solução, na qual a espécie absorvente está dissolvida.<sup>3,4,6</sup>

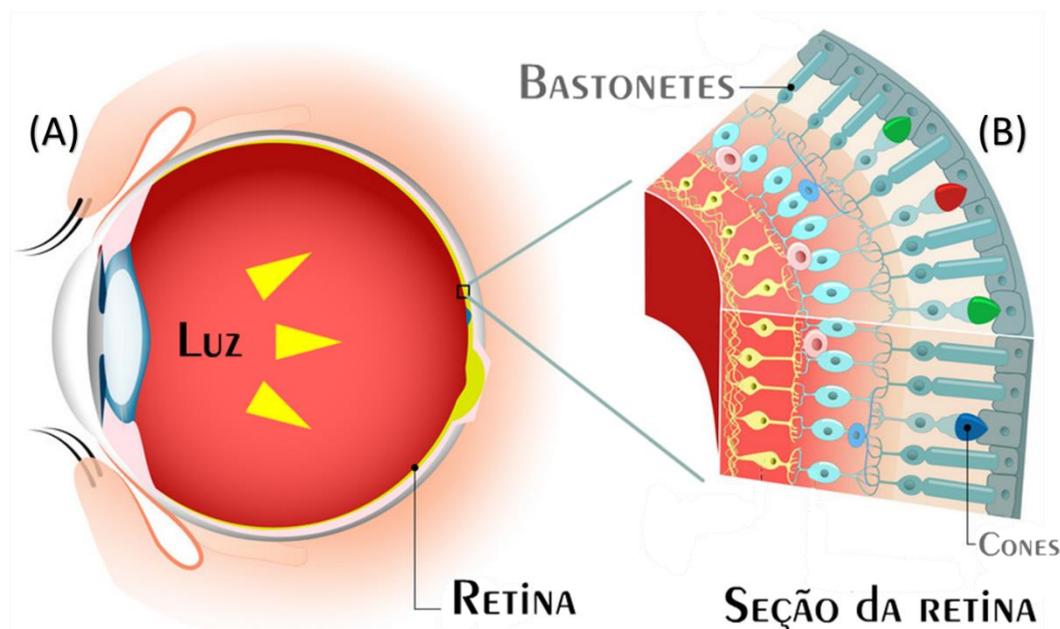
Os métodos colorimétricos são bastante usados em pesquisas e na indústria<sup>7,8</sup>, são empregados para monitoramento de níveis de nitratos, fosfatos, metais e outros compostos presentes em efluentes<sup>4</sup>. A demanda química de oxigênio (DQO) é uma das

aplicações mais populares dos colorímetros<sup>9</sup>. A partir dessa medida, pode-se estimar a quantidade de matéria orgânica presente em águas residuais e medir a qualidade dessa água em determinados pontos do curso dos efluentes e ao longo das etapas de tratamento desses resíduos.

### 1.2 O olho humano

Para se compreender melhor o funcionamento dos métodos colorimétricos por imagens digitais, é necessário entender o funcionamento do olho humano e ter em mente que, os dispositivos de imagens buscam reproduzir, com a maior fidelidade, a imagem que o humano está vendo. A **Figura 1**, apresenta, de forma resumida, a anatomia do olho humano.

**Figura 1** – Anatomia resumida do olho humano: (A) Corte sagital do olho humano; (B) Destaque para as células presentes na retina<sup>10</sup>.



O olho humano é capaz de identificar fótons com comprimento de onda entre 400 e 700 nm. Quem controla a entrada de luz no globo ocular é a pupila (**Figura 1(A)**). Após passar pela pupila, o raio luminoso atinge a retina, onde ficam os fotorreceptores, denominados cones e bastonetes (**Figura 1(B)**). Os bastonetes, permitem que o indivíduo

tenha percepções de brilho dos objetos, sendo assim, são fundamentais para visão noturna e em ambientes pouco iluminados<sup>11</sup>.

Os cones, por sua vez, são células responsáveis pela identificação das cores. Existem três conjuntos de cones em nossa retina: os cones S (do inglês *short*), que são estimulados por comprimentos de onda mais curtos, e máximo de absorção em 445 nm; os cones M (do inglês *medium*), estimulados por comprimentos de onda médios, cujo máximo de absorção ocorre em 535 nm e os cones L (do inglês *long*), que são específicos para comprimentos de onda mais longos, com pico de absorção em 570 nm<sup>11,12</sup>.

Esse conjunto de cones são responsáveis por transmitir ao cérebro impulsos elétricos com as informações referentes ao objeto observado. Se uma superfície reflete luz de comprimento de onda mais curto, então o cérebro reconhecerá aquela superfície como azul. Se, a luz refletida for composta por comprimentos de onda diferentes, o cérebro faz uma combinação desses sinais e teremos cores misturadas, como amarelo, roxo e laranja. Ao receber iluminação cujos comprimentos de onda compreendam toda faixa da luz visível, então o cérebro vê o objeto como sendo branco<sup>10,11,13</sup>.

### *1.3 Colorimetria por imagens digitais.*

O uso de informações de imagem digital, obtidas para soluções coloridas, tem crescido consideravelmente nos últimos anos, por apresentar precisão e exatidão adequadas para diversas aplicações analíticas<sup>14</sup>. Nestes procedimentos, as informações de cores podem ser descritas pelos espaços de cores do objeto, definidos pelas três cromaticidades dos componentes constituindo o padrão vermelho, verde e azul<sup>15</sup>.

O sistema RGB é o espaço de cores mais comum em dispositivos de captura de imagem. Isso ocorre, pois o ser humano enxerga de forma semelhante, ou seja, o sistema RGB é baseado na percepção fisiológica das cores no olho humano, como explicado na seção 1.2. Por conta disso, os dispositivos de imagens e a maioria dos detectores de cores são construídos de forma a gerar informações com as coordenadas de RGB<sup>13</sup>. Imagens RGB de 24 bits são imagens em que o pixel, o menor ponto de uma imagem digital, é representado por três componentes de cor de 8 bits, comumente chamados de vermelho (R), verde (G) e azul (B), formando um espaço de cores aditivo.

Este sistema combina valores de cores vermelha, verde e azul, os quais variam entre 0 e 255, ou seja, 256 variações de cores em cada canal, totalizando mais de 16 milhões ( $256^3$ ) de combinações possíveis e um amplo espectro de cores diferentes.

Com o uso de softwares como ImageJ, Photoshop ou aplicativos do Google, os valores de RGB são coletados, fornecendo a base para a análise quantitativa<sup>13</sup>.

Uma grande quantidade de trabalhos publicados, explorando informações de imagem digital, demonstra o potencial desta técnica para determinações quantitativas<sup>6,13,23-26,15-22</sup>. Há ampla variedade de dispositivos com recursos ópticos, que podem ser usados para coletar informações de cores para análises quantitativas, incluindo câmeras, webcams, scanners, smartphones, tablets, entre outros<sup>13,14,16,18,26</sup>. Assim, características tais como portabilidade, sensibilidade, acessibilidade e resolução de imagens, são diferentes para cada tipo de dispositivo, além do custo de aquisição do equipamento.

O sistema menos compacto é o scanner, sendo preterido por câmeras digitais, webcams, tablets e smartphones. As câmeras fotográficas e webcams são os sistemas mais compactos, no entanto, requerem um computador externo para manipulação de imagens e aquisição dos valores RGB. Tablets e smartphones combinam conectividade e capacidade de processamento, ideais para análises *in loco*, permitem o desenvolvimento de novos aplicativos e contribuem para a democratização da ciência, especialmente para análises *point-of-care*<sup>27</sup>. Tanto tablets, quanto smartphones possuem capacidades limitadas para realizar análises ópticas quantitativas. Além de necessitarem de um computador ou aplicativo para processamento das imagens e coleta dos valores de RGB, ambos apresentam desvantagens, como variações significativas de sensibilidade entre os vários tipos de equipamentos disponíveis no mercado<sup>5</sup>. Esses inconvenientes tornam o monitoramento em tempo real, um processo árduo.

#### 1.4 Controlador Arduino

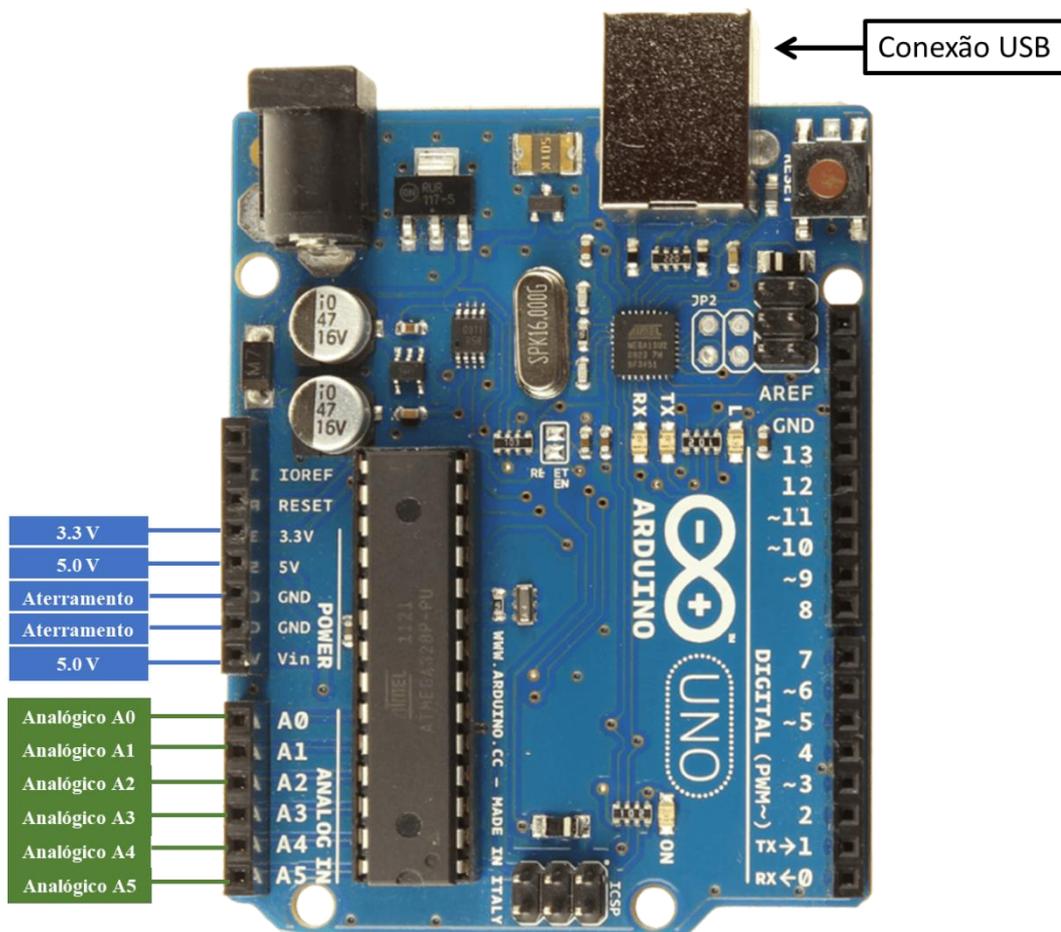
Computadores e microcontroladores de placa única são usados, frequentemente, como plataforma para projetos e protótipos em eletrônica e automação. Para o desenvolvimento de um dispositivo portátil para análises químicas, se faz necessário escolher uma dessas plataformas.

Microcontroladores de placa única possuem um chip integrado que contém todos os circuitos necessários para uma tarefa de controle útil: um microprocessador, circuitos de entrada e saída (I/O), um gerador de relógio, memória RAM ou ROM, e um circuito integrado de suporte necessário. O objetivo é que a placa esteja imediatamente pronta

para utilização no desenvolvimento de suas aplicações, evitando que o usuário ocupe seu tempo e esforço para produzir um equipamento de controle.

Um dos mais populares microcontroladores, é o Arduino, **Figura 2**, uma plataforma de código aberto, que utiliza o conceito de *Hardware* e *Software* de fácil utilização<sup>28</sup>. Baseado na família de microcontroladores ATmega, comunica-se facilmente com diferentes dispositivos, tais como sensores e motores.

**Figura 2** – Microcontrolador Arduino.

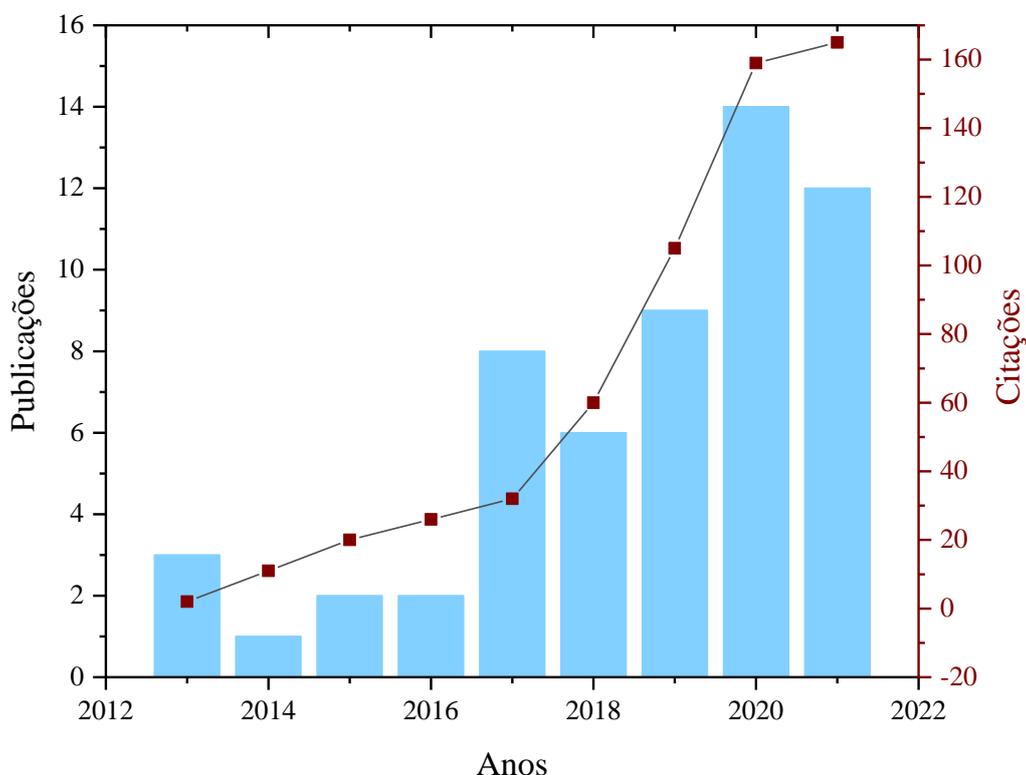


O Arduino é recomendado, principalmente, para usuários que possuem pouco conhecimento em programação. Sua configuração é simples, sendo muito fácil de manipular, bastando apenas conectar a placa a um computador, via USB, baixar o programa e as bibliotecas, no site do fabricante (Arduino) e o sistema está pronto para uso. O dispositivo é barato e pode ser utilizado em plataformas como *Windows*, *Macintosh*, *OSX* e *Linux*<sup>28</sup>. Por conta dessas vantagens, o controlador Arduino vem sendo

utilizado em vários projetos científicos que trabalham com o conceito de internet das coisas (IoT). Analisando a **Figura 3**, pode-se concluir que as publicações de artigos científicos e citações de dispositivos, que utilizam o microcontrolador, seguem uma tendência de aumento, demonstrando a popularidade e fácil implementação desses equipamentos.

Microcontroladores baratos e comercialmente acessíveis podem atuar no controle e gerenciamento de dispositivos, em sensores específicos, sendo vantajosos em aplicações de análises químicas<sup>13,23,25,29-33</sup>. Os benefícios associados ao uso desses dispositivos, incluem a possibilidade de incorporar módulos de conexão sem fio, como *bluetooth* e *wi-fi* em microcontroladores, sendo perfeitamente adequados para projetos DIY, *Do It Yourself* (faça você mesmo) em IoT<sup>21</sup>. A literatura demonstra, que o desenvolvimento de sensores versáteis e miniaturizados, também contribuirá para atender aos requisitos de geração de uma Internet das Coisas Analíticas (IoAT)<sup>33-36</sup>.

**Figura 3** – Evolução das publicações e citações usando microcontrolador Arduino em Química Analítica. Base de dados: *Web of Science*, palavras-chave: Arduino e *Analytical Chemistry*.



O primeiro dispositivo proposto com utilização de Arduino, em Química Analítica, foi reportado em 2013. Os pesquisadores apresentaram um colorímetro, fabricado em impressora 3D, explorando tanto *hardware* quanto *software* de códigos abertos<sup>9</sup>. Como fonte luminosa foi utilizado um diodo emissor de luz (LED) com pico de emissão próximo de 606 nm e um sensor de luz, modelo TSL230R, como detector. Este sensor converte radiação luminosa em frequência. O desempenho do dispositivo foi avaliado em experimentos de determinação da demanda química de oxigênio (DQO).

Dispositivos baseados em Arduino também foram desenvolvidos para medições de fluorescência molecular<sup>37</sup>. Estes dispositivos requerem uma fonte luminosa, responsável pela excitação das espécies fluoróforas. Diodos Emissores de Luz (LED's), são os dispositivos mais empregados nestes trabalhos, por possuírem características favoráveis tais como: (1°) fácil integração com o Arduino; (2°) iluminação monocromática estável; (3°) potência e baixa voltagem adequadas ao acoplamento com microcontroladores, com baixa geração de calor e (4°) dimensões reduzidas. Estes trabalhos exploraram como detectores diversos dispositivos, que incluem: LED<sup>38</sup>, câmera digital<sup>37</sup>, fotodiodo<sup>39,40</sup>, sensor de luz<sup>41</sup> e sensores RGB<sup>42-45</sup>.

Uma busca na base de dados *Web of Science* com a palavra “Arduino” foi realizada. Foram encontrados 228 artigos publicados, filtrando o resultado destes trabalhos, apenas 57 descreviam aplicações de uso em Química Analítica, com um total de 586 citações e diferentes estratégias de detecção sendo exploradas nesses manuscritos. Os demais trabalhos referiam-se a aplicações como monitoramento de temperatura, pressão e outros parâmetros físicos, que embora não sejam aplicações analíticas, foram publicados em revistas especializadas no emprego de sensores, não necessariamente químicos.

As técnicas ópticas são as formas de detecção mais exploradas em dispositivos que utilizam o microcontrolador Arduino, por conta da facilidade em utilizar o conjunto hardware e software, robustez e portabilidade do dispositivo. Além da variedade de sensores, módulos disponíveis comercialmente, incluindo placas, transdutores e módulos ópticos. Usualmente, os trabalhos baseados na fotometria, empregando o Arduino como microcontrolador, exploram a utilização de um LED, como fonte luminosa<sup>9,34,38,46-48</sup>.

Normalmente, a placa Arduino é utilizada para controlar a alimentação e ativação da fonte luminosa. O uso destes dispositivos pode fornecer um filtro natural por eles operarem em uma faixa específica de comprimento de onda e possuírem fácil comunicação com o microcontrolador Arduino. São relatados, na literatura, diversos

trabalhos que exploram diferentes tipos de detectores, tais como sensores ópticos (TSL230R<sup>9</sup> e TSL2591<sup>34</sup>), fotodiodos<sup>46,47</sup>, fotorresistores<sup>48</sup> e arranjos de LEDs<sup>38</sup> como fotossensores.

Tais aplicações analíticas não são necessariamente com dispositivos IoT, entretanto, alguns deles possuem potencial para implementação. Nesse caso, é importante considerar a incorporação de protocolos de comunicação sem fio (*Wi-fi*). Diversas tecnologias e protocolos de comunicação sem fio diferentes podem ser utilizados para conectar o dispositivo inteligente, por exemplo, Protocolo de Internet Versão 6 (IPv6), *ZigBee*, *Bluetooth* de baixa energia (BLE), *Near Field Communication* (NFC), dentre outros. Para melhorar a comunicação sem fio do controlador, um módulo *Wi-fi* pode ser conectado. Geralmente, os módulos sem fio são baratos e de fácil comunicação com o microcontrolador, ou outros componentes e apresentam baixo consumo de energia. Alguns módulos compatíveis com Arduino são: ESP8266 (*Wi-fi*), ESP32 (*Wi-fi* e *Bluetooth*), HC-05 (*Bluetooth*), RFID NFC PN532 (NFC) e *Xbee* (*ZigBee*)

### 1.5 Sensor RGB

Cores são qualidades que estão presentes ou representadas em experiências visuais e podem ser quantificadas usando vários métodos ou espaços de cores que especificam a cor das três cores primárias, semelhante à percepção do olho humano. O espaço de cores RGB é uma representação aditiva de cor utilizada por dispositivos como monitores, scanners e câmeras digitais. Nesta representação, todas as cores na paleta podem ser representadas como uma combinação das cores primárias vermelho (R), verde (G) e azul (B)<sup>49-51</sup>. Em dispositivos de entrada, como scanners e câmeras, são utilizados filtros de banda espectral para essas três regiões do espectro. Com isso, calcula-se uma representação numérica da intensidade de cada um dos canais de cor, que representa o total de fótons de determinada região do espectro.

A resposta de cada canal varia de dispositivo para dispositivo, entretanto, seguem funções gaussianas com faixas típicas de 400-500, 500-580 e 580-700 nm para os canais azul, verde e vermelho, respectivamente<sup>52</sup>.

Análises químicas baseadas em alterações de cores vem despertando bastante interesse na área de química analítica, quando registradas em dispositivos de imagens, devido a vantagens como a simplicidade de uso, portabilidade e possibilidade de análises *in situ* e em tempo real. As reações químicas, que produzem alterações de cores, podem

ocorrer dentro das zonas reacionais de dispositivos analíticos baseados em papel ( $\mu$ PADs)<sup>6,53</sup>, em microcubetas<sup>54</sup>, em cubetas convencionais<sup>55</sup> e a identificação do analito pode ser feita visualmente em resposta de confirmação (resposta binária, sim ou não) ou em escala quantitativa por relações matemáticas da intensidade de cor do analito, após tratamento da imagem digitalizada em aplicativos específicos. Dessa forma, é necessária a obtenção da imagem da área colorida, empregando um dispositivo de captura de imagem (scanners, câmeras fotográficas, smartphones, tablets etc.), que é tratada usando softwares conversores de imagem em valores de componentes de cores. Neste caso, os valores obtidos servem para construção da curva de calibração e análise das amostras<sup>13</sup>.

Imagens digitais são registros resultantes do espalhamento e da reflexão da luz incidida sobre um objeto e podem servir como ferramenta para aplicações analíticas, fornecendo de forma rápida informações que podem ser associadas às concentrações de espécies químicas coloridas. A luz refletida ao passar por um conjunto de filtros com as cores vermelho, verde e azul é agrupada na forma de um mosaico e conhecido como filtro de *Bayer*. Os detectores fotossensíveis, usualmente empregados em química analítica para obtenção de imagens digitais, são constituídos por diversos pontos conhecidos como pixels. A partir das diferentes transmitâncias adquiridas para cada pixel e utilizando como base o modelo das misturas de cores RGB, o sinal é então convertido (pelo uso de um *software*) em unidades decimais entre 0 e 255<sup>25</sup>. Desta forma é possível correlacionar os sinais dos valores de R, G e B (isolados ou após tratamentos matemáticos) com a concentração de espécies coloridas, que em certas condições experimentais, respondem linearmente com a concentração do analito. Como a intensidade da cor pode ser proporcional à concentração de uma espécie química, a quantificação dessa espécie pode ser realizada a partir da correlação dos valores das componentes do sistema RGB de uma imagem digitalizada associada com essa espécie e sua concentração. Pode-se considerar uma analogia a medidas espectrofotométricas, mas dispensando-se todo aparato instrumental usualmente empregado.

Diversos dispositivos têm sido explorados para capturas de imagens em aplicações analíticas, sendo os mais comuns scanners, câmeras digitais, smartphones, tablets, webcam entre outros. Para converter a imagem capturada por estes dispositivos, geralmente após a reação da amostra contendo o analito, a imagem é digitalmente processada usando uma série de operações matemáticas proporcionando reduções de ruídos, correção de nível de cinza e correção de desfoque, para melhorar a qualidade dos sinais<sup>13</sup>. No uso de imagens digitais para fins analíticos, destaca-se a utilização visando

análises *in loco*, incluindo aplicações ambientais, possibilitando a obtenção de resultados em tempo real.

Os sensores RGB possuem um LED branco, responsável pela iluminação ambiente. O detector consiste em uma matriz de cores de fotodiodos filtrados em vermelho (R), verde (G) e azul (B). O arranjo dessa matriz pode variar dependendo do modelo do sensor utilizado.

No sensor TCS3200, o conversor de luz recebe sinal de um conjunto de fotodiodos dispostos em uma matriz 8x8. Os fotodiodos possuem filtros para as cores vermelho, verde e azul, sendo 16 fotodiodos filtrados para cada uma dessas cores e mais 16 fotodiodos transparentes, sem filtro<sup>56</sup>. O sensor ISL29125 possui três arranjos de fotodiodos que convertem luz em corrente. Após conversão da luz em corrente, a saída de corrente é convertida em valores digitais por um conversor analógico-digital (ADC) no chip. A resolução do conversor ADC pode ser selecionada em 12 ou 16 bits. O tempo de conversão do ADC é inversamente proporcional à sua resolução<sup>57</sup>. Há também o sensor TCS34725, que fornece um retorno digital dos valores de detecção de luz vermelha, verde, azul e *clear*. Integrado ao chip e localizado nos fotodiodos de detecção de cor, tem-se um filtro de bloqueio de infravermelho (IV) que, minimiza a componente espectral de IV da luz que entra e permite que as medições de cor sejam feitas com exatidão<sup>52</sup>.

Como o sensor TCS34725 possui alta sensibilidade e filtro de bloqueio infravermelho, torna-se um bom sensor para uso em condições de iluminação variáveis e através de materiais atenuantes, como soluções coloridas. O sensor RGB, a princípio, pode atuar como um filtro de emissão para medições de fluorescência, eliminando a dispersão de luz e a emissão de fundo da amostra, conforme relatado na literatura em um trabalho que explora o uso deste sensor para a determinação de cianeto na forma gasosa, utilizando filtros de fibra de vidro, contendo monocianocobinamida, para detecção do gás cianeto de hidrogênio<sup>42</sup>.

Dispositivos colorimétricos, baseados em Arduino, foram desenvolvidos com êxito utilizando sensores de cores RGB<sup>45,53</sup> com interface com o microcontrolador. Esses sensores apresentaram resposta linear ao serem testados em diferentes cores, fornecendo sinais na escala RGB.

Há também, relatos de trabalho para determinação quimiluminescente, explorando sistemas de fluxo para determinação de peróxido de hidrogênio<sup>58</sup>. Uma placa

controladora do tipo Arduino Duo foi utilizada para controlar o sistema de propulsão com bombas solenoides e o sinal foi registrado por um fotodiodo.

Strzelak e colaboradores<sup>59</sup> propuseram um sistema microfluídico, impresso em 3D, com medidas turbidimétricas e nefelométricas simultâneas, para determinação de proteína total em fluidos corporais. O sistema microfluídico consistia em uma bomba de seringa de dois canais, para injeção de amostra e reagentes e transportar o fluxo carreador até o sistema de detecção, consistido em um laser de 650 nm e dois sensores RGB, para aquisição simultânea turbidimétricas e nefelométricas.

Outros dispositivos ópticos, que utilizam o Arduino como controlador, incluem espalhamento laser para medições turbidimétricas e nefelométricas, e espectrômetro de lente térmica de multirreflexão ajustável<sup>59,60</sup>.

Um dispositivo utilizando sensor RGB e Arduino foi desenvolvido por Heo e colaboradores<sup>43</sup>, no intuito de reconhecer, identificar e quantificar, Fe(III), Co(II), Hg(II) e Sn(II), usando o sensor de cor TCS3200.

Outro trabalho desenvolve um teste baseado na mudança de cor do sistema Fe-SCN, na presença de fluoretos. O sistema foi preparado para colocar soluções em tecidos de algodão, o que permite visualizar o complexo vermelho e quantificar a tonalidade da mancha, sendo esta relacionada à concentração de fluoretos na amostra<sup>61</sup>. Os pesquisadores utilizaram como detector um sensor RGB *SparkFun ISL29125* e os dados foram coletados em um sistema que, também utiliza placa Arduino.

## **2 Objetivos**

### *2.1 Objetivos Gerais*

O objetivo desse trabalho é desenvolver um dispositivo capaz de identificar pequenas alterações de cor em soluções coloridas e relacionar essa alteração com valores de concentração dos corantes dissolvidos nessas soluções.

### *2.2 Objetivos específicos*

Desenvolver um dispositivo utilizando sensor RGB (TCS34725, RGB-Sensor, Adafruit®) e um microcontrolador Arduino Uno (Arduino®, Itália).

Otimizar os parâmetros do sensor utilizando soluções coloridas, para desenvolvimento de um procedimento para análise de ferro(III), pelo método colorimétrico com tiocianato.

Aplicar o procedimento em soluções de polivitamínicos comerciais e amostras de solo.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Materiais e Reagentes

Todos os reagentes empregados no desenvolvimento desse trabalho possuem pureza analítica e foi utilizada água ultrapura (18,2 MΩ cm, Gehaka, Brasil). As soluções estoque (20,0 mmol L<sup>-1</sup>) de azul índigo (Sigma-Aldrich, Alemanha), amarelo tartrazina e vermelho ponceau (ambas Merck, Alemanha), foram preparadas dissolvendo-se as quantidades necessárias dos corantes em água ultrapura. As soluções estoque de verde de bromocresol (Merck) foram preparadas diluindo-se, em água, uma quantidade suficiente do corante para ter concordância em número de 20,0 mmol L<sup>-1</sup> de solução e tampão de acetato, para manter o pH em torno de 4,5, garantindo coloração verde. A solução de fenolftaleína (Vetec, Brasil) foi preparada com a dissolução da substância em etanol à 60% (v/v) e o pH foi ajustado para 10, utilizando-se solução de hidróxido de sódio 1,0 mol L<sup>-1</sup>.

Para determinação colorimétrica de ferro (III), foi utilizada solução 2,0 mol L<sup>-1</sup> de tiocianato de potássio (Vetec) e solução 4,0 mol L<sup>-1</sup> de ácido nítrico (Synth, Brasil). As soluções de referência de ferro foram preparadas a partir da diluição da solução padrão de referência de elemento único de 1000 mg L<sup>-1</sup> e 1% de HNO<sub>3</sub> (Merck), em água deionizada.

As amostras de solo foram fornecidas pela Labfert Análises, laboratório de análises de solos, fertilizantes e tecido foliar, localizado na cidade de Uberaba – MG. As amostras fazem parte do Ensaio de Proficiência promovido pelo IAC – Instituto Agrônomo de Campinas, para laboratórios de análises de solos. A abertura das amostras ocorreu de acordo com o método de análises químicas para fertilidade de solos tropicais<sup>62</sup>. Uma quantidade de 20,0 g de solo foi mantida sob agitação com 40,0 mL de solução extratora de DTPA (Ácido dietilenotriaminopentacético), durante duas horas. O extrato filtrado foi submetido à análise pelo método colorimétrico do tiocianato para determinação de ferro (III).

Os suplementos de ferro foram obtidos em farmácias locais, na cidade de Uberlândia – MG. Alíquotas de 100 mg das suspensões foram pesadas diretamente no frasco digestor. Um volume de 40,0 mL de ácido nítrico e 60,0 mL de ácido clorídrico foi adicionado à amostra. As misturas foram aquecidas até 100 °C em um bloco digestor e a extração foi feita por 1,0 h. Após extração e dissolução total do material, a mistura foi

diluída com água até obter uma solução contendo  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Fe}^{3+}$  para cada suplemento. Estas soluções foram armazenadas e utilizadas como estoque.

### 3.2 Equipamentos Utilizados.

Os espectros de absorção e emissão espectral gerados pelo LED, acoplado no sensor RGB, foram medidos com um espectrometro multicanal baseado em um arranjo de CCD (Dispositivo de Carca Acoplada) (USB 2000, *Ocean Optics*, Dunedin, FL, EUA). A resposta do comprimento de onda do sensor RGB e as medidas de absorbância foram obtidas utilizando um espectrofotômetro (FEMTO 600s) equipado com cubeta de plástico de 1 cm de caminho óptico.

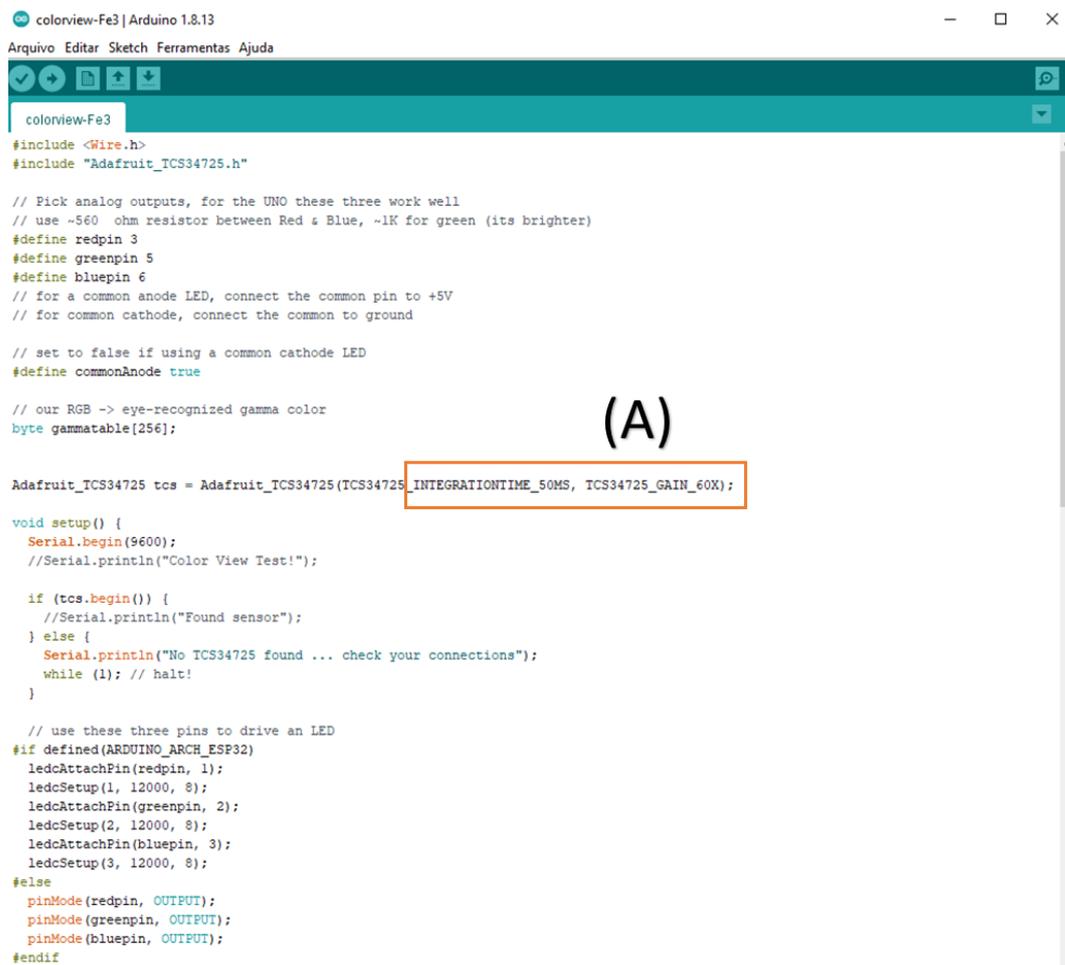
Os valores de RGB foram obtidos utilizando a câmera de um *smartphone* e um dispositivo com sensor RGB (TCS34725, RGB-Sensor, Adafruit®).

O aparelho celular (Iphone 12 Mini, Apple®) com câmera dupla de resolução de 12 MP foi acoplado a um suporte de cubeta fabricado em impressora 3D<sup>54</sup>; foi utilizada uma fonte externa de luz composta por um conjunto de quatro LEDs brancos. As imagens coletadas foram tratadas com o software ImageJ e os valores de RGB foram comparados com aqueles obtidos pelo sensor TCS34725.

O sensor RGB foi conectado a um microcontrolador de placa única Arduino Uno (Arduino, Itália) para aquisição e manipulação de dados. Este sensor possui um LED de alto brilho, que emite luz e ilumina a superfície estudada. A luz refletida pela superfície é medida pelo detector acoplado ao TCS34725. O conjunto de fotodiodos presentes nesse sensor compreende uma matriz 3x4 e cada conjunto de 3 diodos possui filtros para as cores vermelha (R), verde (G) e azul (B). Um quarto conjunto de três diodos recebe a radiação não filtrada. Quatro conversores analógico-digital (ADC), integrados, convertem, simultaneamente, correntes de fotodiodo amplificadas em valor digital de 16 bits. Assim, os resultados são transferidos para registradores de dados por meio de um microcontrolador. O LED, que é baseado em nitreto (InGaN), possui iluminação máxima nas faixas de espectro desejadas (400-700 nm)<sup>63</sup>. Um filtro bloqueador de infravermelho (IR) é integrado ao chip e localizado próximo aos fotodiodos de detecção de cor. O fabricante relata que isso minimiza o componente espectral infravermelho e permite medições de cores mais precisas<sup>52</sup>, visto que a temperatura do meio poderia influenciar no sinal que chega aos fotodiodos.

O sensor RGB pode ser alimentado diretamente pelo Arduino e a recepção de dados é realizada usando as portas analógicas do microcontrolador que, por sua vez, é conectado ao computador via cabo USB e controlado por um software. Os valores de RGB são coletados para cada uma das medidas, utilizando o software e as bibliotecas disponibilizadas pelo fabricante, a partir da biblioteca o usuário tem todo o algoritmo para funcionamento do sensor. A biblioteca utilizada, para fornecer os dados de R, G e B separadamente, foi a Color View, disponível no site do fabricante do sensor, não necessitando de conhecimentos específicos de programação. O algoritmo foi modificado para medidas em intervalos de 50 milissegundos e um ganho de 60x. A **Figura 4** apresenta a tela de operação do software Arduino e a linha, no algoritmo, em que são modificados o ganho e tempo de integração.

**Figura 4** – Captura de tela do software utilizado para medidas de RGB: (A) modificações em tempo de integração e ganho.



```
colorview-Fe3 | Arduino 1.8.13
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

colorview-Fe3
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_TCS34725.h"

// Pick analog outputs, for the UNO these three work well
// use ~560 ohm resistor between Red & Blue, ~1K for green (its brighter)
#define redpin 3
#define greenpin 5
#define bluepin 6
// for a common anode LED, connect the common pin to +5V
// for common cathode, connect the common to ground

// set to false if using a common cathode LED
#define commonAnode true

// our RGB -> eye-recognized gamma color
byte gammatable[256];

Adafruit_TCS34725 tcs = Adafruit_TCS34725(TCS34725_INTEGRATIONTIME_50MS, TCS34725_GAIN_60X);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Serial.println("Color View Test!");

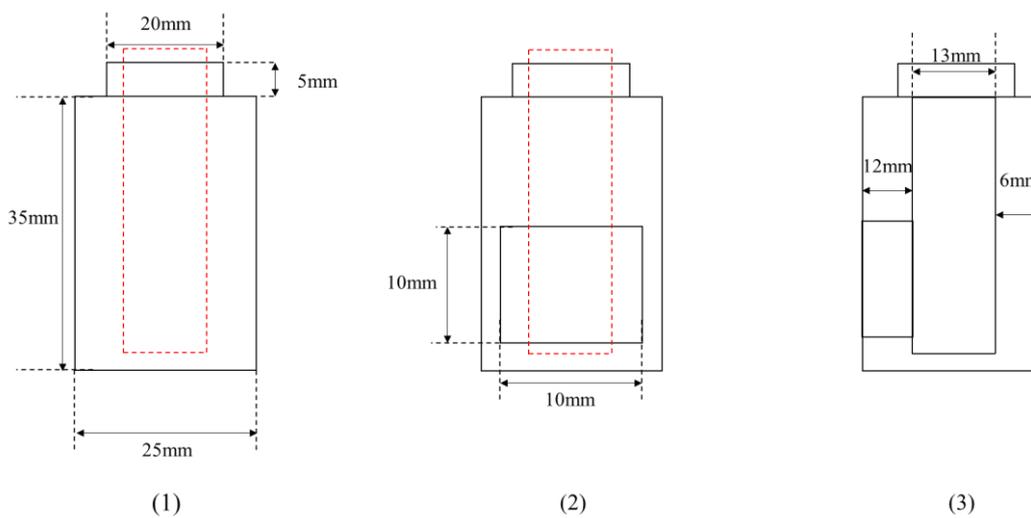
  if (tcs.begin()) {
    //Serial.println("Found sensor");
  } else {
    Serial.println("No TCS34725 found ... check your connections");
    while (1); // halt!
  }

  // use these three pins to drive an LED
#ifdef ARDUINO_ARCH_ESP32
  ledcAttachPin(redpin, 1);
  ledcSetup(1, 12000, 8);
  ledcAttachPin(greenpin, 2);
  ledcSetup(2, 12000, 8);
  ledcAttachPin(bluepin, 3);
  ledcSetup(3, 12000, 8);
#else
  pinMode(redpin, OUTPUT);
  pinMode(greenpin, OUTPUT);
  pinMode(bluepin, OUTPUT);
#endif
}

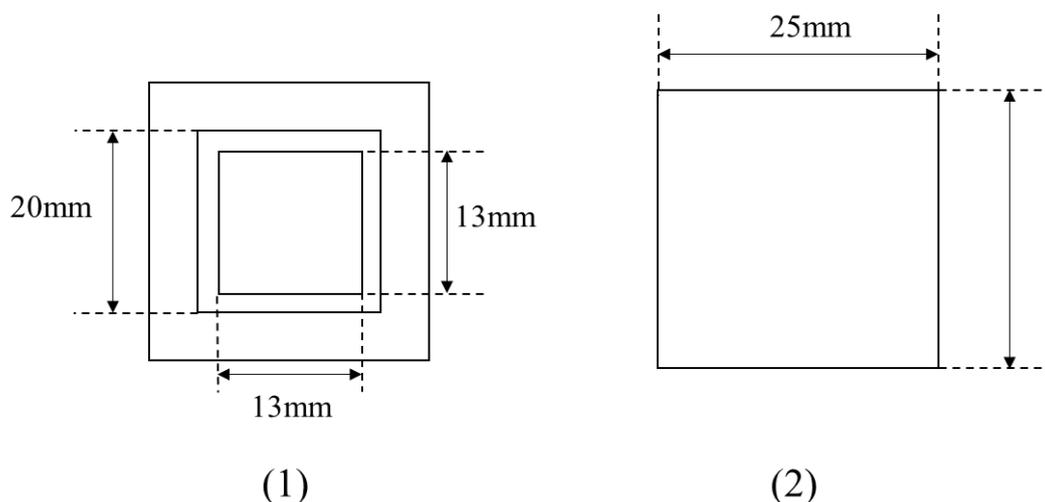
#endif
```

Um suporte para a cubeta foi projetado, utilizando o software *Autodesk Inventor*, e produzido em impressora 3D (modelo A2 Core, GTMax, Brasil). O porta-cubetas, impresso em PLA (ácido poliláctico), possui duas partes: uma base onde são encaixados o sensor e a cubeta e uma tampa para cobrir a cubeta. Na lateral do porta-cubetas foi feita uma janela onde o sensor é acoplado. As **Figuras 5, 6 e 7** apresentam as medidas do suporte de cubeta e sua tampa. A **Figura 8** apresenta a montagem do dispositivo e a **Figura 9**, a representação esquemática do circuito. O arquivo completo do projeto, em formato STL está disponível em <https://bit.ly/3rbftBn>.

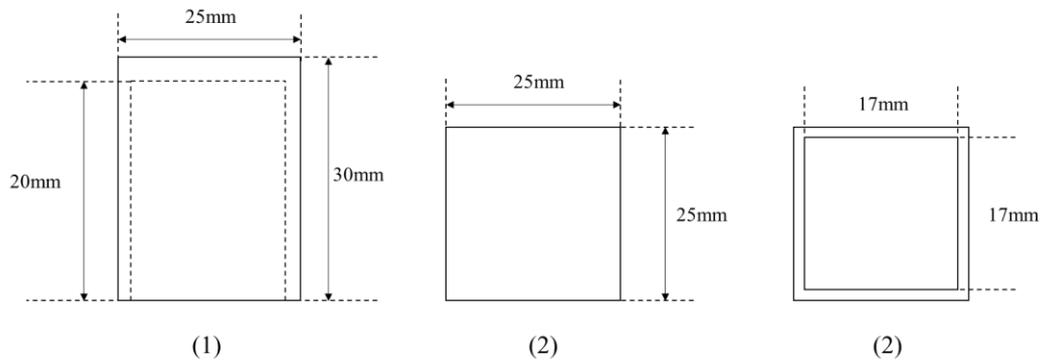
**Figura 5** – Desenho para impressão do suporte de cubeta: (1) vista lateral oposta ao sensor; (2) vista lateral com a janela para acoplamento do sensor; (3) corte longitudinal.



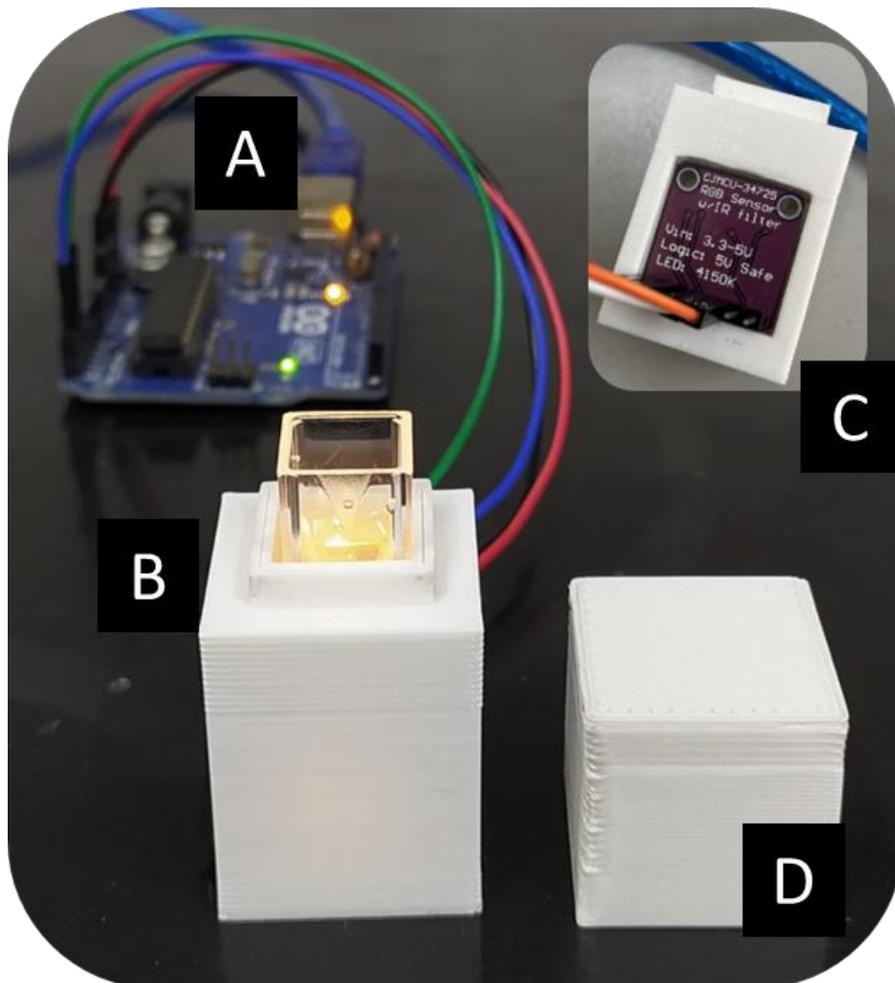
**Figura 6** – Desenho para impressão do suporte de cubeta: (1) vista superior; (2) vista inferior.



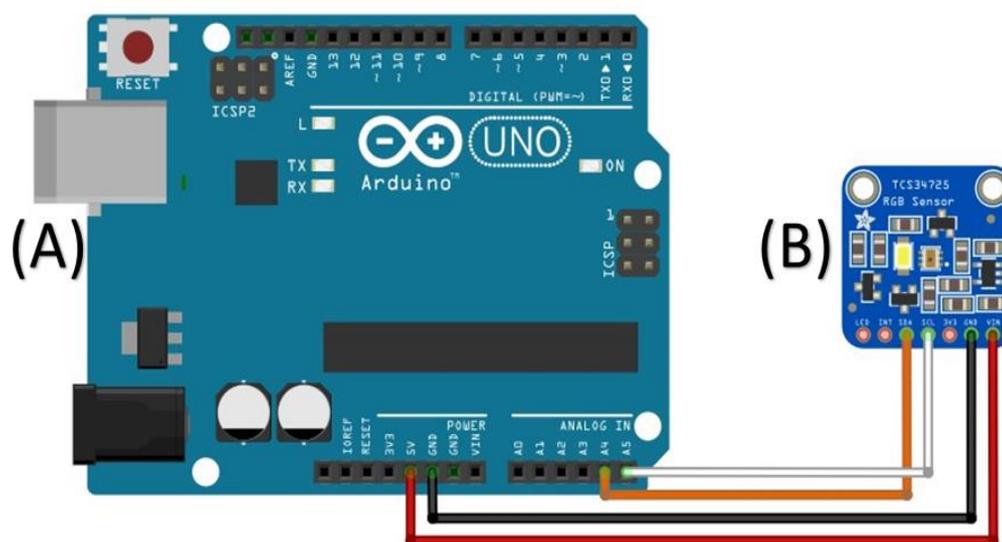
**Figura 7** – Desenho para impressão da tampa do suporte de cubeta: (1) vista lateral; (2) vista superior; (3) vista inferior.



**Figura 8** – Montagem do dispositivo RGB: (A) microcontrolador (Arduino®), (B) suporte com a cubeta, (C) sensor acoplado ao suporte e (D) tampa do suporte da cubeta.



**Figura 9** – Representação esquemática do circuito e conexões: (A) Arduino Uno. (B) Sensor RGB TCS34725. Conexões: Vermelho: alimentação do sensor (5V); Preto: aterramento; Branco e Laranja: transmissão de dados entre o sensor e o controlador.



### 3.3 Procedimento Experimental

A determinação de  $\text{Fe}^{3+}$  foi realizada da seguinte forma: 0,2 mL de solução 2,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de tiocianato de potássio e 0,12 mL de solução 4,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de ácido nítrico foram adicionados em um tubo de polipropileno com amostra de  $\text{Fe}^{3+}$  e completado com água ultrapura até o volume de 2,0 mL de solução e as medidas foram feitas imediatamente.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Aspectos Gerais

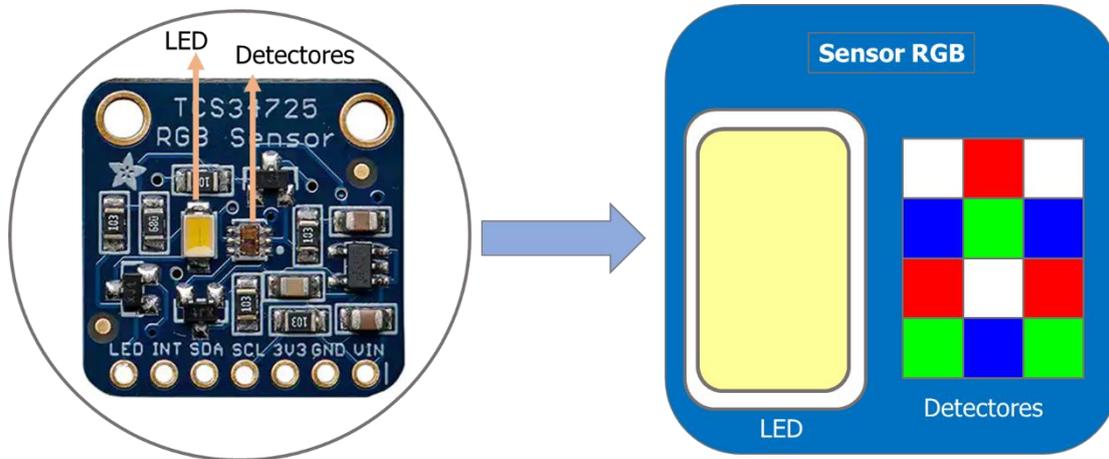
O sensor RGB TCS34725 fornece uma resposta digital em quatro canais diferentes: vermelho, verde, azul e *clear* (RGBC). Desenvolvido pelo fabricante para elaboração de projetos de automação, o sensor tem a finalidade de identificar cores em superfícies diversas, proporcionando uma resposta digital, simulando as cores do ambiente, de acordo com o sistema RGB.

O sensor pode ser dividido em três partes: (1º) um diodo emissor de luz (LED) constituído de um material semiconductor de nitreto de índio-gálio (InGaN); (2º) um sistema de detecção baseado em uma matriz 3x4 de fotodiodos com filtros na região do vermelho, verde e azul, do espectro eletromagnético e uma componente transparente não filtrada (*clear*). Sobre toda a matriz do detector é empregado um filtro de radiação infravermelho; (3º) quatro conversores analógico-digital integrados que convertem o sinal de corrente para valores de RGBC, em um sistema de 16 bits.

Para a detecção da cor do ambiente o sensor ilumina a superfície da qual pretende-se obter a cor, a luz refletida sobre a superfície chega ao detector, onde cada conjunto de diodos fornece, em um sistema de 8 bits, o sinal convertido em valores de RGBC, vermelho, verde, azul e *clear*. A frequência de saída dos fotodetectores é proporcional à intensidade de radiação incidente sobre sua superfície fotossensível. Estes sinais gerados no conjunto 3x4 de fotodiodos fazem com que cada canal RGBC produza um sinal combinado de 3 fotodiodos. Uma foto do sensor é apresentada na **Figura 10**, em que se destaca o sistema de detecção e o LED, utilizado para iluminação do ambiente, e a matriz de fotodetectores.

Considerando estes aspectos, neste trabalho avaliou-se o uso do sensor TCS 34725 para medidas colorimétricas visando a determinação quantitativa de espécies coloridas em solução. Diversos parâmetros instrumentais foram avaliados e otimizados visando a obtenção de sinais analíticos com baixos ruídos e aumento de sensibilidade. Apesar de se encontrar na literatura o uso deste sensor para gás, não se encontra sua aplicação em amostras líquidas<sup>42</sup>.

**Figura 10** – Foto do sensor RGB TCS 34725 e o destaque do sistema de iluminação/detecção do sensor. No destaque do sistema de detecção composto da matriz 3x4 as cores vermelha, verde, azul e branca representam os filtros empregados e a disposição dos fotodiodos empregados como detectores.



#### 4.2 Avaliação do sensor RGB

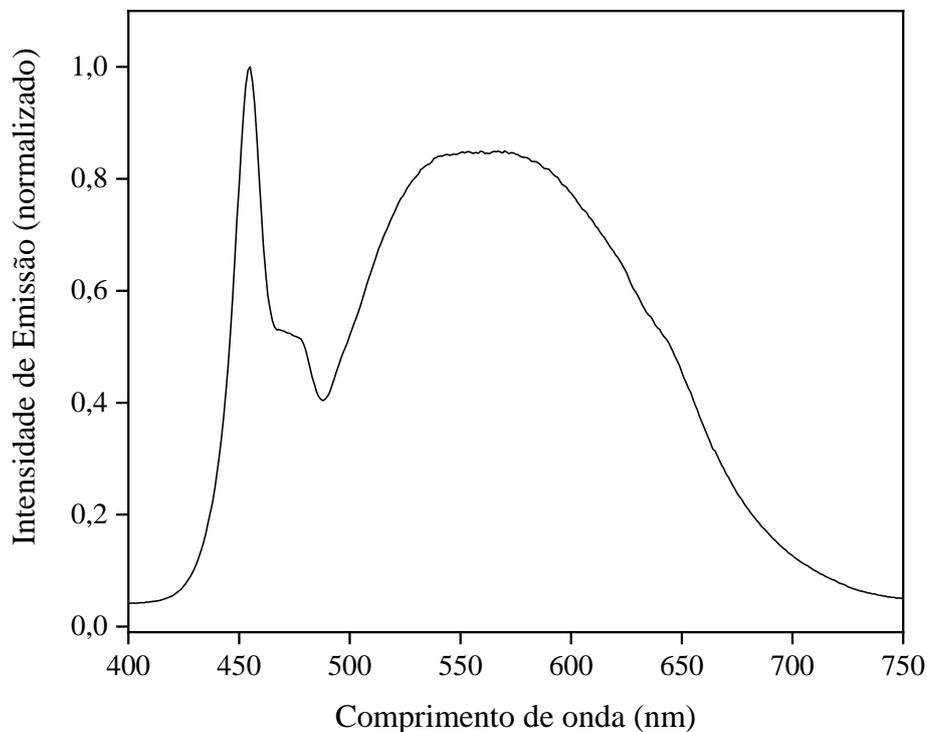
Nesta etapa do trabalho, buscou-se compreender a resposta fornecida por cada canal do sensor, quando empregado para realização de medidas em soluções coloridas. A avaliação da resposta do sensor é uma parte essencial do trabalho, pois a partir dela, consegue-se entender como os sinais são processados pelo detector, bem como suas correlações com diferentes medidas de cores.

Três fatores podem influenciar na resposta do sensor e, conseqüentemente, nos valores de RGB: a fonte de iluminação, o objeto iluminado e a resposta do detector. Neste arranjo do sensor, o LED ilumina a superfície de um objeto. Esta fonte de iluminação é caracterizada por sua capacidade de emitir energia em diferentes comprimentos de onda. Quando a luz incide na superfície de determinado objeto, o feixe luminoso pode ser modificado por absorção, espalhamento e outros processos físicos, dependendo da propriedade química ou física do objeto<sup>1</sup>. Por fim, a luz atinge o detector do sensor RGB na forma de luz refletida ou refratada.

Para uma melhor compreensão da capacidade e iluminação do LED empregado no sensor RGB utilizado neste trabalho, assim como sua faixa espectral de iluminação, um espectro de emissão do LED foi obtido em um espectrometro multicanal e a **Figura 11** apresenta o espectro de emissão do LED. A faixa espectral de iluminação do LED foi observada dentro do espectro visível, entre 415 e 759 nm. Um pico de emissão em torno

de 460 nm foi observado e, de acordo com a literatura, este pico é característico de emissões de LED's compostos por GaN ou InGaN<sup>64</sup>. LED construído a partir da mistura InGaN possui alta capacidade calorífica, ou seja, sua temperatura é praticamente inalterada ao longo da utilização. O comprimento de onda emitido por LED baseados no composto InGaN depende da razão GaN/InN. O fabricante não fornece informações mais detalhadas do LED empregado no sensor.

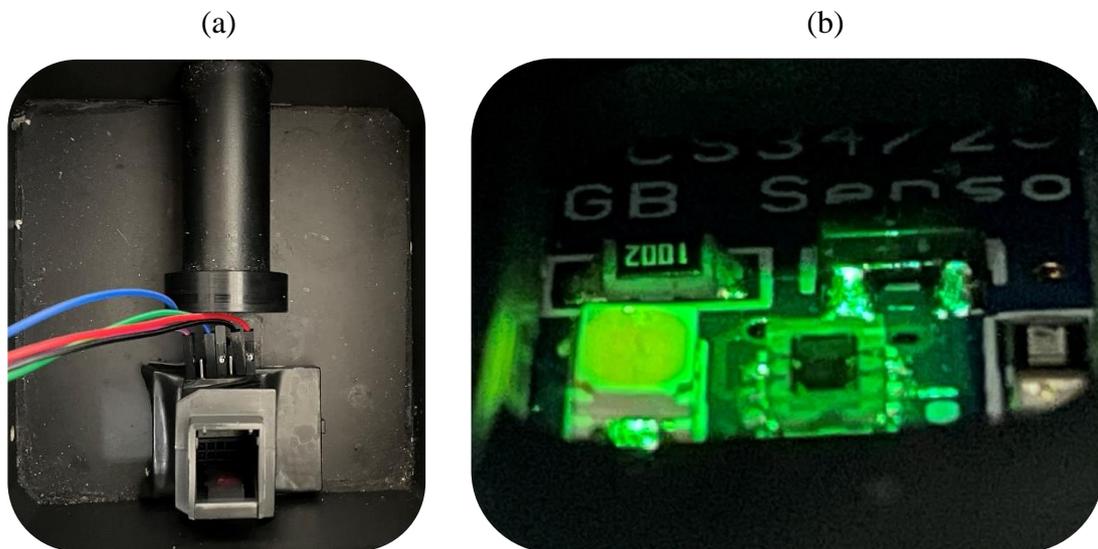
**Figura 11** – Espectro de emissão do LED branco acoplado ao sensor RGB, obtido utilizando um espectrometro multicanal e substituindo a fonte do equipamento pelo LED do sensor. Os sinais foram normalizados.



Após a avaliação da capacidade de iluminação do LED acoplado ao sensor, foi avaliada a resposta do sensor em função do comprimento de onda da radiação incidente no detector. Um espectrofotômetro convencional foi empregado como fonte de radiação monocromática e o sensor foi posicionado no local da cubeta. A radiação emitida pela fonte de radiação do espectrofotômetro foi direcionada diretamente no detector do sensor e os valores de RGB foram anotados para cada comprimento de onda. Neste experimento para cada comprimento no intervalo de 400 e 750 nm foram anotados os valores de RGB

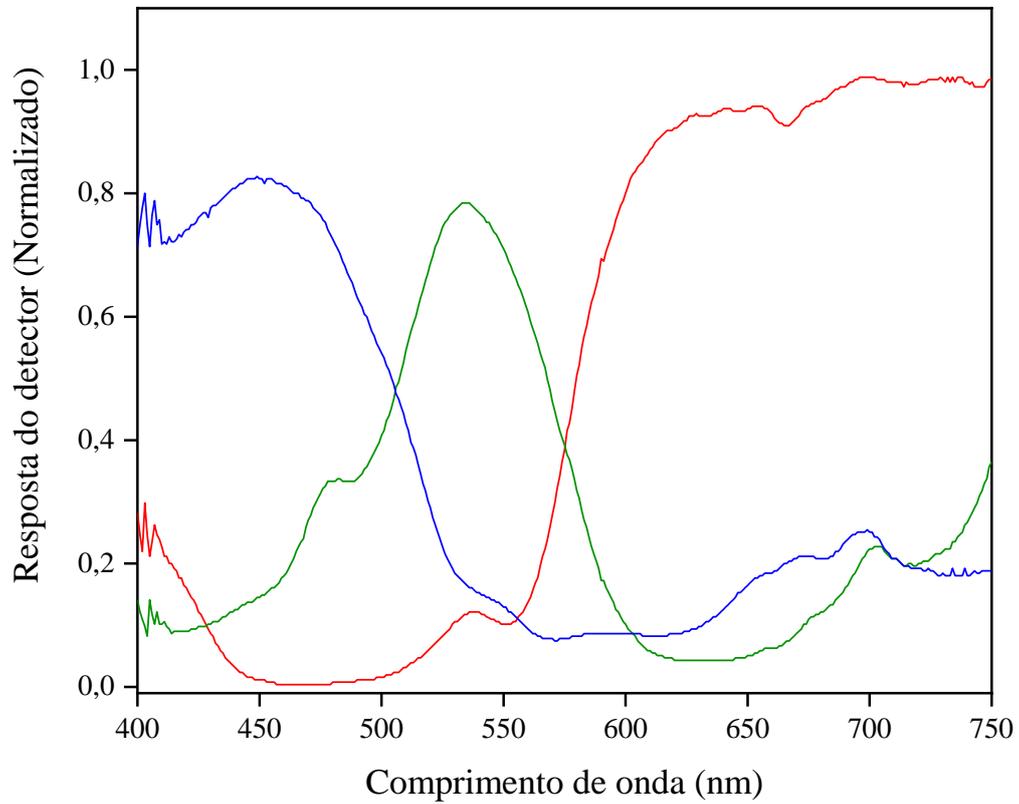
obtidos. Na **Figura 12** é apresentada uma foto do sensor posicionado no espectrofotômetro.

**Figura 12** – Fotografia apresentando o posicionamento do sensor no espectrofotômetro: (a) Vista superior do sensor alocado no interior do espectrofotômetro, fixado dentro do suporte da cubeta. (b) Detalhe do alinhamento da radiação emitida pelo espectrofotômetro no detector do sensor.

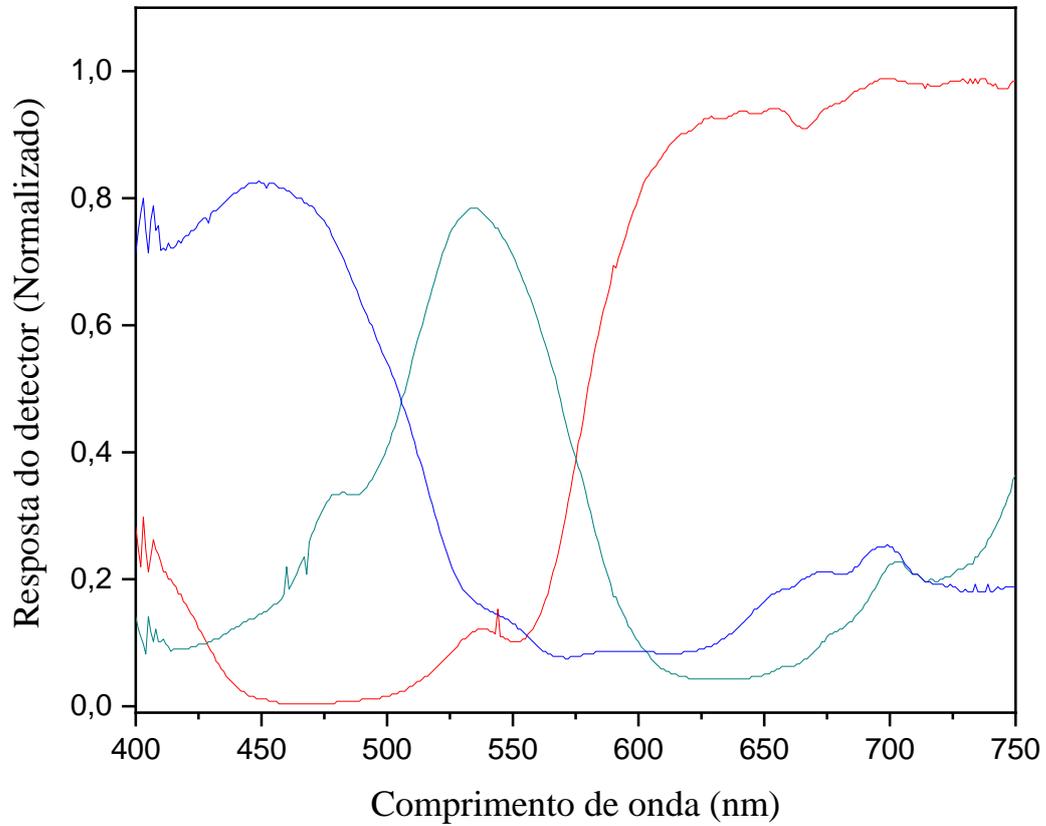


Durante todo o experimento, o LED acoplado ao sensor foi mantido desligado. Uma réplica do sensor TCS34725, adquirida no mercado paralelo, foi submetida ao mesmo experimento para avaliar a resposta do detector. As **Figuras 13** e **14** apresentam as respostas, em valores de RGB, para cada comprimento de onda avaliado (incremento de 1 nm).

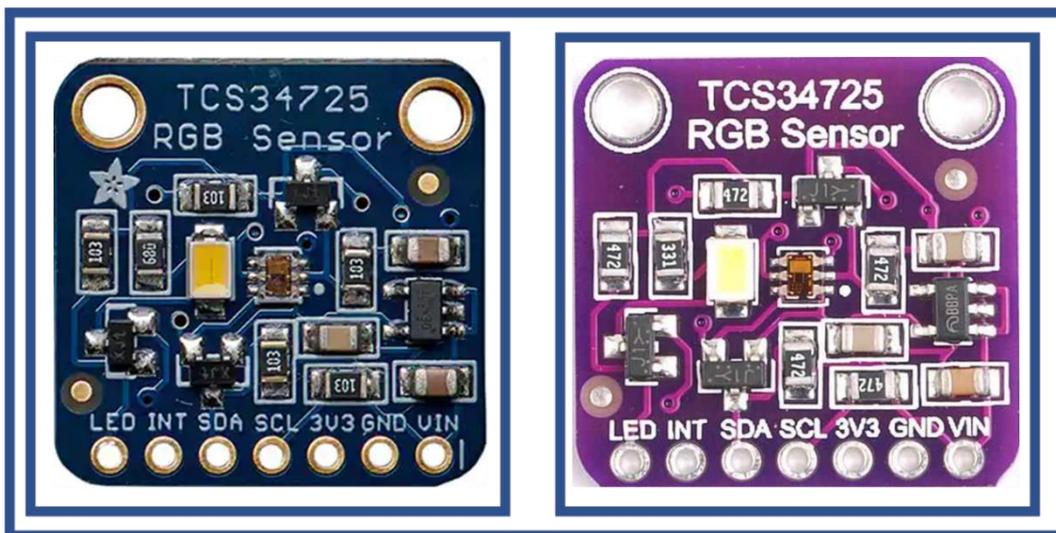
**Figura 13** – Avaliação dos valores dos sinais de RGB em função do comprimento de onda para o sensor TCS34725 Adafruit®. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x.



**Figura 14** – Avaliação dos valores dos sinais de RGB em função do comprimento de onda para o sensor TCS34725 paralelo. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x.



**Figura 15** – Sensores RGB (a) TCS34725 Adafruit® e (b) TCS34725 (paralelo).

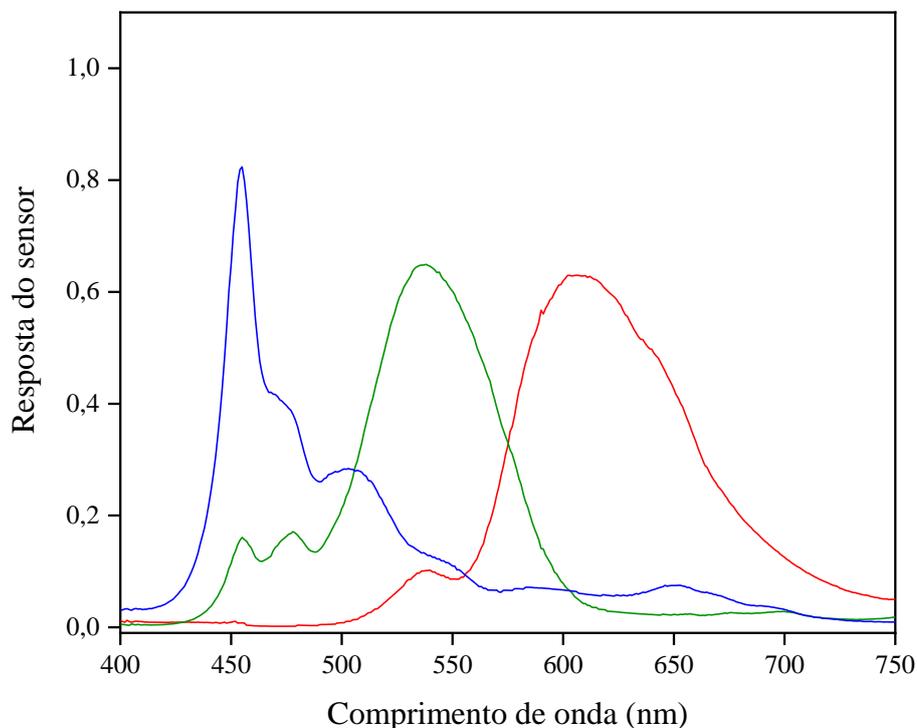


Como pode ser observado nas **Figuras 13 e 14**, não existem diferenças significativas nas respostas obtidas entre os dois sensores avaliados. Os valores de aquisição dos sensores fabricados e vendidos pela Adafruit® (**Figura 15a**) e o sensor encontrado no mercado paralelo (**Figura 15b**) variam em torno de \$8 e \$5 dólares, respectivamente. A conveniência em comprar o sensor paralelo se dá pelo fato da pronta entrega, comparada à compra do sensor original, que geralmente é vendido dos Estados Unidos para os países da América Latina, desconsiderando as taxas de entrega, que neste caso são mais elevadas para o produto importado.

Os sinais reais processados pelo sensor representam uma combinação entre a iluminação fornecida pelo LED do sensor e a capacidade de cada canal para filtrar e fornecer o sinal da radiação refletida que chega ao detector. Como mencionado anteriormente, a capacidade do sensor em fornecer valores de sinais RGB depende, entre outros fatores, da iluminação do ambiente e da resposta do sensor quando submetido à radiação de diferentes comprimentos de ondas. Nos dois experimentos anteriores foram obtidas as respostas de iluminação e sinais processados pelo sensor.

A combinação destas respostas fornece a capacidade efetiva do sensor em função do comprimento de onda. Esta combinação foi obtida multiplicando os sinais do espectro de emissão do LED com os sinais da resposta do sensor em diferentes comprimentos de onda. Como resultado, obtém-se um espectro que corresponde à capacidade efetiva do sensor. O espectro de capacidade efetiva do sensor RGB foi obtido e é apresentado na **Figura 16**.

**Figura 16** – Espectro de capacidade efetiva do sensor RGB. As linhas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor em valores de RGB para os canais R, G e B, respectivamente. Todos os sinais foram normalizados. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x



Considerando a resposta do detector no canal azul em 400 nm, de acordo com as **Figuras 13 e 14**, espera-se uma resposta neste comprimento de onda. No entanto, quando o espectro de emissão do LED acoplado ao detector (**Figura 11**) é observado, é possível concluir que esse LED não possui capacidade de iluminar nesta região do espectro. Combinando o espectro de emissão do LED (**Figura 11**) e o da resposta do detector (**Figuras 13 e 14**), obtém-se o espectro da resposta efetiva do sensor, apresentado na **Figura 16**. Devido à falta de capacidade de emissão do LED, o sensor não é capaz de responder neste comprimento de onda. Outras informações podem ser obtidas com esta combinação de resultados.

Os canais azul, verde e vermelho apresentaram larguras de banda iguais a 415-564, 440-600 e 510-750 nm, respectivamente. A sobreposição entre as cores foi observada, especialmente, para o canal verde. O monitoramento do canal azul é menos influenciado pela cor vermelha em comprimentos de onda de até 500 nm e pelo canal verde, até 485 nm. Todavia, a influência das cores azul e verde, no monitoramento do

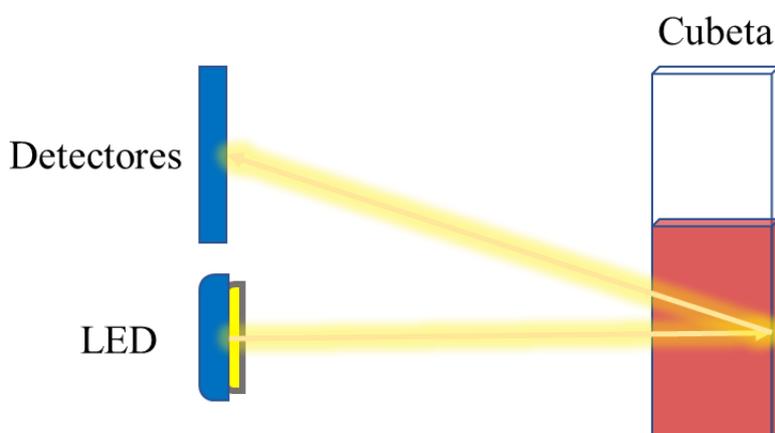
canal vermelho, é menos evidenciada. Estes resultados contribuem para o entendimento da interação entre a luz emitida pelo sensor e os sinais registrados pelos canais RGB do sensor. Estas informações são importantes, pois permitem prever como será a resposta do detector frente às diferentes cores. No caso do emprego do sensor para análises quantitativas em química analítica, é possível prever a resposta do sensor sobrepondo o espectro da resposta efetiva do sensor frente ao espectro de absorção molecular de espécies coloridas.

#### *4.3 Avaliação da resposta do sensor RGB para soluções de corantes.*

No intuito de investigar a interação entre o sensor RGB e as soluções de substâncias coloridas e, posteriormente, a aplicação para análises quantitativas, foram selecionados corantes de diferentes cores. Nesta etapa do trabalho foram empregadas soluções coloridas, preparadas a partir dos corantes, e adicionadas em uma cubeta de plástico convencional, usualmente empregadas em medidas por espectrofotometria UV-vis.

A incidência da radiação eletromagnética emitida pelo LED do sensor em uma cubeta contendo uma solução colorida, sofre diversos processos antes de ter o sinal processado pelo detector. Absorção, espalhamento e reflexão são alguns dos fenômenos que podem ser observados. Um esquema apresentando a incidência da luz emitida pelo LED do sensor RGB em uma cubeta contendo uma solução colorida é apresentada na **Figura 17**.

**Figura 17** – Representação esquemática da incidência de luz emitida pelo LED do sensor em uma cubeta contendo solução colorida.

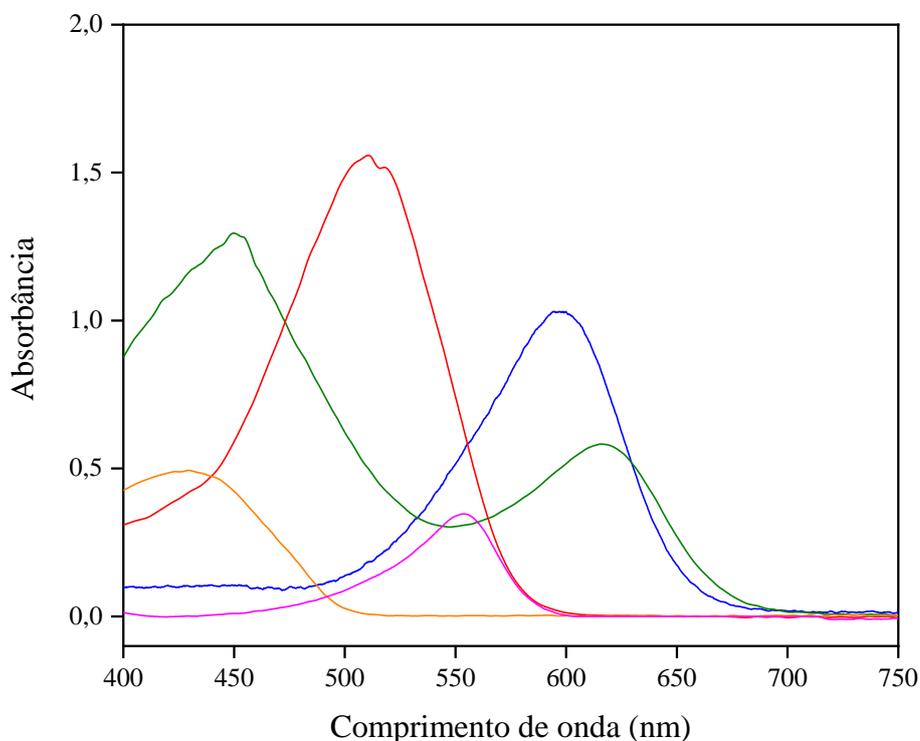


Para avaliar o uso do sensor RGB para medidas quantitativas em soluções coloridas foi desenvolvido um aparato para alocação do sensor e da cubeta de medida. Um suporte impresso em uma impressora 3D foi fabricado para se ajustar a uma cubeta de 1 cm de caminho óptico. Além da cubeta, o suporte possui um corte lateral, em que o sensor RGB é alocado, conforme mostrado no detalhe da **Figura 5** e na **Figura 8C**.

Neste equipamento, os sinais captados pelo sensor RGB são baseados na reflexão da luz branca, emitida pelo LED e refletida pela solução colorida. Considerando estes aspectos, dois diferentes polímeros foram avaliados na fabricação do suporte da cubeta, um branco e outro preto. A avaliação das respostas do sensor foi realizada empregando diferentes soluções coloridas, buscando compreender todo o espectro eletromagnético na região do visível. Desta forma foram preparadas soluções dos seguintes corantes: tartrazina (amarelo), vermelho ponceau (vermelho), fenolftaleína (rosa), azul índigo (azul) e verde de bromocresol (verde).

A **Figura 18** apresenta os espectros de absorção para cada um dos corantes. A tartrazina apresenta máximo de absorção em torno de 430 nm, vermelho ponceau, em torno de 510 nm, a fenolftaleína, próximo de 550 nm e azul índigo, na faixa dos 600 nm. O corante verde de bromocresol exibiu duas regiões de máxima absorbância, 450 nm e 610 nm.

**Figura 18** – Espectros de absorção para as soluções de corantes: (→) Tartrazina; (→) Vermelho Ponceau; (→) Fenolftaleína; (→) Azul índigo; (→) Verde de bromocresol.



Observando o espectro de absorção da tartrazina, na **Figura 18**, e correlacionando a absorção óptica e a resposta da capacidade efetiva do sensor, **Figura 16**, um decaimento na resposta do canal azul, pode ser esperado e este raciocínio pode ser aplicado a todos os outros corantes. Espera-se, caso uma solução colorida absorva a luz emitida pelo sensor, que os sinais monitorados naquela região sejam reduzidos na presença de espécies absorventes.

Quando o polímero preto empregado para a confecção do material de suporte da cubeta foi utilizado para as medidas os sinais observados eram baixos e não apresentavam nenhuma correlação com as soluções coloridas. Neste caso é provável que a luz emitida pelo sensor foi absorvida por este material, após a passagem da radiação pela cubeta contendo as soluções. Os valores de R, G e B obtidos eram todos próximos de zero. Por outro lado, o suporte impresso com material branco se mostrou eficiente e o sensor foi capaz de identificar mudanças nas cores. Dessa forma, o suporte impresso com polímero branco foi utilizado em todas as medidas posteriores.

Posteriormente, soluções de concentrações crescentes dos corantes avaliados foram preparadas para avaliação da resposta linear no dispositivo proposto. Os sinais de cada valor RGB foram monitorados e empregados para construção de curvas de calibração. Melhores correlações entre os valores de R, G e B e as concentrações foram obtidas empregando funções logarítmicas, plotando a **equação 2** em função da concentração.

$$S = -\log \frac{I}{I_0} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde I é o sinal para a amostra e I<sub>0</sub> equivale ao valor para solvente, para cada canal RGB e S é o sinal resultante e a concentração da solução no eixo X. Esta estratégia matemática, que é análoga à aplicação da Lei de Lambert-Beer, já foi explorada em diversos trabalhos da literatura para análises digitais empregando smartphone<sup>6,13,34,55</sup>.

As características analíticas estimadas para cada corante, empregando o dispositivo proposto foram comparadas com aquelas obtidas empregando um smartphone, e por espectrofotômetro convencional, com as medidas realizadas no comprimento de onda máxima de absorção de cada corante. Para as medidas realizadas empregando um smartphone, foi empregado um dispositivo já apresentado na literatura<sup>54</sup>, em que as medidas foram realizadas a partir de fotos das soluções coloridas e em seguida os sinais dos valores de RGB foram extraídos via software.

Para todos os corantes, foram analisados valores de concentração igual à 0,005 mmol L<sup>-1</sup> até 0,05 mmol L<sup>-1</sup>, além do branco analítico. Os resultados estão apresentados na **Tabela 1**.

**Tabela 1:** Características analíticas do sensor RGB e procedimento espectrofotométrico para determinação de corantes em soluções coloridas. %RSD: 0,015 mmol L<sup>-1</sup>, n=10

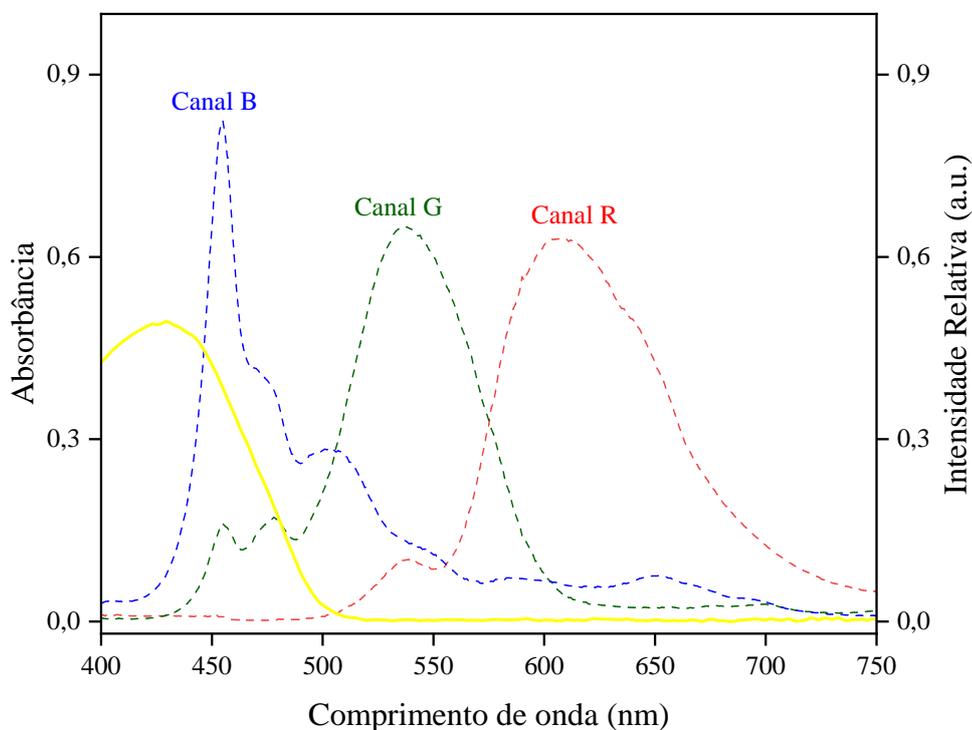
Analito	Dispositivo	Componente	Faixa Linear (mmol L <sup>-1</sup> )	RSD (%)	Equação	R
Tartrazina	Sensor RGB	R		–	–	–
		G	0,005 – 0,025	–	–	–
		B		0,49	7,65x + 0,01	0,988
	Smartphone	R		–	–	–
		G	0,005 – 0,050	–	–	–
		B		3,08	5,77x – 7,0 x 10 <sup>-6</sup>	0,997
Uv-vis	Absorbância	0,005 – 0,075	0,67	11,69x + 0,02	0,999	
Azul índigo	Sensor RGB	R		1,3	8,53x – 1,7 x 10 <sup>-4</sup>	0,999
		G	0,005 – 0,050	0,29	6,48x – 1,0 x 10 <sup>-3</sup>	0,999
		B		0,29	3,21x + 1,3 x 10 <sup>-5</sup>	0,998
	Smartphone	R		3,52	4,42x + 0,02	0,950
		G	0,005 – 0,050	3,17	3,00x – 0,04	0,859
		B		–	–	–
Uv-vis	Absorbância	0,005 – 0,075	0,68	8,36x – 0,01	0,999	
Verde de bromocresol	Sensor RGB	R		0,89	15,97x – 0,02	0,972
		G	0,005 – 0,025	0,65	9,78x – 0,01	0,989
		B		0,90	12,97x + 0,01	0,997
	Smartphone	R		–	–	–
		G	0,010 – 0,050	–	–	–
		B		4,10	18,16x – 0,03	0,993
Uv-vis	Absorbância	0,010 – 0,075	0,51	13,69x – 0,01	0,999	
Vermelho ponceau	Sensor RGB	R		0,39	2,28x + 0,01	0,993
		G	0,005 – 0,025	0,48	12,32x + 0,03	0,982
		B		0,63	12,19x + 0,02	0,987
	Smartphone	R		–	–	–
		G	0,010 – 0,025	11,10	20,66x – 0,036	0,938
		B		–	–	–
Uv-vis	Absorbância	0,010 – 0,075	0,15	17,23x + 0,02	0,999	
Fenolftaleína	Sensor RGB	R		0,57	5,02x + 0,01	0,984
		G	0,005 – 0,025	0,73	15,71x + 0,041	0,977
		B		0,50	6,33x + 0,01	0,983
	Smartphone	R		5,91	2,49x + 0,01	0,982
		G	0,010 – 0,050	5,54	30,31x – 0,05	0,995
		B		–	–	–
Uv-vis	Absorbância	0,010 – 0,075	0,95	17,23x – 0,02	0,999	

De acordo resultados apresentados na **Tabela 1**, observa-se que os dados obtidos empregando o dispositivo proposto são semelhantes àqueles obtidos por smartphone e por espectrofotometria Uv-vis. Comparando os resultados obtidos por smartphone àqueles obtidos pelo sensor RGB, observa-se que para algumas soluções, tais como o azul índigo, verde de bromocresol, vermelho Ponceau e a fenolftaleína, o sensor apresentou linearidade para mais de uma das componentes RGB. Para o sensor RGB, de acordo com os experimentos deste trabalho, era esperado. Isso é observado quando sobreposos os espectros de absorção das espécies coloridas, com a capacidade efetiva do sensor. No entanto, esta resposta efetiva não é conhecida para a câmera do smartphone, do qual não conhecemos como são geradas e armazenadas as fotografias por este dispositivo. Comparando os resultados obtidos para o sensor RGB com os da espectrofotometria UV-vis, as características foram semelhantes, com sensibilidade, faixa linear e desvio padrão relativos comparáveis entre as duas técnicas.

Nas **Figuras de 19 a 28** são apresentadas as curvas de calibração para as soluções coloridas e seus espectros de absorção sobrepostos à resposta efetiva do sensor. Abaixo de cada curva de calibração foram inseridas as fotografias das cubetas preenchidas com as soluções empregadas para a obtenção das curvas de calibração. Os retângulos inseridos abaixo das cubetas representam cada solução usada para obter a curva de calibração. Todas as formas foram criadas no software PowerPoint para Microsoft 365 (versão 2202 64-bits) e cada valor RGB obtido para cada solução foi usado para simular as mudanças de cor.

Para a solução do branco analítico, era esperado que valores de RGB fossem próximos aos máximos obtidos em sistemas de 8 bits (255, em cada canal), devido à ausência de espécies absorventes. Entretanto foi observada uma luz verde-clara, provavelmente, como resultado do espalhamento de luz causado por fótons refletidos pelas interfaces da cela de medida ou pelo porta-cubetas, assim como pela ineficiência do sensor em detectar cores na região de 400 nm do espectro eletromagnético. Para as demais soluções, foi possível observar o aumento da intensidade da cor, à medida que a concentração da solução aumentava.

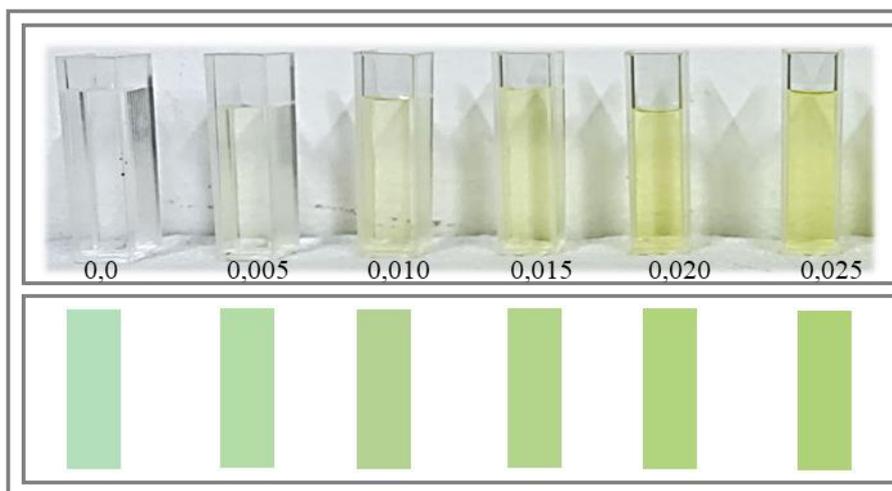
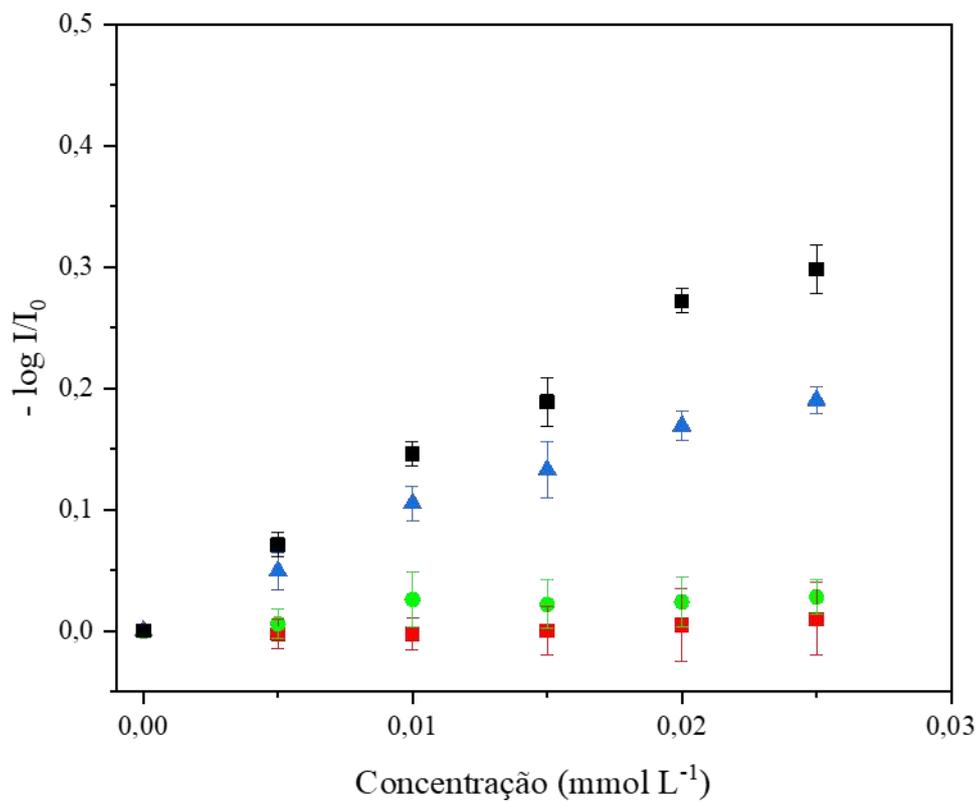
**Figura 19** – Espectro de absorção para a solução de corante tartrazina (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.



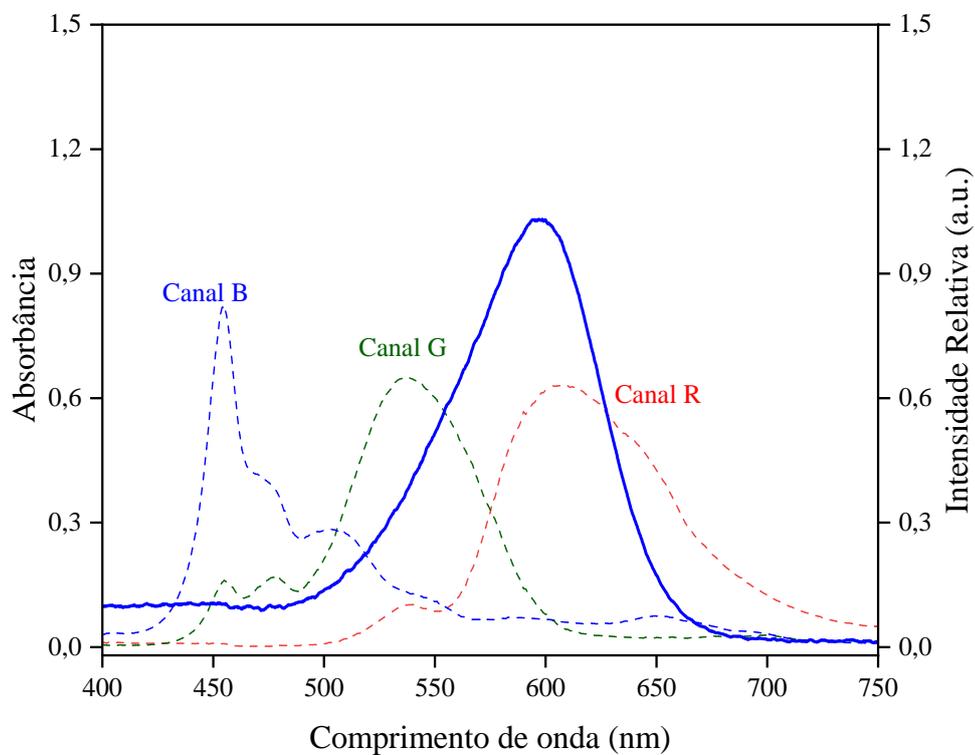
A partir da análise da **Figura 19**, que apresenta o espectro de absorção da tartrazina sobreposto à resposta efetiva do sensor, pode-se esperar que as melhores respostas serão obtidas pelo canal B, do sensor RGB. Como explicado anteriormente, caso uma solução colorida absorva a luz emitida pelo sensor, os sinais monitorados naquela região, tendem a reduzir conforme aumenta-se a concentração da espécie absorvente na solução.

Os resultados apresentados na **Tabela 1** e na **Figura 20**, confirmam a melhor resposta apresentada no canal B, para o corante tartrazina, visto que foi o único canal em que se observou linearidade.

**Figura 20** – Curva de calibração para o corante amarelo tartrazina empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x

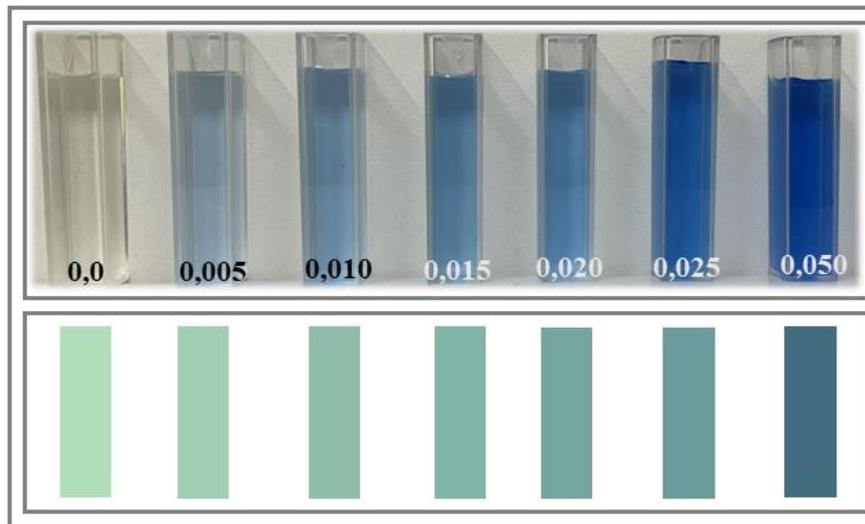
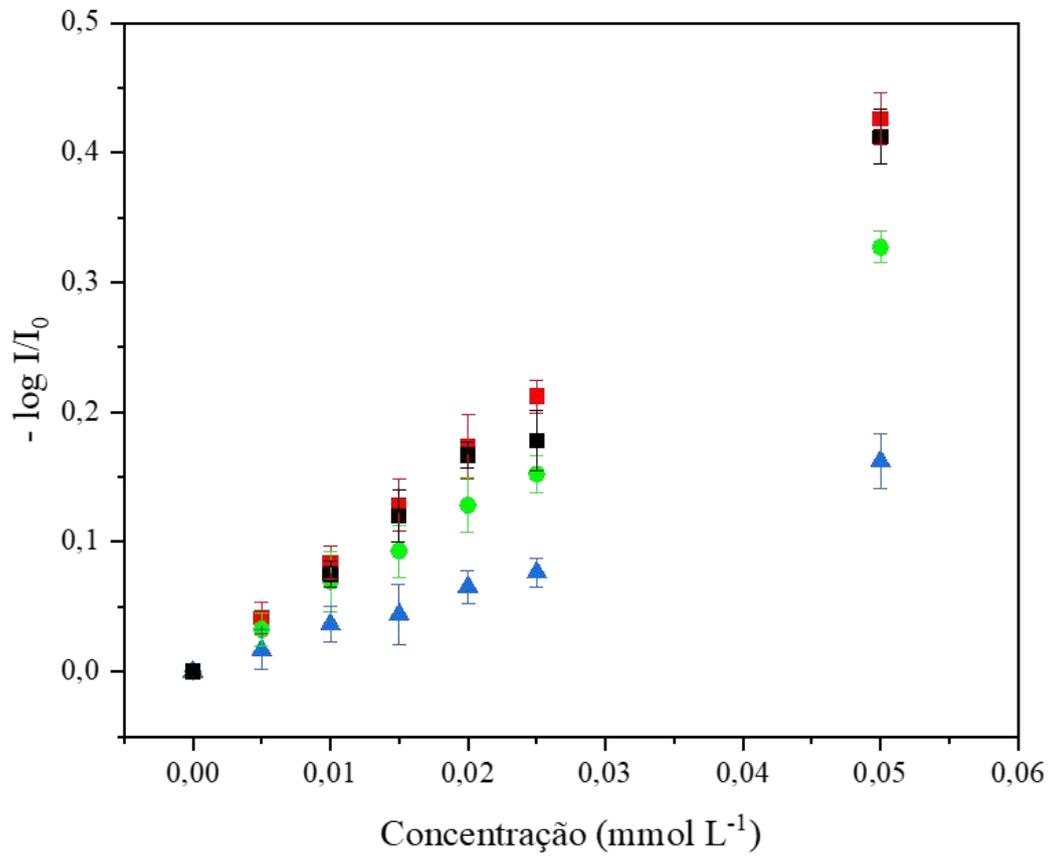


**Figura 21** – Espectro de absorção para a solução de corante azul índigo (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.



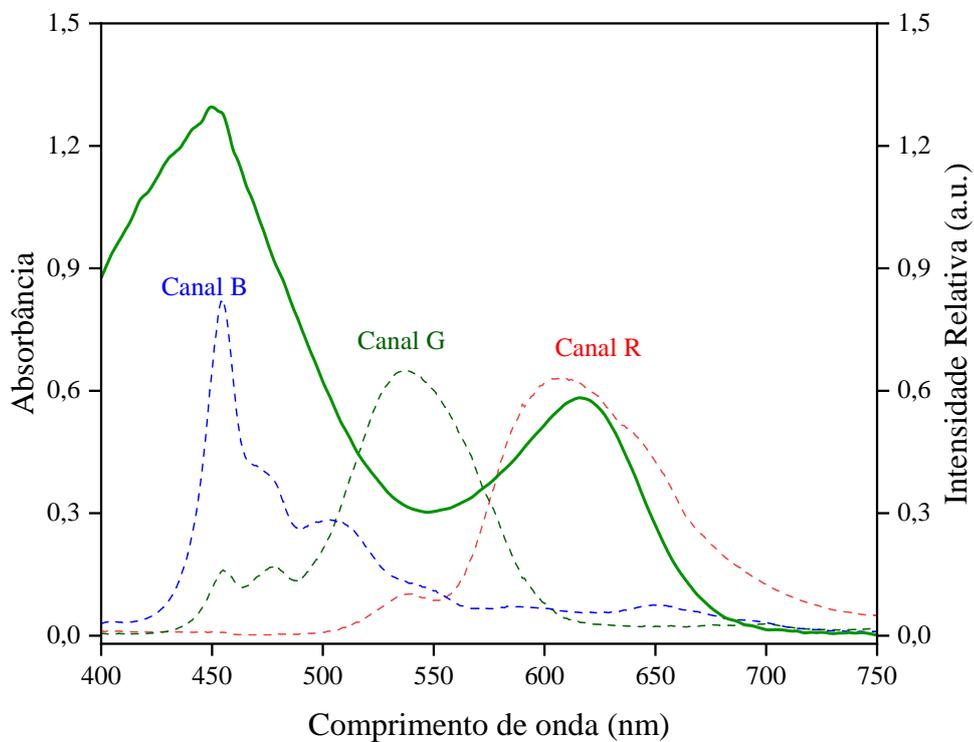
A **Figura 21** permite esperar resultados satisfatórios nos canais G e R e a **Figura 22** apresenta resultados que indicam a melhor linearidade e sensibilidade no canal R.

**Figura 22** – Curva de calibração para o corante azul índigo empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x

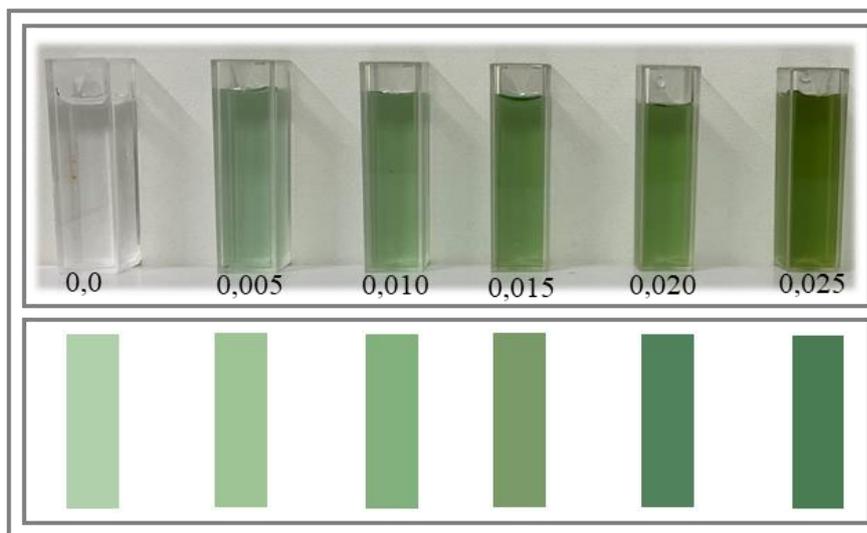
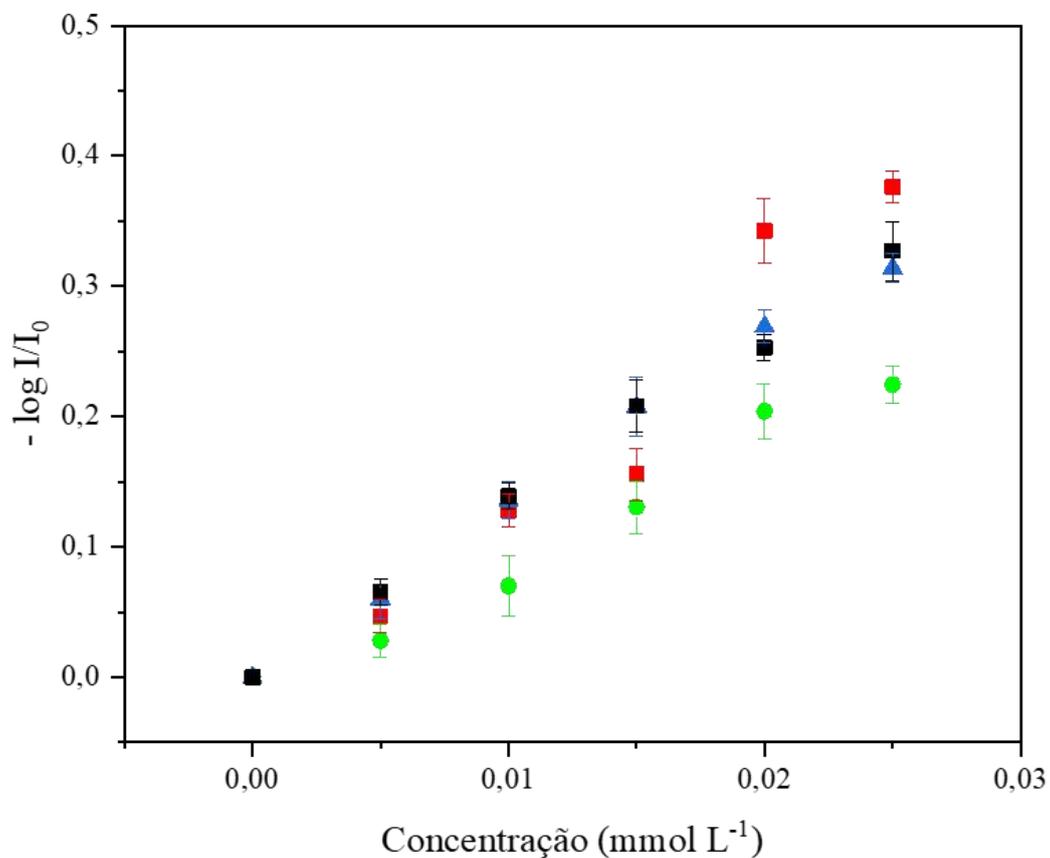


O corante verde de bromocresol apresenta dois picos de absorção e a partir do espectro apresentado na **Figura 23**, era esperado que, ao longo do experimento, ocorram variações de sinais nas três componentes. Analisando a **Figura 24**, compreende-se que, de fato, a intensidade do sinal variou linearmente com a concentração do corante nos três canais, sendo que o melhor resultado obtido foi a partir do canal B, que responde na mesma região em que ocorre maior absorção do corante verde de bromocresol.

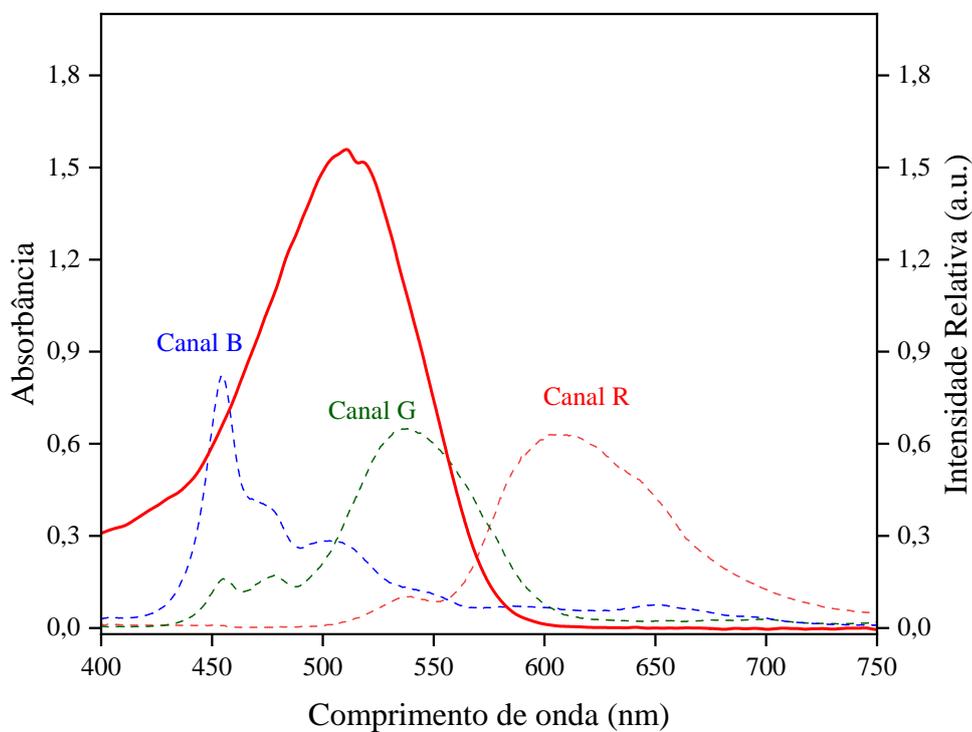
**Figura 23** – Espectro de absorção para a solução de corante verde de bromocresol (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.



**Figura 24** – Curva de calibração para o verde de bromocresol, empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x

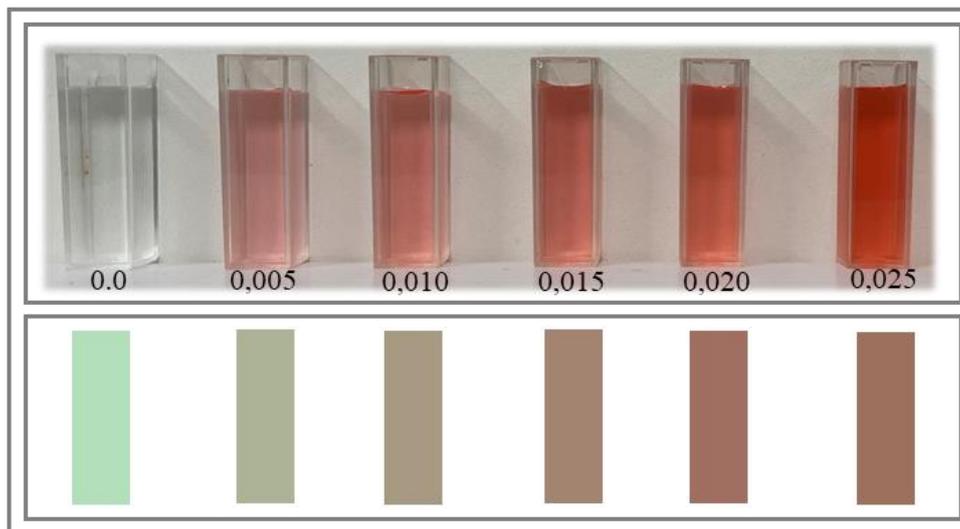
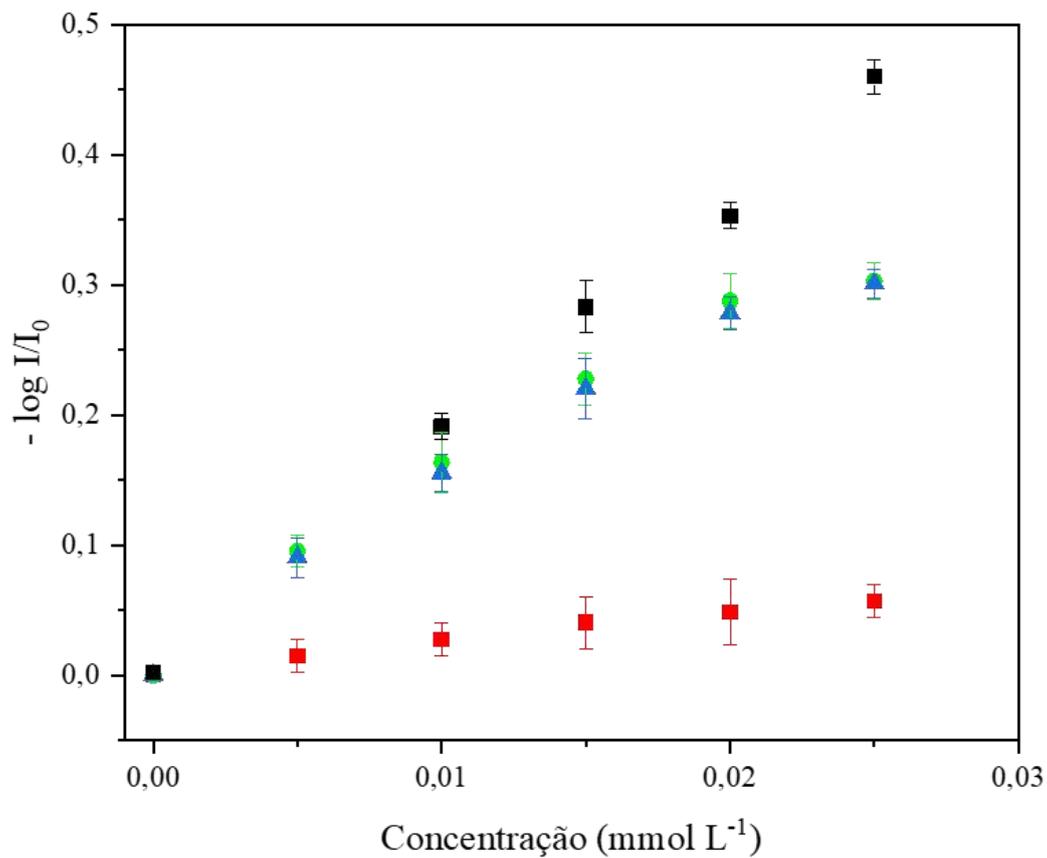


**Figura 25** – Espectro de absorção para a solução de corante vermelho ponceau (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.



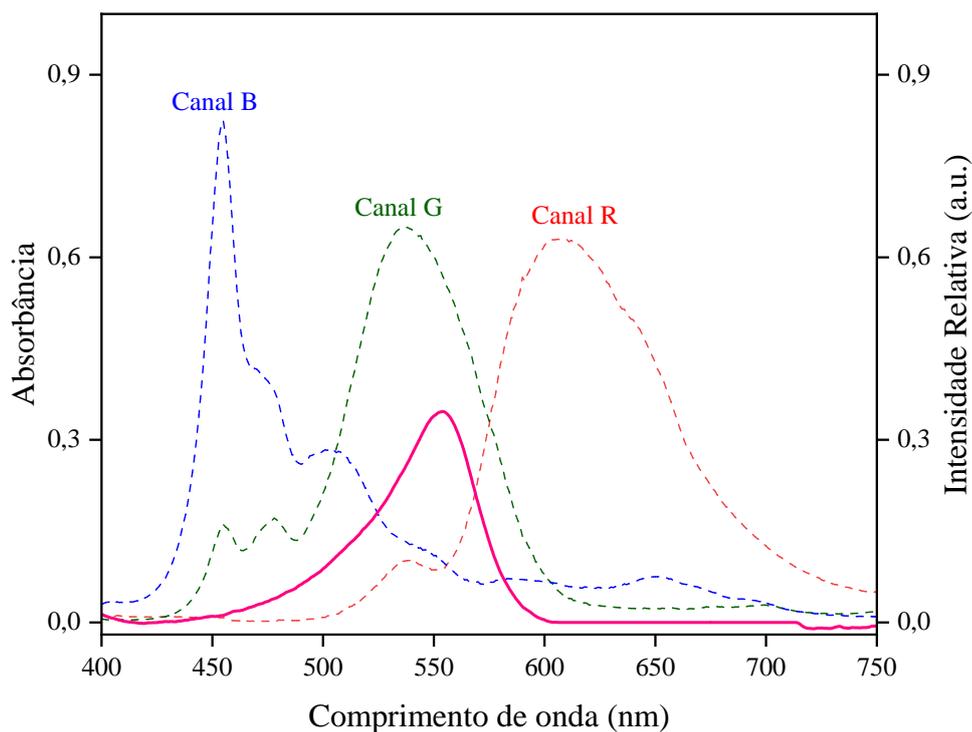
Para o corante vermelho ponceau, como apresentado na **Figura 25**, esperava-se melhores sinais nos canais B e G. Os dados da **Figura 26** e da **Tabela 1** indicam que o melhor resultado foi obtido no canal G.

**Figura 26** – Curva de calibração para o corante vermelho ponceau empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x

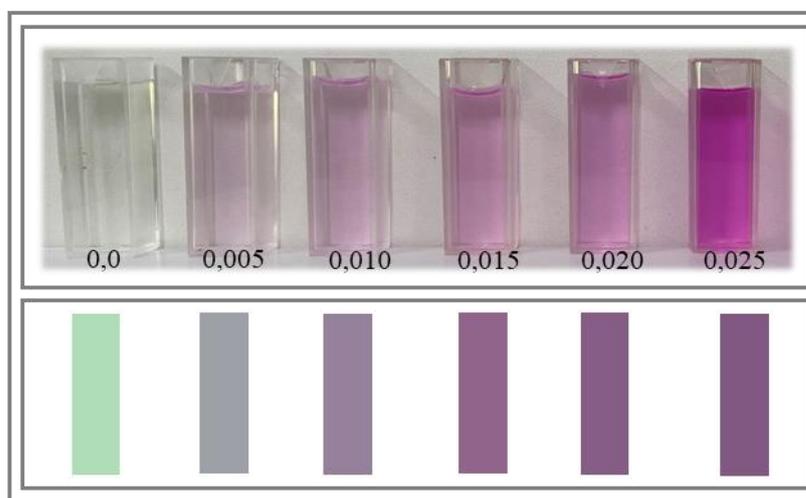
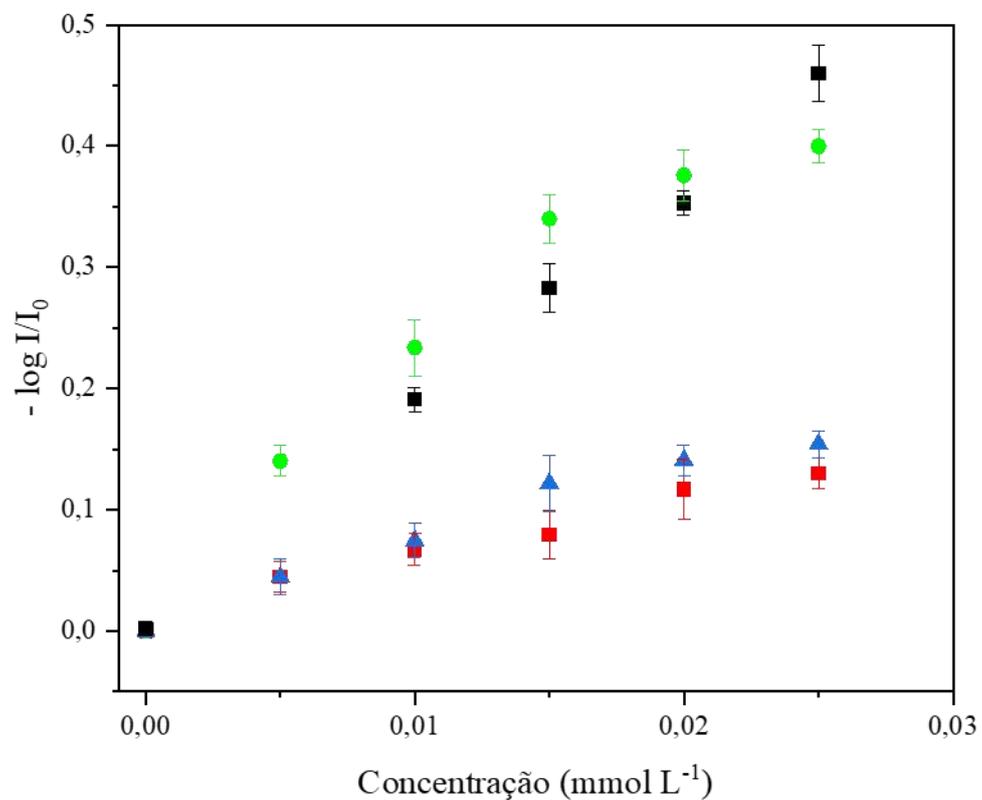


A melhor linearidade encontrada para a fenolftaleína foi utilizando a componente G, como apresentado pela **Tabela 1** e pela **Figura 28**, e isso é explicado pela **Figura 27**, que apresenta a faixa de absorção da fenolftaleína na mesma faixa de identificação do canal G.

**Figura 27** – Espectro de absorção para a solução de corante fenolftaleína (—) sobreposto à resposta efetiva do sensor RGB.



**Figura 28** – Curva de calibração para a fenolftaleína empregando o sensor RGB ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro) e fotografias obtidas para a as soluções empregadas para a obtenção da curva de calibração e seus respectivos retângulos simulando a cor obtida pelo sensor pela substituição dos sinais de RGB. Tempo de integração: 50 ms e ganho 60x



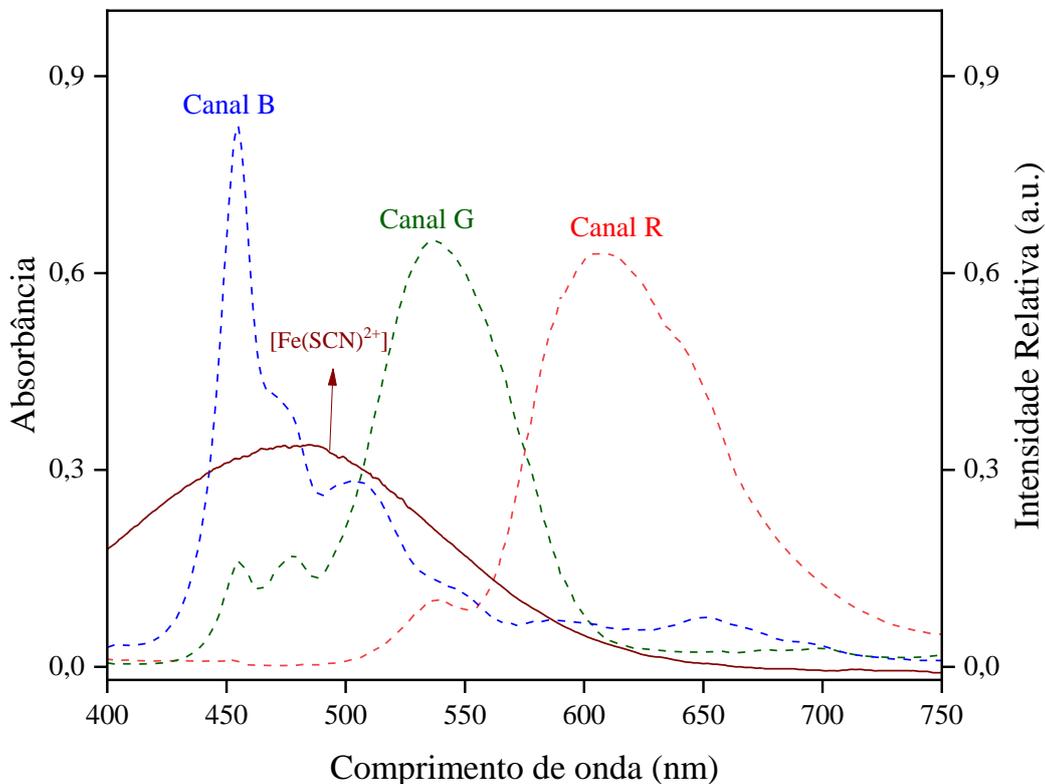
De acordo com os resultados apresentados para as soluções de corantes é possível observar que o sensor RGB responde de forma linear a variações de concentração de diferentes soluções coloridas, contendo apenas um tipo de corante. Desta forma é possível concluir que este sensor pode ser empregado para a análises quantitativas de espécies que absorvam radiação eletromagnética na região do visível. A quantidade de radiação absorvida, assim como o canal em que se observa a variação do sinal depende do espectro de absorção da espécie de interesse.

#### *4.4 Desempenho e validação do sistema RGB para análise quantitativa*

Com o objetivo de obter informações quantitativas para soluções de espécies coloridas empregando o sensor RGB, o método do tiocianato para determinação espectrofotométrica de teores de ferro foi avaliado. Neste método, uma cor vermelha intensa é observada devido à formação de complexo entre ferro (III) e tiocianato ( $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$ ), produto da reação entre estes íons em meio aquoso ácido.

O complexo colorido de ferro apresenta uma banda de absorção na faixa de 400 a 600 nm, com máximo de absorção em torno de 485 nm. A **Figura 23** apresenta o espectro de absorção para o complexo  $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]$ , sobreposto com o espectro da resposta efetiva do sensor.

**Figura 29** – Espectro de absorção do complexo  $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]$  e resposta relativa dos canais do sensor RGB. A linha vermelha escura representa o espectro de absorção do complexo. As linhas pontilhadas em vermelho, verde e azul representam as respostas do sensor para os canais R, G e B, respectivamente. Concentração reagentes:  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  KSCN,  $2,0 \text{ mg L}^{-1}$  de Fe(III) e  $0,24 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{HNO}_3$ .

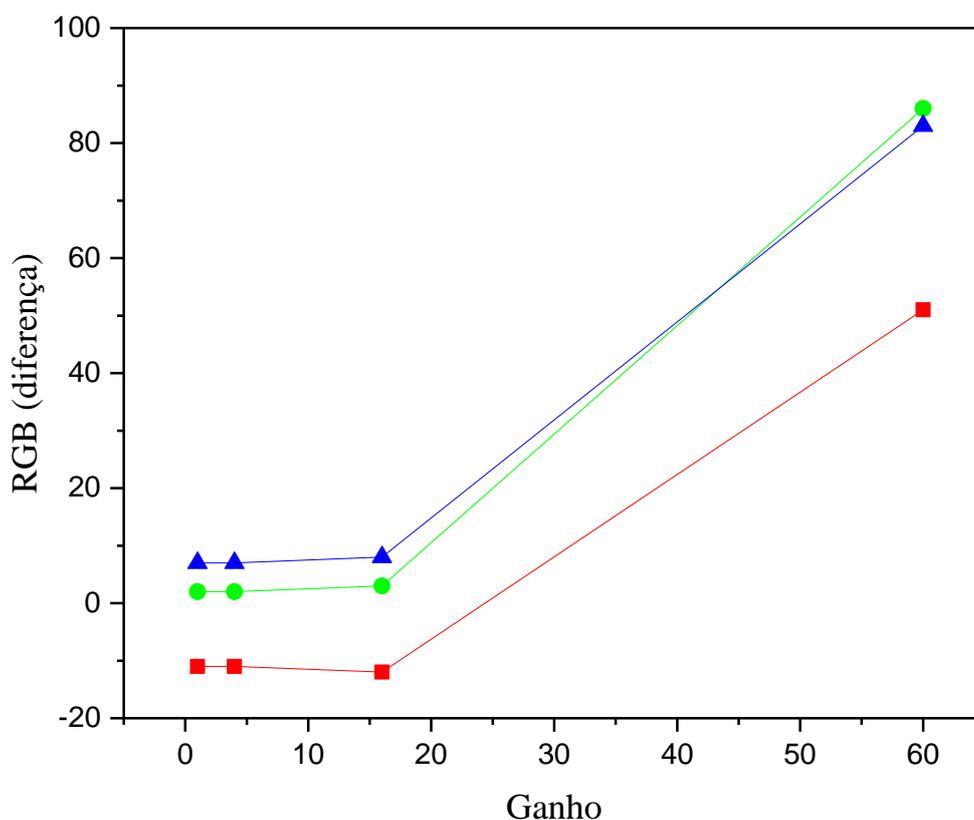


Observando a **Figura 29**, o esperado é que os sinais analíticos diminuam para os três canais do sensor, com o aumento da concentração do complexo, visto que há absorção de luz pela espécie colorida. Na ausência de espécies absorvedoras, a resposta do sinal deve ser máxima, com valores próximos aos permitidos nas medidas RGB, ou seja, o valor para R, G e B deve ser próximo a 255 em cada canal. Observando o espectro de absorção do complexo é possível prever que a resposta menos sensível será observada pelo canal R e a resposta mais sensível é esperada nas medidas realizadas pelo canal B. Isso ocorre devido ao fato que a banda de absorção do complexo sobrepõe-se majoritariamente sobre o canal B do sensor

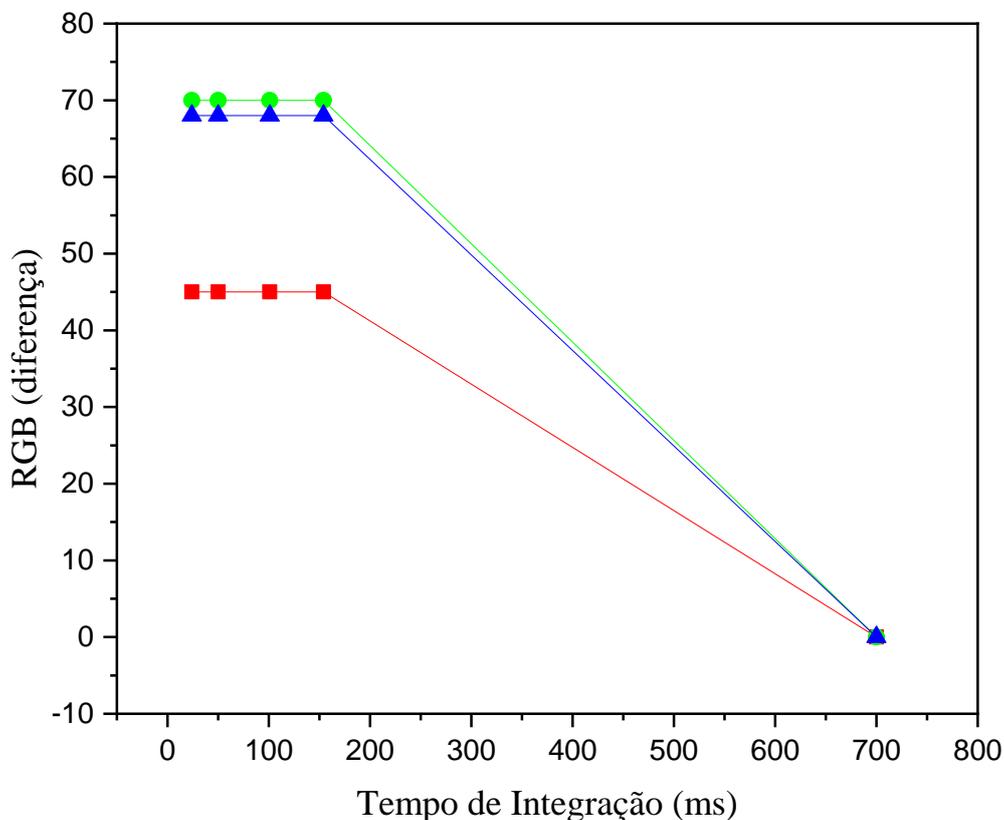
O sensor RGB TCS34725 apresenta tempo de integração e ganho ajustáveis, permitindo aumento da sensibilidade frente a detecção de luz. De acordo com as orientações do fabricante, o ganho pode ser definido em um desses valores: 1x, 4x, 16x e 60x. O tempo de integração, que é o tempo em que o sensor capta o sinal, pode ser

configurado em valores de 2,4, 24, 50, 101, 154 e 700 milissegundos. O efeito da alteração do ganho e do tempo de integração no sinal analítico para cada canal do sensor RGB foram avaliados pelo método univariado, visando obter maior sensibilidade na determinação de ferro a partir da formação do complexo  $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]$ . O sinal analítico foi obtido subtraindo-se a medida de sinal do branco analítico, solução sem adição de  $\text{Fe}^{3+}$ , de um sinal de solução do complexo com concentração de ferro igual a  $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ . Os resultados obtidos estão apresentados nas **Figuras 30 e 31**.

**Figura 30** – Avaliação do efeito de alteração no ganho em função do sinal analítico. ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B). Concentração reagentes:  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  KSCN,  $2,0 \text{ mg L}^{-1}$  de Fe(III) e  $0,24 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{HNO}_3$ . Tempo de integração: 101 milissegundos.



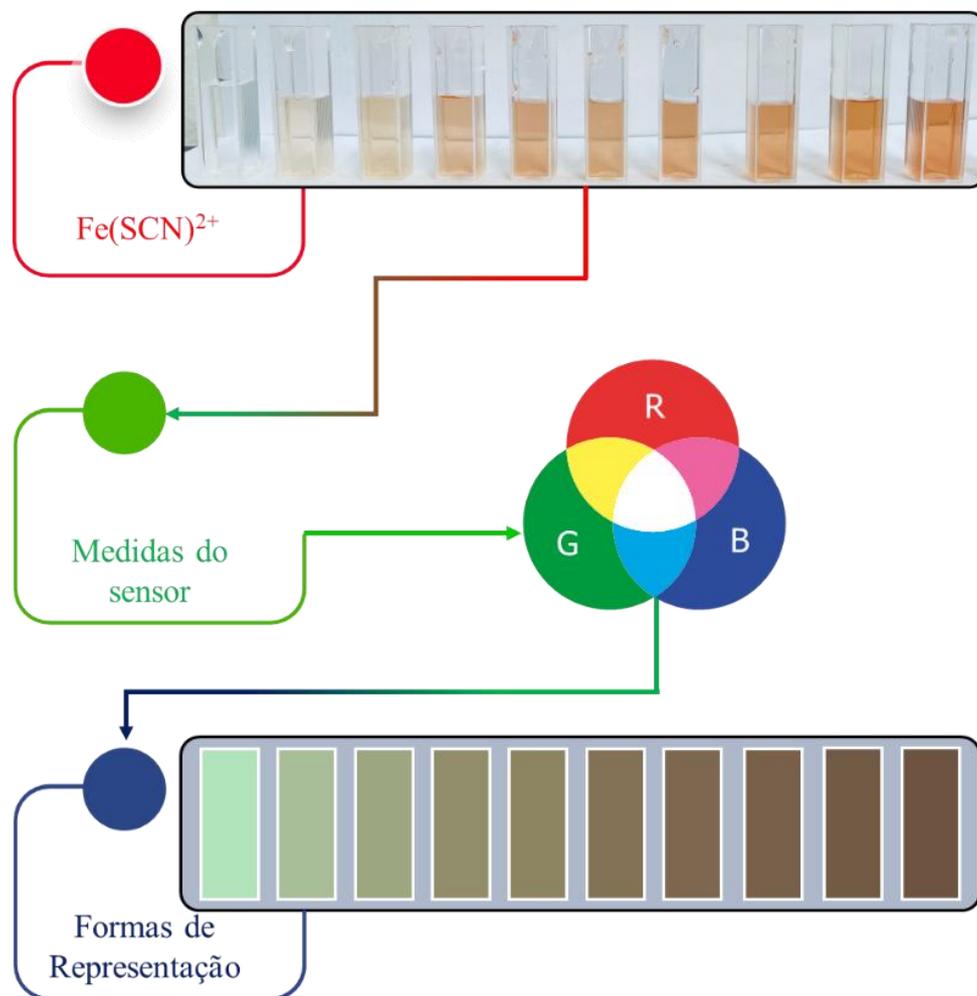
**Figura 31** – Avaliação do efeito de alteração do tempo de integração no sinal analítico. ((■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B). Concentração reagentes: 0,2 mol L<sup>-1</sup> KSCN, 2,0 mg L<sup>-1</sup> de Fe(III) e 0,24 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>. Ganho: 60x.



Os sinais analíticos aumentaram discretamente ao se alterar o ganho entre 1x e 16x, como pode ser observado na **Figura 30**, entretanto a resposta obtida para ganho de 60x foi 40 vezes superior para os canais G e B e, 20 vezes maior para o canal R, em comparação ao ganho de 1x. A variação do tempo de integração, apresentado na **Figura 31**, não afetou significativamente o sinal analítico no intervalo entre 2 e 154 ms, quando o tempo de integração foi igual a 700 ms, foi observado a saturação do sinal para a solução do branco analítico e, também, para a solução contendo o complexo, com valores de RGB iguais a 255. Para elevados valores de tempo de integração o detector é ajustado para gerar uma maior corrente na presença de luz, o que é indicado para situações com baixa quantidade de luz ambiente. No caso do sensor empregado, a emissão do LED acoplado ao sensor é intensa, produzindo um sinal bastante elevado na presença e na ausência do analito, quando 700 ms foi empregado como tempo de integração, o resultado foi a saturação do sinal. De acordo com estes resultados obtidos, para os estudos posteriores o ganho foi configurado em 60x e o tempo de integração em 50 milissegundos.

A **Figura 32** apresenta um fluxograma ilustrativo para soluções contendo concentrações crescentes de Fe(III) empregadas para avaliação da linearidade do método do tiocianato na determinação de ferro, empregando o sensor RGB. As formas inseridas abaixo das cubetas representam cada solução de complexo utilizada para obter a curva de calibração. Todas as formas foram criadas no PowerPoint e os valores de RGB foram utilizados para simular as mudanças de cores e preencher os retângulos. Esses resultados comprovam a capacidade do sensor em identificar diferenças na tonalidade da cor dos complexos de  $[\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}]$ . A **Figura 33** apresenta o efeito da variação da concentração de ferro nos valores de RGB.

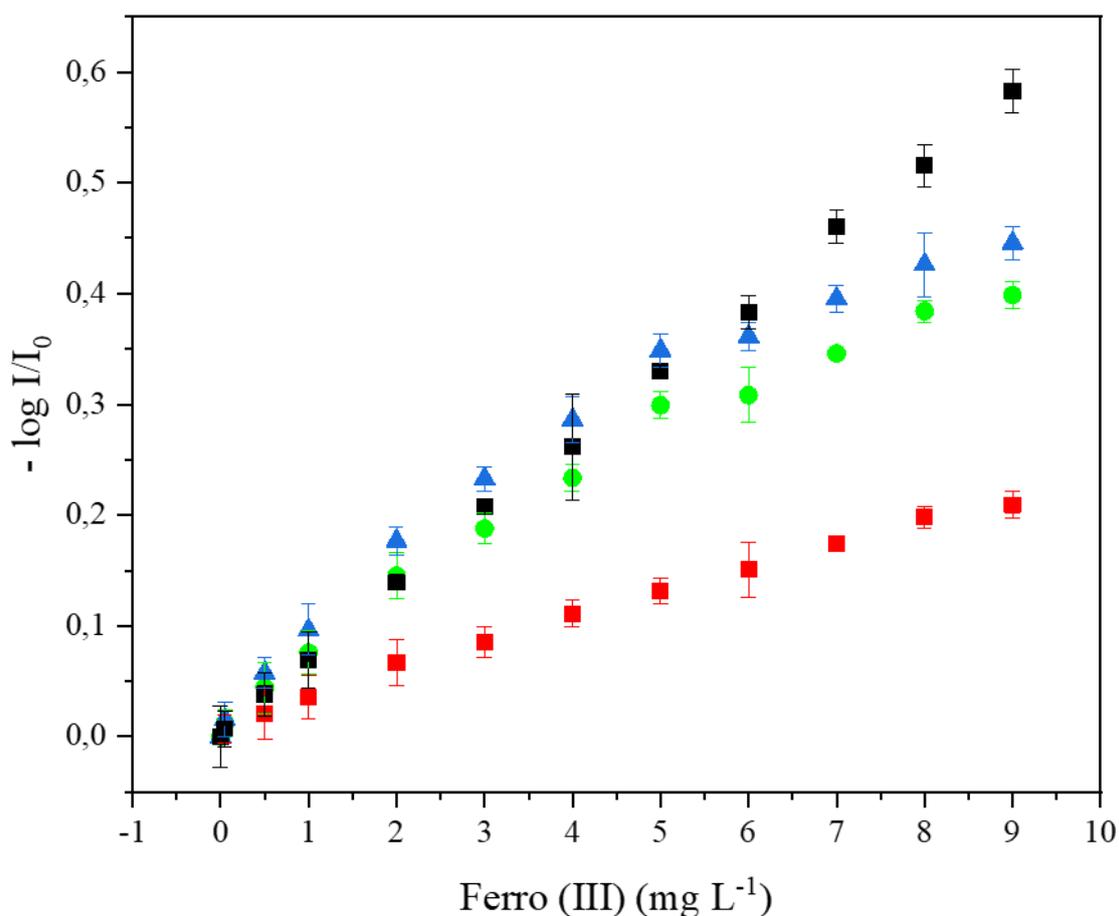
**Figura 32** – Fluxograma de determinação de ferro empregando sensor RGB.



As características analíticas foram analisadas para o procedimento proposto pelo método do tiocianato para a determinação de ferro nas condições experimentais otimizadas. De acordo com a **Figura 33**, foi observada resposta linear para os canais R,

G e B e a concentração de Fe(III), até 5,0 mg L<sup>-1</sup>, com um limite de detecção (LD) estimado em 0,32 mg L<sup>-1</sup> no canal R. As características analíticas do método proposto foram comparadas àquelas obtidas por um espectrofotômetro convencional e medidas realizadas em 480 nm (**Tabela 2**). A sensibilidade obtida com o canal vermelho foi 3 vezes menor do que a obtida com um espectrofotômetro convencional, para os canais azul e verde, a sensibilidade foi semelhante. Além disso, as características analíticas obtidas com a utilização do sensor RGB foram semelhantes àquelas obtidas com o uso de smartphone, a partir da aquisição de imagens digitais em soluções líquidas, em trabalhos previamente reportados na literatura<sup>55,65,66</sup>.

**Figura 33** – Curva de calibração de Ferro (III) (mgL<sup>-1</sup>): (■) Canal R; (●) Canal G; (▲) Canal B; (■) Espectrofotômetro. Concentração reagentes: 0,2 mol L<sup>-1</sup> KSCN e 0,24 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>. Tempo de integração: 50 ms; ganho: 60x. Espectrofotômetro em 480 nm.



**Tabela 2:** Comparação entre o sensor RGB e determinação espectrofotométrica de ferro(III).

		Sensor RGB	Espectrofotômetro
Equação da curva	R	$A = 0,0233 C_{Fe} + 0,0109$	
	G	$A = 0,0451 C_{Fe} + 0,0316$	$A = 0,0646 C_{Fe} + 0,0051$
	B	$A = 0,0501 C_{Fe} + 0,0466$	
R	R	0,997	
	G	0,982	0,999
	B	0,994	
Faixa linear (mg L <sup>-1</sup> )	R	1,0 – 8,0	
	G	1,0 – 5,0	1,0 – 9,0
	B	1,0 – 5,0	
RSD (4 mg L <sup>-1</sup> , n = 10)	R	0,41%	
	G	1,05%	0,58%
	B	0,75%	
LD (mg L <sup>-1</sup> )	R	0,32	
	G	0,10	0,11
	B	0,12	
LQ (mg L <sup>-1</sup> )	R	0,97	
	G	0,30	0,33
	B	0,37	

Para demonstrar a aplicabilidade do sensor RGB, a quantidade de ferro presente em dois suplementos polivitamínicos (P1 e P2) e em amostras de solo (S1 e S2) foram determinadas empregando o método proposto com medidas pelo sensor RGB e os

resultados foram comparados com a espectrofotometria Uv-vis. Os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3:** Determinação de ferro em polivitamínicos (P1 e P2) e em amostras de solo (S1 e S2) (valores médios e incertezas, n = 5)

Amostras		Sensor RGB	Uv-vis	t <sup>a</sup>	F <sup>b</sup>
<i>Polivitamínico (mg g<sup>-1</sup>)</i>					
P1	R	22,6 ± 0,6	24,6 ± 0,9	4,23	2,11
	G	25,2 ± 0,2		8,27	1,16
	B	25,1 ± 2,0		0,53	0,12
P2	R	49,9 ± 0,8	49,8 ± 0,7	0,09	0,73
	G	51,8 ± 0,7		3,6	0,95
	B	50,4 ± 3,0		0,37	0,04
<i>Amostra de Solo (mg L<sup>-1</sup>)</i>					
S1	R	11,4 ± 1,0	11,5 ± 0,1	0,18	0,01
	G	10,1 ± 0,3		7,25	0,09
	B	12,6 ± 0,7		3,5	0,02
S2	R	12,5 ± 0,7	11,7 ± 0,1	2,3	0,02
	G	9,2 ± 0,6		9,15	0,03
	B	11,9 ± 0,5		0,8	0,05

<sup>a</sup> t<sub>Crítico</sub> = 2,31; <sup>b</sup> F<sub>Crítico</sub> = 6,39; 95% de confiança.

O teste F (nível de confiança de 95%) indica que as variâncias entre os métodos utilizados são comparáveis. Os resultados apresentados na **Tabela 3**, quando submetidos ao teste t pareado, indicam que as concentrações obtidas para as amostras P1 e P2 foram concordantes com o nível de confiança de 95%, quando as medidas foram realizadas empregando sinais obtidos no canal azul. Resultado similar foi obtido no canal vermelho para a amostra P2, quando comparados aos resultados obtidos por espectrofotometria Uv-vis. Quando os canais verde e azul foram selecionados para a determinação de ferro nas

amostras P2 e S1, respectivamente, foi observada interferência positiva. Essas amostras apresentaram coloração amarelo-clara, devido à presença dos concomitantes da amostra, indicando interferência. Esta interferência da matriz pode ser contornada selecionando o canal vermelho do sensor. Embora o canal R apresente menor sensibilidade para a determinação de ferro pelo procedimento proposto, a faixa de resposta deste canal acontece em uma região menos afetada por outras espécies presentes na amostra original.

## 5 Conclusões

Uma avaliação crítica do uso do sensor RGB, TCS 34725, para determinação colorimétrica foi realizada neste trabalho. Esses estudos revelaram a capacidade efetiva do sensor RGB em detectar diferentes incrementos de cores refletidos pelas amostras, quando submetidas a incidência de luz pelo LED acoplado ao sensor. Esses resultados contribuem para o entendimento da interação entre a luz emitida pelo sensor e os sinais obtidos pelos canais RGB.

Diversas soluções de corantes que abrangem toda a faixa espectral da região do visível do espectro eletromagnético foram avaliadas e apresentaram correlação linear na resposta analítica do sensor, com o aumento da concentração destas espécies, indicando a potencialidade do emprego do sensor para determinações quantitativas. A abordagem, que utiliza o sensor RGB e uma cubeta convencional de 1 cm para soluções líquidas, também apresenta potencial para detectar baixas concentrações ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) de solução colorida, adequadas para determinação colorimétrica.

O dispositivo proposto apresenta baixo custo, considerando o uso da placa Arduino Uno, do Sensor RGB TCS 34725 da Adafruit®, impressão do compartimento da amostra, o custo não ultrapassa 35 dólares, valor inferior aos smartphones de entrada atualmente disponíveis no mercado. Este custo pode ser reduzido caso o microcontrolador e o sensor, que são hardwares livres, forem comprados no mercado paralelo, visto que a resposta de ambos é praticamente a mesma. O que não ocorre quando utiliza-se o smartphone, pois dependendo do modelo do aparelho, da câmera e das condições de luminosidade do ambiente, o resultado pode variar. Outras características favoráveis do uso do sensor para medidas quantitativas empregando soluções incluem a portabilidade, fácil manipulação e a não necessidade do uso de um software ou aplicativo para obter-se os valores de RGB, usualmente necessários quando o smartphone é empregado para medidas colorimétricas. Alternativamente um módulo *bluetooth* ou *wi-fi* pode ser incorporado ao sensor, conferindo a possibilidade de comunicação *wireless*, tornando o dispositivo adequado para aplicações *point-of-care*.

## 6 Referências

1. Roy Choudhury AK. Visual measures of colour. In: *Principles of Colour and Appearance Measurement*. Vol 2. Elsevier; 2015:1-25.  
doi:10.1533/9781782423881.1
2. Alternose R. Evolution of Instrumentation for UV-Visible-Spectrophotometry Part I. *J Chem Educ*. 1986;63(9):218-223. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>. Accessed December 7, 2021.
3. Skoog DA, West DM, Holler FJ, Crouch SR. *Fundamentos de Química Analítica - Tradução Da 9ª Edição Norte Americana*. (Matos TTRM, ed.). Cengage Learning; 2014.
4. Yan J-C, Ren J, Ren L-L, Yang Y, Yang S-F, Ren T-L. A novel structure design and fabrication method for low liquid consumption and high precision device of colorimeter in water quality detection. *Sensors Actuators A*. 2019;289:1-10.  
doi:10.1016/j.sna.2019.02.016
5. Scheeline A. Teaching, Learning, and Using Spectroscopy with Commercial, Off-the-Shelf Technology. *Appl Spectrosc*. 2010;64(9):256A-268A.  
doi:10.1366/000370210792434378
6. Soda Y, Bakker E. Quantification of Colorimetric Data for Paper-Based Analytical Devices. *ACS Sensors*. 2019;4(12):3093-3101.  
doi:10.1021/acssensors.9b01802
7. Popov-Raljić J V., Lakić NS, Laličić-Petronijević JG, Barać MB, Sikimić VM. Color Changes of UHT Milk During Storage. *Sensors 2008, Vol 8, Pages 5961-5974*. 2008;8(9):5961-5974. doi:10.3390/S8095961
8. Goettems Kuntzler S, Vieira Costa JA, Dutra AP, Brizio R, Greque De Morais M. Development of a colorimetric pH indicator using nanofibers containing *Spirulina* sp. LEB 18. *Food Chem*. 2020;328(10):126768.  
doi:10.1016/j.foodchem.2020.126768
9. Anzalone GC, Glover AG, Pearce JM. Open-source colorimeter. *Sensors (Switzerland)*. 2013;13(4):5338-5346. doi:10.3390/s130405338
10. Delta Color - Espectrofotômetro X Colorímetro.  
<https://www.deltacolorbrasil.com/espectrofotometroXcolorimetro.html>. Accessed January 31, 2022.
11. Hall JE, Guyton AC. *Tratado de Fisiologia Médica*. 13ª. Elsevier Ltd; 2017.
12. Marks WB, Dobelle WH, Macnichol EF. Visual Pigments of Single Primate Cones. *Science (80- )*. 1964;143(3611):1181-1182.  
doi:10.1126/SCIENCE.143.3611.1181
13. Capitán-Vallvey LF, López-Ruiz N, Martínez-Olmos A, Erenas MM, Palma AJ.

- Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review. *Anal Chim Acta*. 2015;899:23-56. doi:10.1016/j.aca.2015.10.009
14. Fernandes GM, Silva WR, Barreto DN, et al. Novel approaches for colorimetric measurements in analytical chemistry – A review. *Anal Chim Acta*. 2020;1135:187-203. doi:10.1016/j.aca.2020.07.030
  15. León K, Mery D, Pedreschi F, León J. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images. *Food Res Int*. 2006;39(10):1084-1091. doi:10.1016/j.foodres.2006.03.006
  16. Shende P, Prabhakar B, Patil A. Color changing sensors: A multimodal system for integrated screening. *TrAC - Trends Anal Chem*. 2019;121:115687. doi:10.1016/j.trac.2019.115687
  17. Roda A, Michelini E, Zangheri M, Di M, Calabria D, Simoni P. Trends in Analytical Chemistry Smartphone-based biosensors : A critical review and perspectives. *Trends Anal Chem*. 2016;79:317-325. doi:10.1016/j.trac.2015.10.019
  18. Nery EW, Kubota LT. Sensing approaches on paper-based devices: A review. *Anal Bioanal Chem*. 2013;405(24):7573-7595. doi:10.1007/s00216-013-6911-4
  19. Mcgonigle AJS, Id TCW, Pering TD, Id JMC, Iii FMM, Parisi A V. Smartphone Spectrometers. 2006:1-15. doi:10.3390/s18010223
  20. Wang T-T, Lio C kit, Huang H, et al. A feasible image-based colorimetric assay using a smartphone RGB camera for point-of-care monitoring of diabetes. *Talanta*. 2020;206(July 2019):120211. doi:10.1016/j.talanta.2019.120211
  21. Grudpan K, Kolev SD, Lapanantnopakhun S, McKelvie ID, Wongwilai W. Applications of everyday IT and communications devices in modern analytical chemistry: A review. *Talanta*. 2015;136:84-94. doi:10.1016/j.talanta.2014.12.042
  22. Martinez AW, Phillips ST, Carrilho E, Thomas SW, Sindi H, Whitesides GM. Simple telemedicine for developing regions: Camera phones and paper-based microfluidic devices for real-time, off-site diagnosis. *Anal Chem*. 2008;80(10):3699-3707. doi:10.1021/ac800112r
  23. Firdaus M, Aprian A, Meileza N, et al. Smartphone Coupled with a Paper-Based Colorimetric Device for Sensitive and Portable Mercury Ion Sensing. *Chemosensors*. 2019;7(2):25-33. doi:10.3390/chemosensors7020025
  24. Levin S, Krishnan S, Rajkumar S, Halery N, Balkunde P. Monitoring of fluoride in water samples using a smartphone. *Sci Total Environ*. 2016;551-552:101-107. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.156
  25. Yusufu D, Mills A. Spectrophotometric and Digital Colour Colourimetric (DCC) analysis of colour-based indicators. *Sensors Actuators, B Chem*. 2018;273(Dcc):1187-1194. doi:10.1016/j.snb.2018.06.131

26. Lopez-Molinero A, Cubero VT, Irigoyen RD, Piazuolo DS. Feasibility of digital image colorimetry - Application for water calcium hardness determination. *Talanta*. 2013;103:236-244. doi:10.1016/j.talanta.2012.10.038
27. Ozcan A. Mobile phones democratize and cultivate next-generation imaging, diagnostics and measurement tools. *Lab Chip*. 2014;14(17):3187-3194. doi:10.1039/c4lc00010b
28. Arduino®. What is Arduino? <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Published 2018. Accessed December 3, 2021.
29. Kassal P, Horak E, Sigurnjak M, Steinberg MD, Steinberg IM. Wireless and mobile optical chemical sensors and biosensors. *Rev Anal Chem*. 2018;37(4):1-27. doi:10.1515/revac-2017-0024
30. Giannetto M, Bianchi V, Gentili S, Fortunati S, De Munari I, Careri M. An integrated IoT-Wi-Fi board for remote data acquisition and sharing from innovative immunosensors. Case of study: Diagnosis of celiac disease. *Sensors Actuators B Chem*. 2018;273:1395-1403. doi:10.1016/J.SNB.2018.07.056
31. Duffy G, Regan F. Recent developments in sensing methods for eutrophying nutrients with a focus on automation for environmental applications. *Analyst*. 2017;142(23):4355-4372. doi:10.1039/c7an00840f
32. Noviana E, Ozer T, Carrell CS, et al. Microfluidic Paper-Based Analytical Devices: From Design to Applications. *Chem Rev*. 2021;121(19):11835-11885. doi:10.1021/acs.chemrev.0c01335
33. Mayer M, Baeumner AJ. A Megatrend Challenging Analytical Chemistry: Biosensor and Chemosensor Concepts Ready for the Internet of Things. *Chem Rev*. 2019;119(13):7996-8027. doi:10.1021/acs.chemrev.8b00719
34. Cesar Souza Machado C, da Silveira Petrucic JF, G. Silva S. An IoT optical sensor for photometric determination of oxalate in infusions. *Microchem J*. 2021;168(April):106466. doi:10.1016/j.microc.2021.106466
35. Capella J V., Bonastre A, Campelo JC, Ors R, Peris M. IoT & environmental analytical chemistry: Towards a profitable symbiosis. *Trends Environ Anal Chem*. 2020;27:1-8. doi:10.1016/j.teac.2020.e00095
36. Capella J V., Bonastre A, Ors R, Peris M. A new application of internet of things and cloud services in analytical chemistry: Determination of bicarbonate in water. *Sensors*. 2019;19(24):1-13. doi:10.3390/s19245528
37. Hossain MA, Canning J, Yu Z, et al. Time-resolved and temperature tuneable measurements of fluorescent intensity using a smartphone fluorimeter. *Analyst*. 2017;142(11):1953-1961. doi:10.1039/C7AN00535K
38. Bzura J, Fiedoruk-Pogrebniak M, Koncki R. Photometric and fluorometric

- alkaline phosphatase assays using the simplest enzyme substrates. *Talanta*. 2018;190:193-198. doi:10.1016/j.talanta.2018.07.052
39. Nghia NN, Huy BT, Lee YI. Highly sensitive and selective optosensing of quercetin based on novel complexation with yttrium ions. *Analyst*. 2020;145(9):3376-3384. doi:10.1039/D0AN00117A
  40. Gillanders RN, Samuel IDW, Turnbull GA. A low-cost, portable optical explosive-vapour sensor. *Sensors Actuators B*. 2017;245:334-340. doi:10.1016/j.snb.2017.01.178
  41. Kiruba Daniel SCG, Kumar A, Sivasakthi K, Singh Thakur C. Handheld, low-cost electronic device for rapid, real-time fluorescence-based detection of Hg<sup>2+</sup>, using aptamer-templated ZnO quantum dots. *Sensors Actuators B Chem*. 2019;290:73-78. doi:10.1016/j.snb.2019.03.113
  42. Greenawald LA, Boss GR, Snyder JL, Reeder A, Bell S. Development of an Inexpensive RGB Color Sensor for the Detection of Hydrogen Cyanide Gas. *ACS Sensors*. 2017;2(10):1458-1466. doi:10.1021/acssensors.7b00396
  43. Heo G, Manivannan R, Kim H, Kim MJ, Min KS, Son YA. Developing an RGB - Arduino device for the multi-color recognition, detection and determination of Fe(III), Co(II), Hg(II) and Sn(II) in aqueous media by a terpyridine moiety. *Sensors Actuators B Chem*. 2019;297:126723. doi:10.1016/J.SNB.2019.126723
  44. Singh H, Singh G, Mahajan DK, Kaur N, Singh N. A low-cost device for rapid “color to concentration” quantification of cyanide in real samples using paper-based sensing chip. *Sensors Actuators B Chem*. 2020;322:128622. doi:10.1016/j.snb.2020.128622
  45. Morais C de LM, Carvalho JC, Sant’Anna C, Eugênio M, Gasparotto LHS, Lima KMG. A low-cost microcontrolled photometer with one color recognition sensor for selective detection of Pb<sup>2+</sup> using gold nanoparticles. *Anal Methods*. 2015;7(18):7917-7922. doi:10.1039/C5AY01762A
  46. Santos GF, Reis FB. Automated analytical procedure using multicommutated flow analysis and organic solvent extraction controlled by an Arduino Due board for photometric determination of zinc in water. *Microchem J*. 2021;163. doi:10.1016/j.microc.2021.105918
  47. Khanfar MF, Al-Faqheri W, Al-Halhouli A. Low Cost Lab on Chip for the Colorimetric Detection of Nitrate in Mineral Water Products. *Sensors 2017, Vol 17, Page 2345*. 2017;17(10):2345. doi:10.3390/S17102345
  48. Grazioli C, Faura G, Dossi N, et al. 3D printed portable instruments based on affordable electronics, smartphones and open-source microcontrollers suitable for monitoring food quality. *Microchem J*. 2020;159:105584. doi:10.1016/j.microc.2020.105584
  49. Kahu SY, Raut RB, Bhurchandi KM. Review and evaluation of color spaces for

- image/video compression. *Color Res Appl.* 2019;44(1):8-33.  
doi:10.1002/COL.22291
50. Cantrell K, Erenas MM, de Orbe-Payá I, Capitán-Vallvey LF. Analytical Chemistry: Theoretical and Metrological Fundamentals. *U E Chem Sensors Biosens Med Biol Appl.* 2004;380(1):30. doi:10.1021/ac901753c
  51. Thajee K, Paengnakorn P, Wongwilai W, Grudpan K. Application of a webcam camera as a cost-effective sensor with image processing for dual electrochemical – colorimetric detection system. *Talanta.* 2018;185(March):160-165.  
doi:10.1016/j.talanta.2018.03.055
  52. Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. *Datasheet - TCS34725 - Color Light-to-Digital Converter with IR Filter.*; 2012. www.taosinc.com.
  53. Maejima K, Hiruta Y, Citterio D. Centrifugal Paperfluidic Platform for Accelerated Distance-Based Colorimetric Signal Readout. *Anal Chem.* 2020;92(7):4749-4754.  
doi:10.1021/ACS.ANALCHEM.9B05782/SUPPL\_FILE/AC9B05782\_SI\_002.ZIP
  54. Leal VG, Batista AD, Petrucci JF da S. 3D-printed and fully portable fluorescent-based platform for sulfide determination in waters combining vapor generation extraction and digital images treatment. *Talanta.* 2021;222:121558.  
doi:10.1016/J.TALANTA.2020.121558
  55. João AF, Squissato AL, Fernandes GM, Cardoso RM, Batista AD, Muñoz RAA. Iron (III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device. *Microchem J.* 2019;146(October 2018):1134-1139.  
doi:10.1016/j.microc.2019.02.053
  56. TAOS. PROGRAMMABLE COLOR LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc . PROGRAMMABLE. *The LUMENOLOGY.* 2009;(972):1-10.
  57. Corporation I. Digital Red, Green and Blue Color Light Sensor with IR Blocking Filter ISL29125. 2013. <http://www.intersil.com/pbfree/Pb-FreeReflow.asp>. Accessed December 7, 2021.
  58. Brandão EG, Perdigão RW, Reis BF. A new flow cell design for chemiluminescence detection using an improved signal transduction network. Determination of hydrogen peroxide in pharmaceuticals. *Microchem J.* 2021;171.  
doi:10.1016/j.microc.2021.106789
  59. STRZELAK K, MALASUK C, OKI Y, MORITA K, ISHIMATSU R. 3D printed silicone platforms with laser-scattering protein detection under flow analysis conditions as a development of Silicone Optical Technology (SOT). *Microchem J.* 2020;157:104936. doi:10.1016/J.MICROC.2020.104936
  60. Cabrera H, Akbar J, Korte D, et al. Trace detection and photothermal spectral

- characterization by a tuneable thermal lens spectrometer with white-light excitation. *Talanta*. 2018;183:158-163. doi:10.1016/j.talanta.2018.02.073
61. Otal EH, Kim ML, Dietrich S, Takada R, Nakaya S, Kimura M. Open-Source Portable Device for the Determination of Fluoride in Drinking Water. *ACS Sensors*. 2021;6(1):259-266. doi:10.1021/ACSSENSORS.0C02273/SUPPL\_FILE/SE0C02273\_SI\_001.PDF
  62. Raij B van, Andrade JC de., Cantarella H, Quaggio JA. *Análise Química Para Avaliação de Fertilidade de Solos Tropicais*. Campinas: Instituto Agrônômico; 2001.
  63. Color Sensor – Color Light-To-Digital Converter – TCS34725 ams | ams. <https://ams.com/tcs34725#tab/description>. Accessed March 15, 2021.
  64. Hedzir AS, Sallehuddin NN, Saidin N, Hasbullah NF. Influence of electron irradiation on the electroluminescence spectra of white InGaN light emitting diodes. *Ukr J Phys Opt*. 2018;19(3).
  65. Upadhyay Y, Anand T, Babu LT, et al. Combined use of spectrophotometer and smartphone for the optical detection of Fe<sup>3+</sup> using a vitamin B6 cofactor conjugated pyrene derivative and its application in live cells imaging. *J Photochem Photobiol A Chem*. 2018;361(May):34-40. doi:10.1016/j.jphotochem.2018.05.002
  66. 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;208:40-47. doi:10.1016/j.saa.2018.09.062