



Universidade Federal
de São João del-Rei

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

YASMIM RIBEIRO MEIRELLES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA RELAÇÃO ENTRE O ESPECTRO
DE IMAGENS RGB EM SOLUÇÕES MULTICOMPONENTES DE
CORANTES**

**Ouro Branco, MG
2024**

YASMIM RIBEIRO MEIRELLES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DA RELAÇÃO ENTRE O ESPECTRO
DE IMAGENS RGB EM SOLUÇÕES MULTICOMPONENTES DE
CORANTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de Concentração: Engenharia das reações químicas e desenvolvimento de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edson Romano Nucci
Coorientador interno: Prof. Dr. Demian Patrick Fabiano

Coorientador externo: Prof. Dr. Jorge David Alguiar Bellido

*Bolsista UFSJ.

**Ouro Branco, MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M29a

Meirelles, Yasmim Ribeiro.

Análise computacional da relação entre o espectro de imagens RGB em soluções multicomponentes de corantes / Yasmim Ribeiro Meirelles ; orientador Edson Romano Nucci; coorientador Demian Patrick Fabiano. -- Ouro Branco, 2024.

154 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2024.

1. Colorimetria. 2. Análise computacional. 3. Smartphone. 4. Corantes. 5. Redes neurais. I. Nucci, Edson Romano, orient. II. Fabiano, Demian Patrick, co-orient. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA Nº 22 / 2024 - PPGEQ (13.13)

Nº do Protocolo: 23122.013403/2024-13

Ouro Branco-MG, 01 de maio de 2024.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **YASMIM RIBEIRO MEIRLLES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, EM 30 DE ABRIL DE 2024.

(Assinado digitalmente em 01/05/2024 17:22)

DEMIAN PATRICK FABIANO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQUI (12.29)
Matrícula: 1810291

(Assinado digitalmente em 01/05/2024 14:52)

EDSON ROMANO NUCCI
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DQBIO (12.26)
Matrícula: 1811284

(Assinado digitalmente em 02/05/2024 13:16)

IGOR JOSE BOGGIONE SANTOS
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
PPGenBio (13.65)
Matrícula: 2255060

(Assinado digitalmente em 01/05/2024 21:41)

JORGE DAVID ALGUIAR BELLIDO
CHEFE DE DEPARTAMENTO
DEQUI (12.29)
Matrícula: 1759475

(Assinado digitalmente em 06/05/2024 10:12)

JOSY ANTEVELI OSAJIMA FURTINI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 005.910.789-88

Visualize o documento original em <https://sipac.ufsj.edu.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **22**, ano: **2024**, tipo: **NOMEAÇÃO DE BANCA EXAMINADORA**, data de emissão: **01/05/2024** e o código de verificação: **b9783890ae**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por essa oportunidade única de cursar e vivenciar mais uma etapa da vida acadêmica, e me proporcionar as mais sonhadas bênçãos durante esses dois anos de curso.

À minha família, em especial à minha mãe, Heloisa, por sempre me apoiar a crescer cada vez mais e por me ajudar a suportar os momentos mais difíceis.

Ao meu companheiro, Guilherme, por estar sempre ao meu lado, acreditando em mim e me incentivando a ir cada vez mais longe.

Ao meu querido orientador, Jorge, por vibrar com minhas conquistas e me guiar durante esse complexo processo de pesquisa. Aos meus orientadores, Edson e Demian, por me acolherem e acreditarem na minha pesquisa.

Aos meus gatinhos tão preciosos, Chuchu, Xaninho e Caramelita, me ajudarem no processo de escrita deste trabalho e em toda decompressão da tensão.

À Yasmim de 2022, por ter aceitado essa aventura no conhecimento, e à Yasmim de 2023, por ter vencido mais uma batalha interna e não ter desistido de se aventurar na vida.

À todo corpo docente e técnico da UFSJ, pelo suporte e ensinamentos.

À CAPES, por todo apoio e suporte.

À UFSJ, pela oportunidade única de aprendizado e obtenção do título de mestre, pela estrutura cedida e pelo apoio financeiro.

“Eu acredito que sabores, cheiros, cores e assim por diante não são nada mais do que meros nomes no que diz respeito ao objeto no qual os colocamos, e que eles residem apenas na consciência. Portanto, se as criaturas vivas fossem removidas, todas essas qualidades seriam apagadas e aniquiladas.”

Galileo Galilei, 1623. *The Assayer*, p. 274.

RESUMO

A análise quantitativa de substâncias químicas muitas vezes é realizada por métodos ópticos, como colorimetria, espectrorradiometria, fotometria e espectrofotometria. Neste estudo, é apresentada uma alternativa de baixo custo em relação aos métodos tradicionais, oferecendo facilidade de manipulação e análise dos dados. Com o objetivo de desenvolver um sistema para análise de soluções multicomponentes de corantes utilizados na indústria têxtil, técnicas de processamento de imagens digitais e estatística espacial foram aplicadas na determinação da concentração dos corantes Auramina (AU), Verde Malaquita (VM) e Vermelho Congo (VC) em meio aquoso. O uso de imagens digitais como fonte de informação permite uma abordagem prática e não invasiva para analisar as propriedades das misturas de corantes. Não obstante, buscou-se entender a interferência do pH nas propriedades cromóforas de cada corante, bem como nas soluções binárias, identificando a influência da variação na absorvância calculada na análise digital de imagens. O pH é fator importante para os corantes VC e AU, mudando suas características cromóforas e, por tanto, o seu comprimento de onda e coloração absorvida. Nas soluções binárias entre os corantes VM-AU e VM-VC, foi possível a determinação quantitativa do corante com a maior variação de concentração (VM) no meio, onde a análise de imagens apresentou melhor sensibilidade para o analito com maior variabilidade de dados. A concentração de cada corante foi relacionada com os valores obtidos no espaço de cores RGB (vermelho, verde e azul). O corante AU está diretamente ligado a banda B nas soluções VM-AU e AU-VC e também quando está puro. Já o corante VM possui melhor relação com a banda G, quando nas soluções VM-AU e VM-VC, ou mesmo puro. As bandas R, B ou G podem ser atribuídas ao corante VC quando puro, mas nas soluções VM-VC e AU-VC apenas com as bandas B e G, respectivamente, apresentam valores correlacionados às suas concentrações.

Palavras-chaves: Colorimetria, análise computacional, smartphone, corantes, redes neurais.

ABSTRACT

Quantitative analysis of chemical substances is often carried out using optical methods such as colorimetry, spectroradiometry, photometry, and spectrophotometry. In this study, a low-cost alternative to traditional methods is presented, offering a data analysis facility. The aim was to develop a system for analyzing multicomponent dye solutions used in the textile industry. Digital image processing techniques and spatial statistics were applied to determine the concentration of the dyes Auramine (AU), Malachite Green (VM), and Congo Red (VC) in an aqueous medium. Using digital images as a source of information allows a practical and non-invasive approach to analyzing the properties of dye mixtures. Additionally, the study sought to understand the interference of pH on the chromophore properties of each dye, as well as in binary solutions, identifying the influence of pH variation on the absorbance calculated in digital image analysis. pH is an important factor for VC and AU dyes, changing their chromophore characteristics and, therefore, their wavelength and absorbed coloration. In binary solutions of VM-AU and VM-VC, it was possible to quantitatively determine the dye with the greatest concentration variation (VM), where image analysis showed better sensitivity for the analyte with the greatest data variability. The concentration of each dye was related to the values obtained in the RGB (red, green, and blue) color space. The AU dye is directly linked to the B band in VM-AU and AU-VC solutions and also pure. The VM dye has a better relationship with the G band in VM-AU and VM-VC solutions or pure. The R, B, or G bands can be attributed to the VC dye when pure, but in VM-VC and AU-VC solutions, only the B and G bands, respectively, show values correlated to its concentrations.

Keywords: Colorimetry, computational analysis, smartphone, dyes, neural networks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE CORES DE FRANÇOIS D'AGUILON.....	32
FIGURA 2 - CÍRCULO CROMÁTICO DE NEWTON EM SUA REPRESENTAÇÃO ORIGINAL E COLORAÇÃO ARTIFICIAL.	33
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE CORES DE NEWTON PARA CORES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS.	34
FIGURA 4: ESPECTRO OBTIDO EM ESPECTROFOTÔMETRO COM O CORANTE AURAMINA EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES (MOL. L ⁻¹).....	41
FIGURA 5: ESPECTRO DE ABSORBÂNCIA PARA AMOSTRA DE 25 PPM DO CORANTE AURAMINA EM ÁGUA, COM PH IGUAL A 6.....	41
FIGURA 6 – ESPECTRO OBTIDO NO ESPECTROFOTÔMETRO REFERENTE AO CORANTE VERDE MALAQUITA NA CONCENTRAÇÃO DE 50 PPM.....	43
FIGURA 7 – ESPECTRO OBTIDO EM ESPECTROFOTÔMETRO COM O CORANTE VERMELHO CONGO EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES (MOL. L ⁻¹).	45
FIGURA 8 - CLASSIFICAÇÃO DOS ESPAÇOS DE CORES.....	46
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO TRIDIMENSIONAL ORTOGONAL DO RGB COM VETOR ESCALA CINZA.	47
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DA CLASSIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS.	54
FIGURA 11 - MODELO PADRÃO DE ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS UTILIZANDO UM SMARTPHONE.	58
FIGURA 12 - AMBIENTE CONTROLADO PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS.....	67
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DAS ÁREAS A E B.....	68
FIGURA 14: GRÁFICO DE BARRA DAS TRIPLICATAS DA AMOSTRA AQUOSA DO CORANTE AU PARA OS MÉTODOS ESPECTROFOTOMÉTRICO E ADI.....	72
FIGURA 15: GRÁFICO DE BARRA DAS TRIPLICATAS DA AMOSTRA AQUOSA DO CORANTE VM PARA OS MÉTODOS ESPECTROFOTOMÉTRICO E ADI.....	72
FIGURA 16: GRÁFICO DE BARRA DAS TRIPLICATAS DA AMOSTRA AQUOSA DO CORANTE VC PARA OS MÉTODOS ESPECTROFOTOMÉTRICO E ADI.....	73
FIGURA 17 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VC. (A) CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO RGB ONDE ABSRGBPH É A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS COM SOLUÇÃO TAMPÃO E ABSRGB REPRESENTA A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS SEM A SOLUÇÃO TAMPÃO.....	75
FIGURA 18 – ESPECTROS DE ABSORBÂNCIA DO CORANTE VC EM DIFERENTES PH. (A) PH 7,0; (B) PH 6,0; (C) PH 5,0; (F) PH 3,0.....	75

FIGURA 19 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VM. (A) CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO RGB ONDE ABSRGBPH É A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS COM SOLUÇÃO TAMPÃO E ABSRGB REPRESENTA A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS SEM A SOLUÇÃO TAMPÃO.....	76
FIGURA 20: ESPECTROS DE ABSORBÂNCIA DO CORANTE VERDE MALAQUITA EM DIFERENTES PH.	76
FIGURA 21 - CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO PARA O CORANTE AU, UTILIZANDO AMOSTRAS COM E SEM A PRESENÇA DA SOLUÇÃO TAMPÃO.....	77
FIGURA 22 –CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O MÉTODO RGB ONDE ABSRGBPH É A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS COM SOLUÇÃO TAMPÃO E ABSRGB REPRESENTA A ABSORBÂNCIA RGB DAS AMOSTRAS SEM A SOLUÇÃO TAMPÃO. (A) REPRESENTAÇÃO DE TODAS AS CURVAS. (B) AMPLIAÇÃO DAS CURVAS ABSR, ABSRPH, ABSG E ABSGPH.....	78
FIGURA 23 - ESPECTROS DE ABSORÇÃO DO CORANTE AU ($1,0 \times 10^{-5}$ MOL. L ⁻¹) NA FAIXA DE PH (A) ENTRE 12 E 5,59 BÁSICOS E (B) EM PHs ÁCIDOS.....	78
FIGURA 24 – ESPECTRO (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) DO CORANTE AU NAS CONCENTRAÇÕES [G. L ⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018 E 0,024.	80
FIGURA 25 - ESPECTRO DO CORANTE VM NAS CONCENTRAÇÕES [G. L ⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; E 0,024.	81
FIGURA 26 - ESPECTRO DO CORANTE VC CONCENTRAÇÕES [G. L ⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; E 0,024.	81
FIGURA 27 – (A) ESPECTROS (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) DOS CORANTES AU, VC E VM COM CONCENTRAÇÕES [G. L ⁻¹] DE 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; E 0,0240. ESPECTRO (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) DOS CORANTES: (B) AU E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELAS; (C) AU E VC E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELAS; (D) VC E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELAS.	83
FIGURA 28 - (A) VALORES DE PIXELS DAS BANDAS R, G E B PARA O CORANTE AU RETIRADOS DA ÁREA A E (B) VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS	84
FIGURA 29 - (A) VALORES DE PIXELS DAS BANDAS R, G E B PARA O CORANTE VC RETIRADOS DA ÁREA A E (B) VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS.	85
FIGURA 30 - (A) VALORES DE PIXELS DAS BANDAS R, G E B PARA O CORANTE VM RETIRADOS DA ÁREA A E (B) VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS.	86
FIGURA 31 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS PARA O CORANTE AU.(A) REPRESENTAÇÃO DE TODAS AS BANDAS (R, G E B). (B) AMPLIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PONTOS DAS CURVAS R E G.	87

FIGURA 32 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA PARA O CORANTE AU, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B (A) REPRESENTAÇÃO DE TODAS AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS (ABSR, ABSG E ABSB). (B) AMPLIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PONTOS DAS CURVAS R E G.	87
FIGURA 33 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE AU.....	88
FIGURA 34 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS PARA O CORANTE AU.	89
FIGURA 35 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DO O CORANTE AU.	90
FIGURA 36 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS PARA O CORANTE VC.....	91
FIGURA 37 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA PARA O CORANTE VC, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B	91
FIGURA 38 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VC.....	92
FIGURA 39 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS PARA O CORANTE VC.	93
FIGURA 40 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DO CORANTE VC.....	93
FIGURA 41 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE PIXEL NORMALIZADOS PARA O CORANTE VM.....	94
FIGURA 42 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA PARA O CORANTE VM, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B	94
FIGURA 43 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO CORANTE VM.....	95
FIGURA 44 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS PARA O CORANTE VM.	96
FIGURA 45 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DO CORANTE VM.....	96
FIGURA 46 - SOLUÇÃO BINÁRIA PARA OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0048). (A) MODELOS	

<p>CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....</p>	98
<p>FIGURA 47 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE (0,0096). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....</p>	99
<p>FIGURA 48 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE (0,0144 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....</p>	99
<p>FIGURA 49 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE (0,0192 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....</p>	100
<p>FIGURA 50 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE (0,0244 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....</p>	101
<p>FIGURA 51 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU E VM.....</p>	101
<p>FIGURA 52 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS (RGB) PARA A SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE VM DE CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0048 A 0,024 G. L⁻¹) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0048; (B) 0,0096; (C) 0,0144; (D) 0,092 E (E) 0,024.</p>	102

- FIGURA 53 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0006 A 0,024 G. L⁻¹) E VC COM CONCENTRAÇÃO CONSTANTE (0,0006 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO..... 104
- FIGURA 54 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0006 A 0,024 G. L⁻¹) E VC COM CONCENTRAÇÃO CONSTANTE (0,006 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO..... 104
- FIGURA 55 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0006 A 0,024 G. L⁻¹) E VC COM CONCENTRAÇÃO CONSTANTE (0,012 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO..... 105
- FIGURA 56 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0006 A 0,024 G. L⁻¹) E VC COM CONCENTRAÇÃO CONSTANTE (0,018 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO..... 106
- FIGURA 57 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL (0,0006 A 0,024 G. L⁻¹) E VC COM CONCENTRAÇÃO CONSTANTE (0,024 G. L⁻¹). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO..... 106
- FIGURA 58 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU E VM..... 107
- FIGURA 59 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS (RGB) PARA A SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE VM COM CONCENTRAÇÃO VARIÁVEL [G. L⁻¹] (0,0006 A

0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0006; (B) 0,006; (C) 0,012; (D) 0,018 E (D) 0,024.....	108
FIGURA 60 - MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA PARA A SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0006); ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B.....	109
FIGURA 61: CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO PARA SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0006).....	110
FIGURA 62 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,006). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	110
FIGURA 63 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,012). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	111
FIGURA 64 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,018). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	112
FIGURA 65 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,024). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	113

FIGURA 66 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU E VC.....	114
FIGURA 67 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA AS ABSORBÂNCIAS CALCULADAS (RGB) PARA A SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0006; (B) 0,006; (C) 0,012; (D) 0,018 E (D) 0,024.....	114
FIGURA 68 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM E AU.....	115
FIGURA 69 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM E VC.....	116
FIGURA 70 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA ESPECTRAL E A CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU E VC.....	117
FIGURA 71 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0048). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	119
FIGURA 72 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0096). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	119
FIGURA 73 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0144). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	119
FIGURA 74 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0192). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G	

E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	120
FIGURA 75 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,024). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	120
FIGURA 76 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA RGB E ABSORBÂNCIA DO ESPECTRO COM A CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM E AU.....	120
FIGURA 77 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0144). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	122
FIGURA 78 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,012). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	123
FIGURA 79 - SOLUÇÃO BINÁRIA COM OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,012). (A) MODELOS CRIADOS A PARTIR DOS VALORES DE ABSORBÂNCIA CALCULADA, ONDE ABSR É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA R; ABSG É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA G E; ABSB É A ABSORBÂNCIA EM RELAÇÃO À BANDA B. (B) CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTROFOTÔMETRO.....	124
FIGURA 80 – ESPECTRO (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) PARA A SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0048; (B) 0,0096; (C) 0,0144; (D) 0,092 E (E) 0,024.....	145

FIGURA 81 – ESPECTRO (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) PARA SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0006; (B) 0,006; (C) 0,012; (D) 0,018 E (E) 0,024..... 146

FIGURA 82 – ESPECTRO (MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO) PARA SOLUÇÃO BINÁRIA COM CORANTE AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L⁻¹] CONSTANTE A: (A) 0,0006; (B) 0,006; (C) 0,012; (D) 0,018 E (E) 0,024..... 147

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEMPERATURA DAS CORES DE FONTES DE LUZ NATURAIS E ARTIFICIAIS.....	36
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO CORANTE AU.	40
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO CORANTE VM.....	42
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DO CORANTE VC.....	44
TABELA 5: CONCENTRAÇÃO DOS CORANTES PUROS.	65
TABELA 6 - SOLUÇÕES BINÁRIAS DOS CORANTES VM E AU.....	65
TABELA 7 - SOLUÇÕES BINÁRIAS DOS CORANTES VC E VM.....	66
TABELA 8 - SOLUÇÕES BINÁRIAS DOS CORANTES VC E AU.....	66
TABELA 9 - SOLUÇÕES BINÁRIAS DOS CORANTES VM E AU.....	66
TABELA 10 - DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DO CORANTE AU.....	88
TABELA 11 - DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DO CORANTE VC.	92
TABELA 12 - DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DO CORANTE VM.	95
TABELA 13 – BANDAS DO MÉTODO RGB REPRESENTATIVAS DE CADA CORANTE, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES..	97
TABELA 14: BANDAS DO MÉTODO RGB REPRESENTATIVAS DOS CORANTES AU E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELES, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	103
TABELA 15: BANDAS DO MÉTODO RGB REPRESENTATIVAS DOS CORANTES VC E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELES, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	108
TABELA 16: BANDAS DO MÉTODO RGB REPRESENTATIVAS DOS CORANTES VC E AU E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELES, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	115
TABELA 17: BANDAS DO MÉTODO RGB E COMPRIMENTOS DE ONDA RELATIVOS AOS CORANTES AU E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELES, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	116
TABELA 18: BANDAS DO MÉTODO RGB E COMPRIMENTOS DE ONDA RELATIVOS AOS CORANTES VC E VM E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELES, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	117

TABELA 19: BANDAS DO MÉTODO RGB E COMPRIMENTOS DE ONDA RELATIVOS AOS CORANTES VC E AU E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELAS, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	118
TABELA 20: BANDAS DO MÉTODO RGB E COMPRIMENTOS DE ONDA RELATIVOS AOS CORANTES VM E AU E A SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE ELAS, CONFORME GRÁFICOS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DA ABSORBÂNCIA E A CONCENTRAÇÕES.....	121
TABELA 21: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0048)...	148
TABELA 22: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0096)...	148
TABELA 23: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0144)...	149
TABELA 24: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0192)...	149
TABELA 25: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0048 A 0,024) E AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0240)...	150
TABELA 26: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0006)...	150
TABELA 27: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,006).....	151
TABELA 28: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,012).....	151
TABELA 29: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,018).....	152

TABELA 30: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES VM COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] VARIÁVEL (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,024).	152
TABELA 31: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,0006).	153
TABELA 32: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU (COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,006).	153
TABELA 33: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,012).	153
TABELA 34: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,018).	154
TABELA 35: DADOS ANALÍTICOS OBTIDOS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA PARA AMOSTRAS DA SOLUÇÃO BINÁRIA ENTRE OS CORANTES AU COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] (0,0006 A 0,024) E VC COM CONCENTRAÇÃO [G. L ⁻¹] CONSTANTE (0,024).	154

ABREVIATURAS

abs – Absorbância calculada

absR – Absorbância calculada da banda R

absG – Absorbância calculada da banda G

absB – Absorbância calculada da banda B

absRGBpH – Absorbância calculada das bandas R, G, B a pH constante

absRpH - Absorbância calculada da banda R em pH constante

absGpH - Absorbância calculada da banda G em pH constante

absBpH - Absorbância calculada da banda B em pH constante

ADI – Análise Digital de Imagens

AU – Auramina

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

LOD – Limite de detecção

LOQ – Limite de quantificação

VM – Verde Malaquita

VC – Vermelho Congo

RGB – vermelho, verde, azul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. OBJETIVOS GERAIS	29
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1. HISTÓRIA DA COR	30
2.2. CARACTERÍSTICAS DAS CORES	33
2.3. CORES ESTRUTURAIS	37
2.4. CORANTES.....	39
2.4.1. CORANTE AURAMINA (AU).....	40
2.4.2. CORANTE VERDE MALAQUITA (VM).....	42
2.4.3. CORANTE VERMELHO CONGO (VC).....	44
2.5. ESPAÇO DE CORES	46
2.5.1. ESPAÇO RGB	46
2.5.2. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM SENSORES.....	47
2.5.3. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM EXIBIÇÃO	48
2.5.3.1. Aditivos	48
2.5.3.2. Subtrativos	49
2.5.4. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM COMBINAÇÃO	49
2.5.5. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM EQUIVALÊNCIA	52
2.5.6. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM APARÊNCIA.....	52
2.5.7. ESPAÇO DE CORES BASEADO EM ORDEM	53
2.6. INSTRUMENTOS PARA MENSURAÇÃO DE CORES.....	53
2.6.1. ESPECTRORRADIÔMETRO	54
2.6.2. COLORÍMETRO.....	55
2.6.3. ESPECTROFOTÔMETRO	56
2.7. ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS.....	57
2.7.1. APLICAÇÕES	59
2.7.1.1. ÁREA DA SAÚDE	59
2.7.1.2. MEIO AMBIENTE.....	60
2.7.1.3. ALIMENTOS.....	61
2.7.1.4. OUTRAS APLICAÇÕES.....	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS	64

3.1. PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES COM OS CORANTES	64
3.2. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS	66
3.3. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	67
3.4. MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	70
4.2. ESTUDO DAS TRIPLICATAS.....	71
4.3. PH.....	74
4.4. ESTUDO ESPECTROFOTOMÉTRICO INDIVIDUAL DOS CORANTES AURAMINA (AU), VERDE MALAQUITA (VM) E VERMELHO CONGO (VC).....	79
<i>4.4.1. ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA E DOS COMPRIMENTOS DE ONDA DOS CORANTES.....</i>	<i>79</i>
<i>4.4.2. ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA E DOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE SOLUÇÕES MULTICOMPONENTES.....</i>	<i>82</i>
4.5. ANÁLISE RGB.....	83
<i>4.5.1. ESTUDO DA ÁREA A E NORMALIZAÇÃO DOS PIXELS DOS CORANTES PUROS</i>	<i>83</i>
<i>4.5.1.1. Corante Auramina (AU)</i>	<i>84</i>
<i>4.5.1.2. Corante Vermelho Congo (VC)</i>	<i>84</i>
<i>4.5.1.3. Corante Verde Malaquita (VM).....</i>	<i>85</i>
<i>4.5.2. ANÁLISE LINEAR.....</i>	<i>86</i>
<i>4.5.2.1. Corante Auramina (AU)</i>	<i>86</i>
<i>4.5.2.2. Corante Vermelho Congo (VC)</i>	<i>90</i>
<i>4.5.2.3. Corante Verde Malaquita (VM).....</i>	<i>93</i>
<i>4.5.2.4. Análise da solução binária com os corantes Vermelho Malaquita (VM) e Auramina (AU) 97</i>	
<i>4.5.2.5. Análise da solução binária com os corantes Verde Malaquita (VM) e Vermelho Congo (VC) 103</i>	
<i>4.5.2.6. Análise da solução binária com os corantes Auramina (AU) e Vermelho Congo (VC) 109</i>	
<i>4.5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS RGB.....</i>	<i>115</i>
<i>4.5.3.1. Análise do comportamento RGB da solução binária dos corantes Verde Malaquita (VM) e Auramina (AU).....</i>	<i>118</i>
4.6. VALIDAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	122
5. CONCLUSÃO	127
6. REFERÊNCIAS	128

ANEXO I – CURVAS DOS ESPECTROS DAS SOLUÇÕES BINÁRIAS	145
ANEXO II – PROPRIEDADES ANALÍTICAS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA.....	148

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Vocabulário Internacional de Iluminação, a luz é definida como “qualquer radiação capaz de causar uma sensação visual direta”, ou seja, é uma radiação eletromagnética visível ao olho humano (CIE, 1989). Segundo Choudhury (2014), o termo cor é utilizado para descrever três aspectos diferentes da realidade. O primeiro é sobre a propriedade cor de um objeto, o segundo descreve a características de raios de luz e o terceiro trata sobre as sensações no cérebro do observador.

As cores não são meras decorações, mas elas têm seu próprio propósito. Os animais que conseguem distinguir cores utilizam estas para identificar materiais em seu meio ambiente. Por exemplo, mesmo sob diferentes iluminações e ambientes, é possível identificar se uma banana está verde, madura ou passada, através de suas colorações verde, amarelo e marrom (Witzel e Gegenfurtner, 2018). A cor pode indicar condições climáticas e temporais visuais (se irá chover, qual o período do dia), a cor da comida contribui para o seu gosto e a cor de um ambiente estimula a percepção da temperatura (Maule, Skelton e Franklin, 2023). Sobre o ponto de vista físico, uma cor não é a mesma em diferentes iluminações, pois suas coordenadas irão mudar, mesmo não sendo perceptíveis a olho humano. Por isso, objetos são classificados como uma distribuição policromática de cores (Witzel e Gegenfurtner, 2018).

A percepção visual é a habilidade de interpretar o ambiente processando informações contidas na luz visível (Choudhury, 2014a). A visão da cor é um processo sensorial básico para a percepção e cognição das cores (Maule, Skelton e Franklin, 2023). Os seres humanos, ao contrário de outros animais, têm a capacidade de interpretar e utilizar cores que naturalmente não existem e categorizá-las com significados diversos (Rowland e Burriss, 2017). Cores são como o sistema visual humano analisa o espectro eletromagnético com comprimentos de onda de 300 a 830 nm (Tkalcic e Tasic, 2003). A sensação no nervo ótico é causada pelo estímulo da radiação eletromagnética, o que leva à distinção das cores (Xuan *et al.*, 2021). A sensibilidade do olho à luz depende do comprimento de onda, onde o comprimento da luz verde em $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ é visualmente mais claro que a mesma radiação em iluminação azul e R (Choudhury, 2014a). A luminosidade é medida através da sensibilidade do olho humano e, na retina humana existem dois fotorreceptores principais responsáveis pela sensação visual: os bastonetes e os cones, que possuem funções diferentes (Choudhury, 2014a; Race e Bunch, 2015). Os bastonetes são bastante sensíveis e capazes de atuar em ambientes com pouca iluminação, promovendo a visão escotópica, entretanto, não fazem diferenciação de cores, processo em que os cones são responsáveis (Race e Bunch, 2015). A visão humana é tricromática, ou seja, a retina apresenta três tipos de cones fotorreceptores com sensibilidade para leitura de comprimentos de onda

longos, médios e pequenos, comprimentos referentes às cores vermelho, verde e azul, respectivamente (Maule, Skelton e Franklin, 2023). Comprimentos de onda grandes têm sensibilidade de 560 nm, os médios apresentam valores de 530 nm e os menores, 420 nm (Pompe, 2020).

Os sinais de saída dos cones sofrem uma transformação e uma fusão nas vias neurais que conectam o olho ao cérebro, resultando na criação de um canal acromático responsável pela percepção de brilho e luminosidade, bem como dois canais cromáticos opostos conhecidos como cones opostos. Esses canais opostos são distintos pela captação de cores que variam desde tonalidades cereja até o azul-petróleo (banda vermelho-verde) e tonalidades violeta até o verde-amarelado (banda azul-amarelo) (Maule, Skelton e Franklin, 2023; Sharma, Vrhel e Trussell, 1998).

É comum categorizar as cores em quantidades específicas, como, por exemplo, sete cores ao se referir ao arco-íris. No entanto, é importante destacar que o arco-íris é composto por ondas de espectro que apresentam variações contínuas em sua frequência, embora possam parecer visualmente estáveis a olho nu. Os seres humanos possuem a capacidade de perceber as cores tanto como elementos quantitativos, ao agrupá-las em categorias distintas, quanto como elementos constantes, ao perceberem a estabilidade aparente das cores no arco-íris (Uchikawa, 2014). A constância das cores tem sido atribuída a mecanismos perceptivos como adaptação e contrastes simultâneos, destaques brilhantes e conhecimento da cor do objeto (Maule, Skelton e Franklin, 2023). Se uma laranja, uma cenoura e uma mexerica possuíssem exatamente a mesma tonalidade de cor, isso implicaria que elas compartilham uma característica visual em comum. No entanto, a similaridade na tonalidade de cor não necessariamente significa que essas amostras sejam mais semelhantes entre si em outros aspectos físicos ou fisiológicos (Byrne e Hilbert, 2003).

Para análises quantitativas de substâncias químicas, os fenômenos ópticos, como mudança de coloração, podem não ser passíveis de interpretação à “olho nu”, pois a percepção das cores depende de vários fatores como: composição da amostra, ângulos de iluminação e características eventuais de análise do cérebro humano, conforme descrito anteriormente (Diniz, 2020). Quando a luz atinge o objeto, o raio de luz é modificado pela absorção, dispersão e outros processos físicos dependentes das características físicas e químicas do objeto (Choudhury, 2014a). De fato, para realizar análises mais precisas e objetivas das cores, são empregados métodos como colorimetria, espectrorradiometria, fotometria, espectrofotometria e, mais recentemente, a Análise Digital de Imagens (ADI). Essas técnicas são fundamentais

para quantificar e caracterizar as propriedades espectrais das cores de forma mais precisa e detalhada (Diniz, 2020).

Com a rápida evolução da comunicação móvel e da computação, a transmissão e exibição de mídias ganharam popularidade e importância primordial. Os algoritmos podem ser utilizados para comprimir uma imagem e expressar o conteúdo visual, utilizando um espaço de cores adequado, de modo a minimizar as redundâncias psicovisuais (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Dispositivos de leitura de imagens replicam o processo humano de reconhecimento das cores, analisando as informações de cor de cada pixel da imagem e reproduzindo a sensação através de filtros com valores máximos de meio comprimento de onda, com eficiência de distinção dos picos de transmissão do espectro visível (Shaukat, Noble e Arif, 2020).

A ADI é uma técnica que rapidamente emergiu com os avanços dos telefones portáteis. No método, uma imagem é captada por uma câmera e um *software* a converte em dados analisáveis (Mahato e Chandra, 2019). A análise digital de imagens é uma alternativa aos métodos convencionais, apresentando vantagens como baixo custo, portabilidade e facilidade de operação, podendo ser utilizada em experimentos envolvendo metais (Masawat *et al.*, 2017; Salcedo e Sevilla III, 2018), compostos orgânicos (Choodum, Sriprom e Wongniramaikul, 2019) e bioquímicos (Priye, Ball e Meagher, 2018; Tambaru *et al.*, 2017), dentre outras diversas possibilidades de aplicações (Jing *et al.*, 2021; Santos Neto *et al.*, 2019; Sivakumar e Lee, 2021). A técnica consiste na representação da imagem capturada através dos espaços representativos RGB (*red*, *green* e *blue* - vermelho, verde e azul), variando as coordenadas de 0 a 255, o que traz maior capacidade de representação que um espectrofotômetro comum (com variação da absorbância de 0 a 2) (Firdaus *et al.*, 2019). O único requerimento dessa análise é que o analito deve apresentar alguma variação de cor, uma vez que se trata de um método colorimétrico.

Os equipamentos para captura de imagens podem variar desde câmeras digitais, celulares à scanners, sendo necessário apenas a habilidade óptica para capturar as cores e suas devidas nuances (Fernandes *et al.*, 2020). Esses equipamentos requerem apenas a capacidade óptica necessária para capturar as cores e suas respectivas nuances. Com o avanço da tecnologia, a qualidade das câmeras e scanners tem melhorado significativamente, permitindo a captura de detalhes sutis e a reprodução fiel das cores presentes na imagem original. A iluminação própria e a portabilidade dos smartphones e câmeras digitais fazem com que eles sejam os mais utilizados, e comparando os dois instrumentos, os celulares se sobrepõem devido às funções da câmera e a possibilidade de uso de aplicativos (Fan *et al.*, 2021). As imagens podem ser analisadas por meio de aplicativos instalados diretamente nos dispositivos ou em

conjunto com um computador, utilizando *softwares* como Matlab, Delphi, Adobe Photoshop, Corel Draw e outras plataformas similares. A quantificação é feita comparando a intensidade da cor à uma curva de calibração padrão do analito em estudo (Fernandes *et al.*, 2020).

Este estudo visa utilizar imagens digitais no formato RGB para determinar a concentração de misturas dos corantes Auramina (AU), Verde Malaquita (VM) e Vermelho Congo (VC) diluídos em água, com o propósito de desenvolver um modelo que seja aplicável de maneira versátil e acessível à sociedade em geral.

O uso de imagens digitais como fonte de informação permite uma abordagem prática e não invasiva para analisar as propriedades das misturas de corantes. Ao desenvolver um modelo baseado em imagens RGB, busca-se oferecer uma solução que possa ser facilmente adotada por diversos usuários, tornando-a acessível tanto em termos de custo quanto de aplicação. Com isso, espera-se fornecer uma ferramenta útil para a análise das concentrações de corantes em soluções aquosas, de forma a apresentar uma alternativa acessível aos métodos colorimétricos dispendiosos.

1.1. Objetivos gerais

Desenvolver um sistema de visão artificial para análise de uma solução com os corantes AU, VM e VC, utilizando-se de técnicas de processamento de imagens digitais e estatística espacial.

1.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um algoritmo para recortar e processar imagens, com o objetivo de calcular a concentração de cada corante;
- Avaliar a influência do pH nos corantes AU, VM e VC quando na análise de imagens;
- Comparar diferentes colorações e concentrações;
- Avaliar a influência do ambiente de controle, dispositivo de captura de imagens e características intrínsecas dos corantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. História da cor

As cores estão presentes em todos os lugares e são o exemplo mais importante, persuasivo e visual da importância da química na vida humana (Freemantle, 2001). Cores são utilizadas desde de tempos pré-históricos como forma de comunicação visual e expressão, associada com a evolução cultural humana (Ardila-Leal *et al.*, 2021). Aproximadamente 164.000 anos atrás, as primeiras evidências de uso distinto de cores denotam sua utilização para identificação, pintura corporal, pigmentação de peles de animais usadas como roupas, adornos em cavernas e para contar histórias (Christie, 2015; Morriss-Kay, 2010). Durante esse tempo, era comum utilizar minerais para realizar essas pinturas, como o óxido de ferro (ocre) e o carvão proveniente de fogueiras (Ardila-Leal *et al.*, 2021; Barnett, Miller e Pearce, 2006). Em estudos paleolíticos, pinturas com a coloração ocre são bastante encontradas, devido a abundância do elemento em várias partes do mundo, apresentando formas desde de vermelho, Fe_2O_3 , marrom, $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ até mesmo preto, Fe_3O_4 (Abel, 2012). No entanto, no passado, cores além do ocre e do preto eram mais difíceis de encontrar e havia poucos recursos disponíveis para produzi-las. Um exemplo disso é a cor azul, cuja primeira utilização registrada ocorreu no Afeganistão, por meio da extração de depósitos da pedra lápis-lazúli (Ardila-Leal *et al.*, 2021). Conforme foi ocorrendo a evolução humana e o aprendizado de controle do fogo e do ar para atingir um equilíbrio oxi-redutivo, mais colorações foram possíveis de atingir. Os egípcios revolucionaram ao criar as primeiras cores artificiais, principalmente o azul egípcio, composto por silicato de cálcio de cobre, $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, sal de cálcio (carbonato, sulfato ou hidróxido), um composto de cobre (óxido ou malaquita) e sílica, SiO_2 . Outras criações foram realizadas ao longo do tempo, buscando obter cores vibrantes. Por exemplo, o uso do sulfato de arsênio permitia a obtenção de um amarelo intenso ou um vermelho vívido, dependendo da sua mistura com água, e do hidróxido de sulfato de potássio férrico, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, originou-se o amarelo claro (Barnett, Miller e Pearce, 2006). Já na cultura greco-romana, as cores eram utilizadas para demonstrar poder, onde ninguém exceto a burguesia poderia vestir roupas roxas, devido a indisponibilidade de fabricação do pigmento na época.

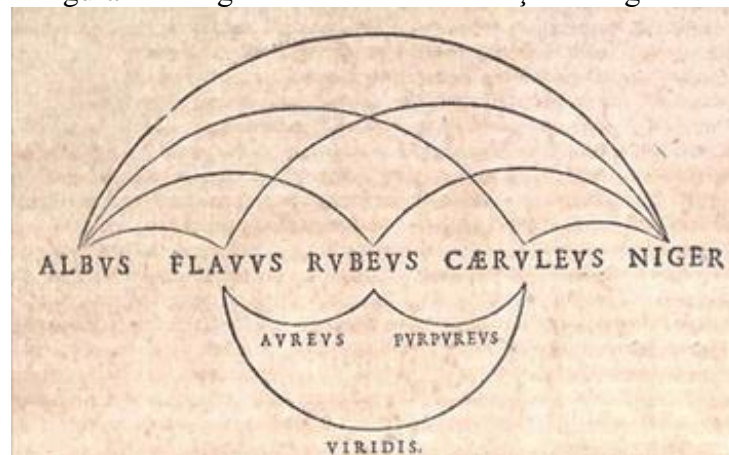
O estudo da luz e cores é bastante antigo, mas o primeiro pensador a propor uma teoria para cores foi Empédocles de Agrigento (495 a.C. – 430 a.C). Para ele, as cores eram provenientes dos quatro elementos fundamentais: terra, ar, água e fogo. O fogo era considerado branco, devido a luz solar, e a água era preta, devido ao mar. As outras cores derivariam da

mistura entre as duas cores principais (Esposito, 2020). O pensador também entendia a cor como uma sensação do observador e não uma propriedade do objeto (Maranhão, 2021).

Aristóteles (384 a.C. – 322 b.C.), seguindo a linha de Empédocles, teorizava as cores como misturas de diferentes proporções de preto e branco e descreveu a cor como uma qualidade fundamental da matéria, sendo explicada com quatro propriedades: o objeto que emite a cor, o meio pelo qual a cor se propaga, o observador que percebe a cor e a luz que ilumina o objeto (Esposito, 2020; Orna, 2015). Aristóteles descreve que não é possível ver, através da visão humana, uma cor completamente pura, sendo sua percepção subjetiva e variante para cada observador (Orna, 2015). Na concepção mencionada, a sensação visual era considerada como algo transmitido por um meio imaterial, que atravessava uma camada transparente dos objetos e conferia cor a eles. Essa transmissão de nuances de cor era atribuída à ação de raios enviados por Deus (Maranhão, 2021; Martins e Silva, 2015). O filósofo e polímata propôs uma teoria sobre a mistura de cores, argumentando que as cores principais eram descritas pelo vermelho, amarelo e azul, e que todas as outras cores poderiam ser produzidas a partir da mistura dessas três cores. Essa teoria influenciou o desenvolvimento da teoria das cores ao longo da história, embora tenha sido posteriormente modificada com a descoberta da teoria das cores primárias utilizadas nos dias atuais, sendo estas o vermelho, verde e azul. Seus estudos foram base para muitas teorias das cores, como a de René Descartes (1596-1650), Robert Hooke (1635-1703) e Isaac Newton (1643-1727) (Orna, 2015).

Entretanto, Leonardo da Vinci (1452-1519) contestava a teoria de Aristóteles em seu livro “Tratado da pintura e da paisagem”, publicado postumamente em 1751. O pintor referia-se a cor como uma propriedade da luz e que branco e preto são extremos da luz e não cores propriamente ditas. Seguindo essas ideias, François d’Aguilon (1567-1617) desenvolveu o primeiro diagrama de cores, publicado em seu livro *Opticorum libri sex, philosophia iuxta ac mathematicis utiles* (Maranhão, 2021). Este diagrama está representado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de cores de François d'Aguilon.

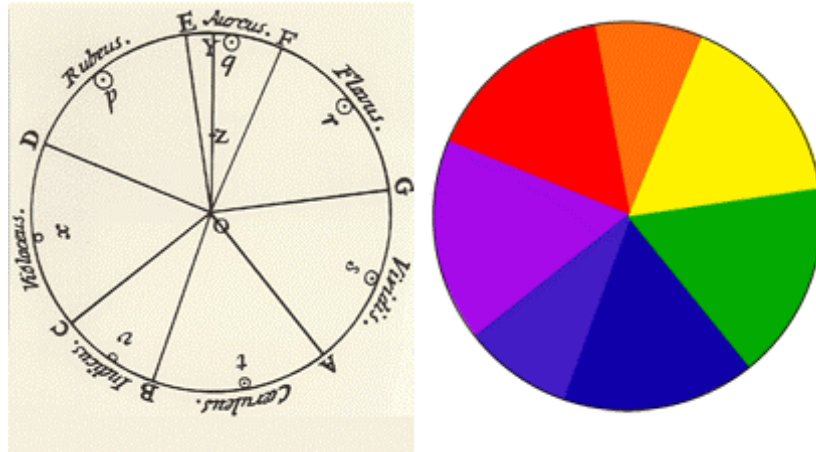


Fonte: Adaptado do Instituto e Museu da História da Ciência (“Museo Galileo”, [s.d.])
 As cores *albus*, *flavus*, *rubeus*, *caeruleus niger* (branco, amarelo, vermelho, azul e preto, respectivamente) são apresentadas linearmente. As cores *aureus*, *viridis* e *purpureus* (ouro, verde e roxo, respectivamente) são uma mistura das três lineares acima.

Descartes e Hooke eram fascinados pela interação das luzes e as colorações provenientes delas. Para Descartes, a luz era como pulsos ou mudanças de pressão que eram transmitidos através do éter (seguindo as notações de Aristóteles, onde o éter era um corpo celeste incorruptível). Quando ocorria o pulso, ocorria uma rotação dessas partículas devido ao impacto com outras partidas de éter estacionárias (Fara, 2015). Se a rotação mencionada fosse rápida, o observador perceberia a coloração como vermelha. Por outro lado, se a rotação fosse lenta, a coloração seria percebida como azulada. Para as demais colorações, os movimentos de rotação seriam intermediários entre esses dois extremos (Fara, 2015; Martins e Silva, 2015). Hooke entendia a luz do mesmo modo que Descartes, porém as cores eram originárias das distorções dos pulsos e não de seus movimentos (Fara, 2015).

Newton percebeu a necessidade de criar protocolos e métodos para classificação e denominação das cores e, em 1704, publicou seu livro *Opticks*, que descrevia pela primeira vez as cores complementares, ou seja, as cores além do vermelho, verde e azul, após anos realizando o experimento do prisma (Orna, 2015; Pridmore, 2020). No experimento conduzido por Newton, ele permitia que a luz solar atingisse um prisma, onde era refratada e produzia uma sequência de cores conhecida como espectro visível. Essas cores, em seguida, passavam por uma lente de telescópio e eram combinadas, resultando na formação de um raio de luz branca (Santos e Alvim, 2022). O físico foi o precursor dos espaços coloridos utilizados na colorimetria, onde vários tipos de diagramas de cor delimitam o perímetro espectral ou não espectral das cores no máximo de sua saturação, possuindo um ponto de iluminação no centro (ponto branco), como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Círculo cromático de Newton em sua representação original e coloração artificial.



Fonte: Banco de imagens.

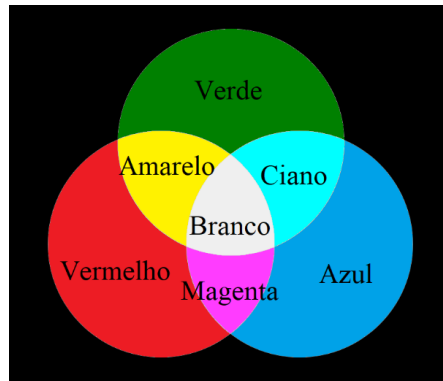
As cores complementares têm papel importante na visão humana, sendo importantes para analisar as misturas, constâncias e aparência das colorações (Pridmore, 2020). Além disso, seu trabalho “A nova teoria da luz e cores”, publicado postumamente em 1993, traz conceitos sobre a luz monocromática que permitiu a criação da espectroscopia (Barsan e Merticariu, 2016).

2.2. Características das cores

Uma cor pode ser gerada por três tipos mecanismos: refletindo ou transmitindo a cor desejada enquanto ocorre a absorção de outras secundárias; gerando cores diferentes por difração ou dispersão ou emitindo luz de uma cor utilizando materiais luminescentes. Entre os três mecanismos mencionados, o primeiro pode apresentar baixa eficiência e baixa resolução. O terceiro mecanismo requer energia para sua criação. Portanto, o segundo mecanismo é considerado o mais promissor tecnologicamente (Wu *et al.*, 2021). Esse meio é a base da ADI, que será discutida posteriormente.

Uma cor geralmente apresenta três atributos principais: tonalidade, brilho e saturação; e dois secundários: luminosidade e croma (Phung *et al.*, 2022). As cores podem ser classificadas em primárias, simples, elementares ou principais, secundárias e terciárias, sendo as últimas chamadas de cores complementares. As cores primárias são representadas pelas bandas vermelho, verde e azul, como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de cores de Newton para cores primárias e secundárias.



Essas cores são consideradas fundamentais para a mistura e reprodução de uma ampla gama de outras cores, e, em alguns sistemas de cores, o branco e o preto também são considerados componentes adicionais. As misturas entre as cores primárias produzem as cores secundárias como amarelo, ciano e magenta (O'Connor, 2021). A mistura de todas as cores, primárias e secundárias, forma o branco e a ausência destas, forma o preto.

De acordo com a Comissão Internacional de Iluminação (1989), CIE (do francês, *Commission Internationale d'Éclairage*), “tonalidade é o atributo da sensação visual segundo a qual uma área parece ser semelhante à uma das cores percebidas, vermelho, amarelo, verde e azul, ou uma combinação de duas delas”. As cores podem ser divididas, segundo sua tonalidade, como em quentes (ex. vermelho) ou frias (ex. azul) (Chen *et al.*, 2020). A tonalidade representa o tipo da cor, ou seja, o comprimento de onda predominante no espectro visível, e a saturação refere-se à quantidade de cinza (Diniz, 2020). Apesar de ser comum considerar que as cores são as primárias, secundárias e terciárias, entre as suas variações podem haver cerca de 269 tipos de tonalidades diferentes, segundo o sistema americano de *designações de cores* (*Inter-Society Color Council-National Bureau of Standards, ISCC-NBS*) (Harder, 1999).

Ao manter a luminosidade ambiente uniforme, a tonalidade do objeto não muda conforme a mudança de sentido de observação. Em meios computacionais, essa propriedade é invariante ao brilho e, em análises RGB, a tonalidade é representada entre 0 e 360°, onde tem a capacidade de avaliar a proporção entre dois pequenos componentes RGB (Finlayson e Schaefer, 2001; Ren *et al.*, 2021). A mudança de tonalidade ocorre de acordo com as variações da luminosidade e, por consequência, do brilho, efeito denominado Bezold-Brücke (Lillo e Moreira, 2006). Esse efeito foi descrito pelos pesquisadores Bezold e Brücke, em 1873, onde observaram que sob luzes fortes, pontos vermelhos e verde azulados aparentavam mais amarelados e pontos verde e azuis não apresentavam nenhuma mudança de tonalidade (Walraven, 1961).

Cores vibrantes estão relacionadas à altas saturações ou brilho, e para adquiri-las é necessário um alto grau de pureza espectral, ou seja, a cor deve apresentar apenas um pico espectral (Baek *et al.*, 2020). O brilho é importante para determinar a luminosidade ou escuridão refletida pela cor e a saturação influencia na pureza da coloração, ou seja, determinar a proporção de luz difusiva em uma superfície refletiva (Chen *et al.*, 2020; Anderson; Whitbread; Silva, 2014; Kim; Gold; Murray, 2018). É comum observar valores positivos da correlação entre o brilho e a quantidade de luz emitida ou refletida, entretanto, a relação entre quantidade de luz em vários estímulos e seu brilho e luminosidade torna-se mais complexa (Hellwig e Fairchild, 2022). Sob diferentes condições de iluminação, uma mesma superfície pode produzir diferentes níveis de luminância na imagem da retina, mesmo que sua reflectância seja a mesma. Por outro lado, diferentes superfícies com reflectâncias distintas podem resultar na mesma luminância, quando a quantidade e qualidade da luz incidente são ajustadas para compensar essas diferenças (Kim, Gold e Murray, 2018). Na análise RGB, é de conhecimento que áreas claras em uma imagem podem causar erros de processamento em algoritmos devido à saturação de cores ou perda de detalhes. No entanto, existem estudos em andamento que visam lidar com esse desafio, concentrando-se na redução do brilho para melhorar a detecção de bordas, realçar o contraste e melhorar a visibilidade de objetos em imagens coloridas (Bezryadin, Bourov e Ilinih, 2007; Gonzalez *et al.*, 2017; Liseras *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2018).

A saturação é o raio do círculo da tonalidade, começando no ponto de luminosidade e terminando na extremidade espectral da cor pura (Arlete, Camargos e Gonzalez, 2001). A saturação de uma cor está diretamente relacionada à sua pureza e intensidade, onde quanto maior o valor de saturação, mais pura e vibrante é a coloração. A característica é medida em uma escala de 0 a 100%, onde 0% representa uma cor pouco saturada ou acinzentada, e 100% representa a máxima saturação, correspondendo à cor em seu estado mais intenso e puro (Flores-Vidal *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2021). A cor vermelha pura é altamente saturada, enquanto os tons ditos pasteis são poucos saturados (Lopes, 2003). A cor percebida pelo estímulo visual descreve a intensidade da cromaticidade. A diferença entre croma e saturação reside na forma como são definidos em relação à cor. O croma é determinado pela coloração em relação a um estímulo de brilho branco iluminado de maneira homogênea. Ele mede a intensidade relativa da cor em relação à sua luminância. Por outro lado, a saturação refere-se à coloração em relação ao próprio estímulo de brilho da cor. Ela representa a pureza e intensidade da cor independentemente de seu brilho relativo. Portanto, enquanto o croma está relacionado à intensidade da cor em relação a um estímulo de brilho branco, a saturação está relacionada à

pureza e intensidade da cor em si mesma, independentemente do brilho relativo (Diniz, 2020; Hellwig e Fairchild, 2022).

Duas cores são consideradas complementares quando apresentam luminosidade e cromaticidade correlatas para produzir uma mistura neural de acordo com estímulo provocado. Caso a mistura apresente cromaticidade similar mas luminosidade distintas, o evento passa a se denominar cromaticidade complementar (Chen *et al.*, 2020).

Siuda-Krzywicka e colaboradores (2019) citam 3 problemas ao categorizar cores. O primeiro versa sobre a diferença entre os sistemas de referências usados ao mensurar os comprimentos de onda de cada cor que apresentam constantes mudanças. Para evitar a divergência, os autores indicam que é necessário padronizar, utilizando cartas universais, como o Sistema Munsell e o CIELAB. O segundo indicador errôneo retrata o possível contraste da cor com o seu “fundo”, onde ao analisar cores, é necessário uniformizar seu segundo plano. As cores são geralmente percebidas através de contextos espaciais e temporais de seu ambiente, portanto, a iluminação é de suma importância para uma observação adequada. Com isso, o terceiro tópico relata a importância de uniformização para uma adaptação sensorial adequada.

A temperatura da cor (Tabela 1) é importante característica na luz visível. Quando a temperatura de uma amostra incandescente aumenta, a luz emitida por ela também aumenta. À medida que a temperatura se eleva, o material passa por uma transição de cores, indo do vermelho (em temperaturas mais baixas) para tonalidades mais altas de amarelo, laranja e, eventualmente, atinge uma aparência quase branca em temperaturas muito altas (Choudhury, 2014a).

Tabela 1 - Temperatura das cores de fontes de luz naturais e artificiais.

Fonte de Luz	Temperatura da cor (K)
Pôr/nascer do sol	1800
Bulbo de luz incandescente	2700-3000
Luar/lâmpada de arco de xenônio	4100
Luz de dias nublados	6500
Flash eletrônico	5500-6000
Telas LCD/CRT	6500-9300
Luzes residenciais (lâmpadas fluorescentes)	2700*

*Temperatura correlata às fontes naturais. O valor real pode variar.

Fonte: Adaptado de Choudhury (2014a).

As características espectrais da luz desses materiais dependem da temperatura do objeto, mas algumas cores são seletivamente absorvidas pelo objeto emissor. Superfícies transparentes

ou altamente refletivas apresentam baixa emissão de luz visível quando a temperatura é aumentada. Por outro lado, os corpos negros são conhecidos por serem excelentes emissores de luz (Choudhury, 2014a).

As fontes de luz também interferem nas características das cores, podendo intensificar ou diminuir a saturação, brilho e tonalidade percebidas pelo observador. Segundo Choudhury (2014a), as fontes de luz podem ser incandescentes ou luminescentes e, dentro das duas podem ocorrer outras quatro classificações. A luz pode ser: natural, proveniente de fonte astronômica, como radiação solar, estrelas, supernovas; atmosférica, através de meteoros e auroras; terrestre, por bioluminescência e erupção vulcânica; ou artificial, divididas em diretas (quimiluminescência, fluorescência e fosforescência), por combustão ou elétrica.

2.3. Cores estruturais

Na natureza existem duas variações de cores, as pigmentadas e as estruturais. As cores pigmentadas possuem natureza química originária da seletividade da absorção de luz através da transição de elétrons entre as órbitas moleculares e; as cores estruturais possuem natureza física decorrente da interação entre estruturas aleatórias ou constantes com a luz (Liu, Tao e Tang, 2023). Cores estruturais são formadas pela interferência da luz espalhada em estruturas nano ou microscópicas dispostas criteriosamente e podem gerar cores muito mais vibrantes ou completamente transparentes (Baek *et al.*, 2020; Yavuz *et al.*, 2017). O comprimento de onda da luz refletida depende da dimensão da nanoestrutura no material e seus índices refrativos (Fu *et al.*, 2016). A grande vantagem das cores estruturais sobre os pigmentos e corantes é que elas permitem o desenvolvimento de diversas cores com apenas uma mudança nos parâmetros estruturais (Baek *et al.*, 2020). Além disso, esse modelo de coloração é compacto e tem elevada durabilidade, onde aquelas provenientes de materiais inorgânicos podem sobreviver a altas temperaturas (Kim *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019).

Cores estruturais podem ser divididas em iridescentes ou não iridescentes. Uma cor iridescente é aquela gerada por matrizes ordenadas de longo alcance e tendem a apresentar diferentes variações conforme há uma mudança do ângulo de observação (Liu, Tao e Tang, 2023). A mudança na coloração de um objeto ocorre devido à interferência dos diferentes comprimentos de onda da luz dispersa em diversas direções, resultado da estrutura periódica da matriz do objeto. Nessa estrutura, é assumido que o objeto reflete mais intensamente a luz em certas direções e de forma menos intensa em outras (Noh *et al.*, 2010). Na natureza, a iridescência estrutural pode ser encontrada principalmente em animais como camaleões (Teyssier *et al.*, 2015), pavões (Zi *et al.*, 2019), borboletas (Kinoshita, Yoshioka e Miyazaki,

2008), beija-flores e besouros (Kinoshita e Yoshioka, 2005). A cor não iridescente é originária da combinação de matrizes ordenadas e desarranjadas, onde o espalhamento da luz pelas estruturas será constante (Liu, Tao e Tang, 2023).

Segundo Huang e colaboradores (2019) e Zhang e colaboradores (2021) existem quatro principais mecanismos de criação associados com coloração estrutural. A cor pode ser desenvolvida através da interferência de um fio fino com um efeito iridescente, ou seja, através da interferência de raios modificados pela incidência da luz, comumente apresentando espessura de 0,1-10 μm , incorporando mono ou múltiplas camadas, como a superfície de bolhas de sabão. Os autores citam a possibilidade de criação através do chamado “efeito de grades de difração”, em que a luz interage com uma superfície de microssulcos ou ondulações periódicas e causa efeitos iridescentes. O terceiro método é a difração da luz que produz efeitos não iridescentes devido a interação da luz incidente com estruturas desordenadas do meio. E por último, a cor pode ser desenvolvida artificialmente com o uso de cristais fotônicos. Os cristais fotônicos são nanoesferas com diferentes índices de reflexão, onde a luz é propagada apenas em sua superfície, o que permite a percepção de cores mais vibrantes (Wang *et al.*, 2019).

Grande parte dos materiais utilizados na fabricação de cores estruturais são provenientes de metais, compostos inorgânicos e orgânicos sintéticos (Zhang *et al.*, 2021). Os materiais metálicos são muito utilizados devido a possibilidade de criação de cores plasmônicas de altas resoluções, cerca de 100.000 dpi (pontos por polegadas) (Wu *et al.*, 2021). Entretanto, devido à biocompatibilidade, biodegradabilidade e abundância, estudos buscam desenvolver usando polímeros naturais (Jin *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2010; Mittal *et al.*, 2017).

Devido a flexibilidade das cores estruturais, elas podem ser utilizadas comercialmente como rótulos de hologramas e em matérias que previnem a falsificação de produtos, onde dificultam a possibilidade de cópia devido as cores serem dependentes da angulação (Hong, Yuan e Chen, 2020). Existe estudo que demonstra a aplicabilidade para coloração em madeiras, como forma de aumentar seu valor comercial e compactuar com uma tecnologia limpa de coloração biomimética ecológica (Hu, Liu e Wu, 2020). Esse modelo de cores também pode ser usado como guia de luz na comunicação fotônica e dispositivos elétricos, além de biomateriais, chips microfluídico e sensores (Liu *et al.*, 2019; Shang *et al.*, 2019).

2.4. Corantes

Corantes são substâncias utilizadas para dar cor a diversos materiais como papéis, tecidos, couro e diversos outros (Gajipara *et al.*, 2023). Corantes são divididos em duas categorias, os naturais provenientes de plantas, animais e fontes minerais, e os sintéticos, criados especialmente para uso em larga escala. Desde 1859, mais de 10.000 tipos de corantes sintéticos foram criados, sendo caracterizados por serem não-saturados, complexos e solúveis em água ou compostos orgânicos (Sharma, Sharma e Soni, 2023). A indústria têxtil é a maior consumidora de corantes, com valores de consumo de 10.000 de toneladas por ano, o que corresponde a 14% do montante de corante produzido mundialmente. Cerca de 10 a 15% dos corantes usados na indústria têxtil são ejetados junto aos efluentes produzidos (Tara *et al.*, 2020).

Portanto, por serem muito utilizados industrialmente, corantes sintéticos são comumente encontrados em efluentes que podem levar a deterioração de ecossistemas aquáticos e a contaminação de água potável, uma vez que podem resistir a transformações químicas e bioquímicas (Sun; Yao, 2021). Até mesmo em pequenas concentrações, corantes podem impedir a penetração de luz solar na água e resultar na diminuição do nível de oxigênio na mesma (Kong *et al.*, 2022). No Brasil, foram encontrados corantes sintéticos em efluentes com concentrações de 0,0118 a 6,81 $\mu\text{g. L}^{-1}$ (Azevedo *et al.*, 2021).

Os corantes provenientes de processos industriais quando lançados sem devido tratamento, podem causar a periculosidade no meio ambiente, como a redução da disponibilidade de luz para fotossíntese em ambientes aquáticos e o aumento de câncer nos seres humanos. A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, nº 357 de 17 de março de 2005 dispõe que águas doces de classe 1 devem apresentar “corantes provenientes de fontes antrópicas virtualmente ausentes”, e as demais classes de água podem apresentar quantidade desde que seja passível de remoção por coagulação, sedimentação e filtração convencionais (CONAMA, 2005). Diversos estados, como o estado de Goiás, com o projeto de lei nº 649/19, propuseram propõe a proibição do lançamento direto de efluentes com corantes em rios, lagos, represas e demais corpos de água doce (Goiás, 2019), projetos ainda em tramitação sem avanços significativos.

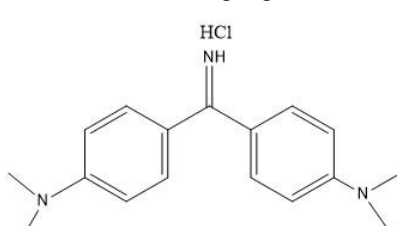
Problemas ambientais de grande escala são notificados em corantes com anéis aromáticos como grupos cromóforos (Reis, 2009), portanto, no presente estudo foram escolhidos três corantes sintéticos utilizados na indústria têxtil, com grupos aromáticos em sua estrutura: os corantes AU, VM e VC. Tais aditivos foram utilizados para realizar soluções

binárias com a finalidade de entender o comportamento destes quando analisados através da análise digital de imagens.

2.4.1. Corante Auramina (AU)

O corante AU, também conhecido como Amarelo Básico 2, é um sal hidrocloreto sintético, um corante catiônico básico muito utilizado para o tingimento de couro, algodão e papel (Ahmed, Oatley-Radcliffe e Williams, 2021; Pataer *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). O corante também é utilizado na indústria alimentícia e farmacêutica, como forma de melhorar a aparência dos produtos (Wang, W. *et al.*, 2023). O corante possui coloração amarelo vibrante e possui grande disponibilidade no mercado (Lu, Priyantha e Lim, 2020). A Tabela 2 apresenta algumas características do corante.

Tabela 2 - Características do corante AU.

Descrição	Característica
IUPAC	Monocloridrato de 4,4'-carbonimidobilis (n,N-dimetilanilina)
Fórmula molecular	$C_{17}H_{22}N_3Cl$
Massa molecular (g.mol. L^{-1})	303,83
CAS	2465-27-2
Índice Internacional de Corantes (C.I.)	41000
Nomes	Amarelo Básico 2, <i>Pyocatanium aureum</i> , Auramina O
Solubilidade	Solúvel em água (10 g. L^{-1})
pKa (25 °C)	9,8, 10,7
Cor percebida	Amarelo
Toxicidade (LD ₅₀ oral)	1500 mg/Kg
Estrutura Molecular	

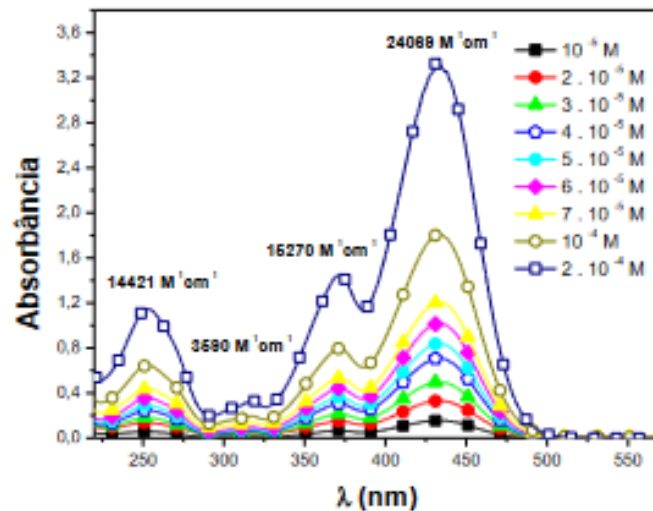
Fonte: Adaptado de Sun e Yao (2021).

O corante possui dois anéis aromáticos altamente tóxico para os seres humanos, uma vez que causa interferência no sistema de transporte de oxigênio do sangue, levando a fraqueza, dificuldade de respirar e irritação nos olhos, além de ser altamente cancerígeno (Gaikwad e Kinldy, 2009). AU possui dose letal de 0,5 mg por Kg de massa corporal, sendo acessível e possuindo baixo custo (Lu *et al.*, 2020). Devido às suas características, a AU foi banida em alguns países como China, Estados Unidos, Japão e países componentes da União Europeia

(Nguyen Thi Kim *et al.*, 2019). Já no Brasil, a Portaria nº 9, de 10 de abril de 1987, proíbe o uso do corante AU em saneantes domissanitários devido sua propriedade carcinogênica (Anvisa, 1987).

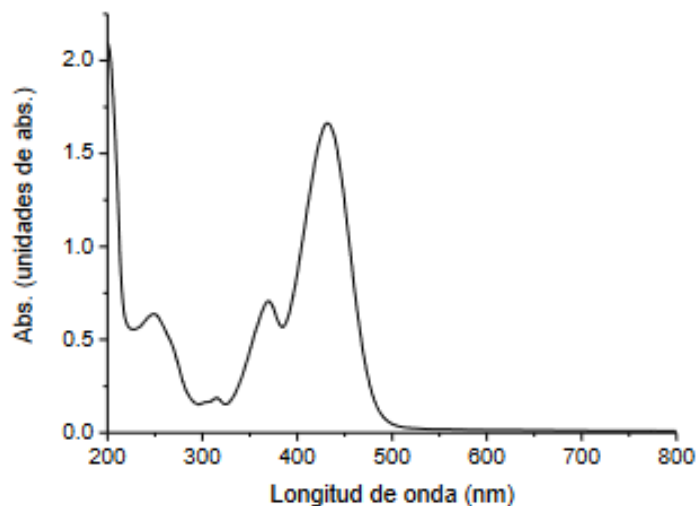
O corante AU é comumente analisado em espectrofotômetro, onde seu comportamento espectral em diferentes concentrações, quando em soluções aquosas, demonstram que esta substância não forma agregados em concentrações inferiores a $0,001 \text{ mol. L}^{-1}$, não apresentando formação, desaparecimento ou deslocamento considerável nas bandas espectrais, conforme Figura 4 (Ferreira 2015). O corante apresenta picos de absorbância próximos a 432 e dois pequenos picos a 370 e 250 nm, na região ultravioleta, ilustrados na Figura 5.

Figura 4: Espectro obtido em espectrofotômetro com o corante Auramina em diferentes concentrações (mol. L^{-1}).



Fonte: Ferreira (2015).

Figura 5: Espectro de absorbância para amostra de 25 ppm do corante Auramina em água, com pH igual a 6.



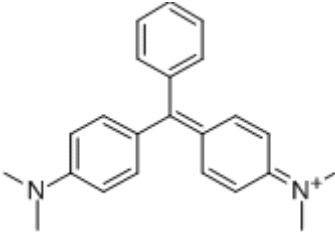
Fonte: Herrero (2014).

Além do espectrofotômetro, há diversos métodos já foram estudados para a quantificação do corante AU em meio aquoso, como espectroscopia Raman amplificada por superfície (Zhang *et al.*, 2020), cromatografia líquida de alta performance (Azevedo, Kasahara e Montagner, 2021; Tatebe *et al.*, 2014), cromatografia gasosa (Straub, Voyksner e Keever, 1993) voltametria (Hoa *et al.*, 2020) e métodos fluorescentes (Güner, Şener e Bayraç, 2022; Wang, W. *et al.*, 2023). Entretanto, não foi encontrado na literatura o uso da análise de imagens para detecção deste corante, especialmente em soluções binárias.

2.4.2. Corante Verde Malaquita (VM)

O corante VM é um corante básico hidrossolúvel pertencente à classe de corantes trifenilmetano (Raval, Shah e Shah, 2017). Este corante é o mais comum e abundante entre os corantes sintéticos, apresentando natureza catiónica e grupos aromáticos cromóforos (Aoulad El Hadj Ali *et al.*, 2022). Apresenta cor azul-esverdeada quando em soluções aquosas e, na presença de ácidos fortes ou bases apresenta crescente transparência (Nanjappa e Jayaprakash, 2023). A Tabela 3 apresenta características do corante sintético VM.

Tabela 3 - Características do corante VM.

Descrição	Característica
IUPAC	4-[(4-dimethylaminophenyl)-phenyl-methyl]-N, N-dimethylaniline
Fórmula molecular	C ₅₂ H ₅₄ N ₄ O ₁₂
Massa molecular (g.mol. L ⁻¹)	927,0
CAS	2437-29-8
Índice Internacional de Corantes (C.I.)	42000
Nomes	Verde de anilina, verde básico 4, verde diamante B, verde vitória B
Solubilidade	Altamente solúvel em água (110 g/L) e etanol (60 g/L)
pka (25 °C)	6,9
Cor percebida	pH 0 (amarelo), pH 2,0-11,0 (verde), pH > 13,5 (incolor)
Toxicidade (LD ₅₀ oral)	275 mg/Kg
Estrutura Molecular	

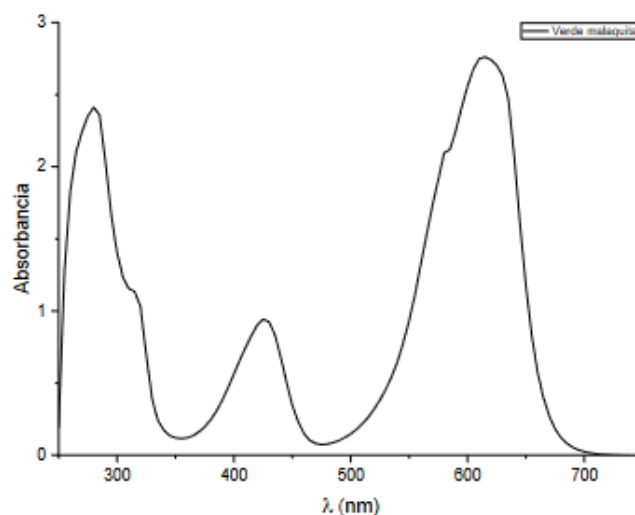
Devido sua solubilidade, é bastante utilizado em sistemas aquáticos por sua capacidade antifúngica e antiparasitária (Gharavi-nakhjavani *et al.*, 2023). Além disso, pode ser utilizado

como pigmento nas indústrias farmacêutica, plástica, de tintas, entre outras, devido sua facilidade de manipulação e baixo custo de produção (Amiri-Hosseini e Hashempour, 2021). Entretanto, quando exposto diretamente a luz solar pode levar a transformações fotoquímicas e biológicas gerando produtos tóxicos, podendo inclusive contaminar água potável e solos férteis, além de gerar distúrbios na cadeia alimentar de ecossistemas aquáticos (Sharma, Sharma e Soni, 2023).

Devido a seus grupos aromáticos, o corante VM é extremamente carcinogênico e sua inalação pode levar a danos no sistema nervoso e em órgãos humanos como cérebro, fígado, rins e coração. Quando ingerido por levar a irritação no trato gastrointestinal e em contato com a pele pode causar irritações, vermelhidão e dor, portanto, devido a sua alta toxicidade, o corante foi banido em diversos países como Estados Unidos, China e países da União Européia (Amiri-Hosseini e Hashempour, 2021; Aoulad El Hadj Ali *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2023). No Brasil, a Instrução Normativa nº 9, de 21 de fevereiro de 2017, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, permite que seja encontrado em peixe de cultivo o limite de 1 µg/Kg do corante (Brasil, 2017).

Na análise espectral realizada por método espectrofotométrico, o corante VM pode apresentar três picos distintos, em aproximadamente 618, 312 e 245 nm. O primeiro pico está relacionado às ligações duplas carbono-carbono de sua estrutura molecular, enquanto o terceiro pico, caracterizado na região do ultravioleta, está relacionado com os anéis aromáticos presentes no meio (Garduño, 2023). Em uma concentração de 50 ppm, o corante apresenta seus picos bem definidos, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Espectro obtido no espectrofotômetro referente ao corante Verde Malaquita na concentração de 50 ppm.



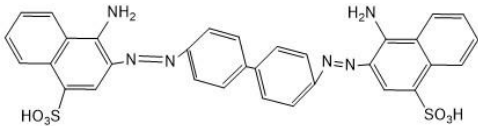
Fonte: Garduño (2023).

Assim como AU, sua quantificação também pode ser realizada por outros métodos onerosos como cromatografia líquida (Hashimoto *et al.*, 2011; Wang e Chen, 2015), cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa (Tao *et al.*, 2011), espectrofotometria ultravioleta visível (Ling e Mohd Suah, 2017; Sabzroo *et al.*, 2018), imunoenensaio (Chen *et al.*, 2018) e métodos fluorescentes (Wang *et al.*, 2022; Yuan, Hou e Han, 2022). Alguns métodos alternativos também foram desenvolvidos para sua detecção, como pontos quânticos (Du *et al.*, 2023; Qiu *et al.*, 2022) e sensores eletroquímicos (Deng *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2022). A análise digital de imagens já foi utilizada para detecção do corante VM (Koohkan *et al.*, 2020; Wang, J. *et al.*, 2023; Yue *et al.*, 2022), entretanto, não foram encontrados estudos da utilização do método em misturas binárias contendo este corante.

2.4.3. Corante Vermelho Congo (VC)

O corante VC, conhecido como sal sódico do ácido benzidinodiazó-bis-1-naftilamina-4-sulfônico, possui diversas aplicações na indústria farmacêutica, alimentícia e também atua como pigmento na indústria têxtil e cosmética, além disso, é comumente empregado como indicador ácido-base em diversas reações químicas, devido às suas propriedades específicas de mudança de cor em diferentes meios de pH (Naseem *et al.*, 2018; Quintero-Jaramillo, Carrero-Mantilla e Sanabria-González, 2021; Siddique *et al.*, 2023). A Tabela 4 apresenta algumas características do corante VC.

Tabela 4 - Características do corante VC.

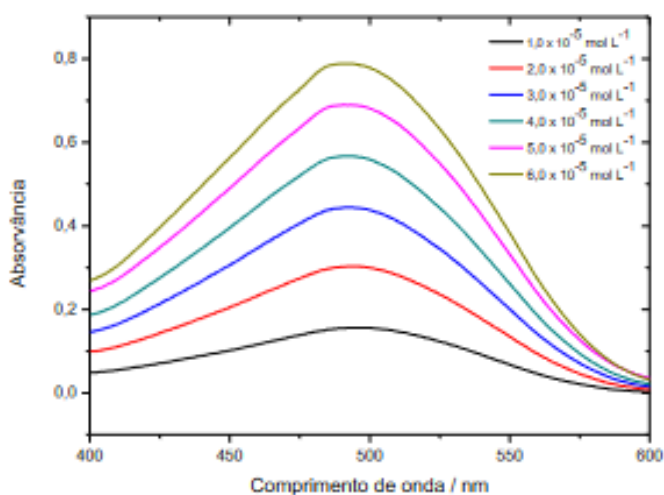
Descrição	Característica
IUPAC	<i>1-Naphthalene sulfonic acid, 3,3'-(4,4'-biphenylenebis (azo))bis(4-amino-)disodium salt</i>
Fórmula molecular	$C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$
Massa molecular (g.mol. L ⁻¹)	696,68
CAS	573-58-0
Índice Internacional de Corantes (C.I.)	22120
Nomes	Vermelho Congo 4B, Vermelho Cosmos, Vermelho Algodão B, Vermelho Algodão B
Solubilidade	Água (10 mg. mL ⁻¹)
pka (25 °C)	4,1
Cor percebida	pH 3 (azul), pH 5 (vermelho)
Toxicidade (LD ₅₀ oral)	143 mg/Kg
Estrutura Molecular	

Quando o corante VC está em meio alcalino ou em soluções levemente ácidas, sua forma aniônica não protonada confere uma cor vermelha. No entanto, ao diminuir o pH e acidificar o meio, o comprimento de onda visível tende a aumentar, resultando em uma mudança de cor para a região amarela alaranjada. Essa transição de cor pode até mesmo estender-se às regiões violeta ou azul, devido à formação de uma estrutura azoica e duas formas tautoméricas na composição do corante (Csillag *et al.*, 2023; Horobin e Kiernan, 2020).

Devido à presença de dois cromóforos azo (-N=N-) e auxocromos ácidos (-SO₃H) ligados diretamente a dois anéis benzênicos, o corante em questão é conhecido como diazo ácido (Siddique *et al.*, 2023). No entanto, é importante destacar que este corante é altamente tóxico e carcinogênico para os seres humanos. O contato com esse composto pode resultar em alergias, dermatites, asma e, em casos mais graves, desenvolvimento de câncer de bexiga e câncer de medula óssea (Kang *et al.*, 2014; Sadhukhan, Mondal e Chatteraj, 2014).

O corante VC possui características de agregação quando observado no espectro de absorção do método espectrofotométrico. Ao realizar varreduras espectrais de soluções com o corante variando de 1 a 6×10^{-5} mol. L⁻¹, em pH uniformizado a 6, observa-se que quanto maior a concentração do analito, maior será sua absorção no meio, mantendo seu pico próximo ao comprimento de onda de 494 nm (Reis, 2009), conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Espectro obtido em espectrofotômetro com o corante Vermelho Congo em diferentes concentrações (mol. L⁻¹).



Fonte: Reis (2009).

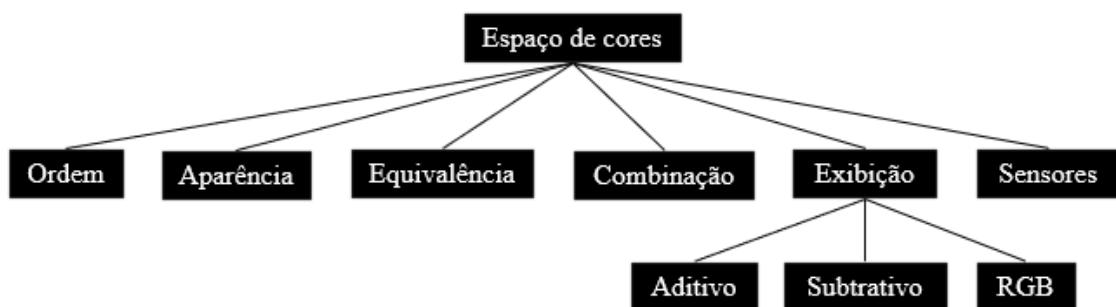
Sua detecção pode ser feita por métodos fotométricos (Barka *et al.*, 2008) por eletroforese (Ishikawa *et al.*, 2004), cromatografia líquida de alta performance (Liu *et al.*, 2015; Qin, Bakheet e Zhu, 2017), espectrometria (Jin *et al.*, 2015; Sahraei *et al.*, 2012) e métodos menos convencionais como fotodiodos (Kocuyigit *et al.*, 2022), eletrodos (Shetti *et al.*, 2019) e

pontos quânticos de carbono (Liu *et al.*, 2021). Até o momento, não foram identificados na literatura estudos que explorem o uso da análise de imagens para detecção do corante em questão, particularmente em soluções binárias.

2.5. Espaço de Cores

A habilidade para descrever cores utilizando diferentes espaços de cores provêm de três canais que se juntam para transformar a informação da cor que será lida e transmitida do olho para o cérebro (Montag e Buckley, 2022). Os espaços de cores comumente utilizam três componentes para representar cores complexas. No entanto, muitas vezes, essa representação tridimensional é insuficiente para descrever completamente a variedade de cores existentes. Para lidar com essa limitação, são empregados diagramas de cromaticidade ou espaços de cores mais complexos, que utilizam um maior número de componentes para obter uma descrição mais precisa das cores. Portanto, os espaços de cores podem ser divididos em Euclidianos (com três ou menos componentes) e Riemnnian (com mais de três componentes). A primeira categoria é mais utilizada para algoritmos menores e a segunda pode ser utilizada em grandes dimensionalidades (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Além disso, podem ser divididos em não lineares, lineares ou fundamentais, derivados e de aplicação específica. Para fins deste estudo, será utilizado a pesquisa de Kahu, Raut e Bhurchandi (2019) como modelo, demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Classificação dos espaços de cores.



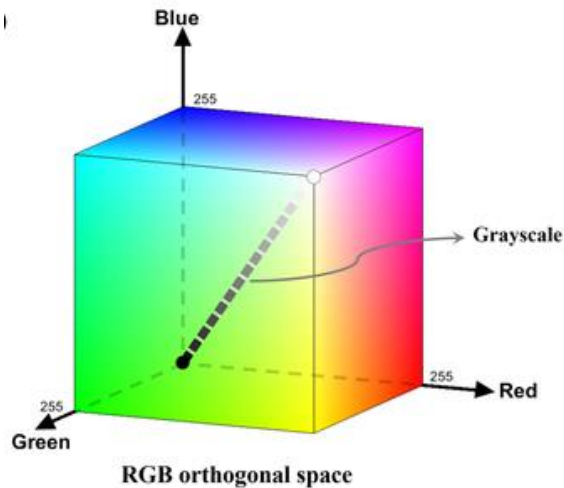
Fonte: Adaptado de Kahu, Raut e Bhurchandi (2019).

2.5.1. Espaço RGB

Antes de discutir sobre os espaços de cores, é necessário compreender alguns aspectos. Segundo a CIE (1986), os estímulos de referência são R, G e B, que possuem comprimento de onda 700, 546,1 e 435,8 nm, respectivamente. Esse espaço pode ser definido como um cubo

no espaço 3D, onde cada eixo corresponde a uma cor e as extremidades exteriores a saturação das mesmas (Figura 9).

Figura 9 - Representação do espaço tridimensional ortogonal do RGB com vetor escala cinza.



Fonte: Diniz (2020).

A reta diagonal variando de preto (0,0,0) ao branco (255, 255, 255) representa a escala cinza (Fan et al., 2021).

Os valores RGB observados em computadores são diferentes dos percebidos pelo olho humano, pois os últimos são ágeis em distinguir a saturação, intensidade e tonalidade das cores. Por isso, esse sistema é pouco utilizado para análise de ambientes naturais, onde não é capaz de produzir uma resposta adequada. Entretanto, alguns dispositivos necessitam ter características mais próximas à visão humana para entregar um serviço adequado ao usuário, necessitando de fazer a conversão para coordenadas específicas, o que leva a sobrecarga da máquina (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Portanto, são utilizados alguns espaços de cores específicas de modo a normalizar os valores, conforme será discutido a seguir.

2.5.2. Espaço de cores baseado em sensores

Nesse método, são capturadas imagens por scanner ou câmeras digitais e transformadas em valores R, G e B. Esses valores são proporcionais às sensibilidades espectrais dos sensores, onde é utilizado o espaço de cores CIE XYZ, espaço de cores criado para definir cores claras, onde o Y representa o brilho (Fan et al., 2021). Na técnica também é utilizado de um espaço de cores não renderizado, denominado Métrica de Meio de Entrada de Referência, projetado para dispositivos que não possuem saída de cores (Ramanath *et al.*, 2005; Sharma, 2002).

2.5.3. Espaço de cores baseado em exibição

Por "exibição", entende-se a capacidade de mostrar imagens em dispositivos como monitores de computador, televisores e celulares. Esses dispositivos possuem a capacidade de exibir imagens dentro de um espaço de cores RGB. Para estabelecer um padrão comum e garantir consistência na reprodução de cores em dispositivos de exibição, a empresa *Microsoft* se uniu a outros grupos, como a HP (*Hewlett-Packard*), para criar um espaço de cor específico para uso em multimídias. Esse espaço de cor foi denominado sRGB, sendo o "s" uma abreviação de *standard* em inglês, que significa padrão (Sugiura *et al.*, 2002). O modelo foi criado para complementar as cores existentes virtualmente e beneficiar o usuário com uma ampla gama (Anderson *et al.*, 1996). Independente do multimídia utilizado, o sistema sRGB permite a troca de informações de cores, economizando esforço computacional durante a transmissão e armazenamento dos valores (Sharma, 2002).

Para conversão do RGB em sRGB, é necessário identificar os valores dos primeiros, obtido por meio da inversão da correção da gama aplicada nas câmeras digitais (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Essa conversão é demonstrada na Equação 1.

$$R' = \begin{cases} 112,92 * R & \text{se } R \leq 0,000304 \\ 1,055 * R^{1/2.4} - 0,055 & \end{cases} \quad \text{Equação 1}$$

O mesmo processo de conversão pode ser utilizado para G' e B', onde estes representam sRGB.

Conforme descrito no diagrama apresentado na Figura 4, espaços de cores baseados em exibição podem ser divididos em aditivos, subtrativos ou RGB. O espaço RGB será discutido posteriormente, uma vez que este é o utilizado nesta pesquisa.

2.5.3.1. Aditivos

Espaços aditivos são a combinação das cores primárias em várias proporções em um fundo preto, ou seja, são gerados em uma tela preta através da adição de cores, conforme exemplificado na Figura 3 (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). As misturas das cores aditivas em um dispositivo digital podem ser realizadas pelo emprego de pulsos, de forma a controlar a emissão de cada luz primária com uma amplitude de potência constante e discreta (Tang *et al.*, 2021).

A teoria de mistura de cores é atribuída aos experimentos de Newton que sugeriu que todas as cores do universo fossem homogêneas ou uma mistura de luz. Para ele, para formar o

branco, era necessário no mínimo cinco cores diferentes (Lakshminarayanan, 2019). Espaços aditivos tendem à coloração branca quando a intensidades dos canais é máxima, e ao preto quando é mínima (Noguera *et al.*, 2014). Os espaços de cores sRGB, rgb, Adobe RGB e ProPhoto RGB são espaços aditivos (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). A pesquisa atual é baseada nesse espaço, uma vez que, conforme discutido anteriormente, as câmeras celulares trabalham com o espaço de cores sRGB.

2.5.3.2. *Subtrativos*

Espaços subtrativos são utilizados para produzir cores transparentes ou mídias refletivas, pois possuem fundos brancos. É o modelo comumente utilizado em impressoras coloridas (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Para espaços subtrativos, o aumento da intensidade dos canais leva à coloração preta, e a redução ao branco, apresentando comportamento inverso aos espaços aditivos (Noguera *et al.*, 2014).

Sistemas subtrativos produzem cores através da remoção de espectros não desejados na luz branca (Rodriguez, 1996). Um exemplo de espaço subtrativo é o modelo CMY. Esse modelo é constituído das cores ciano (C, *cyan*), magenta (M, *magenta*) e amarelo (Y, *yellow*). Para obter o ciano, o vermelho é retirado da luz e o mesmo acontece com o magenta e o amarelo, onde são retirados, o verde e o azul, respectivamente. Enquanto no modelo RGB, o filtro vermelho transmite 1/3 da luz visível, no sistema CMY é transmitido 2/3, devido a retirada do comprimento não desejado. Há também um espaço denominado CMYK, onde o canal K representa a cor preto.

É possível realizar a transformação do sistema CYM em RGB, conforme a Equação 2.

$$\begin{aligned} C &= 1 - R/255 \\ M &= 1 - G/255 \\ Y &= 1 - B/255 \end{aligned} \quad \text{Equação 2}$$

Modelos subtrativos, como CMY, são muito utilizados para análises de imagens de baixa luminosidade devido ao seu alto poder espectral, sendo bastante usados em imagens astronômicas (Ebbesen *et al.*, 1998).

2.5.4. *Espaço de cores baseado em combinação*

Espaços de cores de combinação são baseados nas sensibilidades do olho humano, tendo seu principal sistema do CIE.

Existem dois sistemas principais de especificação das cores, o CIE e o sistema Munsell. O primeiro trata de mistura entre cores aditivas e utiliza métodos colorimétricos e

espectrometria e o segundo discorre sobre a aparência das cores, caracterizado pelo uso de modelos matemáticos e estáticos, mas com menor precisão.

Existem duas formas de produzir cor, por meio de espaços subtrativos ou de aditivos. No primeiro, o corante remove parte do espectro visível. No meio aditivo, as luzes colorimétricas são misturadas, ou seja, as cores primárias (vermelho, verde e azul) são combinadas de forma que o olho humano é incapaz de identificar cada uma separadamente (Schanda, 2007). O CIE é formado por um sistema aditivo onde a mistura de cores possui três variáveis, ou seja, a luz é representada por três valores, formando um sistema denominado *tristimulus* (Stockman, 2019). Quando as cores são apresentadas nesse tipo de sistema, podem ser admitidos valores negativos ou negativos, onde cada proporção está relacionada a uma cor única (Smith e Guild, 1931).

Para construção de um espaço geométrico denominado espaço de cores, é necessário que os estímulos sejam transformados em vetores (Equação 3), também denominados de coordenadas de cromaticidade (Ohta e Robertson, 2005).

$$\begin{aligned} r &= R/(R + G + B) \\ g &= G/(R + G + B) \\ b &= B/(R + G + B) \end{aligned} \quad \text{Equação 3}$$

Onde $r + g + b = 1$. Portanto, apenas duas coordenadas são possíveis para encontrar uma cor em um plano geométrico, onde esta seria visualmente a mistura entre os dois vetores estimulantes.

Como os valores podem apresentar-se positivos ou negativos, a matemática torna-se um pouco mais complexa. Portanto, foi criado outro sistema de conversão, XYZ, onde os valores RGB podem ser convertidos, tornando todos os dados positivos (Ohta e Robertson, 2005).

Inicialmente, X, Y e Z são expressos em função de RGB, como demonstrado na Equação 4.

$$\begin{aligned} [X] &= (R_x, G_x, B_x) \\ [Y] &= (R_y, G_y, B_y) \\ [Z] &= (R_z, G_z, B_z) \end{aligned} \quad \text{Equação 4}$$

Para facilitar o cálculo, eles são descritos em forma de matriz (Equação 5).

$$\begin{pmatrix} [X] \\ [Y] \\ [Z] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_x & G_x & B_x \\ R_y & G_y & B_y \\ R_z & G_z & B_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [R] \\ [G] \\ [B] \end{pmatrix} \quad \text{Equação 5}$$

Os valores RGB de cada coordenada pode ser traduzido como a soma dos estímulos multiplicado pelo vetor da cromaticidade (Equação 6).

$$\begin{aligned} R_x &= S_x r_x \\ G_x &= S_x g_x \\ B_x &= S_x b_x \end{aligned} \quad \text{Equação 6}$$

O mesmo pode ser descrito para as outras coordenadas. Logo, a matriz pode ser reescrita como mostrado na Equação 7.

$$\begin{pmatrix} [X] \\ [Y] \\ [Z] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x & g_x & b_x \\ r_y & g_y & b_y \\ r_z & g_z & b_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [R] \\ [G] \\ [B] \end{pmatrix} \quad \text{Equação 7}$$

Considerando que os sistemas RGB e XYZ determinam o valor da cor ([F]) (Equação 8), então pode-se escrever [F] em função de equação ou matriz (Equação 9).

$$[F] = R[R] + G[G] + B[B] = X[X] + Y[Y] + Z[Z] \quad \text{Equação 8}$$

$$\begin{pmatrix} R & G & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [R] \\ [B] \\ [Y] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x & g_x & b_x \\ r_y & g_y & b_y \\ r_z & g_z & b_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [R] \\ [G] \\ [B] \end{pmatrix} \quad \text{Equação 9}$$

Logo, para realizar a conversão dos valores RGB em XYZ, é necessário realizar operações com matriz, como ilustrado Equação 10.

$$\begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & G & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x & g_x & b_x \\ r_y & g_y & b_y \\ r_z & g_z & b_z \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix}^{-1} \quad \text{Equação 10}$$

Os valores X, Y e Z são considerados cores imaginárias pois não podem reproduzir cores reais, por isso são denominados estímulos ao invés de iluminantes ou luz (Hawkyard e Bezerra, De, 2001). Smith e Guild (1931) apresentam tabelas onde podem ser observados os valores padronizados dos vetores r, g, b, x, y e z para cada comprimento de onda do campo visível (380 a 780 nm).

Existe também o modelo CIE 1964, onde a X e Z são opostos e Y é a luminância, em uma distância de observação de 10 polegadas. Além disso existem outros espaços derivados do

CIE XYZ: CIE $W^*u^*v^*$, CIE L^*a^*b , Hunters' Lab, CIE $L^*u^*v^*$, CIE $L^*C^*h^*$ e CIE LAR (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Devido aos modelos serem mais complexos, não será relatado no estudo, uma vez que foge da proposta do mesmo, entretanto, seus detalhes podem ser observados em Trezona e Parkins (1998) e Ohta (1992).

A principal limitação desse sistema é a não uniformidade visual, onde o espaço Yxy não corresponde à percepção visual da cor, ou seja, a distribuição de cores no espaço CIE não é uniforme à realidade visual (Choudhury e Naskar, 2019).

O sistema de cores Munsell possui uma separação comercial, onde é possível comprar amostras de cores, e uma teórica, onde descreve o espaço de cores (Cochrane, 2014). Este espaço consiste em três atributos independentes representados de forma cilíndrica, a saturação (H), a pureza ou croma (C) e o valor (V, variando de 0 a 10, onde 0 é preto e 10 é branco), representado por HV/C (Choudhury e Naskar, 2019). A saturação é dividida em cinco categorias: vermelho (R), amarelo (Y), verde (G), azul (B) e roxo (P); além de apresentar outras cinco subcategorias: amarelo avermelhado (YR), verde amarelado (GY), azul esverdeado (BG), roxo azulado (PB) e vermelho arroxado (RP) (Pastilha *et al.*, 2019). Esse sistema é bastante utilizado em análises de solo (Ferguson, 2014; Kirillova *et al.*, 2018; Landa, 2004).

2.5.5. Espaço de cores baseado em equivalência

Esses sistemas transformam os valores *tristimulus* em coordenadas que tentam representar a cor real do material, ou seja, em coordenadas onde as cores são semelhantes independente de mudança das condições de observação ou iluminação (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). O espaço utiliza operação denominada Transformação de Ajuste de Material (MAT, *Material Adjustment Transform*) para predizer como as mudanças do sensor ao trocar as condições de observação (Derhak, 2015). Os dois mais conhecidos espaços desse tipo são o Waypoint (Wpt) e o WLab.

2.5.6. Espaço de cores baseado em aparência

Espaços de cores baseado na aparência das cores busca a melhor percepção das cores em diferentes condições de visualização e planos de fundo, utilizando o modelo HVS. Todos esses modelos são derivados do CIE XYZ devido sua fácil aplicação, podendo ser exemplificados o CIE L^*a^*b , Hunt, RLAB, ATD, LLAB, CIECAM97s e CIECAM02 (KAHU; RAUT; BHURCHANDI, 2019).

2.5.7. Espaço de cores baseado em ordem

Para o modelo, as cores são organizadas de forma conceituada e intuitiva. O propósito desses espaços é criar cartelas para melhor manuseio e interpretação, entretanto, não é muito utilizada na comunidade científica, e sim na artística. Alguns espaços são usados para calibração visual através de paletas de cores físicas ou para criar bibliotecas virtuais de padrão de cores. Não existem formas matemáticas para seu desenvolvimento, uma vez que foram criados utilizando somente atributos visuais (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). Por modelos de ordem, pode-se citar o sistema Pantone, a cartela de cores Munsell, o sistema de cores RAL e o OSA-UCS.

O sistema de cores Pantone é muito utilizado na arquitetura, moda e artes em geral. Entretanto, alguns autores a consideram apenas como um sistema de nomeação de cores, uma vez que não apresenta uma escala contínua (Choudhury e Naskar, 2019).

O sistema RAL foi desenvolvido para indústria de pigmentos e tintas para evitar problemas nas coordenadas de cores, iniciando com apenas 40 tipos de cores (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). O modelo é definido por critérios de tonalidade, luminosidade e croma, onde o RAL *Design* de cores foi desenvolvido de acordo com o sistema CIEL*A*B*. O sistema é feito em coordenadas cilíndricas onde a tonalidade é derivada do ângulo e indica a posição em que o ciclo de cor inicia, variando com todas de 360° e aumentando em sentido anti-horário. A luminosidade varia de branco ($L = 100$) a preto ($L = 0$) e a escala croma inicia-se em 0, mas para cores neutras não apresenta limitação (Öztürk, 2005).

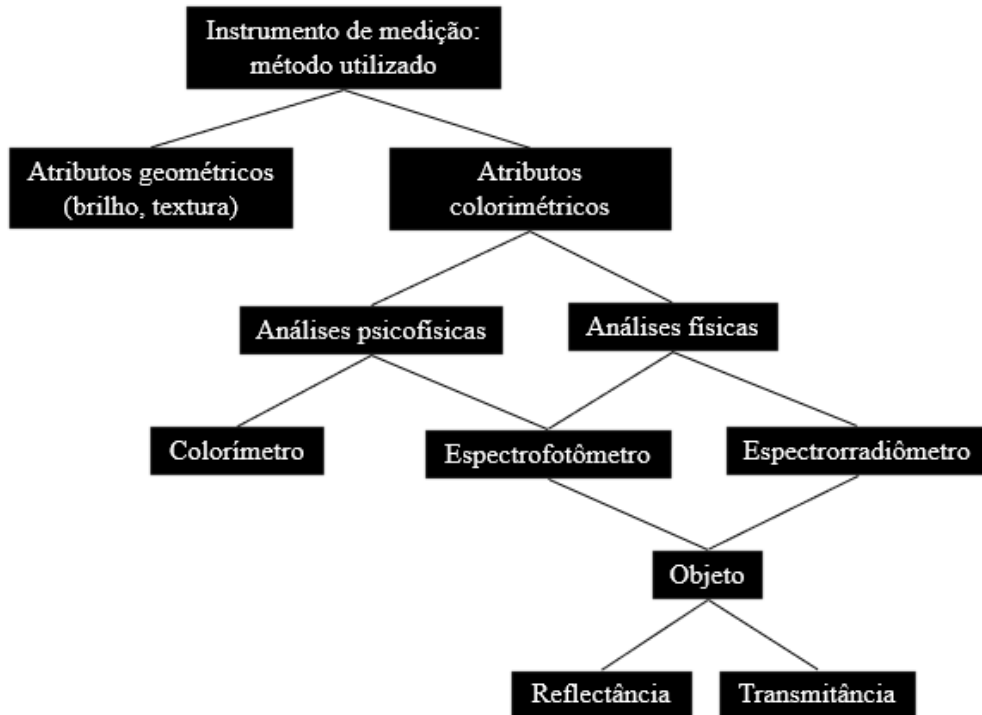
Por fim, há o sistema OSA-UCS (*Optical Society America's Uniform Color System*) ou Sistema de Cores Uniformes, desenvolvido pela Sociedade Óptica Americana. O espaço utiliza de uma geometria Euclidiana 3D de eixos L, j e g representando a luminosidade, o amarelo-azulado e o vermelho esverdeado, respectivamente (Kahu; Raut; Bhurchandi, 2019). OSA-UCS representa uma escala onde todas três dimensões possuem percepções semelhantes (Smith e Billmeyer, 1994). Entretanto, conforme exposto por Kuehni (2000), Indow (2002) e Oleari (2002), esse sistema apresenta diversos problemas de aplicação.

2.6. Instrumentos para mensuração de cores

A luz é parte do espectro de radiação eletromagnética compostos por ondas de rádio, raios-x e radiações ultravioleta e infravermelho, além do campo visível ao olho humano, entre 360 a 780 nm (Westland, 2003). Para leitura analítica da luz, instrumentos como colorímetros, espectrofotômetros e espectrorradiômetros são utilizados. Os instrumentos de análise de cores

podem ser categorizados de acordo com sua finalidade intrínseca, com base na medição das propriedades geométricas ou cromáticas do analito, como ilustrado na Figura 10 (Choudhury, 2014d).

Figura 10 - Fluxograma da classificação de instrumentos.



Fonte: Adaptado de Choudhury (2014d).

2.6.1. Espectrorradiômetro

A espectrorradiometria é um método utilizado para medir as propriedades de refletivas de diferentes superfícies em condições de iluminação solar (Milton, 1987). Espectrorradiômetros são sensores de leitura de comprimentos de ondas eletromagnéticos que geram uma representação gráfica ou numérica. Os instrumentos são compostos por: um espectrômetro, responsável por dispersar a luz nos componentes espectrais e separá-las em diferentes comprimentos de onda; um radiômetro que mede a intensidade da radiação e; um fotodetector, para converter a radiação em um sinal elétrico mensurável. Possuem atuação de pequenos intervalos de onda, com faixa espectral de 325 a 2500 nanômetros, o que levar a apresentar maior precisão que demais tipos de sensores (Santos, 2019). Esses equipamentos possuem a capacidade de aceitar luz proveniente de fontes externas, uma vez que medem a quantidade radiométrica por meio da comparação entre a fonte de teste e uma fonte padrão que possui uma distribuição conhecida de energia espectral. Essas fontes padrão são geralmente compostas por filamentos de tungstênio (Choudhury, 2014d).

A técnica permite obtenção de espectro contínuo com alta resolução, possibilitando uma análise precisa do comprimento de onda, largura de banda, intensidade e distribuição espectral. Entretanto, segundo Pons e colaboradores (2015), os operadores do método encontram dificuldades devido à falta de detalhes nos manuais de uso, bem como à insuficiência de dados abordados em pesquisas que utilizam essa técnica em suas metodologias. Essas lacunas dificultam a reprodução dos resultados e a obtenção de resultados satisfatórios.

A espectrorradiometria é amplamente utilizada para análises de solo, por meio da qual, é possível obter informações sobre a composição química, propriedades físicas e características do solo, como teor de umidade, conteúdo orgânico, textura, entre outros (Brandelero *et al.*, 2012; Nanni e Demattê, 2006; Santos, 2019).

2.6.2. Colorímetro

Colorímetros são utilizados para determinar a quantidade de uma substância por quantificação da luz absorvida, podendo ser equipados com lâmpadas de tungstênio (Hoang *et al.*, 2021). Os equipamentos são compostos de um sensor e um processador de dados, proporcionando medidas que são compatíveis com a percepção do olho humano (Choudhury, 2014d).

A análise é possível devido a mudança da intensidade da radiação eletromagnética da região de comprimento de onda visível após transmissão ou refração da luz no analito. O método é capaz de determinar a concentração de uma solução, onde a quantidade de luz e cor absorvida ou transmitida depende das características do material. O equipamento compara o volume de luz da solução com a quantidade observada no material puro pois possui fotocélulas capazes de realizar essa detecção. Quanto maior a saturação da cor, maior será a absorção de luz e menor será a corrente das fotocélulas (Choudhury, 2014d).

Segundo Choudhury (2014d) existem dois tipos de colorímetros, o visual e o fotoelétrico. Um colorímetro visual pode ser *tristímulus*, ou seja, a energia refletida passa por um filtro tri estimulante e atinge um fotodetector, resultando o valor colorimétrico. A maioria desses equipamentos são precisos, mas não geram resultados tão adequados quanto um espectrofotômetro, pois necessitam de grande tempo de operação. A segunda classificação dos colorímetros é atribuída ao aumento da velocidade e reprodutibilidade das medições. Isso ocorre devido ao uso de sensores fotoelétricos que quantificam as cores por meio de filtros de banda larga e células fotoelétricas. Esses colorímetros são compostos por um fototubo ou fotocélula, um conjunto de filtros de cor (vermelho, verde e azul), um amplificador e um indicador de sensor.

Sensores colorimétricos possuem vantagens como o fácil manuseio, a boa reprodutibilidade e consistência e a diversidade de aplicações, com boa sensibilidade seletividade para diversos analitos (Krishnan e Syed, 2022). Entretanto, possuem alto custo de manutenção, necessitando de calibração constante, além de não apresentarem bons resultados em comprimentos de onda fora da região visível e serem adequados para análises apenas de superfícies planas e uniformes.

2.6.3. Espectrofotômetro

A espectroscopia pode ser definida como a interação de luz com a matéria, envolvendo emissão ou absorção de luz (Montag e Buckley, 2022).

Um espectrofotômetro é um dispositivo utilizado em análises quantitativas de substâncias orgânicas ou inorgânicas, onde é mensurado a quantidade de luz absorvida pelo analito em solução (Burgess, 2017). A quantidade de luz absorvida ou transmitida a um determinado comprimento de onda é proporcional à concentração do material, mesmo se este não absorve por si próprio, onde podem ser utilizados reagentes específicos para cada amostra (García, 2019).

O equipamento pode captar regiões ultravioleta, de 190 a 380 nm, regiões visíveis, de 380 a 750 nm e regiões infravermelho, de 800 nm a 2500 nm (Moreno-Villalba *et al.*, 2021).

Um espectrofotômetro é composto por uma fonte de radiação ou fonte de luz, um seletor de comprimento de ondas, uma cubeta para amostra, um fotomultiplicador, um amplificador de sinal e um dispositivo de leitura, podendo este ser no próprio dispositivo ou com suporte de um computador (Osorio e Espinoza, 2009). A fonte de luz nos instrumentos de análise de cores pode ser constituída por lâmpadas de deutério e tungstênio, ou até mesmo LEDs. O seletor de comprimento de onda utiliza um prisma para direcionar o espectro de luz. Esse prisma tem a função de separar a luz em diferentes comprimentos de onda, permitindo a seleção precisa da faixa espectral desejada para a análise de cores (Moreno-Villalba *et al.*, 2021). As cubetas podem ser de vidro, quartzo, sílica fundida ou plástico (García, 2019). Já os sensores, como o fotomultiplicador e o amplificador de sinais, devem converter a radiação luminosa em sinal elétrico, através de sua capacidade de produzir um sinal quando o sensor é atingido por fótons (Passos e Saraiva, 2019).

A transmitância óptica é a relação entre a quantidade de luz transmitida pela amostra e a quantidade incidente, onde a magnitude pode ser calculada através da Equação 11.

$$A = -\log T$$

Equação 11

Onde T é a transmitância e A é absorvância. Para demonstração que a absorvância é diretamente proporcional à concentração da substância absorvente, pode ser utilizado a Lei de Lambert-Beer (Equação 12):

$$A = \epsilon lc \quad \text{Equação 12}$$

Onde ϵ é o coeficiente de absorção molar, próprio de cada substância, l é o comprimento do caminho óptico, ou seja, a largura da cubeta e c é a concentração da amostra. As equações acima serão discutidas posteriormente.

O espectrofotômetro pode ser utilizado em diversas áreas devido sua capacidade de análise quantitativa e qualitativa, sua versatilidade de aplicação, a tecnologia avançada que permite altas velocidade e eficiência de análise e sua grande reprodutibilidade, em relação aos demais métodos apresentados. Contudo, o instrumento pode levar a alguns problemas como: o valor de tungstênio no interior da lâmpada ou até mesmo poeira pode levar a resultados imprecisos e o fotomultiplicador pode oscilar caso algum movimento brusco seja feito, onde um padrão de valores não será mantido (Dondelinger, 2011). O espectrofotômetro não é capaz de medir o espectro inteiro de uma substância (García, 2019). Além disso, seu elevado custo, complexidade operacional, necessidade de preparação de amostras e dependência da qualidade dessas, sensibilidade e seletividade limitada são outras desvantagens apresentadas pelo equipamento.

2.7. Análise digital de imagens

O emprego da técnica conhecida como Análise Digital de Imagens (ADI) não é tão recente como inicialmente previsto, uma vez que trabalhos datados de 1960 já faziam uso de algoritmos para a correção de imagens. Em 1970, o método passou a ser utilizado nas ciências do espaço, como a cartografia, e em análises microscópicas na medicina e biologia (Geladi e Kowalski, 1986). Atualmente, a técnica se adaptou para instrumentos modernos e é capaz de ser aplicada em todas as áreas que envolvam determinado espectro.

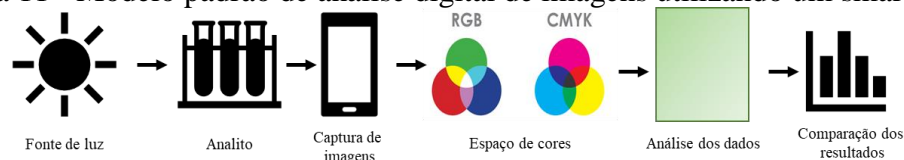
A ADI é referente à análise colorimétrica baseada na digitalização de imagens coletadas em telefones celulares, câmeras digitais, scanners, webcams e outros dispositivos passíveis de captura (Firdaus *et al.*, 2014). Na análise, um sensor optoeletrônico converte os sinais em um código digital, ou seja, em uma matriz de células ordenadas uniformemente. Cada célula é microscopicamente sensível e gera impulsos elétricos de diferentes intensidades dependentes das condições de luminosidade (Martínez-Verdú *et al.*, 2010).

A facilidade de utilização do scanner é um dos principais motivos do seu uso, além de apresentar um ambiente controlado. Entretanto, o equipamento é pouco portátil e necessita estar sempre conectado a um computador para capturar as imagens. O mesmo problema é observado no uso de webcams (Capitán-Vallvey *et al.*, 2015).

Comparado com os demais dispositivos, os smartphones se sobressaem devido à facilidade de uso, as altas performances das câmeras e o uso de aplicativos compatíveis com as análises. O uso de smartphones cresceu nos últimos anos devido a praticidade de ter um computador portátil em mãos. Segundo Taylor (2023), o número de celulares com acesso à internet em todo mundo em 2016 era de 3,616 bilhões, quantidade que dobrou em 2022, tornando-se 6,598 bilhões. Segundo as previsões, esse número tende a ser 7,861 bi até 2028. China, Índia e Estados Unidos são os maiores responsáveis por esse número e, em 2022, as vendas de telefones celulares geraram em torno de US \$463 bilhões. Portanto, uma vez que o acesso à essa tecnologia se torna cada vez mais amplo, o seu uso em aplicações científicas aumenta, visando aproveitar do custo-benefício proporcionado. Os celulares podem ser utilizados também para determinação de análises envolvendo espectro de emissão fluorescente e de ressonância de cartucho micro fluido, em testes de fosforescência, quimiluminescência e eletrofosforecência (Capitán-Vallvey *et al.*, 2015; Long *et al.*, 2017). O dispositivo também é capaz de capturar todo o comprimento de onda do espectro visível (Nonno, Di e Ulber, 2021).

Para realizar a ADI, é importante ter um sistema de aquisição de imagens e um *software* para processar as imagens (Adobe Photoshop, Image J, Matlab, Octave, Pantone Studio, etc.) nos espaços de cores determinados, para que então a relação entre os valores das imagens e a concentração do analito possa ser criada (Fan *et al.*, 2021). A Figura 11 demonstra um organograma de como se dá o processo.

Figura 11 - Modelo padrão de análise digital de imagens utilizando um smartphone.



Segundo Fan e colaboradores (2021), durante a captura de imagens a separação RGB não irá melhorar com o aumento dos pixels, entretanto, quanto maior a quantidade desses em uma determinada área, mais sensíveis à luz dissipada na vizinhança eles serão. Além disso, o tamanho do sensor e a temperatura têm influência em possíveis barulhos na imagem. A segmentação das imagens consiste na partição desta em várias regiões, denominados conjuntos de pixels, sem que haja sobreposição. Esse procedimento é utilizado para localizar objetos e

limites, sendo realizado através de limiarização, uma segmentação baseada em arestas (Capitán-Vallvey *et al.*, 2015; Diniz, 2020). Cada região apresenta diferentes cores, intensidades, texturas e outras características estatísticas convenientes aos métodos (Diniz, 2020).

Condições de iluminação influenciam a aparência das cores, fatores como composição do comprimento de onda, geometria da intensidade e emissão da luz, solidez e homogeneidade do objeto podem levar a problemas durante a captura (Fan *et al.*, 2021). A fonte de luz é essencial para a captura das imagens, podendo ser LED, o flash do celular ou a luz ambiente, onde a escolha será feita de acordo com a aplicação. Os LED são frequentemente utilizados pois apresentam baixo custo e são independentes do celular. Luzes ambientes podem ser usadas, entretanto variam conforme o período do dia e devem ser direcionadas à amostra através de fibras ou lentes óticas, por exemplo (Nonno, Di e Ulber, 2021). Entretanto, a falta de um ambiente com luz controlada por levar a erros e, em condições de baixa iluminação, apenas alguns fótons são percebidos pelos leitores das câmeras, levando às imagens de alta qualidade apresentarem ruídos que dificultam a identificação dos objetos. Existem estudos que buscam minimizar esse barulho através do processamento de imagens (Guo, Asif e Ma, 2022). De acordo com Li e colaboradores (2017) e Meng e colaboradores (2015), quando a fonte de luz é posicionada acima das amostras, a distorção da imagem é reduzida, pois há melhor paralelismo da luz.

2.7.1. Aplicações

Segundo Di Nonno e Ulber (2021), a maioria das análises envolvendo a técnica estão relacionadas ao controle ambiental, às áreas da saúde e ao controle de qualidade em alimentos. Portanto, de forma a exemplificar o uso da ADI, trabalhos relacionados a essas áreas serão apresentados a seguir.

2.7.1.1. Área da saúde

A radiônica é um campo médico voltado para a análise de tumores, com o objetivo de realizar diagnósticos precoces, no entanto, é uma área que enfrenta desafios em termos de reprodutibilidade dos exames (Litvin *et al.*, 2021; Zwanenburg *et al.*, 2020). Filatau e colaboradores (2014) utilizaram imagens para diferenciar os diagnósticos de pancreatite crônica e câncer de pâncreas, obtendo precisão de 0,92. Vallières e colaboradores (2015) obtiveram sensibilidade de 0,96 e especificidade de 0,93 para o diagnóstico de lesões pulmonares metastáticas utilizando a ADI combinada com as imagens obtidas em tomografias e

ressonâncias magnéticas. No estudo realizado por Zwanenburg e colaboradores (2020), a ADI foi aplicada com o intuito de simplificar e padronizar a radiônica. Nesse estudo, dos 174 parâmetros analisados, 169 foram padronizados com sucesso. No entanto, não foi possível uniformizar a aquisição das imagens, sendo focado apenas no processo de processamento dos dados radiônicos.

No estudo conduzido por Solana-Altabella e colaboradores (2018), realizou-se a quantificação de ferro em duas formulações farmacêuticas distintas (Ferbisol® e Ferro Sanol®). Isso foi feito por meio do uso de uma câmera digital em um ambiente controlado de metacrilato branco, equipado com dois tubos contendo lâmpadas fluorescentes. Para aumentar o contraste das imagens, um pedaço de papelão preto foi colocado atrás das amostras. Além disso, o método também foi testado usando um scanner. As imagens capturadas foram processadas no *software* ImageJ, utilizando o espaço de cores RGB. Ambos os procedimentos demonstraram uma excelente reprodutibilidade, com as curvas geradas apresentando coeficientes superiores a 0,995. No entanto, apesar da pequena diferença observada, o uso do smartphone se mostrou superior em relação ao scanner.

Com o objetivo de melhorar a triagem de lesões e o monitoramento de eritema em consultas dermatológicas, Uthoff e colaboradores (2020) aplicaram a ADI com o suporte de um celular e um sensor dermatoscópio para capturar imagens. A iluminação foi realizada em diferentes comprimentos de onda, escolhidos com base na capacidade de sondar pontos específicos da hemoglobina, a fim de distinguir os níveis de oxigenação. Para as luzes brancas, a conversão do espaço de cor foi feita para CIE XYZ e CIE Lab, enquanto para as outras luzes, a conversão foi para Yequal. Ambos os dispositivos mostraram um bom desempenho. No entanto, os autores discutiram possíveis melhorias, como aumentar a velocidade de captura para reduzir o desfoque das imagens, utilizar difusores na iluminação para aumentar a uniformidade e explorar o efeito de um filtro de luz ultravioleta para futuras pesquisas.

2.7.1.2. Meio ambiente

No estudo realizado por Malthus, Ohmsen e Van Der Woerd (2020), um smartphone com dois aplicativos (HydroColor e EyeOnWater), baseados no espaço RGB, foi utilizado para medir os sólidos suspensos e a aparência em águas superficiais. O primeiro aplicativo, HydroColor, mostrou falta de uniformidade no processamento das imagens, com a iluminação sendo identificada como o principal fator de erro. Isso ocorreu porque as fotos foram capturadas em um ambiente aberto, onde as condições de iluminação variam. Por sua vez, o aplicativo EyeOnWater foi capaz de confirmar a qualidade da água superficialmente e apresentou boa

precisão na estimativa da condição do fluido. No entanto, não foi capaz de detectar parâmetros qualitativos mais complexos. Embora os aplicativos tenham mostrado utilidade para avaliar certos aspectos da água, como sua qualidade superficial, eles não foram capazes de fornecer resultados comparáveis aos obtidos por um espectrofotômetro e não conseguiram detectar parâmetros qualitativos mais avançados.

Özdemir e colaboradores (2017) investigaram a adsorção de corantes em água por meio da ADI. Foi criado um ambiente controlado na base da câmera de um celular e as imagens capturadas em RGB foram convertidas para o espaço de cores HSV para o processamento dos dados. O método foi testado utilizando o corante azul de metileno, sendo adicionadas soluções de poliacrilonitrila eletrofiada e zeólita para estudar a adsorção ao longo do tempo. O trabalho demonstrou uma sensibilidade de 0,1817 ppm, sendo capaz de detectar quantidades menores que 0,5 ppm. Esses resultados indicam que o método proposto apresenta uma boa capacidade de detecção e quantificação de corantes em soluções aquosas, o que pode ser útil em aplicações relacionadas ao monitoramento e tratamento de águas contaminadas por corantes.

Han e colaboradores (2016) desenvolveram um sistema para medir a cor de solos, que são conhecidos por apresentarem uma ampla variedade de cores. Nesse modelo, um smartphone foi utilizado juntamente com seu flash como fonte de luz, além de lentes externas, dispositivos de sombreamento e um cartão de calibração de cores. O espaço de cores RGB foi calibrado utilizando um padrão verde, uma vez que o tamanho e a geometria das partículas do solo, juntamente com a qualidade da câmera do telefone, podem introduzir ruído nas imagens capturadas. O padrão verde mostrou-se adequado para corrigir essas variações. Embora seja necessário secar as amostras de solo antes de realizar as medições, a aplicação da ADI para a identificação de solos mostrou-se compatível com o método padrão de medição.

2.7.1.3. Alimentos

No estudo realizado por Coskun e colaboradores (2013), um celular foi utilizado em conjunto com uma plataforma desenvolvida chamada iTube para realizar testes de alergênicos em alimentos. Foi construído um pequeno ambiente controlado, acoplado à câmera do celular, onde a iluminação foi realizada utilizando dois diodos de LED. O objetivo da análise era detectar a presença de amendoim em diferentes tipos de biscoitos. Para isso, as porcentagens de amendoim foram conhecidas por meio de técnicas de segmentação e incubação, permitindo a comparação dos dados obtidos. Essa abordagem utilizando o celular e a plataforma iTube oferece uma maneira conveniente e portátil de realizar testes de alergênicos em alimentos.

Orlandi e colaboradores (2018) investigaram a maturação fenólica de uvas de diferentes variedades e estágios de maturidade. Para isso, foram utilizadas técnicas de cromatografia em papel e um scanner para capturar as imagens das amostras. Após a captura das imagens, os valores RGB foram convertidos para o espaço de cores HSV, e um "colorgrama" foi gerado usando o *software* MATLAB. Através dessa análise, foi possível avaliar o índice de cor, a tonalidade e o teor de antocianinas totais nas uvas. Essas medidas fornecem informações valiosas sobre a maturação fenólica das uvas, que estão relacionadas à qualidade do fruto e ao potencial para a produção de vinho. Já o estudo de Herrero-Latorre e colaboradores (2019), teve como objetivo autenticar a alta qualidade de vinhos envelhecidos e quantificar possíveis adulterações. Para isso, foram analisadas quatro amostras de diferentes empresas utilizando imagens em RGB. Utilizando uma câmera digital em um ambiente controlado e o *software* ImageJ para a captura e processamento das imagens, o estudo revelou diferenças significativas entre as classes dos vinhos, o grau real de envelhecimento e as amostras adulteradas. O método proposto demonstrou uma boa capacidade de predição e precisão, com um erro de apenas 2,5% e um limite de detecção de 2,3%.

Böck e colaboradores (2018) estudaram a presença de etanol na cachaça, o qual reage com nitrato de amônio cérico e ácido nítrico, gerando um complexo vermelho passível de uso na ADI. As imagens foram capturadas utilizando um smartphone e o *software* PhotoMetrix realizou o processamento de dados através dos mínimos quadrados parciais. Para o *design* do experimento, um scanner e o *software* ChemoStat foram usados de forma a configurar as amostras. O espaço de cores estudado foi o RGB. O erro quadrado foi de 0,0677% e um teste estatístico não demonstrou significância entre o método e o padrão.

Estudando a cana de açúcar crua, Guedes e Pereira (2019) aplicaram a ADI para identificação da presença de pequenas impurezas sólidas, utilizando de histogramas RGB e espaços de cores HSV e rgb. As imagens foram capturadas usando uma câmera digital dentro de uma caixa preta, de forma a evitar a absorção ou reflexão da luz do ambiente, entretanto, a caixa permanecia aberta durante o processo, onde a iluminação era proveniente da câmera. Os autores encontraram tendência de as amostras apresentarem cerca de 85% de pureza por peso, com uma sensibilidade do método acima de 0,97.

Fulgêncio e colaboradores (2020) observaram que a ADI pode ser usada para controle de qualidade de cervejas, uma vez que há uma cor ideal localizada no comprimento de onda de 430 nm. Com uso de espaço RGB e um smartphone, além de dois modelos de análise, o método não apresentou a necessidade do padrão em desgaseificar a bebida para realizar o teste,

apresentando valores lineares e precisos, de acordo com os padrões estabelecidos nas normas brasileiras e internacionais.

Visando diferenciar maçãs orgânicas das convencionais, Song e colaboradores (2020) utilizaram um ambiente controlado, com a iluminação direta e frontal à maçã, e as capturas de fotos foram realizadas utilizando um smartphone. A imagem foi apresentada de forma a parecer um espectro visível de todas as cores e os métodos de classificação utilizados foram diversos, onde alguns apresentaram maior sensibilidade que outros. O espaço de cores observado é o RGB. Os resultados mostram que o método usado nas imagens possui baixa resolução e alta grau de não linearidade quando comparados à um espectrofotômetro, sendo possível identificar as maçãs apenas pela coloração.

2.7.1.4. *Outras aplicações*

Para analisar adulterações no combustível álcool etílico hidratado, Dantas e colaboradores (2017) utilizaram diversos LEDs, com diferentes comprimentos de onda, e uma webcam. Algumas amostras foram adulteradas propositalmente com água ou metanol a fim de verificar a confiabilidade do método. As imagens foram decompostas em cinco espaços de cores diferentes (RGB, escala preto-branco, HSV, HLS e CMYK), e os valores foram submetidos a análises linear e mínimos quadrados discriminantes, obtendo sensibilidade e especificidade de 100% para todos.

A fim de realizar análises em concretos, Ahamad e Maizul (2020) utilizaram um microscópio eletrônico de varredura e um microanalisador de raio-x junto com a ADI e um algoritmo K-Means. No estudo, foi possível observar a composição de óxido, sílica e carbono através do agrupamento realizado no processamento de imagens. Uma vez que o microscópio captura imagens em preto-e-branco, foi necessário adicionar cores virtuais através do aumento da temperatura.

Han e Cai (2020) visaram a substituição de modelos geométricos na engenharia geotécnica por imagens digitais, evitando processamentos lentos e complexos que são comumente utilizados na área. Para o desenvolvimento do modelo, os autores criaram um modelo virtual de extrato com múltiplas camadas e utilizaram um algoritmo de separação de regiões em grades, aumentando a rapidez com a qual as regiões são categorizadas. O estudo foi feito apenas para modelos 2D, não demonstrando aplicação para 3D.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Preparação das soluções com os corantes

Os corantes AU (monocloridrato de 4,4'-carbonimidoilbis (n,N-dimetilanilina), CI 41000), VM (4-[(4-dimethylaminophenyl)-phenyl-methyl]-N, N-dimethylaniline, CI 42000) e VC (1-Naphthalene sulfonic acid, 3,3'-(4,4'-biphenylenebis (azo))bis(4-amino-)disodium salt, C.I. 22120) foram utilizados na pesquisa sem tratamento prévio. Os três corantes foram analisados em um equipamento de espectrofotometria UV-Visível (UV-Vis), além de serem submetidos à análise digital de imagens.

Devido à natureza de grande pigmentação, alguns corantes podem ser visualizados a olho nu em concentrações mínimas, como em 1 ppm (Guaratini e Zaroni, 2000). As concentrações dos corantes foram escolhidas devido ao método de pigmentação utilizado na indústria têxtil, onde a concentração dos corantes varia de 2 a 6% por peso da amostra de tecido (El-Shehry *et al.*, 2022; Gülşen Bakıcı e Kadem, 2021; Iqbal *et al.*, 2020; Nautiyal e Shukla, 2018). Portanto, as concentrações do estudo foram baseadas em uma amostra de tecido (algodão cru) de 2g. Ao caracterizar os corantes na concentração de 0,040 g. L⁻¹, o espectrofotômetro não é capaz de ler tais concentrações, sendo necessário diminuí-la. Logo, a concentração máxima desta pesquisa foi especificada em 0,024 g. L⁻¹, caracterizando pela possibilidade de leitura de todos os corantes no método espectrofotométrico.

Para os ensaios em laboratório, uma solução estoque foi preparada para cada corante através da diluição de 0,05 g de corante em 50 mL de água destilada. A massa do corante foi medida em uma balança analítica marca Shimadzu, modelo AY220, e o volume da água destilada foi quantificado utilizando um balão volumétrico de 50 mL. A cada triplicata, a solução estoque era refeita, visando a reprodutibilidade e confiança do método. Amostras das soluções estoque foram diluídas em um balão de 25 mL para obtenção das seguintes concentrações [g. L⁻¹]: 0,0006; 0,006; 0,0120; 0,018; e 0,024. Foram totalizadas cinco amostras, e suas triplicatas, de cada corante homogeneizado em água destilada, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Concentração dos corantes puros.

Corantes	Concentração (g. L ⁻¹)				
	B1*	B2	B3	B4	B5
AU	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
VM	B6	B7	B8	B9	B10
	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
VC	B11	B12	B13	B14	B15
	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024

*B corresponde a nomenclatura dada a batelada.

Após diluição, o pH das amostras foram corrigidos para 5,0 através da solução tampão de 2,0 mol. L⁻¹ de acetato hidratado de sódio e ácido acético glacial. As medidas de pH foram realizadas em um pHmetro de bancada marca Luca, modelo 210 n° 3076/1711, utilizando um eletrodo combinado de pH.

Para as soluções binárias, os testes foram separados em cinco bateladas. Em cada batelada, um dos corantes era mantido fixo e o segundo corante variava em toda a faixa de concentração trabalhada. Na batelada seguinte, a proporção do corante fixo aumentou em 100% da sua primeira concentração. Inicialmente, foram preparadas soluções binárias aquosas dos corantes AU e VM, totalizando cinco bateladas mantendo a concentração de AU constante e variando a concentração do corante VM, conforme ilustrado na Tabela 6. A última concentração do corante AU (0,024 g. L⁻¹), ou seja, a concentração deste corante na batelada 5, corresponde a cinco vezes a sua primeira concentração (0,0048 g. L⁻¹).

Tabela 6 - Soluções binárias dos corantes VM e AU.

Batelada	Concentração de AU [g. L ⁻¹]	Concentração de VM [g. L ⁻¹]				
B16	0,0048	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B17	0,0096	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B18	0,0144	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B19	0,0192	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B20	0,024	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024

*B corresponde a nomenclatura dada a batelada.

Visando observar o comportamento dos corantes AU e VM em soluções com outros corantes, foram realizadas soluções com o corante VC. Primeiro, foram analisadas cinco bateladas de soluções mantendo o corante VC fixo e variando VM. nas concentrações exibidas na Tabela 7. Para essa solução a primeira concentração foi de (0,0006 g. L⁻¹), na batelada 1, corresponde a 40 diluições (v/v) da sua última concentração (0,024 g. L⁻¹), na batelada 5.

Tabela 7 - Soluções binárias dos corantes VC e VM.

Batelada	Concentração de VC [g. L ⁻¹]	Concentração de VM [g. L ⁻¹]				
B21	0,0006	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B22	0,006	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B23	0,012	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B24	0,018	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B25	0,024	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024

*B corresponde a nomenclatura dada a batelada.

Em sequência, seguindo os mesmos passos das demais soluções binárias, foram analisadas cinco bateladas de soluções mantendo o corante VC constante e variando o corante AU, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Soluções binárias dos corantes VC e AU.

Batelada	Concentração de VC [g. L ⁻¹]	Concentração de AU [g. L ⁻¹]				
B26	0,0006	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B27	0,006	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B28	0,012	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B29	0,018	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024
B30	0,024	0,0006	0,006	0,012	0,018	0,024

*B corresponde a nomenclatura dada a batelada.

Para observar e identificar possíveis interferências nas soluções binárias com os corantes AU e VM, cinco bateladas inversas às descritas na Tabela 6 foram desenvolvidas, onde o corante VM passa a ser constante e o corante AU varia no meio, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Soluções binárias dos corantes VM e AU.

Batelada	Concentração de VM [g. L ⁻¹]	Concentração de AU [g. L ⁻¹]				
B31	0,0048	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B32	0,0096	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B33	0,0144	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B34	0,0192	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024
B35	0,024	0,0048	0,0096	0,0144	0,0192	0,024

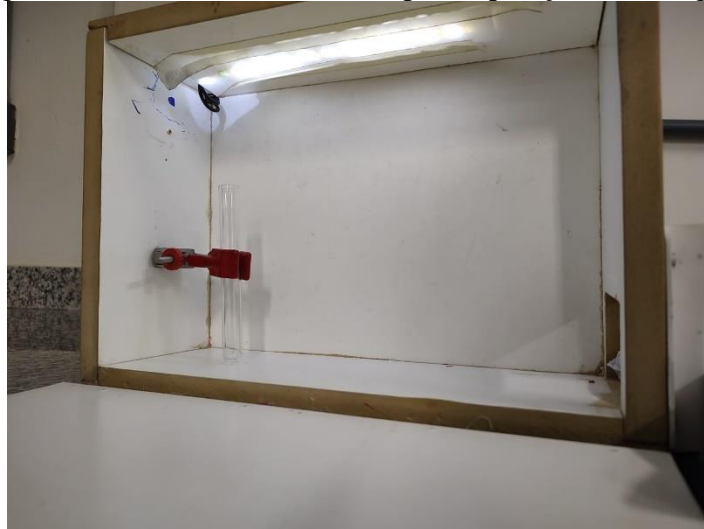
*B corresponde a nomenclatura dada a batelada.

3.2. Aquisição das imagens

Para aquisição das imagens, foi projetada e montada uma caixa de luz, visando manter a iluminação uniforme, minimizando as mudanças de luminosidade durante a coleta de dados. O receptáculo possui abertura lateral para manutenção e operação das amostras e pequena

abertura para câmera do aparelho telefônico, abertura envolta com um pano preto para evitar entrada de luz externa no ambiente controlado. A caixa de luz consiste em uma caixa de madeira com revestimento branco, onde a escolha do material foi devido à durabilidade e coloração branca, que serve como normalizador dos efeitos de variação da luminosidade, como pode ser observado na Figura 12. A luminosidade da caixa era realizada por uma fita contendo dez diodos emissores de luz (LED) branca, presos na porção superior e conectados à uma fonte de energia externa à caixa. Rente aos LEDs, foi posicionado um anteparo de papel branco.

Figura 12 - Ambiente controlado para aquisição das imagens.



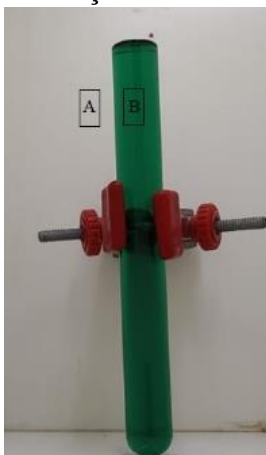
Cada solução aquosa, binária ou pura, foi colocada em um tubo de ensaio de 10 mL que era encaixado no interior da caixa de luz. O aparato consistia em uma braçadeira anexa à caixa para que o tubo permanecesse imóvel durante a captura das imagens.

Na coleta das imagens, um celular Motorola Egde 20 foi utilizado, com todas as configurações automáticas desativadas (Composição inteligente, otimizador de fotos, iluminação suave com IA, HDR e flash), além de manter a resolução da câmera em seu menor valor para evitar mudanças na coloração real das amostras durante a captura das imagens.

3.3. Processamento das imagens

Dois áreas na imagem foram recortadas para obtenção dos respectivos valores da amostra e do branco. Foi recortada uma área no plano de fundo, denominada área A (branco), e uma área de mesmo tamanho na amostra, denominada área B (amostra). O tamanho dos recortes é o mesmo para ambas as áreas, com dimensões de 10x10 pixels. A Figura 13 exemplifica a disposição das áreas.

Figura 13 - Representação ilustrativa das áreas A e B.



O processamento foi realizado usando um algoritmo desenvolvido no GNU Octave versão 7.2.0/2022. Através do algoritmo, obteve-se os valores de R, G, B, onde cada componente corresponde a uma faixa de 0 a 255 denominada banda. Após o processamento, os resultados foram visualizados por meio de gráficos criados no OriginLab. Além disso foram utilizados o Minitab 21 e o RStudio 2023.06.0-421 para melhor visualização dos resultados.

3.4. Método espectrofotométrico

Como método de comparação foi escolhido o método espectrofotométrico. Utilizando um espectrofotômetro Shimadzu UV-1280. Inicialmente, foi feita uma varredura com uma amostra de água destilada (branco) na faixa de comprimento de onda de 300 a 800 nm. Em seguida, as amostras colorimétricas foram lidas pelo equipamento na mesma faixa de comprimento, de forma a obter suas absorbâncias. Os espectros foram obtidos com uso de uma cubeta de quartzo de caminho óptico igual a 1,00 cm.

3.5. Validação do experimento

Três amostras do corante AU de concentração de $0,0144 \text{ g. L}^{-1}$ foram pipetadas utilizando uma pipeta volumétrica para um balão volumétrico de 25 mL. A cada amostra foram adicionadas três concentrações desconhecidas do corante VM, amostras estas dentro da faixa de estudo ($0,0048$ a $0,024 \text{ g. L}^{-1}$). Os corantes foram colocados em um balão volumétrico de 25 mL para correção do volume com uso de água destilada. O pH foi ajustado para 5,0 com uso da solução tampão de $2,0 \text{ mol. L}^{-1}$ de acetato hidratado de sódio e ácido acético glacial.

Seguindo o mesmo procedimento, seis amostra de concentração $0,012 \text{ g. L}^{-1}$ do corante VC foram pipetadas utilizando uma pipeta volumétrica para um balão volumétrico de 25 mL.

Em três destas amostras foram adicionadas três concentrações desconhecidas do corante VM, dentro da faixa de estudo (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹). Nas outras três amostras de VC, foram adicionadas três concentrações do corante AU, dentro da faixa de estudo (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹). Os volumes foram completados com água destilada em um balão volumétrico de 25 mL. O pH foi ajustado para 5,0 utilizando a solução tampão.

As soluções foram analisadas no espectrofotômetro Shimadzu UV-1280 e colocadas em um tubo de ensaio de 10 mL para análise do método ADI. O tubo foi colocado no interior da caixa de luz e imagens foram capturadas, conforme os procedimentos dos itens 3.2 e 3.3 desta seção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aquisição e processamento das imagens

A caixa de luz desenvolvida no estudo possuía LEDs brancos como fonte de luz. Conforme Al-Nidawi e Alshana (2021), o LED necessita de um monocromador para produzir uma luz ampla e não selecionada em termos de comprimento de onda. Portanto, um anteparo foi colocado rente à fita de LED, visando ajudar a dispersar a luz e evitar que ela seja refletida diretamente no tubo de ensaio que contém as soluções que estão sendo fotografadas. Essa configuração do ambiente permite obter imagens com uma iluminação consistente, minimizando as influências externas na qualidade e nos resultados das fotografias. Ao uniformizar a luminosidade interna e garantir que a luz seja distribuída de forma homogênea, é possível obter resultados mais precisos e confiáveis durante a coleta de dados fotográficos.

Após a captura das imagens, visando garantir a uniformidade do conjunto, o recorte de mesma dimensão (10x10) das amostras (áreas A e B) foi realizado de forma a padronizar as áreas selecionadas. Essa escolha visa manter a consistência na análise das imagens, permitindo comparar as características das áreas A e B de maneira adequada. Ao utilizar essa abordagem de recorte uniforme, é possível analisar as diferenças de cor, textura ou qualquer outra característica de interesse entre as áreas A e B, sem interferências causadas por variações no tamanho ou na localização dos recortes. Isso contribui para obter resultados mais precisos e confiáveis na análise das imagens capturadas.

No processamento das imagens, os recortes foram utilizados e os valores de pixel de cada banda RGB foram calculados. Essa média foi então utilizada para construir os modelos ou realizar as análises desejadas.

Para a análise das imagens e comparação com o método espectrofotométrico, ou seja, o método comumente utilizado, a espectrofotometria, um modelo de absorvância calculada (*abs*) foi utilizado, baseado na Lei de Lambert-Beer para RGB (Equação 13).

$$abs = -\log \frac{I_o}{I} \quad \text{Equação 13}$$

Onde I_o é referente à intensidade do padrão/branco em uma banda específica (R, G ou B) e I é a intensidade do analito na mesma banda do branco. Ao dividir I_o por I , também ocorre a normalização dos valores. Essa normalização tem o objetivo de amenizar possíveis variações de luminosidade entre as áreas recortadas, permitindo uma comparação mais precisa e padronizada dos valores de pixel. Ao realizar essa normalização, os efeitos das variações globais de iluminação são reduzidos, ajudando a garantir que as diferenças de absorvância

estejam relacionadas principalmente às características específicas das amostras e não a variações de luminosidade. Portanto, além da absorvância, a normalização é outra variável analisada nesse contexto.

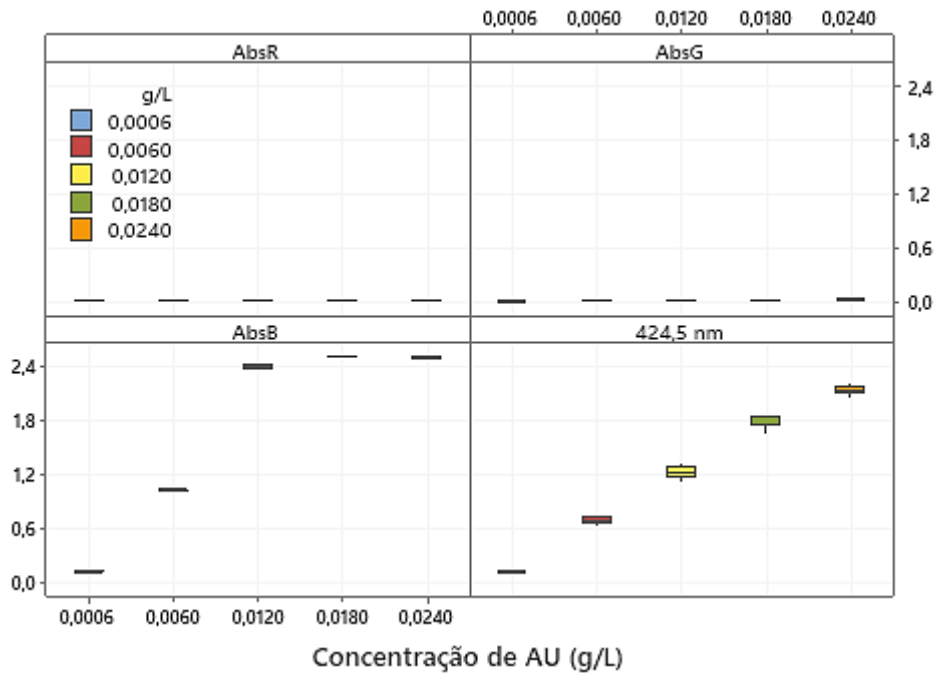
Os dados obtidos foram linearizados buscando aproximação com o método espectrofotométrico, uma vez que a Lei de Lambert-Beer é descrita como a relação linear entre a absorvância e a concentração do analito. Portanto, como forma de conferir a linearidade dos dados, foram escolhidos testes estatísticos como o coeficiente de determinação, o coeficiente de correlação e o teste de hipóteses. O coeficiente de determinação determina a variabilidade dos dados no modelo de regressão. O coeficiente de correlação quantifica a força e a direção da relação linear. O teste de hipóteses avalia a significância estatística de uma relação de variáveis, indicando se hipótese apresentada é nula, ou seja, maior de 0,05, ou verdadeira, menor que 0,05. No presente estudo, valores maiores que 0,05 demonstram pouca relação linear entre os dados.

4.2. Estudo das triplicatas

De forma a aumentar a consistência do método, as triplicatas foram realizadas em dias diferentes, com soluções estoques diferentes. As Figura 14-16 apresentam os valores das variações de cada proporção de concentração dos corantes estudados. As variâncias foram calculadas considerando os resultados obtidos no espectrofotômetro, no comprimento de onda respectivo de cada corante, e na absorvância calculada (abs) de cada banda (R, B, G) da análise digital de imagens.

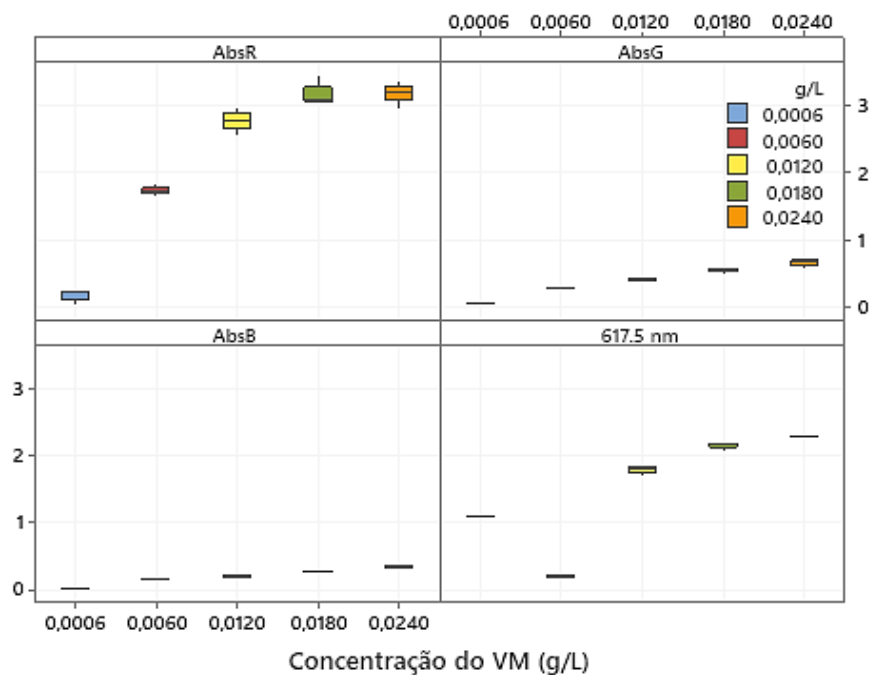
A Figura 14, em relação às análises realizadas no corante AU, ilustra que as triplicatas possuem pouca variação entre si para o método ADI. Entretanto, no método espectrofotométrico, a variação é maior, aumentando conforme ocorre a adição de corante no meio. Esse método, para este corante, apresenta maior dispersão dos dados que a ADI, indicando que, estatisticamente, possui uma maior diversidade de resultados, ou seja, uma sensibilidade ligeiramente maior que a ADI.

Figura 14: Gráfico de barra das triplicatas da amostra aquosa do corante AU para os métodos espectrofotométrico e ADI.



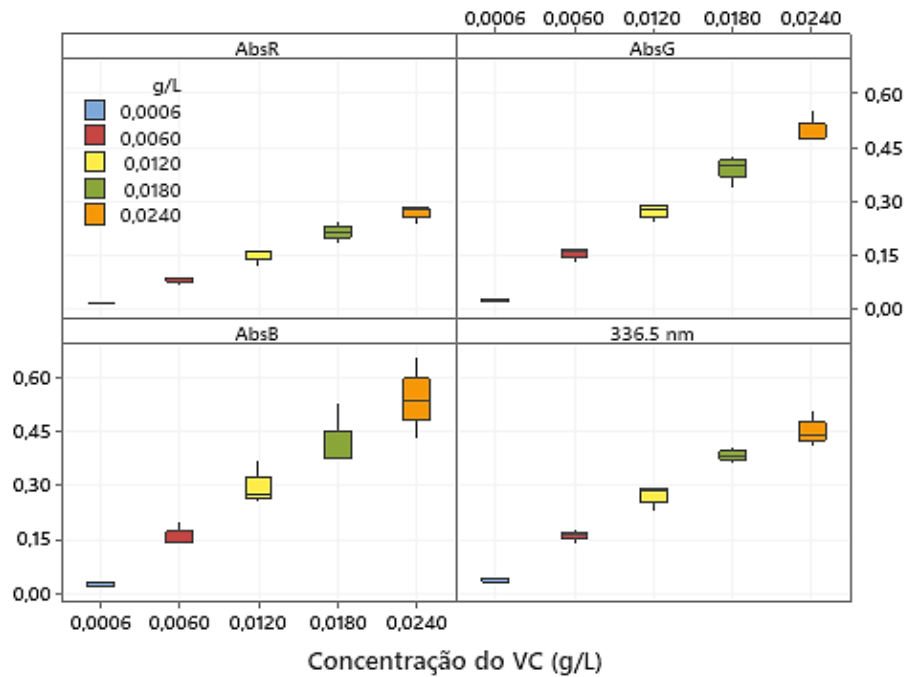
Em relação às triplicatas das análises do corante VM puro, houve maior dispersão dos dados na análise ADI conforme a concentração do corante no meio aumentava. Isso indica que em meios mais saturados com o corante VM, a ADI é capaz de identificar melhor as ligeiras variações, principalmente em absR. No método espectrofotométrico, a dispersão foi menor, onde os dados da concentração de 0,012 g. L⁻¹ de VM apresentou a maior dispersão.

Figura 15: Gráfico de barra das triplicatas da amostra aquosa do corante VM para os métodos espectrofotométrico e ADI.



Para o corante VC, conforme ilustrado na Figura 16, a dispersão dos dados aumenta com a concentração do corante, bem como ocorreu para o corante VM. Esse resultado é exacerbado na absorvância calculada B, onde é nítido o aumento da variação, sendo possível observar que a média se encontra próxima ao limite inferior.

Figura 16: Gráfico de barra das triplicatas da amostra aquosa do corante VC para os métodos espectrofotométrico e ADI.



Os valores da variância das amostras indicam que há dispersão entre os valores das amostras, mesmo que em alguns casos seja pequena, como para o corante AU. Caso a ADI não demonstrasse variabilidade, a sensibilidade do método seria muito pequena, não sendo capaz de identificar as pequenas mudanças e interferências de um sistema. Além disso, a dispersão dos dados ajuda na repetibilidade do método, o que é confirmado pelos resultados obtidos no equipamento de comparação, o espectrofotômetro, onde este também detectou a dispersão dos dados. Logo, no estudo quantitativo dos corantes, um banco de dados que apresente variabilidade dos dados pode levar a maior representatividade da amostragem.

Uma vez verificado que os corantes puros apresentam dispersão esperada entre as triplicatas, este estudo absteve-se da análise de variância das soluções binárias posto que os resultados apresentaram-se semelhantes.

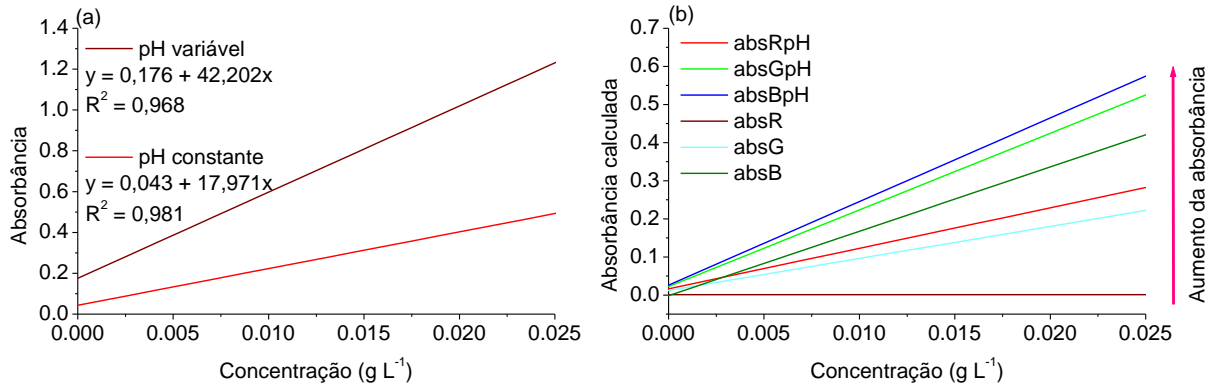
4.3. pH

O pH foi tamponado em 5,0 para todas as amostras devido aos valores de pKa dos corantes. Ao misturar os corantes AU e VM (pKas 9,8 e 6,9, respectivamente, o componente com o pKa mais básico, AU, irá reagir com a base conjugada presente no meio, entretanto, como o ácido de pKa 6,9 é mais forte que o ácido dissociado de pKa 9,8, ele tende a doar prótons com mais facilidade. Tamponando a mistura em 5,0, o meio torna-se mais ácido do que os componentes, tornando favorável a associação dos prótons às moléculas ácidas. Logo, a forma de ácido não dissociado será mais presente no meio.

Já nas soluções com os corantes AU e VC (pKas 9,8 e 4,1) em pH igual a 5,0, o corante a forma não dissociada dos componentes estará mais presente que a forma dissociada assim como as soluções com os corantes VM e VC (pKas de 6,9 e 4,1). Portanto, a escolha do pH deu-se visando a ambientação dos corantes em um ambiente mais ácido, visando os comprimentos de onda na faixa de 617,5, 424,5 e 336,5 nm dos corantes VM, AU e VC, respectivamente.

O pH é fator importante para o corante VC, onde a mudança deste pode levar a aumento ou diminuição da faixa de absorção e comprimento de onda do espectrofotômetro. Em valores de pH acima de 5,0, o corante VC apresenta coloração vermelha devido à sua forma aniônica protonada. Em pH menores que 5,0, VC apresenta duas formas tautoméricas e uma forma azoica, o que leva a sua coloração a aproximar-se de faixas azuis do espectro visível (Csillag *et al.*, 2023). A Figura 17 apresenta o comportamento do corante quando possui o pH mantido constante e quando este não é uniformizado. Na Figura 17a, para o método espectrofotométrico, a curva vermelha (pH constante) corresponde às amostras com pH corrigido para 5,0., e a curva vinho (pH variável) são as amostras sem correção. Já no gráfico da Figura 17b, as curvas vermelho (absRpH), verde (absGpH) e azul (absBpH) correspondem as amostra com pH igual a 5,0, e, as demais curvas (absR, absG e absB) apresentam os dados sem a tamponização do pH, este variando entre 4,0 a 7,0.

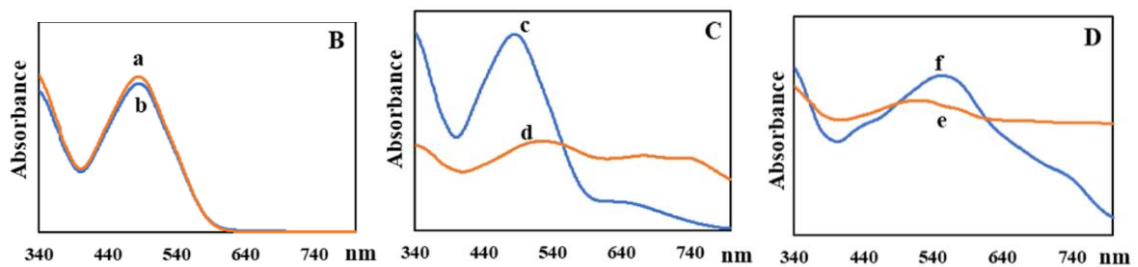
Figura 17 - Curvas de calibração do corante VC. (a) Curva de calibração para o método espectrofotométrico. (b) Curva de calibração para o método RGB onde absRGBpH é a absorvância RGB das amostras com solução tampão e absRGB representa a absorvância RGB das amostras sem a solução tampão.



A tamponização do pH em 5,0 reduz a inclinação da curva no método espectrofotométrico. Entretanto, o efeito inverso acontece no método RGB, onde as curvas aumentaram sua inclinação e diminuíram a variação entre si com a fixação do pH, como pode ser observado nas curvas absRpH, absGpH e absBpH. Ao utilizar a solução tampão, as curvas absGpH e absBpH aproximam-se e possuem valores similares próximos.

Conforme há a protonação do meio, ou seja, a redução do pH, a curva espectral torna-se mais indefinida, perdendo o formato dos picos devido a formação de estruturas azo que precipitam no meio (Csillag, 2023), como apresentado na Figura 18. Portanto, o pH influencia diretamente nas características de absorção e coloração do corante VC.

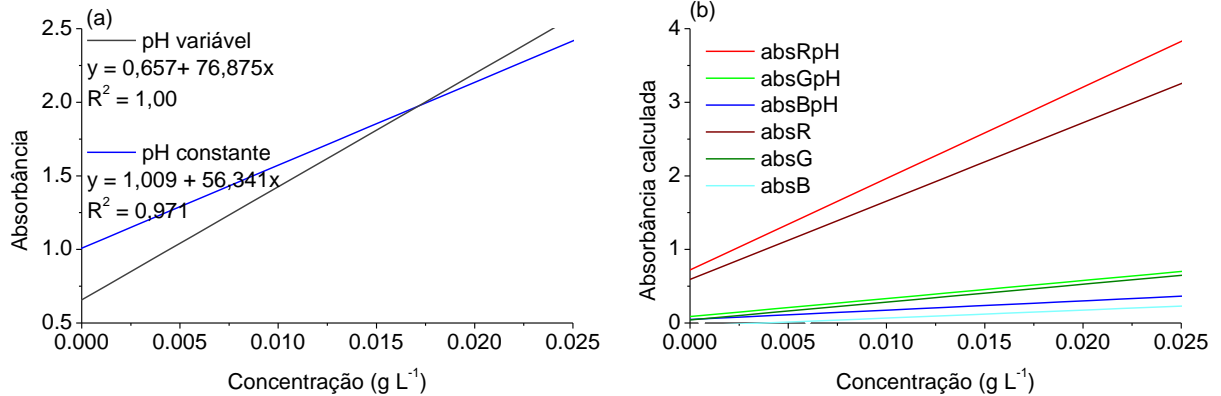
Figura 18 – Espectros de absorvância do corante VC em diferentes pH. (a) pH 7,0; (b) pH 6,0; (c) pH 5,0; (f) pH 3,0.



Fonte: Csillag *et al.* (2023).

Diferentemente de VC, o corante VM apresenta pouca variação entre os resultados obtidos a partir das amostras com e sem o uso da solução tampão, conforme exibido na Figura 19.

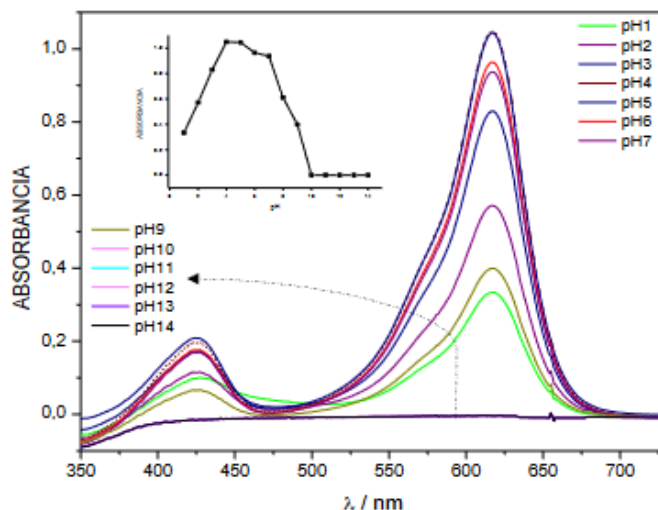
Figura 19 - Curvas de calibração do corante VM. (a) Curva de calibração para o método espectrofotométrico. (b) Curva de calibração para o método RGB onde absRGBpH é a absorvância RGB das amostras com solução tampão e absRGB representa a absorvância RGB das amostras sem a solução tampão.



Para o espectrofotômetro, a curva de calibração diminuiu sua inclinação, entretanto, em concentrações acima de $0,012 \text{ g. L}^{-1}$ apresentou valores próximos ao estado sem padronização do pH. No método RGB, a banda R apresentou uma maior separação entre as amostras, com um ligeiro aumento da sensibilidade, ou seja, da inclinação da curva. Para as demais bandas, os valores não demonstraram grandes variações, apresentando comportamentos similares.

A pouca variação do pH é confirmada no estudo de Ramos (2018) que apresenta análise do corante em pH ácidos e básicos, conforme mostrado na Figura 15. Ao acidificar o meio, os valores de absorvância ficam menores devido a descoloração e degradação dos intermediários e anéis aromáticos estruturais do corante. É observado que em valores de pH próximos, por exemplo na faixa de 5 a 6, há pouca variação dos valores de absorvância, o que corrobora com os resultados obtidos no presente estudo.

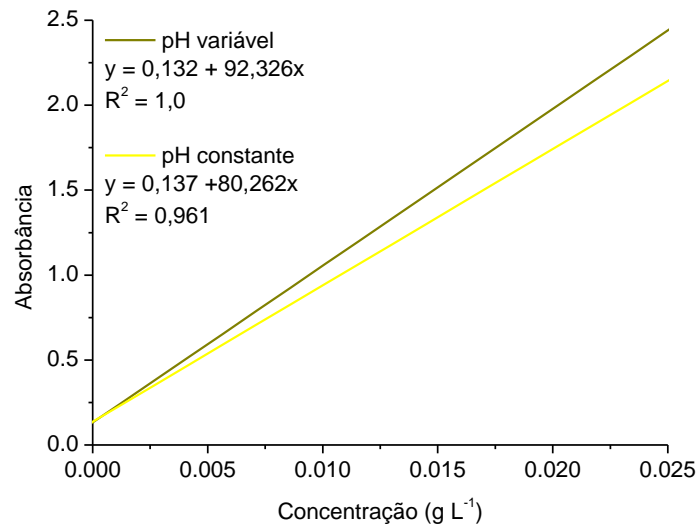
Figura 20: Espectros de absorvância do corante Verde Malaquita em diferentes pH.



Fontes: Ramos (2018).

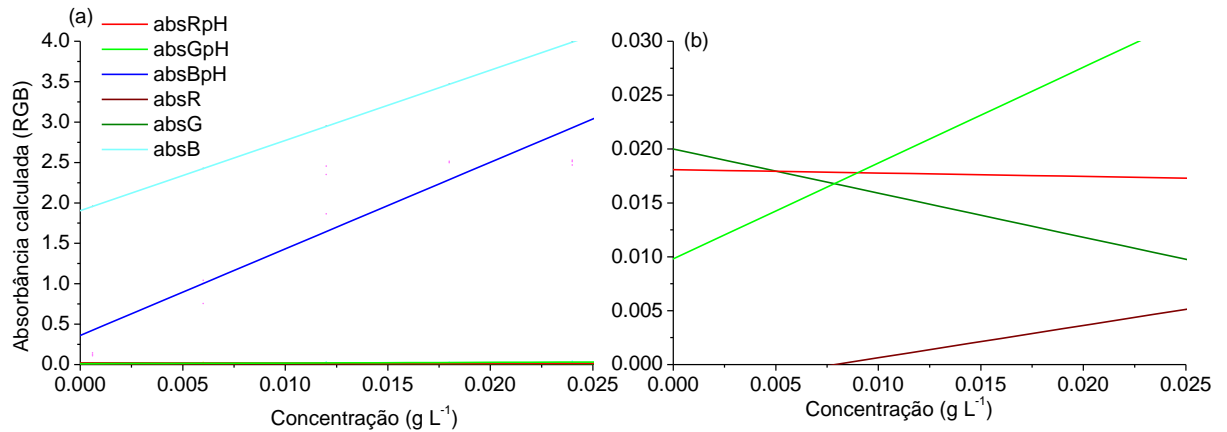
O corante AU possui ligeira mudança nos valores para o método espectrofotométrico, como pode ser observado na Figura 21. A constante de ambas as curvas possui valor similar, apresentando diferença de 0,005, e o coeficiente angular apresenta menor valor, onde inferindo em uma menor inclinação da reta.

Figura 21 - Curva de calibração para o método espectrofotométrico para o corante AU, utilizando amostras com e sem a presença da solução tampão.



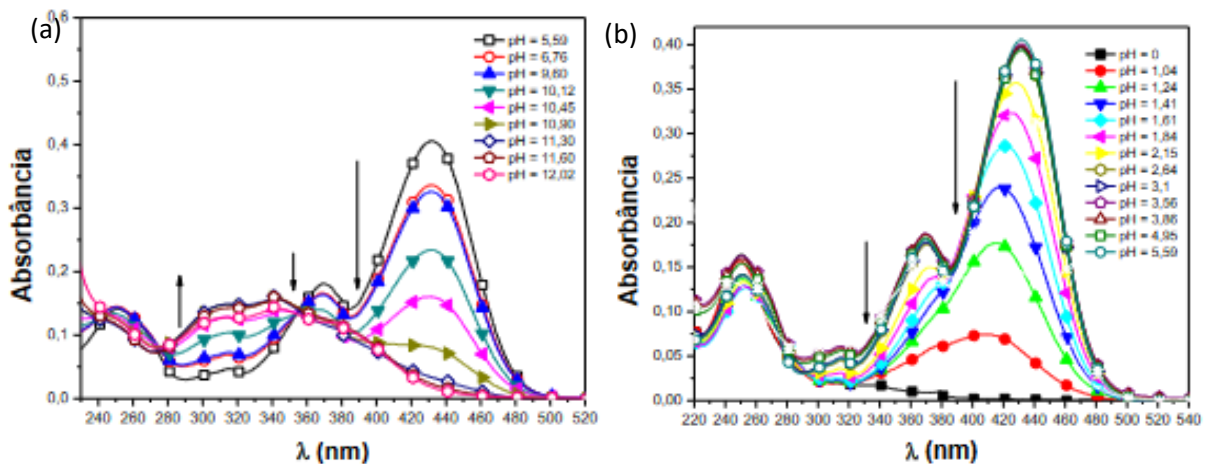
Já para a análise RGB, os resultados mostram maior nível de confiança (Figura 22). A banda B apresentou menores valores de absorbância, entretanto, maior angulação, aumentando a sensibilidade do método. A curva G, apresentou inclinação negativa quando o pH não foi uniformizado. Em absGpH, a inclinação da curva demonstra bom limite de detecção, mostrando relação direta do aumento da concentração com o aumento dos valores de absorbância calculados. Para a banda R, ao manter o pH constante, a curva também se apresentou constante, com declínio desprezível em relação às demais curvas.

Figura 22 –Curva de calibração para o método RGB onde absRGBpH é a absorbância RGB das amostras com solução tampão e absRGB representa a absorbância RGB das amostras sem a solução tampão. (a) Representação de todas as curvas. (b) Ampliação das curvas absR, absRpH, absG e absGpH.



Para AU, o pH é fato importante na análise RGB, apesar de mostrar-se pouco relevante para o método espectrofotométrico em concentrações menores que 0,005 g. L⁻¹. O resultado obtido apresenta correlação com o estudo de Ferreira (2015), ilustrado na Figura 23 onde o autor descreve que o corante é dependente do pH, e em valores básicos (maiores que 10) há uma descoloração alcalina do meio.

Figura 23 - Espectros de absorção do corante AU (1,0 x 10⁻⁵ mol. L⁻¹) na faixa de pH (a) entre 12 e 5,59 básicos e (b) em pH ácidos.



Fonte: Ferreira (2015).

4.4. Estudo espectrofotométrico individual dos corantes Auramina (AU), Verde Malaquita (VM) e Vermelho Congo (VC)

4.4.1. Análise espectroscópica e dos comprimentos de onda dos corantes

Antes da análise dos espectros corantes, é necessário entender como cada comprimento de onda transmite determinada coloração. Considerando as cores primárias, vermelho, verde e azul, quando há absorção de uma dessas cores, a transmissão será às outras duas restantes. Por exemplo, se há a absorção da cor vermelha, logo a transmissão ou a percepção do ser humano será uma coloração verde azulado, conforme descrito no tópico *Introdução*. As cores transmitidas são aquelas observadas pelo ser humano em angulação O Quadro 1 apresenta com as faixas de comprimento de onda e as devidas cores absorvidas e transmitidas, sendo estas aquelas percebidas pelo olho humano.

Quadro 1: Ilustrativa das cores absorvidas e transmitidas em diferentes faixas de comprimento.

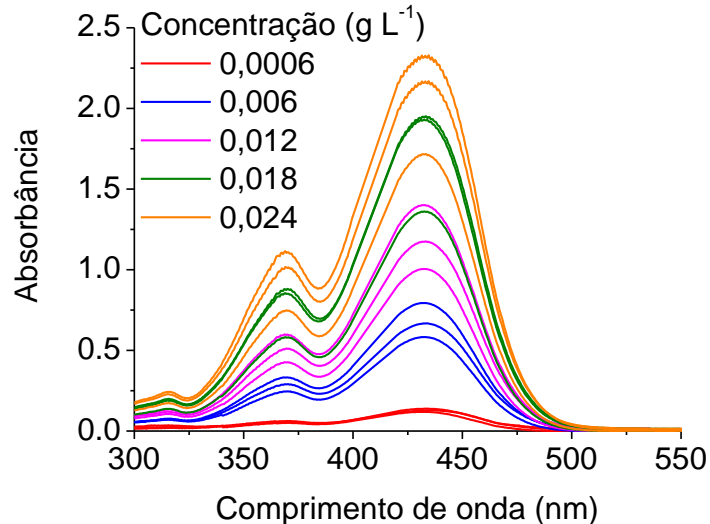
Faixa de comprimento de onda (nm)	Cor absorvida	Cor transmitida
< 380	Ultravioleta	-
380-420	Violeta	Verde-amarelado
420-440	Violeta-azulado	Amarelo
440-470	Azul	Laranja
470-500	Azul-esverdeado	Vermelho
500-520	Verde	Púrpura
520-560	Verde-amarelado	Violeta
560-580	Amarelo	Violeta-azulado
580-640	Laranja	Azul
640-700	Vermelho	Azul-esverdeado
700-780	Púrpura	Verde

Fonte: Adaptado de Lewis e Morris (2000) e Harris (2012).

O corante AU demonstra leitura em toda a faixa de espectro estudada no método convencional. No entanto, para concentrações menores, a leitura começa a partir de 680 nm. O AU exibe picos na faixa de comprimento de onda de 424,5 nm, indicando um comportamento na região azul do espectro visível. A faixa do comprimento de onda de 420 a 440 possui uma coloração violácea absorvida, entretanto, a cor é transmitida para o ser humano na cor amarelo,

conforme ilustrado no Quadro 1. Além disso, o espectro também apresenta picos menores em comprimentos de onda próximos a 370 nm, correspondentes à faixa ultravioleta, como pode ser observado na Figura 24.

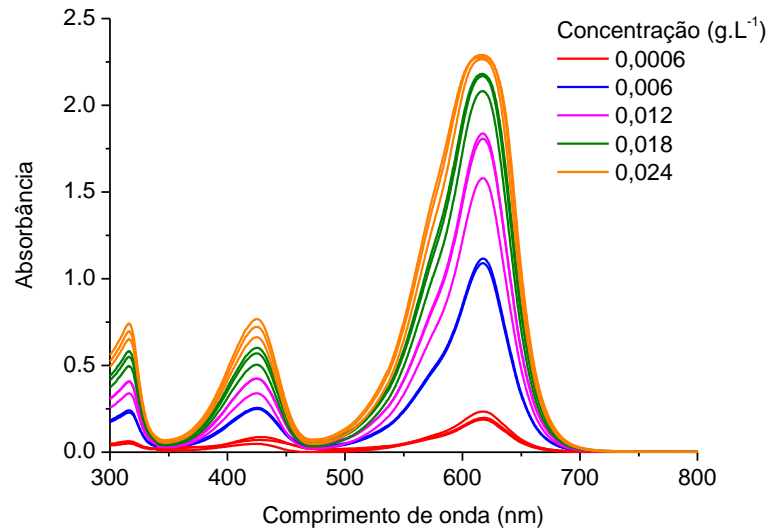
Figura 24 – Espectro (método espectrofotométrico) do corante AU nas concentrações [g. L⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018 e 0,024.



A detecção do menor pico, em 370 nm foi viabilizada pelo emprego de uma cubeta de quartzo, que possibilita o acesso a comprimentos de onda ultravioleta. Contudo, a capacidade de visualização dessa faixa também resultou em uma pequena interferência no final do pico principal, especialmente nas concentrações de 0,018 e 0,024 g. L⁻¹. No espectro, as triplicatas das absorbâncias obtidas no espectrofotômetro também foram ilustradas de modo a entender o comportamento de todos os dados. Os dados foram obtidos através de uma solução estoque do corante AU, com concentração de 1 g. L⁻¹, sendo realizado uma única diluição (v/v) em cada concentração estudada.

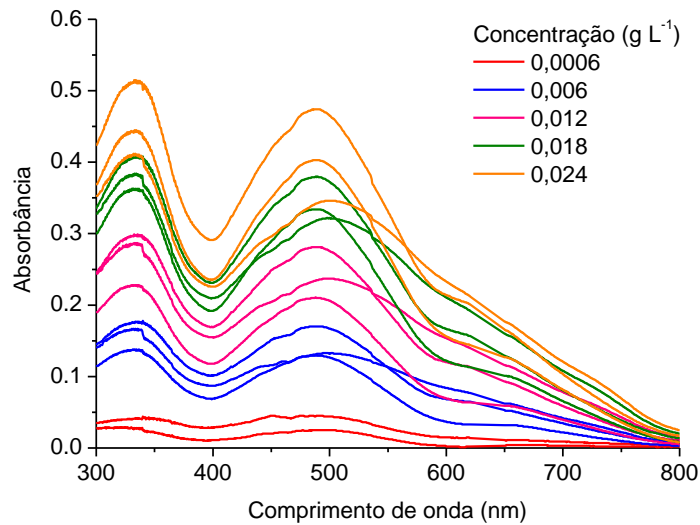
O corante VM exibiu picos consistentes na faixa de 617,5 nm para todas as concentrações analisadas (Figura 25). Essa faixa representa a cor absorvida laranja, entretanto, é percebida pelo ser humano através da transmissão de raios azulados. Picos com valores menores foram observados em 424,5 nm, faixa equivalente aos dados obtidos para o corante AU. A presença dos dois picos demonstra que o corante apresenta características tanto na faixa do vermelho quanto na do azul, com valores aproximados de 700 e 435,8 nm, respectivamente (CIE, 1986). Essa observação será importante na análise RGB.

Figura 25 - Espectro do corante VM nas concentrações [g. L⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; e 0,024.



O corante VC apresenta picos de absorção na faixa de 490 nm e 336,5 nm, valores que estão bastante próximos dos picos observados para o corante AU e dos picos secundários do corante VM, conforme ilustrado na Figura 26. Os picos do corante VC apresentam maior espaçamento entre as linhas, o que aumenta conforme há a saturação do corante. Como os picos da região ultravioleta apresentam-se mais intensos, e todos os corantes deste estudo foram testados utilizando a mesma região, será considerado como pico principal o referente ao comprimento de onda de 336,5 nm.

Figura 26 - Espectro do corante VC concentrações [g. L⁻¹] 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; e 0,024.



4.4.2. *Análise espectroscópica e dos comprimentos de onda de soluções multicomponentes*

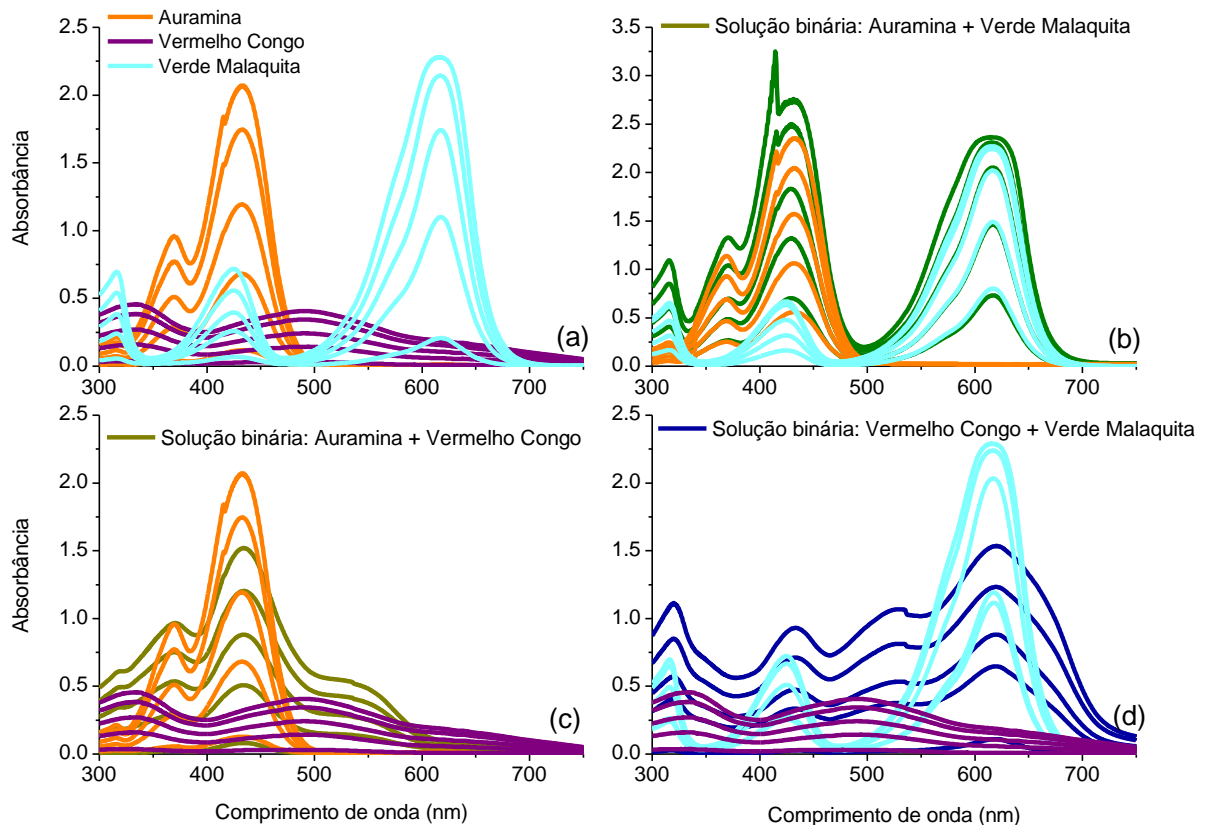
Quando os espectros dos três corantes são sobrepostos, é possível observar a proximidade dos picos (Figura 27). Como discutido anteriormente, o corante VM possui seu pico menor próximo aos picos principais dos corantes AU e VC. Portanto, ao realizar uma mistura desses corantes, é necessário verificar as possíveis interferências que o corante VC pode causar, especialmente se deseja-se calcular a concentração de apenas um corante.

A Figura 27b apresenta o comportamento da solução binária dos corantes AU e VM. Observa-se que o comprimento de onda de 617,5 nm, a solução apresenta comportamento semelhante ao corante VM, apresentando ligeiro aumento em seus valores devido a presença quase imperceptível do corante AU neste comprimento de onda. Na faixa de 424,5 nm, a mistura tende a exibir valores mais altos em comparação ao corante AU puro, devido a presença do segundo pico do corante VM. É necessário salientar que no espectro a soma dos picos individuais de cada corante não corresponde ao valor da mistura destes, uma vez que não há uma constância de valores entre os analitos, sendo imprescindível considerar as possíveis interferências que cada corante pode causar no outro quando na solução binária. O corante AU apresenta interferência quando ocorre a transição de comprimento de onda visível para a faixa ultravioleta, na região próxima a 400 nm, como observado na Figura 27b. Quando AU está em solução com o corante VM, a interferência torna-se mais evidente, especialmente em concentrações mais elevadas, o que pode ser devido a criação de uma nova espécie. Este trabalho se absteve em aprofundar as interferências no espectro uma vez que o objetivo não é a análise espectral em si, e sim a comparação da curva analítica obtida com os valores do pico de cada analito e solução com a ADI.

Para a solução binária contendo os corantes AU e VC (Figura 27c), observa-se que o espectrofotômetro tende a adotar um comportamento semelhante às curvas do corante AU, resultando em picos mais arredondados, com uma tendência à maximização em comprimentos de onda próximos a 424,5 nm. Na faixa de comprimento de onda de 500 a 600 nm, é observado um aumento na absorbância das curvas em relação às curvas do corante VC. Embora o corante AU não aparente possuir alguma curvatura significativa nessa faixa, ao ampliar os valores, é possível notar uma pequena ondulação, que contribui para o aumento da absorbância quando presente na mistura. Em concentrações muito pequenas, como $0,0006 \text{ g. L}^{-1}$, o espectrofotômetro não é capaz de diferenciar os compostos da solução, mas ao aumentar a concentração, a distância entre as curvas torna-se cada vez mais nítida, sendo possível identificar as interferências causadas por cada corante.

Para a Figura 27d, a solução binária entre os corantes VC e VM apresenta grande influência de ambos corantes no meio. Para o pico de 617,5 nm, é possível observar que a interferência do corante VC torna a curva da solução mais abaulada e menor, em relação ao corante VM. O contrário ocorre em 336,5 nm, onde a absorbância da solução é maior que para o corante VC, devido à interferência de um pequeno pico da região não visível do corante VM. Exceto na concentração de 0,0006 g. L⁻¹, a solução apresenta picos bem visíveis que decrescem conforme diminui-se o comprimento de onda.

Figura 27 – (a) Espectros (método espectrofotométrico) dos corantes AU, VC e VM com concentrações [g. L⁻¹] de 0,0006; 0,006; 0,012; 0,018; e 0,0240. Espectro (método espectrofotométrico) dos corantes: (b) AU e VM e a solução binária entre eles; (c) AU e VC e a solução binária entre eles; (d) VC e VM e a solução binária entre eles.



4.5. Análise RGB

4.5.1. Estudo da área A e normalização dos pixels dos corantes puros

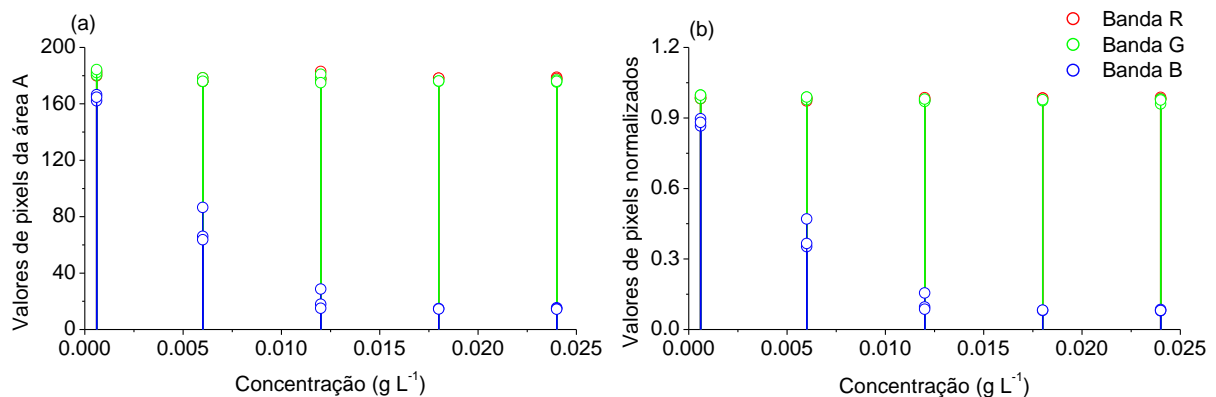
O estudo da área A, ou seja, a área de recorte do branco (fundo da caixa de luz/ambiente de controle), visa entender o comportamento dos corantes quando se extrai os valores RGB das amostras. Para obter uma maior linearidade nos resultados, todos os valores de pixels obtidos para a área A foram normalizados em relação à uma região branca recortada do fundo do

ambiente de controle. Esse procedimento foi realizado para minimizar os impactos causados por variações de brilho durante o estudo.

4.5.1.1. Corante Auramina (AU)

Para o corante AU, observou-se que as bandas R e G apresentaram maior distinção em relação à banda B e, esta apresentou tendência a saturar em valores próximos a 0, como apresentado na Figura 28.

Figura 28 - (a) Valores de pixels das bandas R, G e B para o corante AU retirados da área A e (b) valores de pixel normalizados



Os dados apresentam melhor adequação na normalização dos dados, que no estudo da área A. A banda R apresenta melhor linearidade entre as concentrações, continuando a ser predominantes para o corante AU, juntamente com a banda G. A banda B continua com valor alto na primeira concentração ($0,0006 \text{ g. L}^{-1}$), mas decresce de intensidade conforme o teor de corante aumenta, demonstrando relação negativa com o corante e sua concentração. Mesmo com a normalização, os valores de R e G permanecem similares, sobrepondo-se durante o experimento. Considerando a mudança nas bandas após a normalização, a banda B apresenta menor predominância para o corante AU, o que pode ser um indicativo de pouca representação do corante na análise RGB.

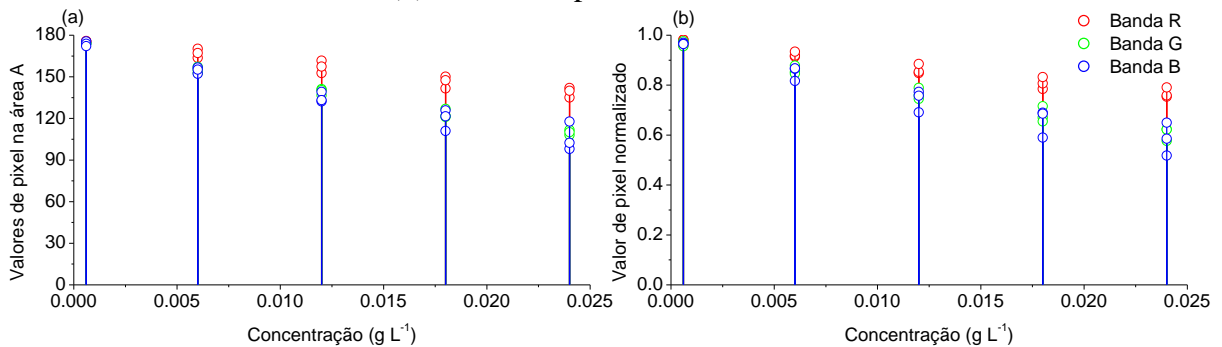
Considerando que o corante AU possui uma tonalidade visual amarela, sendo uma cor secundária resultante da combinação de vermelho e verde, é esperado que as bandas dominantes apresentem valores muito próximos, corroborando a análise realizada.

4.5.1.2. Corante Vermelho Congo (VC)

Conforme discutido previamente, o corante VC demonstra sensibilidade à variação de pH, evidenciada pela alteração de sua tonalidade. Em ambientes com pH superiores a 5,0, seria esperado que os valores da banda R da amostra, quando não normalizados, se sobreponham no

gráfico. No entanto, devido à manutenção do pH constante em 5,0, observa-se uma tendência do corante VC em adquirir uma coloração com nuances azuis. Ao analisar os resultados obtidos pelo método em questão, é notável que a banda B exibe o valor mais elevado em comparação com as demais bandas, porém essa intensidade diminui à medida que a concentração no meio aumenta, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - (a) Valores de pixels das bandas R, G e B para o corante VC retirados da área A e (b) valores de pixel normalizados.

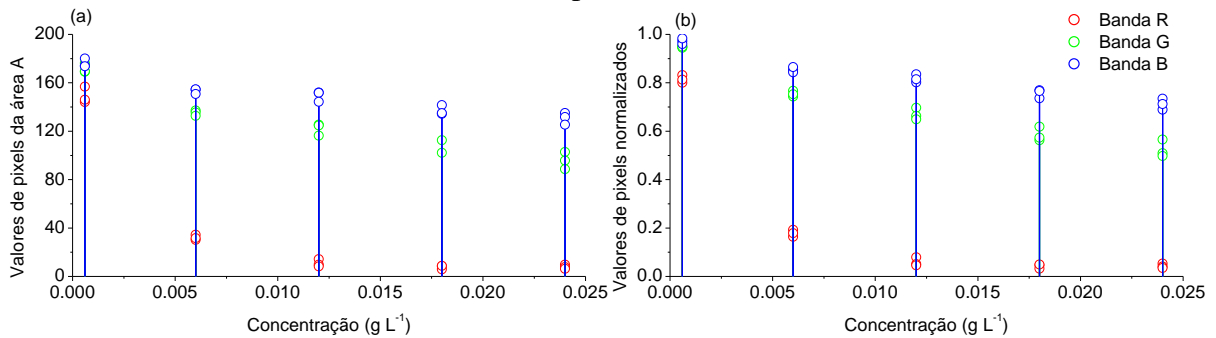


Com a normalização (Figura 29b), as triplicatas das amostras do corante VC distanciam-se ligeiramente, o que leva ao pequeno distanciamento das bandas G e B. A diminuição na intensidade da banda B é mais significativa do que na banda R. À medida que a concentração aumenta, a banda R se torna predominante, exibindo os valores mais elevados entre as bandas observadas. Portanto, em concentrações maiores, observa-se o aumento da saturação da cor da amostra do corante.

4.5.1.3. Corante Verde Malaquita (VM)

Para o corante VM, destaca-se a banda B, que exibe maiores diferenças em relação às bandas R, entretanto, a banda G possui valores próximos à B, como exibido na Figura 30. Observa-se um declínio levemente acentuado na banda G à medida que a concentração aumenta.

Figura 30 - (a) Valores de pixels das bandas R, G e B para o corante VM retirados da área A e (b) valores de pixel normalizados.



Com a normalização dos dados, permitindo que os valores sejam ajustados, visando a redução de erros de luminosidade, os valores das triplicatas aproximaram-se, tornando os dados mais lineares. A banda B continuou a ser a de maior intensidade, seguida da banda G. O comportamento de R e G tende a ser linear, com inclinação negativa, enquanto R apresenta certa curvatura nas primeiras concentrações, tornando-se constante acima de 0,018 g. L⁻¹.

Como era esperado visualmente, a banda dominante para os dados não normalizados é a B.

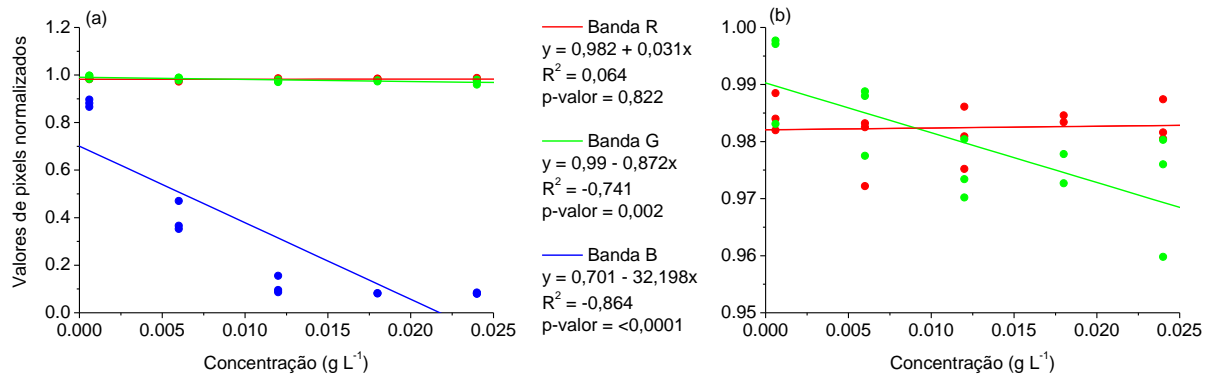
4.5.2. Análise linear

Com o objetivo de obter um modelo que melhor representasse cada corante e suas respectivas misturas e uma vez que a absorvância espectral comumente retratada por curvas lineares, os dados normalizados e a absorvância RGB foram tratados, através de regressão linear, a fim de realizar a comparação com o método alternativo e o padrão. Para cada banda e sua respectiva curva, buscou-se a melhor representação dos dados, sendo analisado seus coeficientes de angulação e linearidade.

4.5.2.1. Corante Auramina (AU)

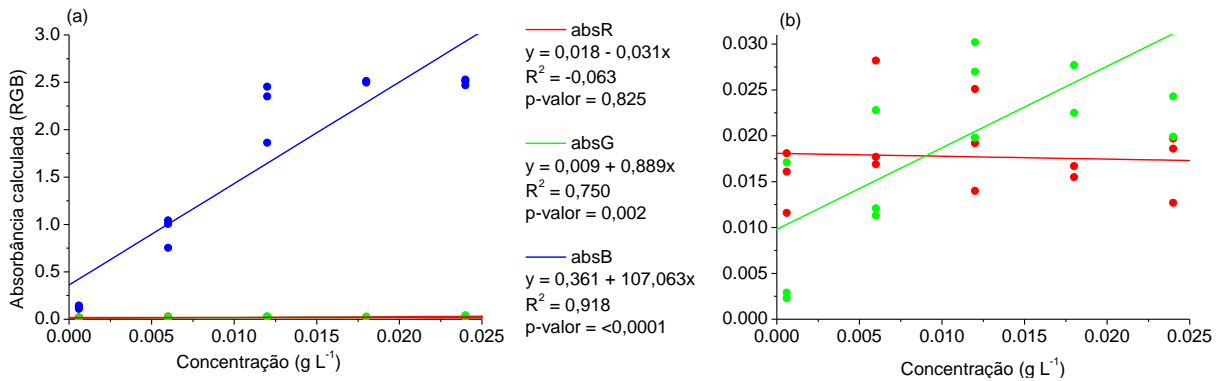
Realizando a curva dos dados obtidos com a normalização dos pixels para o corante AU, observa-se que as bandas B e G apresentaram correlações negativas para modelo de regressão linear, como pode ser observado na Figura 31. Apesar da banda R apresentar-se aparentemente linear, ao aproximar os valores é observado que esta apresenta baixa linearidade, como também pode ser notado pelo baixo coeficiente de determinação (0,064) e pelo alto p-valor (0,822). Ao aproximar os valores no gráfico, observa-se a causa da baixa linearidade. A alta dispersão dos valores obtidos nas triplicatas para R e G demonstram baixa adequação ao modelo, onde esta variabilidade torna-se inadequada para comparação com o método espectrofotométrico.

Figura 31 - Modelos criados a partir dos valores de pixel normalizados para o corante AU.(a) Representação de todas as bandas (R, G e B). (b) Ampliação do comportamento dos pontos das curvas R e G.



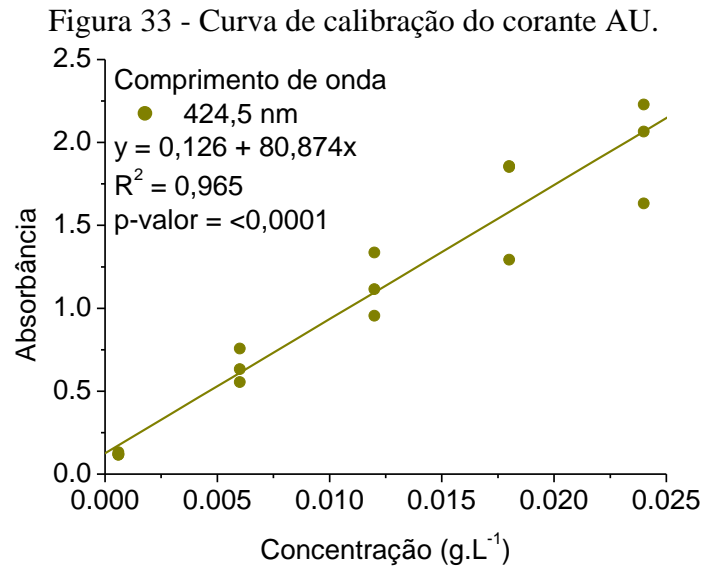
Visando verificar outras possibilidades de análises para a comparação com o método espectrofotométrico, gerou-se curvas para os valores de absorbância RGB calculados na ADI, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Modelos criados a partir dos valores de absorbância calculada para o corante AU, onde absR é a absorbância em relação à banda R; absG é a absorbância em relação à banda G e; absB é a absorbância em relação à banda B (a) Representação de todas as absorbâncias calculadas (absR, absG e absB). (b) Ampliação do comportamento dos pontos das curvas R e G.



No caso da banda R, assim como apresentado na Figura 31, os valores apresentam grande dispersão, baixa correlação e confiança para a aplicação em modelo linear. A banda G apresentou inversão de inclinação, tornando-se positiva, apesar de continuar a apresentar uma variabilidade significativa dos pontos. A banda B apresentou maior nível de confiança entre as demais, com coeficiente de determinação de 0,918.

Ao comparar as Figuras 31 e 32 com a curva de calibração gerada para o corante AU (Figura 22), a absorbância calculada RGB torna-se a curva principal para comparação entre os métodos estudados, uma vez que seus resultados apresentam maior semelhança com os dados espectrofotométricos, ou seja, a curvatura e angulação das curvas da Figura 32 apresenta maior compatibilidade com as apresentadas na Figura 33.



Observando o padrão de inclinação do espectro (método espectrofotométrico), observa-se que este se aproxima do padrão da banda B, levando a possibilidade de que esta banda seja a mais representativa para este corante na análise RGB. Para que seja afirmado tal comparação, é necessário observar os parâmetros analíticos de cada uma das curvas (métodos ADI e espectrofotométrico). A Tabela 10 apresenta a comparação entre os resultados obtidos na análise RGB e o método espectrofotométrico.

Tabela 10 - Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras do corante AU.

Método	Valores normalizados			Absorbância RGB			Absorbância espectral
	R	G	B	R	G	B	424,5 nm
Intercepto	0,982	0,99	0,701	0,018	0,009	0,361	0,126
Coefficiente Angular	0,031	-0,872	-32,198	-0,031	0,889	107,063	80,874
Coefficiente de correlação	0,064	-0,741	-0,865	-0,063	0,740	0,918	0,965
R^2	0,0043	0,549	0,746	0,0044	0,549	0,842	0,923
R^2 (adj)	0	0,515	0,726	0	0,514	0,830	0,970
p-valor	0,822	0,002	<0,0001	0,825	0,002	<0,0001	<0,0001
LOQ ¹	289,78	-	-	-	0,769	0,366	0,244
LOD ²	5,686	-	-	-	0,037	0,017	0,012

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

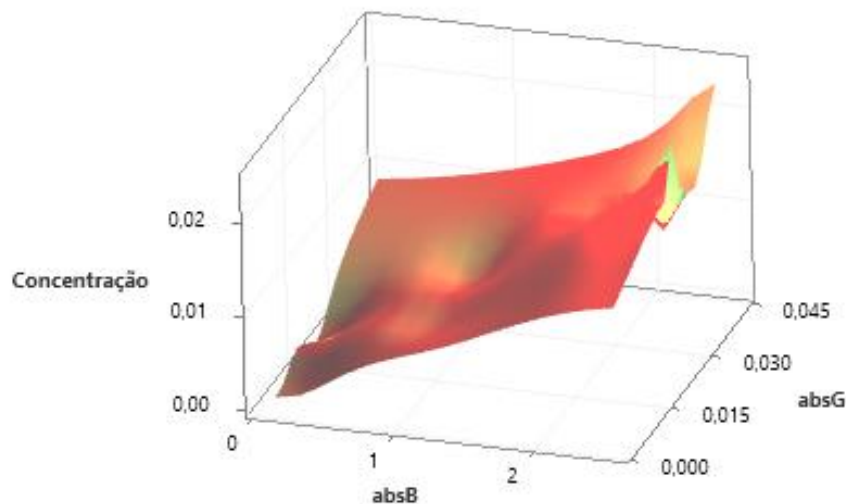
O limite de quantificação (LOQ) de 0,366 representa a menor absorbância calculada que a banda B consegue medir com precisão e exatidão, ou seja, a banda B possui seu limite inferior de identificação da concentração do corante AU em $4,67 \cdot 10^{-5}$ g. L⁻¹, sendo esse valor aproximadamente 12 vezes menor que a concentração mínima estudada (0,0006 g. L⁻¹). Apesar

de ser menor que o LOQ obtido no espectrofotômetro, representa a capacidade da ADI em identificar precisamente concentrações ínfimas do corante AU.

Já o limite de detecção (LOD) para esta mesma banda (B) é de 0,017, mostrando que este é menor valor de absorvância que pode ser detectado com 0,95 de confiança. Mesmo com diferença de 0,005 unidades com a absorvância espectral, a banda G possui boa sensibilidade. Na ADI, é necessário que a sensibilidade seja prioritária em relação a precisão, portanto, para o corante AU, a banda G apresenta resultados promissores.

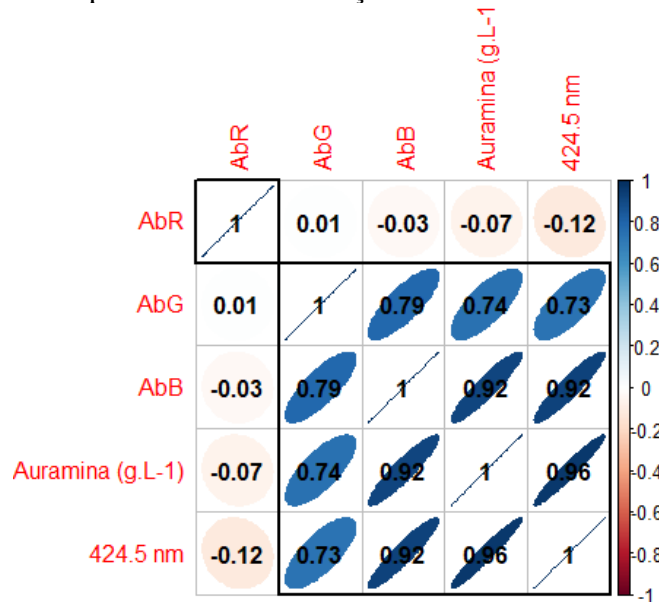
Como pode ser observado na superfície de resposta (Figura 34), a absorvância calculada para a banda B apresenta-se valores maiores do que a banda G, e também maior correlação com o aumento da concentração das amostras.

Figura 34 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas para o corante AU.



O apresentado no gráfico da superfície de resposta pode ser representado numericamente no gráfico de correlação, exibido na Figura 35. Nesse gráfico, os eixos x e y são representados pelas mesmas variáveis, ou seja, a absorvância das bandas R, G e B, a absorvância obtida no espectrofotômetro no comprimento de onda 424,5 nm e a concentração do corante AU, medida em g. L^{-1} . A correlação pode ser avaliada comparando os dois eixos, ou seja, comparando uma variável com outra. À medida que a correlação entre as variáveis aumenta, a cor azul fica mais forte, até atingir a correlação ideal igual a 1. Já a relação inversa é demonstrada pelo aumento da coloração vermelha no gráfico.

Figura 35 - Gráfico de correlação entre os valores da absorbância RGB e absorbância espectral e a concentração do o corante AU.

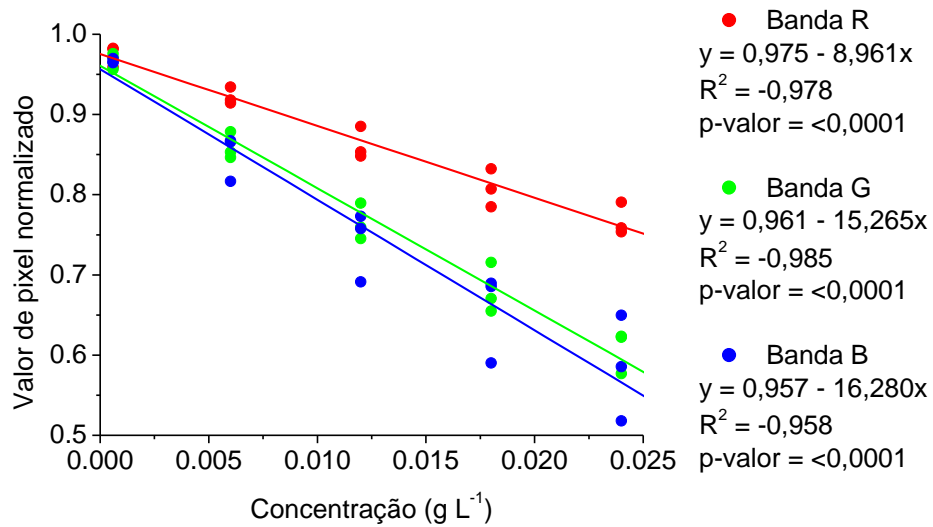


A banda B apresenta correlação de 0,92 com a concentração do corante AU, enquanto a banda R apresenta correlação negativa, com valor de -0,07, e a banda G apresenta correlação de 0,74. Portanto, pode-se constatar que para o corante AU, considerando a comparação entre os métodos estudados, a banda B possui maior relevância e relação com a concentração do corante.

4.5.2.2. Corante Vermelho Congo (VC)

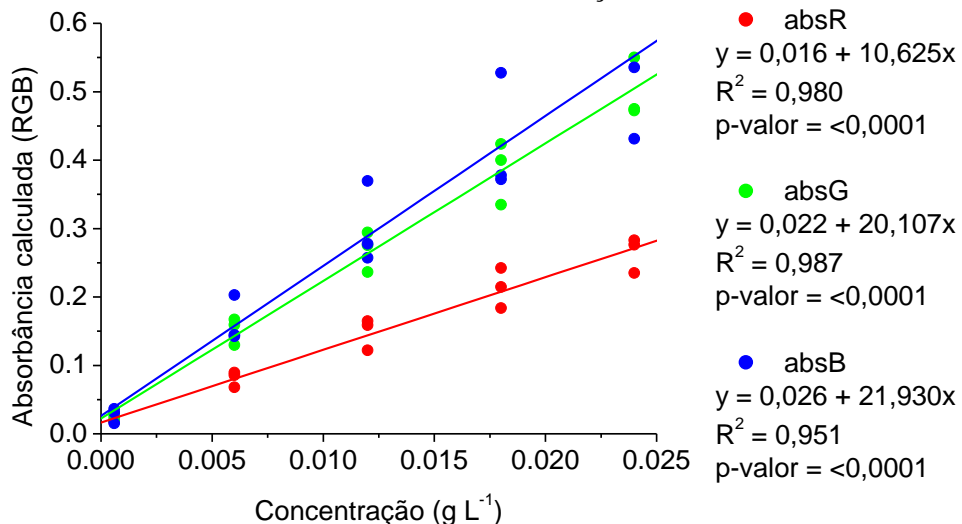
Ao construir as curvas dos dados normalizados RGB para o corante VC, observado na Figura 36, todas as bandas apresentam relação negativa com a concentração, e, apesar do resultado, a análise de hipóteses demonstra que há bom ajuste linear (maior que 0,95) dos dados de todas as variáveis. Considerando que no método espectrofotométrico as curvas de calibração com inclinação negativa podem levar a interpretação de limitação do método ou mesmo de erros de medição, os dados normalizados demonstram pouca efetividade nos resultados da análise RGB para esse corante, assim como ocorreu para o corante AU, visto anteriormente.

Figura 36 - Modelos criados a partir dos valores de pixel normalizados para o corante VC.



Portanto, curvas RGB para a absorvância do método foram geradas visando a comparação entre as duas metodologias, podendo serem observadas na Figura 37. Nota-se que todas as bandas agora apresentam inclinação positiva, indicando correlação direta com o aumento da concentração. Ressalta-se que o coeficiente de determinação de todas as bandas é maior que 0,95. As bandas G e B apresentam verossimilhança, com ligeira diferença de inclinação.

Figura 37 - Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada para o corante VC, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B



A curva de calibração obtida no espectrofotômetro, conforme ilustrado na Figura 38, exibe semelhança com a curva de absG (absorvância em relação à banda G), sugerindo que esta banda possa representar o corante. A Tabela 11 apresenta os dados obtidos nas análises de regressão, bem com os limites de detecção e quantificação das amostras.

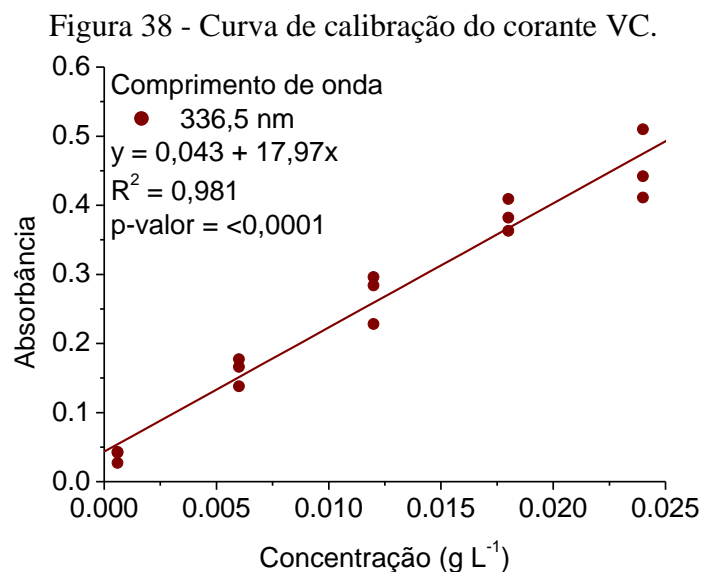


Tabela 11 - Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras do corante VC.

Método	Valores normalizados			Absorbância RGB			Absorbância espectral
	R	G	B	R	G	B	336,5 nm
Intercepto	0,975	0,961	0,957	0,016	0,022	0,026	0,043
Coefficiente Angular	-8,961	-15,265	-16,280	10,625	20,107	21,930	17,97
Coefficiente de correlação	-0,978	-0,985	-0,958	0,980	0,987	0,951	0,981
R^2	0,957	0,97	0,919	0,961	0,974	0,905	0,962
R^2 (adj)	0,954	0,968	0,912	0,958	0,972	0,898	0,958
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
LOQ ¹	-	-	-	0,17	0,139	0,274	0,169
LOD ²	-	-	-	0,008	0,007	0,013	0,008

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

A absR apresenta LOD em valor igual ao método padrão, mostrando que ambos apresentam a mesma sensibilidade. Já absG possui valor menor que o obtido no espectrofotômetro, mostrando que para essa banda, a ADI é mais sensível e capaz de detectar concentrações mais baixas do analito. Já o LOQ da banda R é ligeiramente maior que o LOQ, levando a uma pequena perda de precisão e exatidão. Mas, absG possui LOQ menor (0,139) que a análise espectral do equipamento tradicional (0,169), mostrando novamente que a banda G é mais sensível e mais precisa para detectar pequenas quantidades do corante VC em meio aquoso.

Para criar uma superfície de resposta para o corante VC, foram selecionadas as bandas R e G, visto que a banda B apresenta a maior discrepância com o método espectrofotométrico,

embora mínima. Como demonstrado na Figura 39, a absorvância calculada em ambas as bandas (R e G) mostra uma boa relação com o aumento da concentração do corante. A banda R exibe uma correlação de 0,98 com a concentração, enquanto a banda G apresenta um valor de 0,99, conforme evidenciado no gráfico de correlação (Figura 40).

Figura 39 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas para o corante VC.

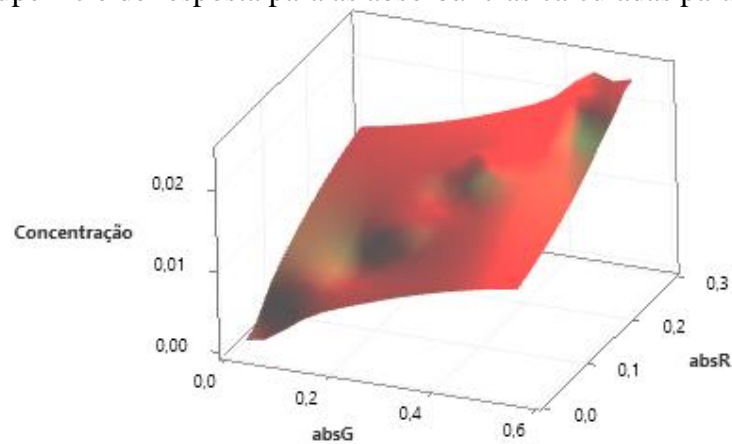
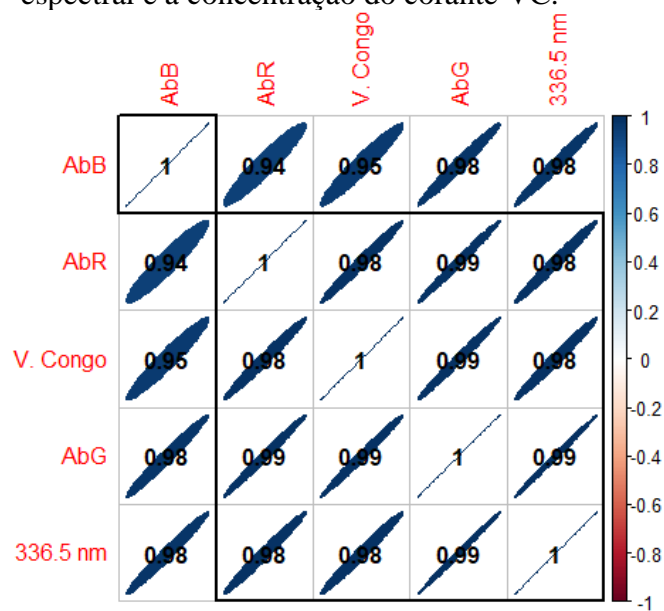


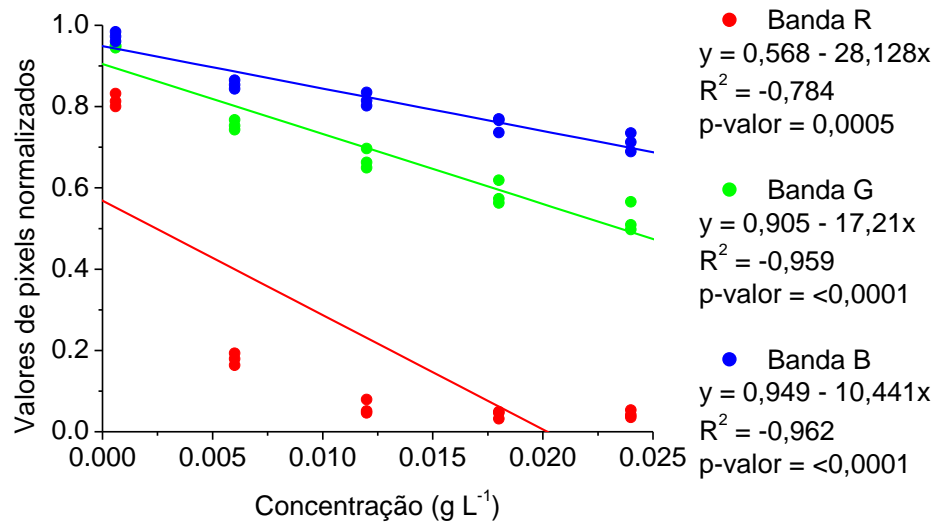
Figura 40 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e absorvância espectral e a concentração do corante VC.



4.5.2.3. Corante Verde Malaquita (VM)

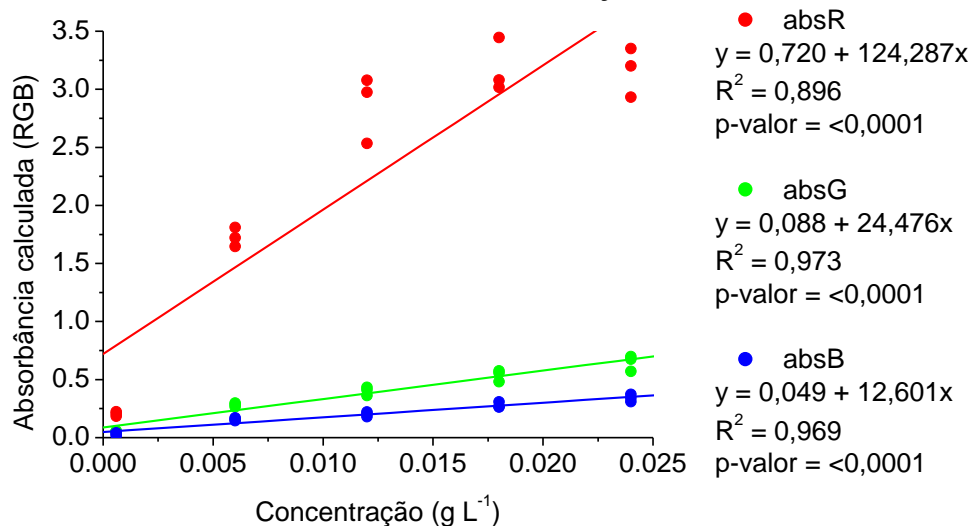
Assim como no corante VC, os dados normalizados do corante VM também apresentaram inclinação negativa (Figura 41), mas também demonstram correlação entre as variáveis através do teste de hipóteses.

Figura 41 - Modelos criados a partir dos valores de pixel normalizados para o corante VM.

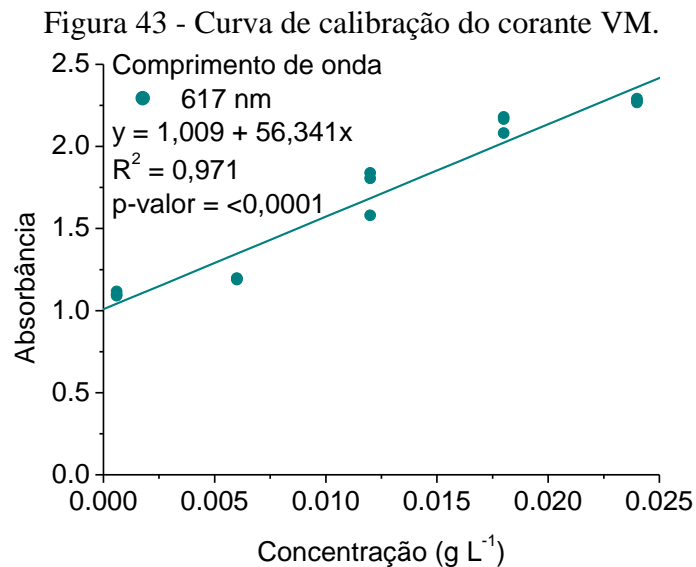


Ao examinar os valores da absorvância calculada para o corante VM, é perceptível um desempenho superior nas bandas G e B, conforme representado na Figura 42. No modelo, a banda G exibiu o coeficiente de determinação mais elevado, com um valor de 0,973, seguido pela banda B com 0,969. Em contraste, a banda R demonstrou menor representatividade, indicando que sua absorvância calculada pode não ser tão significativa em comparação com as outras.

Figura 42 - Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada para o corante VM, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B



O corante VM exibe dois picos em comprimentos de onda. No entanto, a curva de calibração foi estabelecida apenas em relação ao seu pico principal, localizado em 617,5 nm, conforme ilustrado na Figura 43. Os valores obtidos do espectrofotômetro e da banda G demonstram a maior semelhança, indicando uma boa seletividade dos dados.



A Tabela 12 demonstra que, para os valores obtidos para o coeficiente de determinação das curvas, as bandas G e B apresentam valores de R^2 maiores que os obtidos na absorbância espectral. Os valores de 0,913 e 0,919 respectivamente para as bandas G e B comparado com o valor de 0,612 obtido no espectrofotômetro indica que a análise ADI representa melhor o modelo linear que o método espectrofotométrico, proporcionando uma análise mais confiável.

Tabela 12 - Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras do corante VM.

Método	Valores normalizados			Absorbância RGB			Absorbância espectral
	R	G	B	R	G	B	617,5 nm
Intercepto	0,568	0,905	0,949	0,720	0,088	0,049	1,009
Coefficiente Angular	-28,128	-17,21	-10,441	124,287	24,476	12,601	56,341
Coefficiente de correlação	-0,784	-0,959	-0,962	0,896	0,973	0,969	0,971
R^2	0,615	0,919	0,925	0,803	0,946	0,939	0,644
R^2 (adj)	0,585	0,913	0,919	0,788	0,942	0,934	0,612
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
LOQ ¹	-	-	-	0,418	0,201	0,216	0,630
LOD ²	-	-	-	0,020	0,001	0,010	0,030

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Os limites de quantificação para todas as absorbâncias calculadas (R, G e B) possuem valores significativamente menores que o métodos espectrofotométrico, mostrando que para o corante VM, dentro do intervalo de concentrações estudadas, a ADI é mais precisa e exata que o método tradicional. Isso também pode ser percebido na sensibilidade de ambas análises, onde

a ADI é mais sensível para concentrações pequenas do corante que o espectrofotômetro, principalmente a banda G, que possui os menores valores de LOD e LOQ.

A análise da superfície de resposta, conforme apresentada na Figura 44, revela que a banda G exerce uma influência maior nas concentrações do corante VM do que o banda B, o que sustenta sua predominância no meio. No entanto, a Figura 45 indica que tanto a banda G quanto à banda B exibem a mesma correlação com a concentração do corante, com um valor de 0,97. Por outro lado, a banda R demonstra uma correlação menos significativa em comparação com outras observadas neste estudo, com um valor de 0,68.

Figura 44 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas para o corante VM.

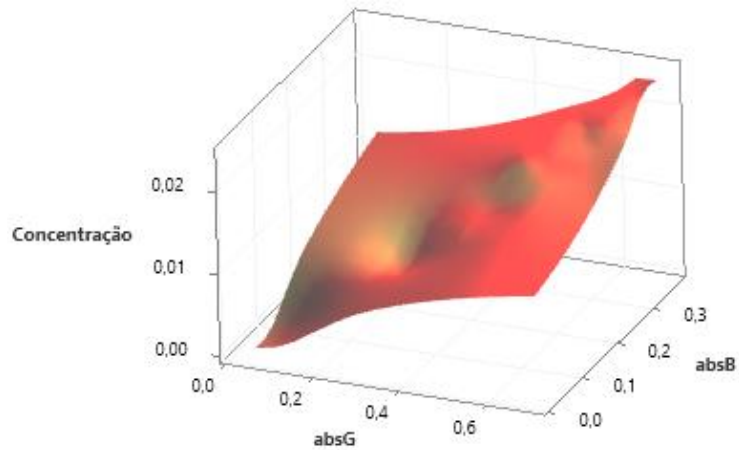
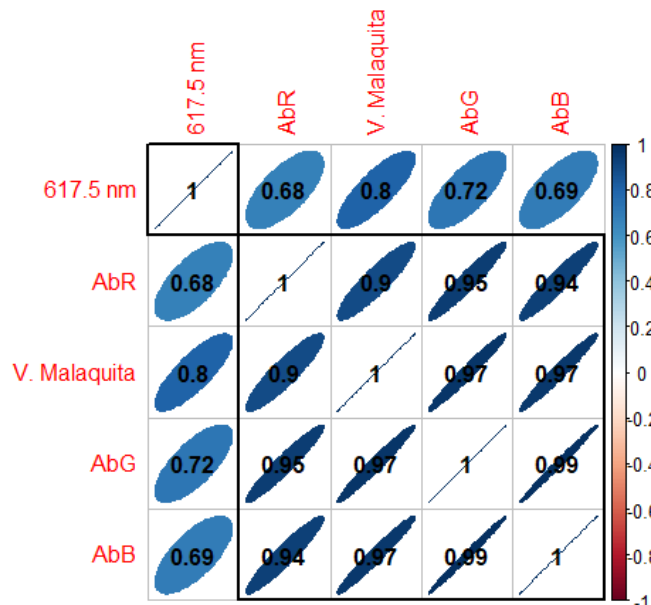


Figura 45 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e absorvância espectral e a concentração do corante VM.



Considerando que o corante AU demonstrou uma melhor representatividade dos valores com a banda B, o corante VC com as bandas R e G, e VM com as bandas G e B, para fins de separação de bandas para cada corante, será adotado o seguinte: o corante AU poderá ser representado pela banda B; VC poderá ser representado pelas bandas R e G, e VM poderá ser representado pelas bandas G e B. A Tabela 13 resume os resultados e a determinação de cada banda e corante. Assim será possível realizar uma análise de soluções binárias semelhante à separação feita pelo método espectrofotométrico, o que pode otimizar a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Tabela 13 – Bandas do método RGB representativas de cada corante, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorbância e a concentrações.

Banda	Corantes		
	AU	VC	VM
	Correlação entre absorbância e concentração		
R	-0,07	0,98	0,90
G	0,74	0,99	0,97
B	0,92	0,95	0,97
Espectro	0,96	0,98	0,8

4.5.2.4. Análise da solução binária com os corantes Vermelho Malaquita (VM) e Auramina (AU)

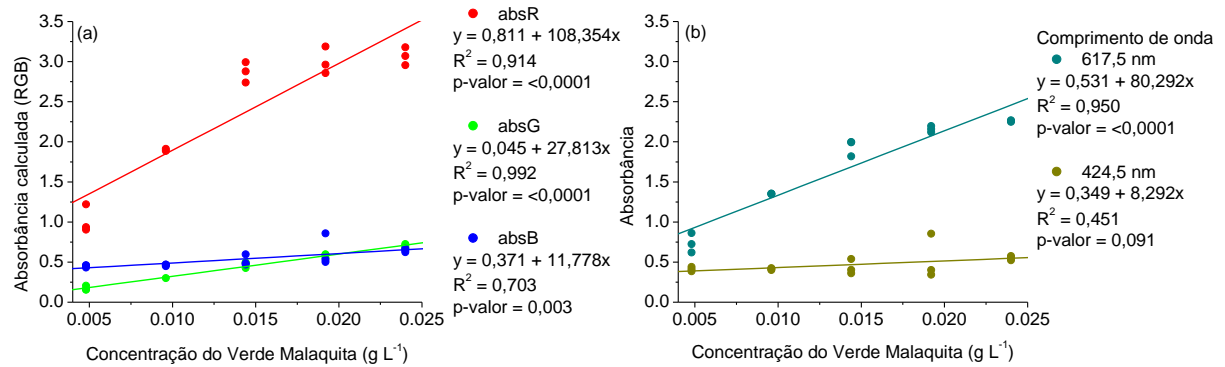
As Figuras 46-50 apresentam os resultados obtidos com as soluções binárias onde foi mantido o corante AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,00480; 0,0096; 0,0144; 0,0192; ou 0,0240) e o corante VM variável, com concentrações [g. L⁻¹] de 0,0048; 0,0096; 0,0144; 0,0192 e 0,0240.

A primeira combinação (Figura 46a) da mistura apresenta coeficiente de correlação significativo para a banda G, com um valor 0,992. Como esta banda é a predominante no corante VM, a sua presença em maior quantidade na mistura é esperada. À medida que a concentração do corante VM aumenta no meio, o valor da absorbância na banda G também tende a aumentar. Por outro lado, a linha B apresenta correlação regular, com pequena inclinação mas boa correlação dos dados na regressão linear.

Ao comparar a banda selecionada com os dados obtidos no espectrofotômetro (Figura 46b), é evidente que a presença do corante VM tem uma influência significativa no meio para essa combinação, apresentando maior sensibilidade ao método (inclinação). A análise espectral revela um nível de confiança menor no comprimento de onda do corante AU, comportamento

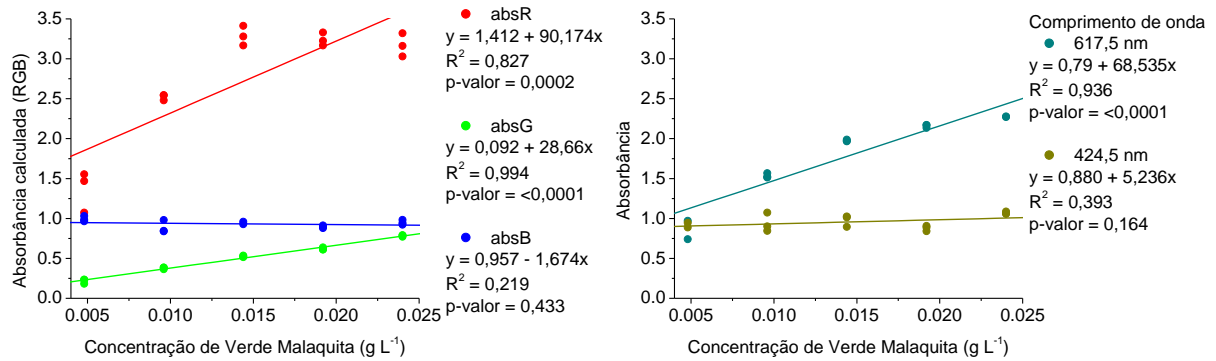
que também pode ser observado na banda B. Isso pode ser devido à baixa concentração deste corante no meio.

Figura 46 - Solução binária para os corantes VM com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,0048). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



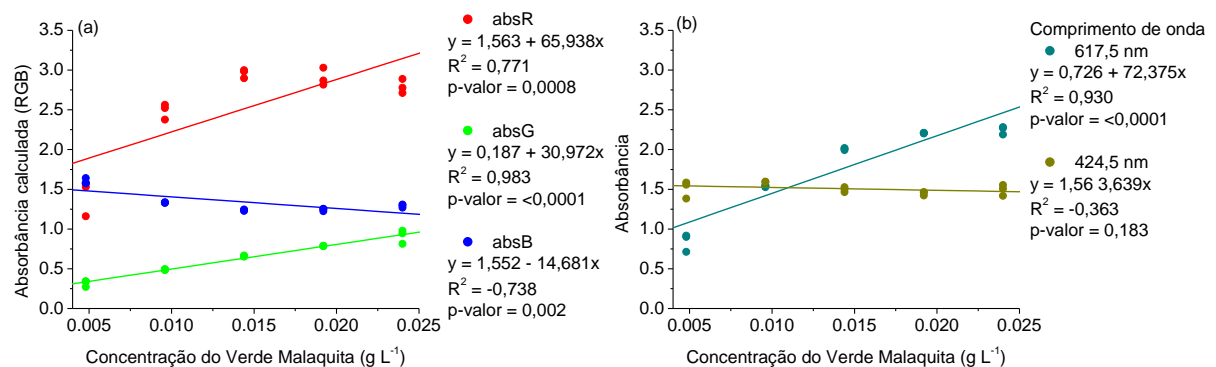
Ao aumentar a concentração do corante AU em $0,0048 g \cdot L^{-1}$, passando para $0,0096 g \cdot L^{-1}$, a confiança na banda B aumenta significativamente (Figura 47a). A discrepância de valores entre as bandas B e G aumenta, à medida que a concentração do corante AU aumenta no meio. A banda G tende a ser constante na faixa de absorvância calculada entre 0 e 1,0. Isso indica que esta banda pode estar relacionada ao corante VM, uma vez que a concentração dele é a mesma em todas as bateladas. A banda B inverte sua inclinação, tomando valores negativos em relação à concentração de VM, o que também pode ser observado na curva de calibração, no comprimento de 424,5 nm (Figura 47b). No espectrofotômetro, o comprimento de onda de VM se sobressai, uma vez que apresenta concentração maior do que a do corante AU.

Figura 47 - Solução binária com os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0096). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



Na terceira batelada, é observado que a banda B apresenta inclinação negativa com a concentração de AU em 0,0096 g. L⁻¹ (Figura 48a). A banda G continua apresentando ótima correlação e nível de confiança. Os dados obtidos do espectrofotômetro, mostrados na Figura 48b, revelam que a concentração do corante VM se aproxima da concentração do corante AU e, onde para as primeiras concentrações, o pico do comprimento de onda de 424,5 nm (corante AU) apresenta valor maior que o pico de 617,5 nm (corante VM).

Figura 48 - Solução binária com os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0144 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

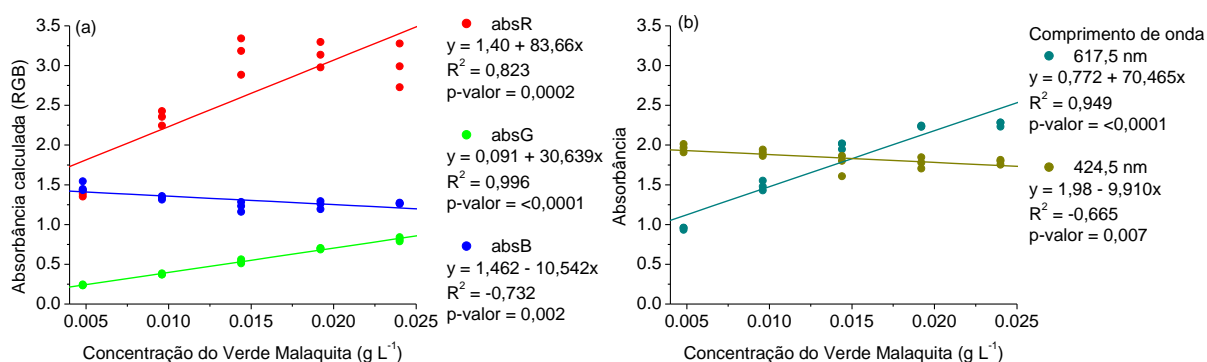


Para a concentração de 0,0192 g. L⁻¹ de AU, as bandas B e G apresentam valores cada vez mais distantes, com a banda G permanecendo constante, com valores de 0 a 1, e a banda B ainda apresenta correlação negativa com a concentração (Figura 49a). Em comparação com a concentração de AU anterior, a curva B apresentou pouca diferenciação de valores. A análise espectral, apresentada na Figura 49b, revela que a solução possui uma concentração

predominante do corante AU, e a partir da concentração de $0,0144 \text{ g. L}^{-1}$, o corante VM apresenta valores mais elevados. Por ser uma cor mais forte, é esperado que a curva do corante VM se sobreponha ao do corante AU, mesmo que o último apresenta concentrações mais elevadas, conforme observado na Figura 49b.

Figura 49 - Solução binária com os corantes VM com concentração $[\text{g. L}^{-1}]$ variável ($0,0048$ a $0,024$) e AU com concentração $[\text{g. L}^{-1}]$ constante ($0,0192 \text{ g. L}^{-1}$). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b)

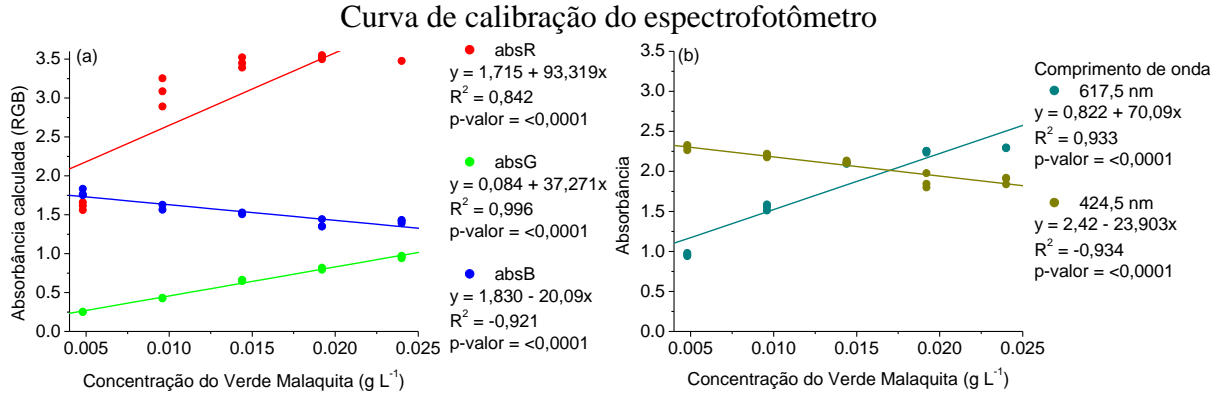
Curva de calibração do espectrofotômetro.



No último modelo da mistura, a banda B apresenta aumento aproximado de 0,308 unidades na concentração de $0,0048 \text{ g. L}^{-1}$ do corante VM e 0,269 unidades na concentração de $0,0096 \text{ g. L}^{-1}$ do corante VM, o que leva ao aumento da inclinação negativa da curva, e portanto, ao aumento da sensibilidade do método, como mostrado na Figura 50a. A mudança de valores pode estar relacionada ao aumento de $0,0048 \text{ g. L}^{-1}$ da concentração do corante AU. A banda G continua estável, sem apresentar grandes mudanças, o que pode indicar que a escolha desta como representação do corante VM é ideal.

Ao analisar os dados do espectrofotômetro, apresentado na Figura 50b, o comprimento de onda de $424,5 \text{ nm}$ possui valores maiores até aproximadamente $0,0170 \text{ g. L}^{-1}$, quando os valores de $617,5 \text{ nm}$ se sobressaem. O pico relacionado ao corante AU continua com inclinação negativa e o pico de $617,5 \text{ nm}$ mantém seus valores constantes, com ligeiras variações de absorvância em todas as bateladas realizadas.

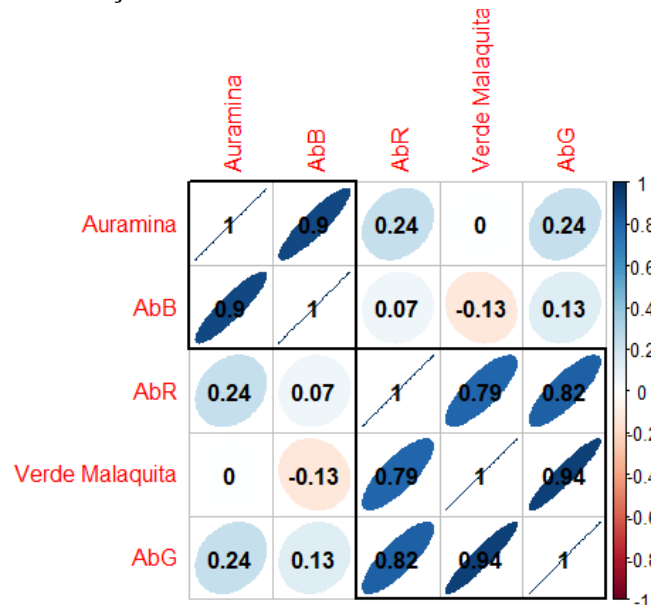
Figura 50 - Solução binária com os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0244 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b)



Ao examinar as curvas das absorvâncias RGB calculadas para a solução binária em questão, é evidente que para a banda B, à medida que a concentração do corante AU no meio aumenta, a inclinação da curva se torna negativa, resultando em uma relação inversa com a concentração do corante VM. Como observado anteriormente, para os corantes puros, a banda B apresenta uma forte correlação com o corante AU e, no estudo de soluções binárias, essa relação também pode ser considerada verdadeira.

A banda G permanece constante em todos os gráficos, evidenciando uma tendência para representar o corante VM, como também foi observado no estudo do corante puro. A Figura 51 exibe o gráfico de correlação entre os métodos espectrofotométrico. Para os corantes puros, as bandas R, G e B foram claramente associadas aos corantes VC, VM e AU, respectivamente.

Figura 51 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e da concentração da solução binária entre os corantes AU e VM.

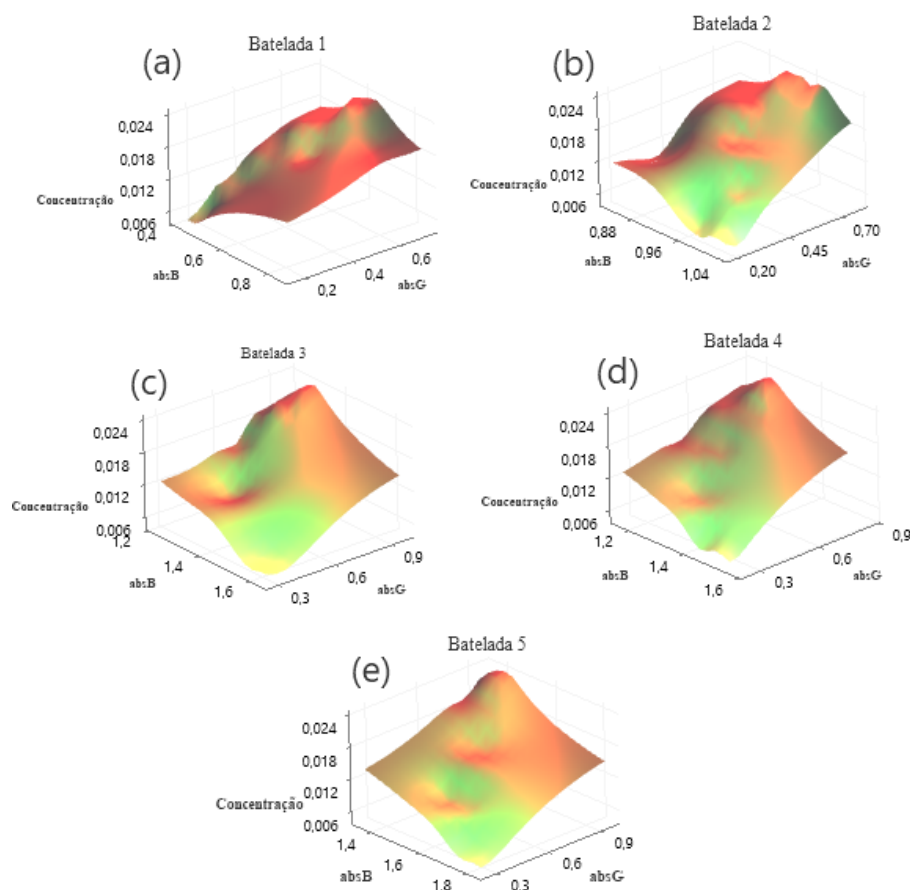


Para o corante VM, a banda R apresenta correlação regular, mas ainda sim promissora, com valor de 0,79. Já a banda B apresenta correlação negativa, mostrando que ao aumentar a concentração do corante VM, o valor da banda B tende a diminuir, o que sugere que este não representa adequadamente o corante em questão. No entanto, para a banda G, observa-se que esta apresenta uma boa relação com o corante, indicando uma resposta diretamente ligada ao aumento da concentração. Assim, ao considerar que o corante VM pode ser melhor representado pela banda G, observa-se uma boa correlação com o método espectrofotométrico.

Já para o corante AU, a banda B demonstra bons resultados, alcançando uma correlação de 0,9, indicando uma forte relação. Por outro lado, as demais bandas apresentam resultados baixos, com correlação de 0,24 para as bandas G e R, respectivamente, não sendo relevantes para a correlação com o corante AU. Portanto, como antecipado anteriormente, a banda B emerge como representativa do corante AU.

O comportamento das curvas, podem ser visualizados nas superfícies de respostas apresentadas na Figura 52, que corrobora com os resultados discutidos anteriormente.

Figura 52 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas (RGB) para a solução binária com corante VM de concentração variável (0,0048 a 0,024 g. L⁻¹) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante a: (a) 0,0048; (b) 0,0096; (c) 0,0144; (d) 0,092 e (e) 0,024.



A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos na solução binária com os corantes AU e VM, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 14: Bandas do método RGB representativas dos corantes AU e VM e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorvância e a concentrações.

	Corantes puros		Solução binária	
	AU	VM	AU	VM
Banda	Correlação entre absorvância e concentração			
R	-0,07	0,90	0,24	0,79
G	0,74	0,97	0,24	0,94
B	0,92	0,97	0,9	-0,13

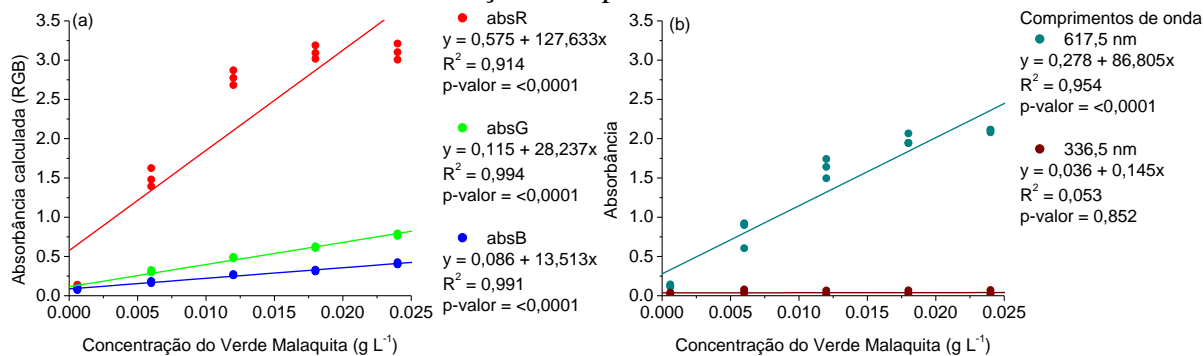
Com a finalidade de confirmar as premissas propostas, foram realizados testes com um terceiro corante, o VC, a fim de observar o comportamento dos corantes VM e AU na análise de imagens.

4.5.2.5. Análise da solução binária com os corantes Verde Malaquita (VM) e Vermelho Congo (VC)

A apresentação dos dados obtidos para as misturas dos corantes VM e VC é exibida nas Figuras 53-57, onde, de forma similar à solução anterior, as curvas RGB foram comparadas com o modelo do espectrofotômetro.

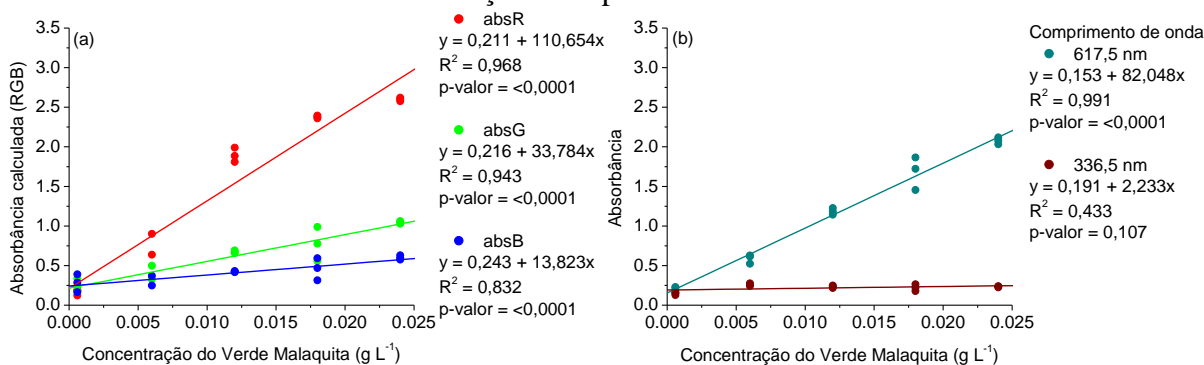
Na primeira batelada, com concentração fixa do corante VC em $0,0006 \text{ g. L}^{-1}$, a banda R demonstra um coeficiente de determinação de 0,914. Contudo, observa-se uma tendência para uma curvatura característica de um modelo quadrático nos pontos (Figura 53a). Essa característica também é observada na curva de calibração do comprimento de onda de 617,5 nm (Figura 53b), correspondente ao corante VM. No entanto, não é possível ainda relacionar este comprimento de onda com a banda R, pois é necessário verificar se o comportamento de ambas as curvas se assemelha ao aumentar a concentração do corante VC. As bandas G e B exibem resultados semelhantes em comparação com a banda R, com pequenas diferenças de inclinação entre elas. No espectrofotômetro, a curva do comprimento de onda de 336,5 nm mostra valores muito pequenos e uma relação linear baixa, o que sugere uma dificuldade do equipamento em detectar o pico do corante VC em concentrações baixas.

Figura 53 - Solução binária com os corantes VM com concentração variável (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹) e VC com concentração constante (0,0006 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



Com o aumento da concentração do corante VC, fixando-se em 0,006 g. L⁻¹, observa-se uma redução na inclinação da banda R e um aumento em seu coeficiente de correlação linear. Isso significa que os pontos apresentam um comportamento menos quadrático e se tornam mais "linearizados". Por outro lado, a banda G aumenta sua inclinação e diminui seu coeficiente de correlação, levando a um maior afastamento da banda B, que apresentou uma relação menor com a linearidade em comparação ao estado anterior, mas manteve seus valores similares (Figura 54a). Quanto às curvas de calibração espectrofotométrico, a curva do comprimento de onda de 617,5 nm apresentou pouca variação na inclinação, mas os dados ajustaram-se melhor em uma reta. A curva de 336,5 nm mostrou valores mais elevados, aumentando a sensibilidade da análise, bem como um melhor ajuste na regressão (Figura 54b).

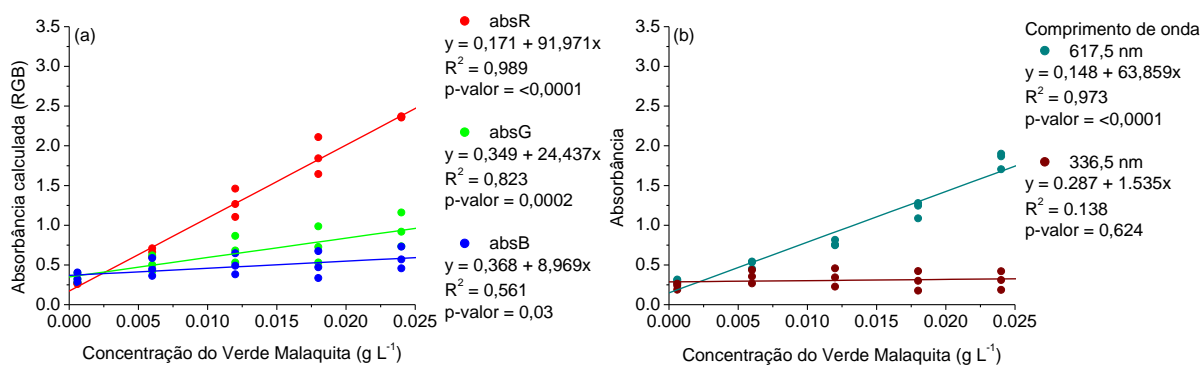
Figura 54 - Solução binária com os corantes VM com concentração variável (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹) e VC com concentração constante (0,006 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



Na terceira análise, com o corante VC mantido constante em 0,012 g. L⁻¹, observa-se um comportamento semelhante ao da batelada anterior, especialmente para ADI (Figura 55a).

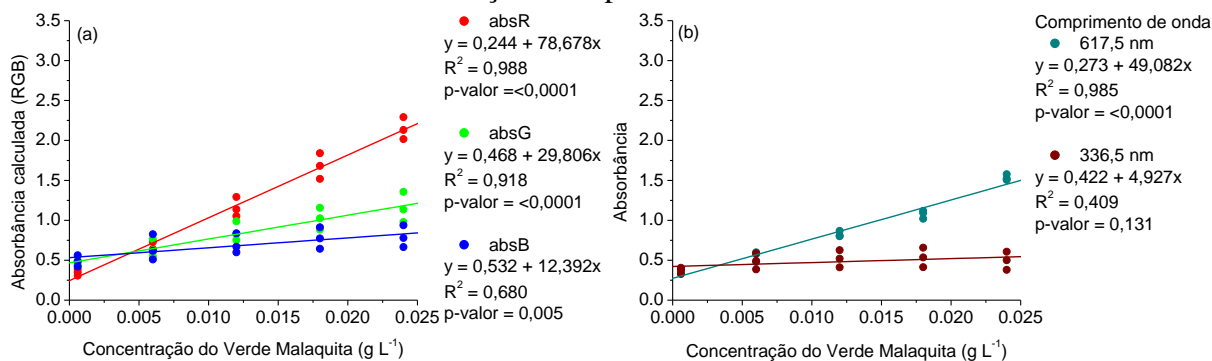
A banda R continua reduzindo sua inclinação e apresentando um melhor ajuste dos dados linearmente. A banda G diminuiu sua inclinação e seu coeficiente de correlação, aproximando-se da banda B, que também apresentou diminuição na sua correlação linear e inclinação. No espectrofotômetro, representado na Figura 55b, o comprimento de onda de 617,5 nm também diminuiu sua sensibilidade, mas manteve uma boa correlação linear. Além disso, o comprimento de onda de 336,5 nm também mostrou uma redução na sensibilidade e uma menor adequação dos dados à linha reta.

Figura 55 - Solução binária com os corantes VM com concentração variável (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹) e VC com concentração constante (0,012 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



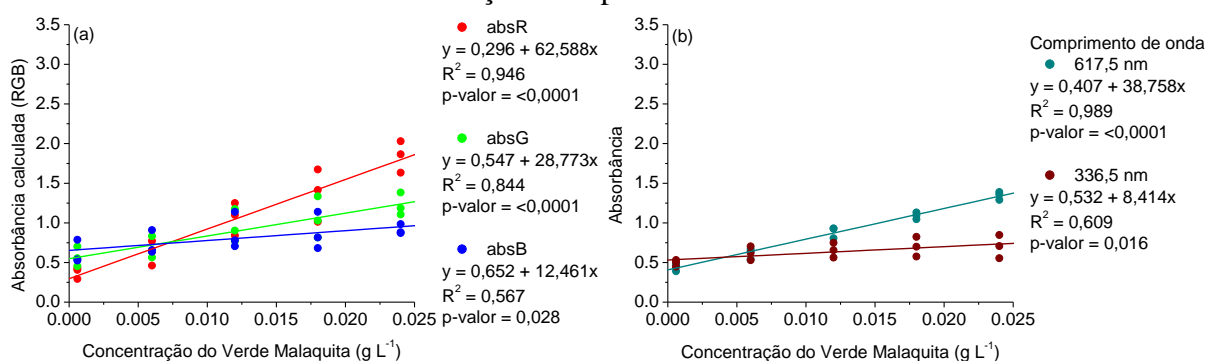
Quando o corante VC é concentrado a 0,018 g. L⁻¹, observa-se que as curvas RGB e as curvas do espectrofotômetro (Figura 56a e Figura 56b, respectivamente) estão se aproximando entre si, e, em concentrações do corante VM próximas a 0,006 g. L⁻¹, os valores obtidos são tão semelhantes que as curvas tendem a se sobrepor, dificultando a análise desses pontos. No método ADI, a reta R diminui ainda mais a sua inclinação, sem afetar o coeficiente de correlação. A banda G apresenta aumento de sensibilidade e adequação dos pontos à curva, assim como a banda B, que exibe comportamento similar. No espectrofotômetro, a curva de 617,5 nm diminui sua inclinação, enquanto a curva de 336,5 nm aumenta sua sensibilidade, resultando em um pico ligeiramente mais elevado que os anteriores.

Figura 56 - Solução binária com os corantes VM com concentração variável (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹) e VC com concentração constante (0,018 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



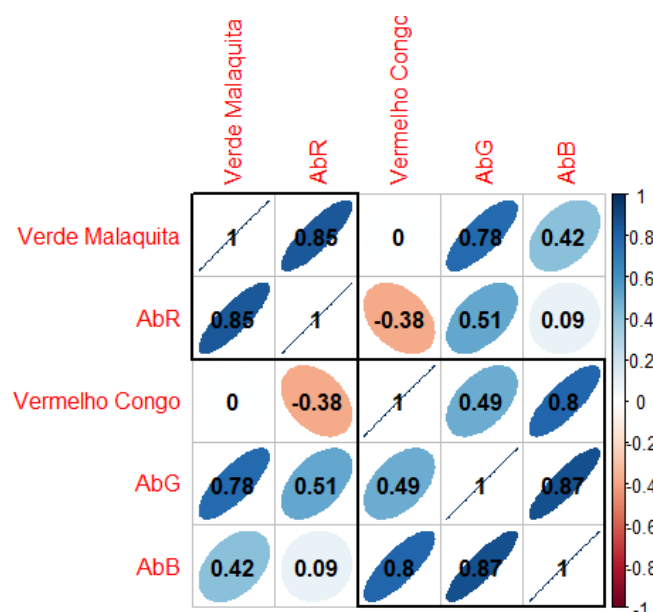
Por fim, na última batelada, as curvas RGB apresentadas na Figura 57a estão tão próximas que os pontos das triplicatas usadas na construção da reta se sobrepõem com os demais valores das outras retas. Assim como anteriormente, a banda R continua diminuindo sua inclinação sem afetar a linearidade dos dados, a banda G apresenta uma pequena redução na sua sensibilidade, e a banda B mantém constância nos valores em relação aos exibidos na batelada anterior. Para as curvas padrão (Figura 57b), há redução da inclinação de 617,5 nm, aproximando-se cada vez mais da curva de 336,5 nm, que aumenta sua sensibilidade e relação linear dos pontos.

Figura 57 - Solução binária com os corantes VM com concentração variável (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹) e VC com concentração constante (0,024 g. L⁻¹). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



Para realizar a comparação e verificar se as suposições dos corantes puros relacionadas a cada banda RGB são de fato adequadas para soluções binárias dos corantes VM e VC, foi gerado um gráfico de correlação com a concentração de cada corante, conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 58 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e da concentração da solução binária entre os corantes AU e VM.

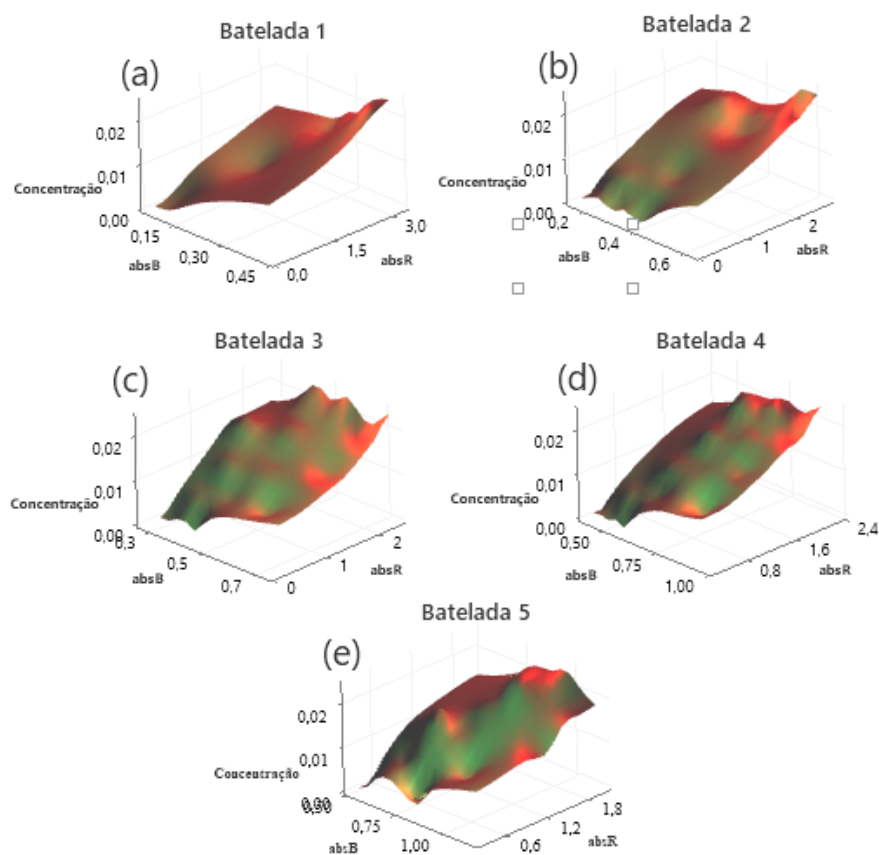


A absorvância calculada da banda R apresenta uma correlação negativa com o corante VC, indicando uma relação fraca com este corante. Por outro lado, para o corante VM, essa correlação se torna 0,85. Já para a banda G, a correlação entre as concentrações dos corantes VM e VC é de 0,78 e 0,49, respectivamente. Portanto, a banda G apresenta uma interação melhor com o corante VM do que com o VC, o que também foi observado na banda R. Na última banda, a absorvância calculada da banda B mostra uma correlação melhor com o corante VC do que com o VM, com valores de 0,8 e 0,42, respectivamente.

Entretanto, além do corante VM poder ser representado pela banda G, ele também apresentou correlações relevantes com a banda R. Da mesma forma, o corante VC pode ser representado pela banda B. Portanto, para a solução contendo ambos os corantes, é necessário reajustar as bandas representativas de cada corante de forma a melhor representá-los. Assim, em uma solução binária contendo os corantes VC e VM nas concentrações estudadas, suas bandas predominantes são B e R, respectivamente.

Considerando que para os corantes puros correlacionados, ou seja, VC e VM, as bandas propostas que regem seus comportamentos em ADI são a R e G, foram criadas superfícies de respostas correlacionando estas bandas à concentração do corante VM, exibidas na Figura 59. É possível notar que absB apresenta comportamento constante com o aumento da concentração do corante VM no meio.

Figura 59 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas (RGB) para a solução binária com corante VM com concentração variável [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante a: (a) 0,0006; (b) 0,006; (c) 0,012; (d) 0,018 e (e) 0,024.



A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos na solução binária com os corantes VC e VM, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 15: Bandas do método RGB representativas dos corantes VC e VM e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorvância e a concentrações.

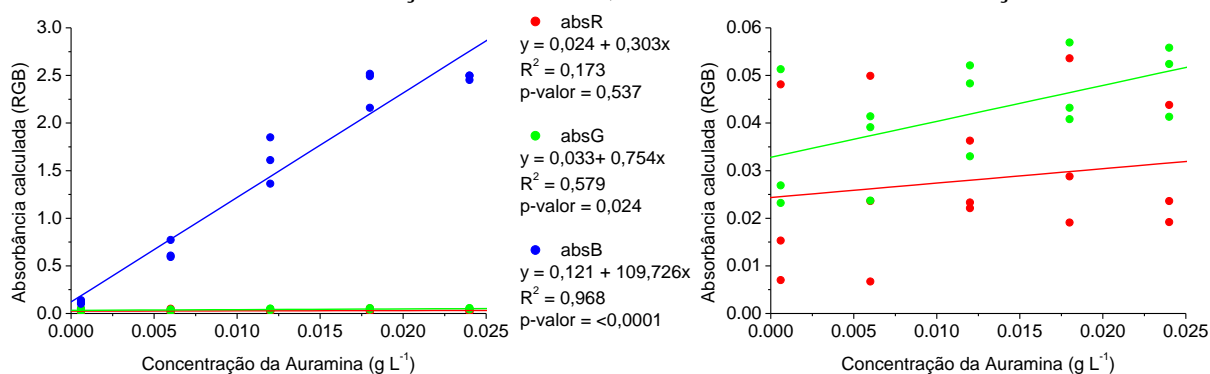
Banda	Corantes puros		Solução binária	
	VC	VM	VC	VM
	Correlação entre absorvância e concentração			
R	0,98	0,90	-0,38	0,85
G	0,99	0,97	0,49	0,78
B	0,95	0,97	0,80	0,42

4.5.2.6. Análise da solução binária com os corantes Auramina (AU) e Vermelho Congo (VC)

A seguir, serão discutidas as bateladas produzidas com soluções binárias entre os corantes AU e VC, conforme ilustrado nas Figura 60-65.

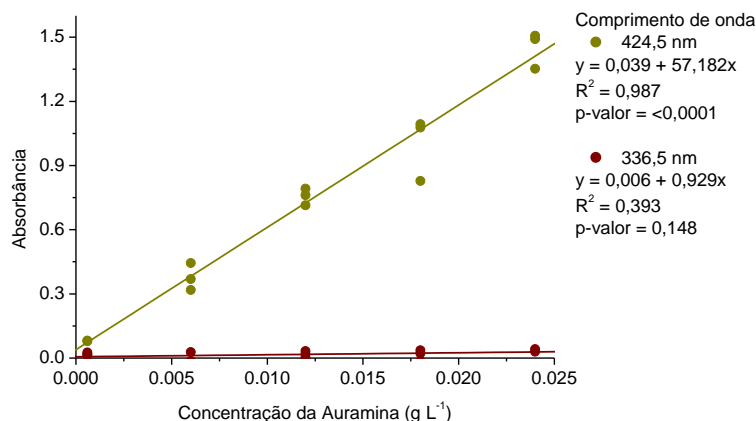
Na primeira solução realizada contendo os corantes AU em concentrações variáveis e VC em concentração de $0,0006 \text{ g. L}^{-1}$, as bandas G e R praticamente não se destacam, apresentando valores muito próximos entre si e inclinações menores que 1. Além disso, a adequação dos pontos à regressão linear não apresenta bons resultados, ou seja, os coeficientes de correlação são menores que 0,90 e o teste de hipótese para R indica que a reta não representa adequadamente os dados. Isso é observado com a grande variabilidade dos pontos, tornando a análise pouco precisa. Por outro lado, a banda B mostra uma maior sensibilidade, com um coeficiente de 0,968 (Figura 60).

Figura 60 - Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada para a solução binária com os corantes AU com concentração $[\text{g. L}^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[\text{g. L}^{-1}]$ constante (0,0006); onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B.



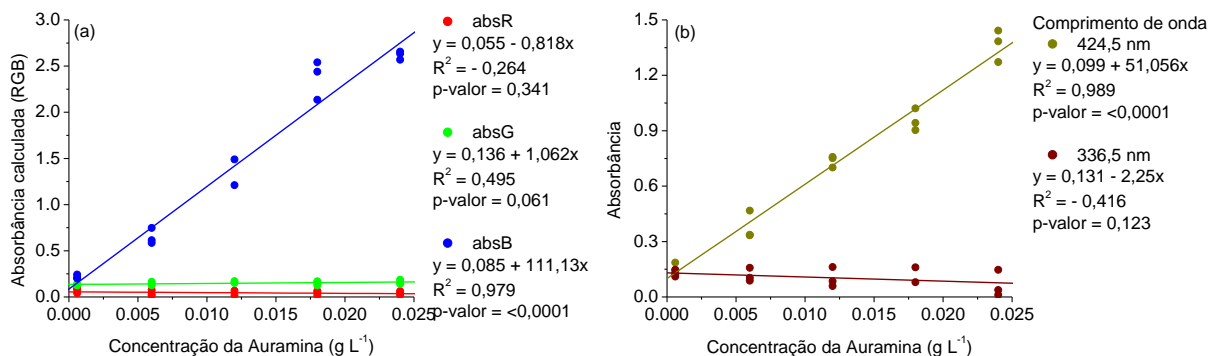
No espectrofotômetro, no comprimento de onda referente ao corante AU, 424,5 nm, os dados apresentam uma boa relação com a curva, mas para 336,5 nm, os valores são pouco ajustáveis (Figura 61). Portanto, com o método espectrofotométrico, pode-se entender que em concentrações pequenas, assim como aconteceu com a solução binária com os corantes VC e VM, o corante VC é pouco perceptível, onde seu pico apresenta valores pouco úteis para análise de sua concentração, indicando uma limitação da curva do espectrofotômetro.

Figura 61: Curva de calibração do espectrofotômetro para solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,0006).



Na segunda batelada, mantendo a concentração do corante VC fixa em $0,006 g \cdot L^{-1}$, observa-se que a banda R reduz ligeiramente sua inclinação, tornando-se negativa, mas apresentando uma melhor adequação dos pontos à reta. Enquanto isso, a banda G aumenta sua inclinação, afastando-se da linha R, porém, há uma perda de linearidade nesse processo. Por sua vez, a banda B exibe um aumento de sensibilidade, assim como no coeficiente de correlação (Figura 62a). O comprimento de onda de $336,5 nm$ (Figura 62b) passa a apresentar valores de inclinação negativa, semelhantes à banda R, e, da mesma forma, demonstra-se mais adequado à reta. Em contrapartida, o comprimento de onda de $424,5 nm$ reduz ligeiramente sua inclinação, mas sem impactar na correlação da reta.

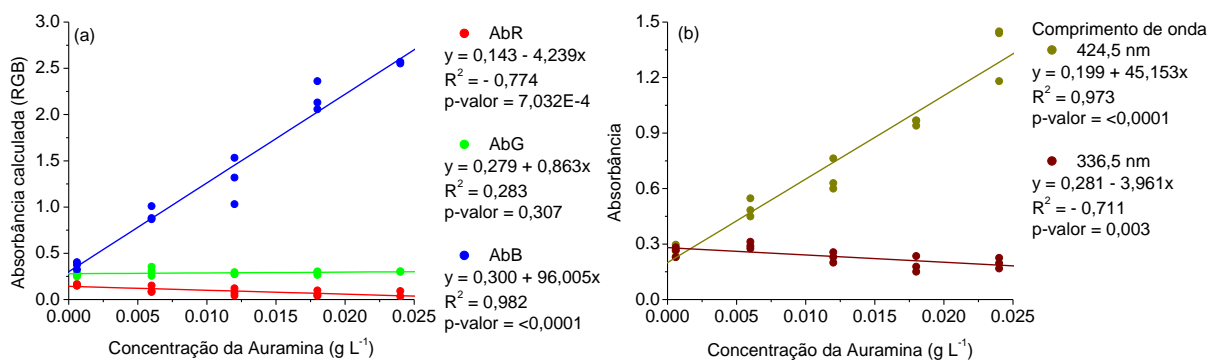
Figura 62 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,006). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorbância calculada, onde absR é a absorbância em relação à banda R; absG é a absorbância em relação à banda G e; absB é a absorbância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



Para uma concentração do corante VC igual a $0,012 g \cdot L^{-1}$, é observado que a inclinação da reta R assume valores negativos. No entanto, o teste de hipótese revela uma melhor adequação dos dados à reta, juntamente com um aumento considerável do coeficiente de

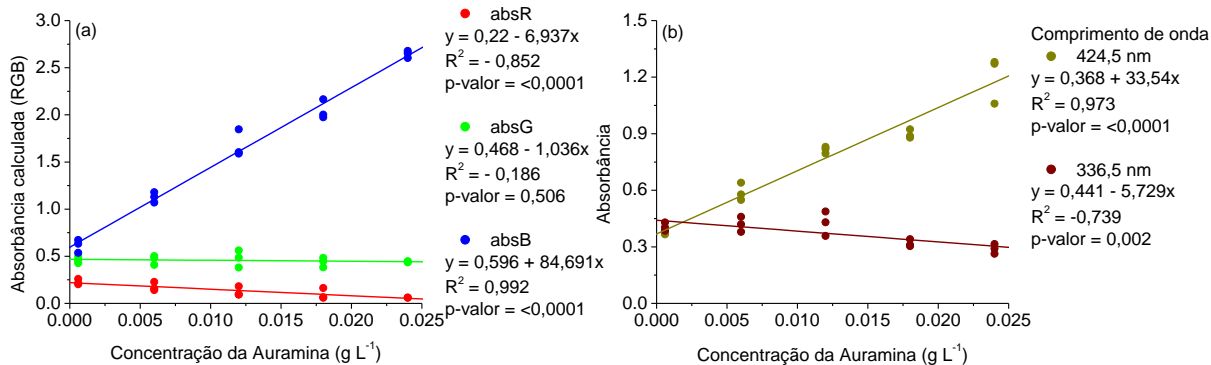
correlação. A banda G apresenta alterações ínfimas, mantendo uma aparente constância dos dados. A terceira banda reduz sua inclinação, sem afetar a correlação (Figura 63a). No comprimento de onda correspondente ao corante AU, assim como na banda B, a inclinação da reta diminui, mas o coeficiente de correlação permanece alto. Por outro lado, o segundo comprimento de onda apresenta uma inclinação negativa mais pronunciada dos dados (Figura 63b), comportamento que é observado conforme aumenta-se a concentração do corante VC no meio.

Figura 63 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,012). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde $absR$ é a absorvância em relação à banda R; $absG$ é a absorvância em relação à banda G e; $absB$ é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



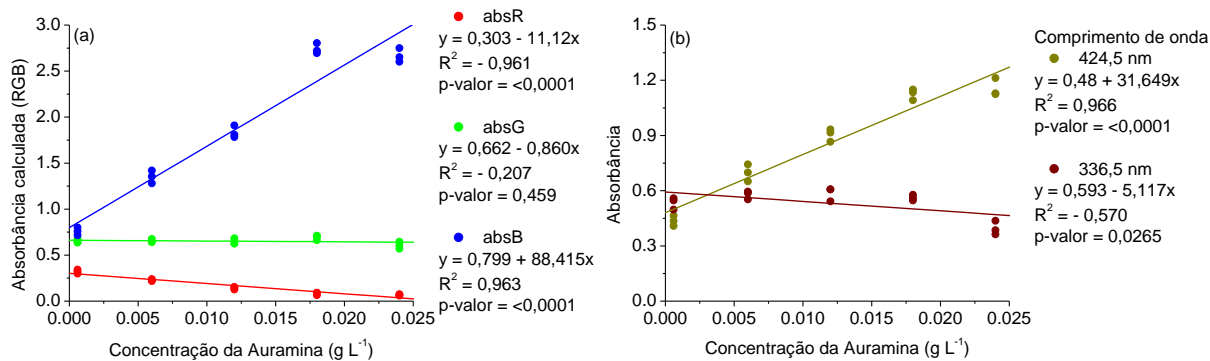
Na quarta batelada, mantendo a concentração do corante VC constante em $0,018 g \cdot L^{-1}$, observa-se que a sensibilidade da banda R aumenta, no entanto, sua inclinação permanece negativa. A banda G também apresenta uma inclinação negativa, saindo de seu estado de constância, mas com os pontos pouco relacionados à reta. A banda B continua reduzindo sua inclinação sem afetar o coeficiente de correlação (Figura 64a). No espectrofotômetro, a reta de $424,5 nm$ possui um comportamento similar à banda B. Por último, a reta do comprimento de onda de $336,5 nm$ continua apresentando inclinação negativa, mas ocorre um aumento de sua sensibilidade. Além disso, é observada uma aproximação dos pontos das duas retas, principalmente em concentrações muito pequenas, onde os dados chegam a se sobrepor (Figura 64b).

Figura 64 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,018). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorbância calculada, onde absR é a absorbância em relação à banda R; absG é a absorbância em relação à banda G e; absB é a absorbância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



No último experimento realizado para a solução binária dos corantes em questão, observa-se uma maior sensibilidade dos dados da banda R, apesar de sua inclinação negativa, indicando que a concentração do corante AU tem uma relação inversamente proporcional ao aumento da absorbância desta banda. A banda G continua apresentando pouca representação na reta, o que pode indicar uma relação limitada com os dois corantes quando combinados nas concentrações estudadas, sendo necessário observar seu comportamento através do gráfico de correlação. Para a banda B, ocorre um ligeiro aumento em sua sensibilidade, com pouca significância em relação aos seus decréscimos. Em comparação com a primeira batelada, as bandas R e G apresentam valores mais distintos (Figura 65a). No espectrofotômetro, a reta de 424,5 nm apresenta pouca diferença em relação aos seus valores anteriores, mantendo-se praticamente constante, assim como o comprimento de 336,5 nm (Figura 65b). No entanto, para os valores das concentrações de $0,006 g \cdot L^{-1}$ de ambos corantes se encontram similares, indicando que o aumento do corante VC no meio pode levar à aproximação das retas, ou seja, à aproximação dos valores de absorbância.

Figura 65 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,024). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



O gráfico de correlação para a solução binária em questão, representado na Figura 66, revela que a banda R tem uma baixa representatividade tanto para o corante AU quanto para o corante VC. Para o corante AU, a correlação é negativa, enquanto para o corante VC, a banda R tem pouca influência nos resultados, indicando que não é adequada para a quantificação de nenhum dos corantes. A banda G, por sua vez, demonstra resultados promissores para o corante VC, apresentando uma correlação de 0,89, sendo a maior correlação dos dados para este corante. No entanto, para o corante AU, a banda G mostra uma interação de apenas 0,01, o que indica uma representatividade irrelevante. Por fim, a banda B revela uma maior relação com o aumento da concentração do corante AU, com um valor de correlação de 0,95, enquanto para o VC, essa correlação é de apenas 0,17. Portanto, é possível deduzir que nas concentrações estudadas para a solução dos dois corantes, as bandas G e B são as mais representativas para os corantes VC e AU, respectivamente. Logo, gráficos da superfície de resposta (Figura 67) foram criados de forma a ilustrar essa correlação com a concentração dos corantes.

Figura 66 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e da concentração da solução binária entre os corantes AU e VC.

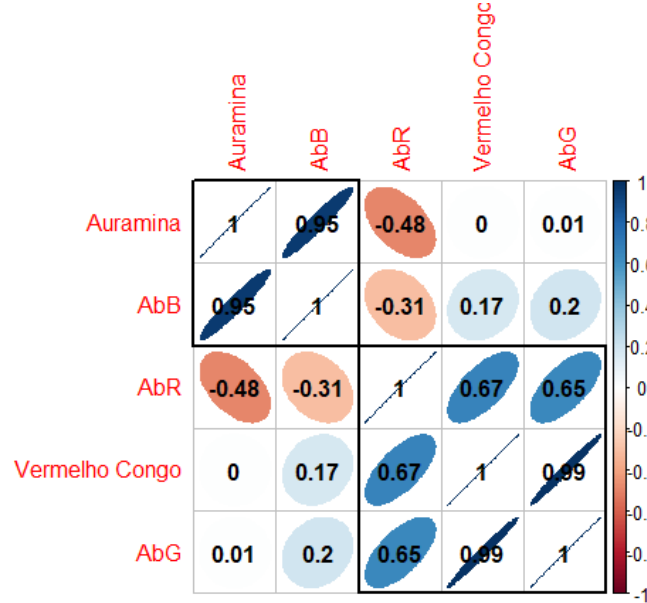
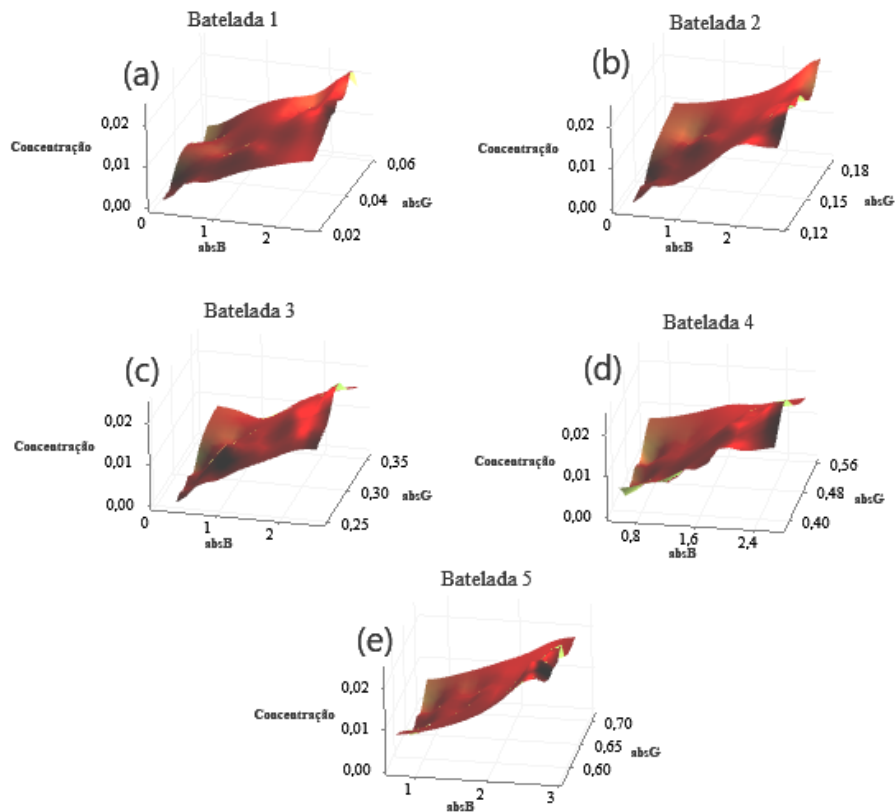


Figura 67 - Superfície de resposta para as absorvâncias calculadas (RGB) para a solução binária com corante AU com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante a: (a) 0,0006; (b) 0,006; (c) 0,012; (d) 0,018 e (e) 0,024.



A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos na solução binária com os corantes VC e AU, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

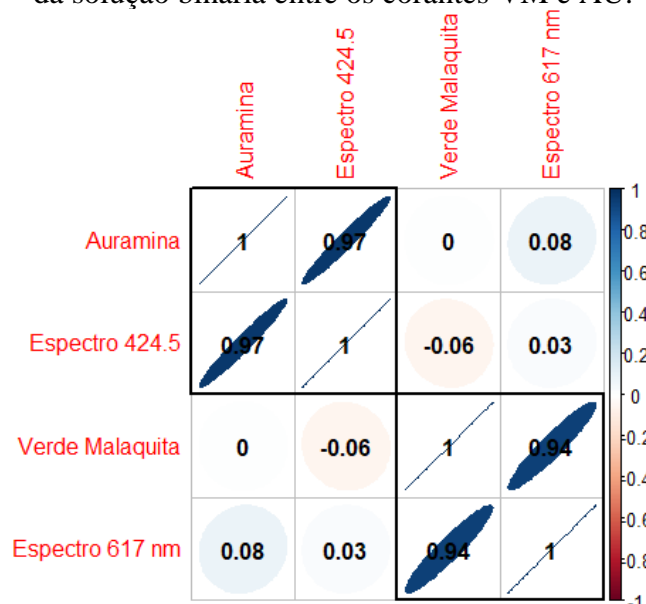
Tabela 16: Bandas do método RGB representativas dos corantes VC e AU e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorbância e a concentrações.

Banda	Corantes puros		Solução binária	
	VC	AU	VC	AU
R	0,98	-0,07	0,67	-0,48
G	0,99	0,74	0,89	0,01
B	0,95	0,92	0,17	0,95

4.5.3. Análise dos resultados RGB

Comparando os resultados obtidos para o método espectrofotométrico, conforme mostrado na Figura 68, para a solução binária dos corantes AU e VM, onde o primeiro permaneceu fixo em cada batelada, o espectrofotômetro de 424,5 nm apresenta uma correlação com os dados de 0,97. Na análise RGB, a banda representativa do corante AU é a B, com uma correlação de 0,90. Apesar da diferença, o resultado da análise RGB é considerado promissor. Por outro lado, para o comprimento de onda relativo ao corante VM, 617,5 nm, a correlação das variáveis foi de 0,94. A banda G, considerada representante do corante VM, também apresentou uma correlação de 0,94 com suas concentrações.

Figura 68 - Gráfico de correlação entre os valores da absorbância espectral e a concentração da solução binária entre os corantes VM e AU.



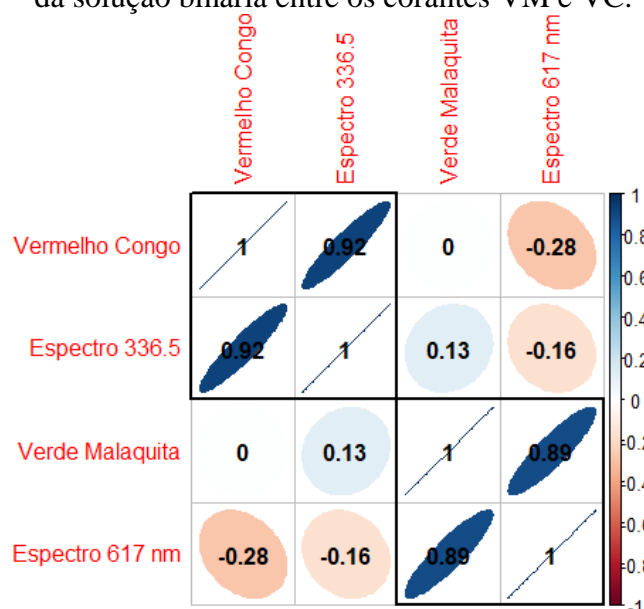
A Tabela 17 resume os resultados e a comparação com o espectrofotômetro os resultados obtidos na solução binária com os corantes AU e VM, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 17: Bandas do método RGB e comprimentos de onda relativos aos corantes AU e VM e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorbância e a concentrações.

Banda	Corantes puros		Solução binária	
	AU	VM	AU	VM
R	-0,07	0,90	0,24	0,79
G	0,74	0,97	0,24	0,94
B	0,92	0,97	0,9	-0,13
Comprimento de onda				
617,5 nm	-	0,8	-	0,94
424,5 nm	0,96	-	0,97	-

Na análise da correlação da solução binária dos corantes VC e VM, conforme ilustrado na Figura 69, o comprimento de onda específico ao corante VC, 336,5 nm, demonstra uma correlação de 0,92, enquanto os dados obtidos em ADI referentes à banda B apresentam uma correlação de 0,80. Em relação ao segundo corante, VM, seu comprimento de onda está associado a uma correlação de 0,89. A banda R, que está correlacionada a este corante, exibe uma correlação ligeiramente inferior, com um valor de 0,85.

Figura 69 - Gráfico de correlação entre os valores da absorbância espectral e a concentração da solução binária entre os corantes VM e VC.



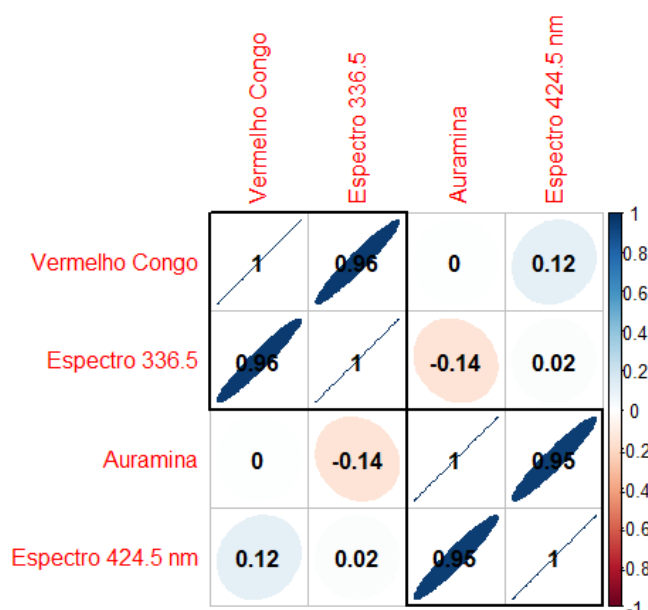
A Tabela 18 resume os resultados e a comparação com o espectrofotômetro os resultados obtidos na solução binária com os corantes VC e VM, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 18: Bandas do método RGB e comprimentos de onda relativos aos corantes VC e VM e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorbância e a concentrações.

	Corantes puros		Solução binária	
	VC	VM	VC	VM
Banda	Correlação entre absorbância e concentração			
R	0,98	0,90	-0,38	0,85
G	0,99	0,97	0,49	0,78
B	0,95	0,97	0,80	0,42
Comprimento de onda				
617,5 nm	-	0,8	-	0,89
336,5 nm	0,98	-	0,92	-

Na terceira solução binária (Figura 70), envolvendo os corantes VC e AU, onde VC é mantido em concentrações diferentes em cada experimento, o comprimento de onda associado ao corante VC apresenta uma correlação de 0,96. Enquanto isso, na análise ADI, a banda G, referente ao corante VC, exibe uma correlação de 0,89, ainda significativa. Quanto ao comprimento de onda de 424,5 nm do corante AU, a correlação é de 0,95, um valor semelhante a banda considerado representativo para esse comprimento, ou seja, a banda B.

Figura 70 - Gráfico de correlação entre os valores da absorbância espectral e a concentração da solução binária entre os corantes AU e VC..



A Tabela 19 resume os resultados e a comparação com o espectrofotômetro os resultados obtidos na solução binária com os corantes VC e AU, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 19: Bandas do método RGB e comprimentos de onda relativos aos corantes VC e AU e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorvância e a concentrações.

Banda	Corantes puros		Solução binária	
	VC	AU	VC	AU
	Correlação entre absorvância e concentração			
R	0,98	-0,07	0,67	-0,48
G	0,99	0,74	0,89	0,01
B	0,95	0,92	0,17	0,95
Comprimento de onda				
424,5 nm	-	0,96	-	0,95
336,5 nm	0,98	-	0,96	-

Das análises de todos as soluções desenvolvidas, observa-se que quando um dos corantes é mantido fixo em cada solução, ele apresenta uma correlação reduzida para o método ADI. No entanto, o corante (AU, VC ou VM) cujas concentrações são variáveis demonstra uma maior afinidade com a análise, exibindo uma correlação semelhante à do método espectrofotométrico. Há um caso de estudo para as amostras da solução binárias entre os corantes VC e VM, onde houve maior discrepância entre os resultados do método espectrofotométrico e da análise RGB, com correlações entre as absorvâncias e a concentração do corante VM de 0,89 e 0,85, respectivamente. Nesse caso, devido às cores intensas dos corantes, a análise RGB enfrenta um desafio maior na quantificação dos dados, podendo resultar na perda da sensibilidade dos mesmos. Mas, os resultados se mostram significativos para uma possível quantificação da concentração de cada corante, sendo necessário estudos para quantificação do limite superior suportado pela ADI.

4.5.3.1. Análise do comportamento RGB da solução binária dos corantes Verde Malaquita (VM) e Auramina (AU)

Para determinar o comportamento da análise digital de imagens em soluções binárias de corantes e verificar o padrão sobre a redução da correlação para o corante mantido fixo, foram realizadas cinco bateladas para a solução dos corantes VM e AU, mantendo o VM em concentrações fixas e variando o corante AU, conforme Tabela 9. As Figuras 71-76 ilustram os resultados obtidos.

Figura 71 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0048 a 0,024) e VM com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,0048). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

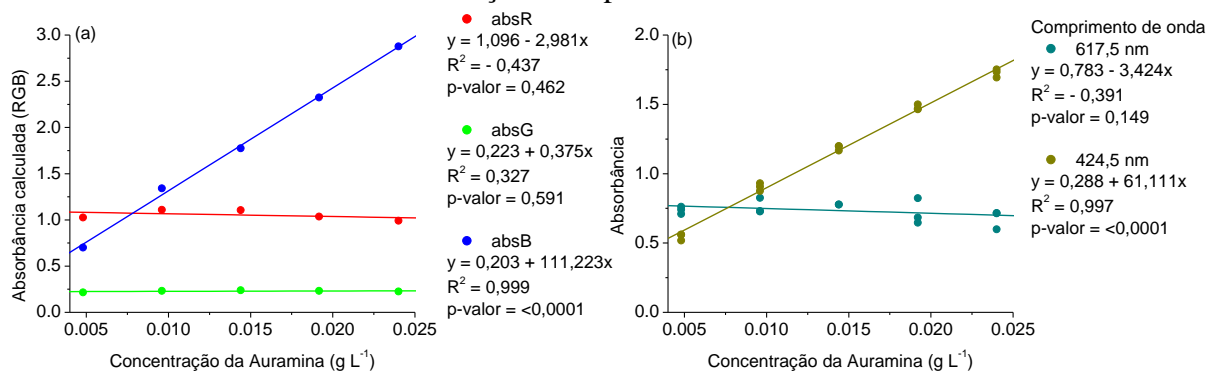


Figura 72 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0048 a 0,024) e VM com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,0096). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

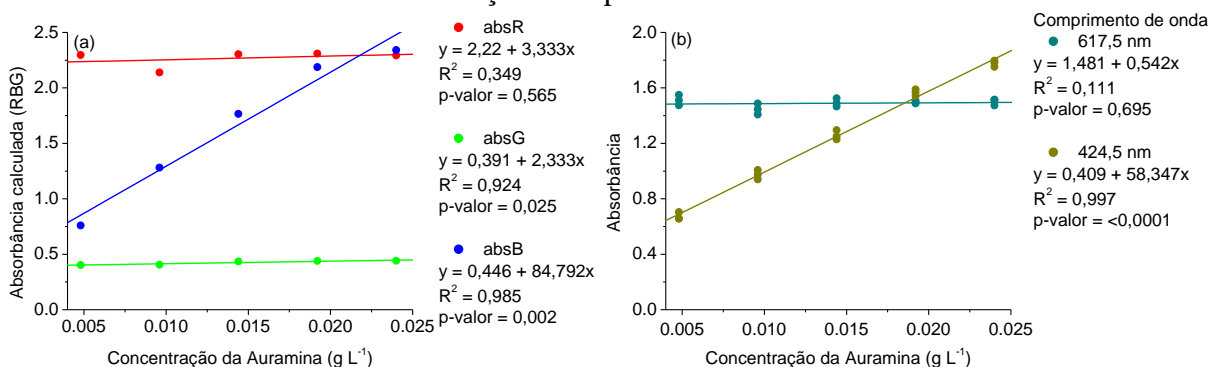


Figura 73 - Solução binária com os corantes AU com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ variável (0,0048 a 0,024) e VM com concentração $[g \cdot L^{-1}]$ constante (0,0144). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

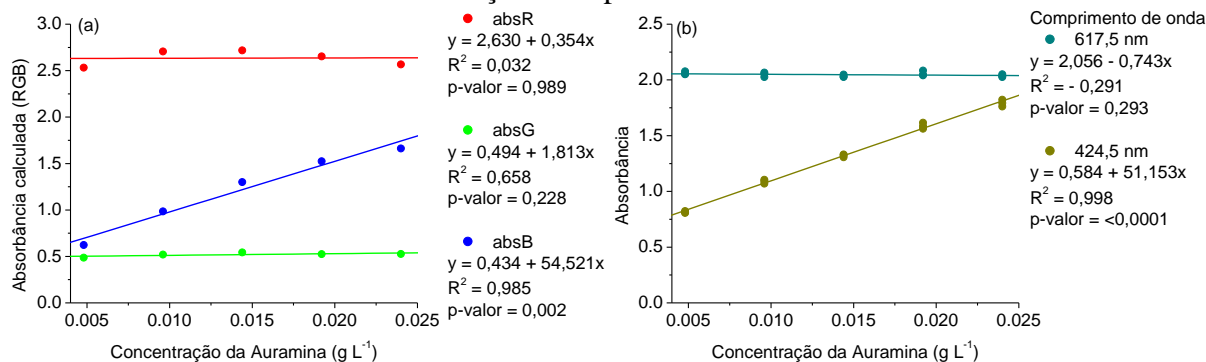


Figura 74 - Solução binária com os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e VM com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0192). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

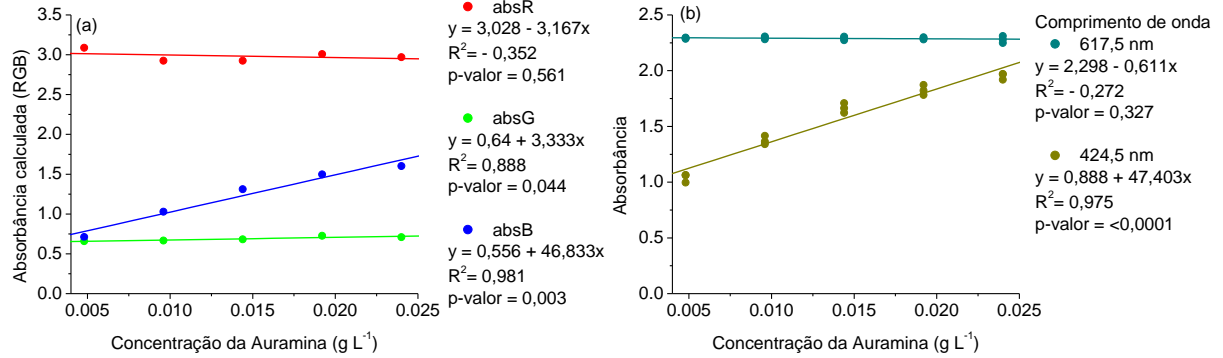


Figura 75 - Solução binária com os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e VM com concentração [g. L⁻¹] constante (0,024). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.

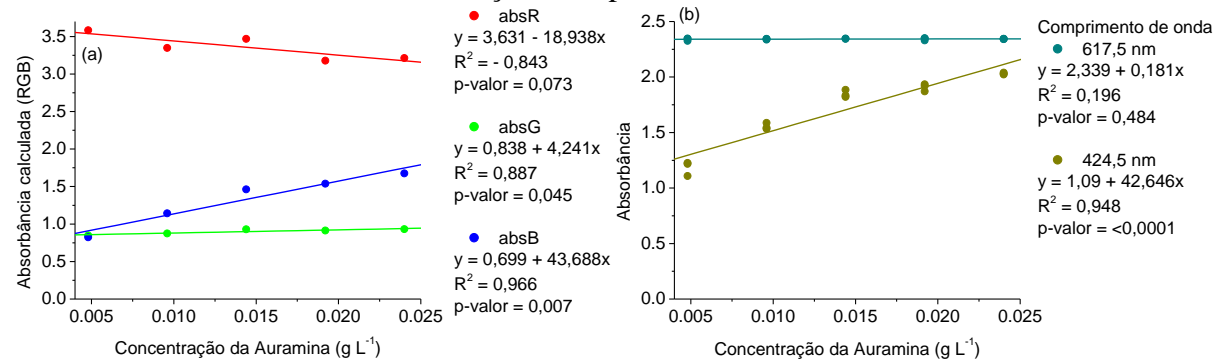
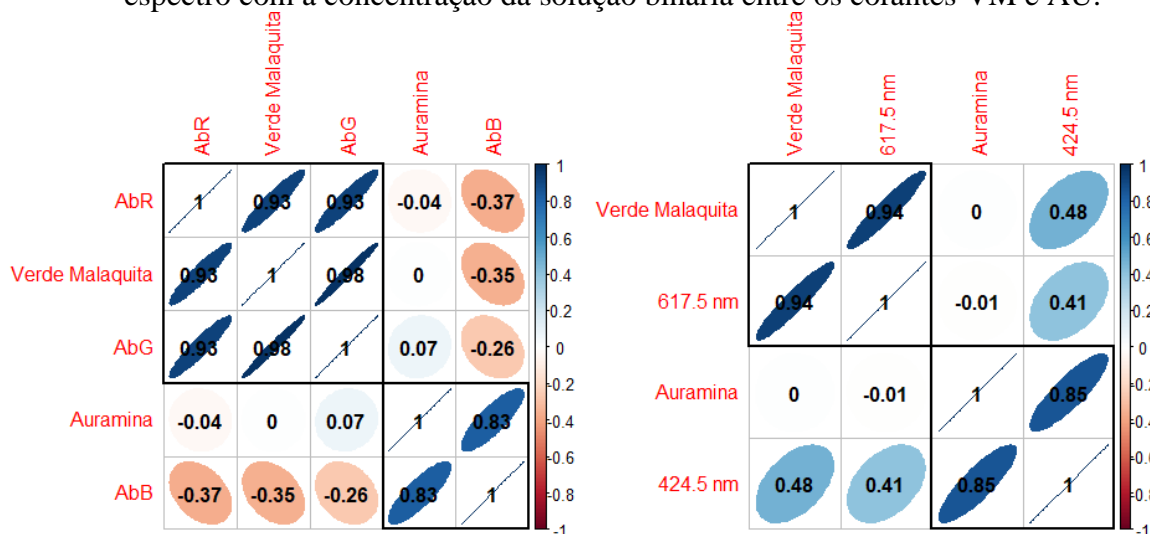


Figura 76 - Gráfico de correlação entre os valores da absorvância RGB e absorvância do espectro com a concentração da solução binária entre os corantes VM e AU.



Considerando a solução binária em que a concentração do corante AU varia de 0,0048 a 0,024 g. L⁻¹ e a concentração do corante VM é mantida constante em cada gráfico, nas mesmas concentrações que o outro corante, o gráfico de correlação revela que a banda R apresenta uma correlação de 0,93 com o corante VM e uma correlação negativa, -0,04, com o corante AU. Por sua vez, a banda G exibe uma correlação de 0,98 com o corante VM, indicando uma forte relação com este corante, enquanto para o corante AU essa correlação é de apenas 0,07, sendo considerada irrelevante para a quantificação da concentração do corante. Por fim, a banda B demonstra uma correlação negativa e modesta com o corante VM, -0,35, mas uma correlação significativa com o corante AU, chegando a 0,83. Os resultados apresentam as mesmas relações para aqueles obtidos na Seção 4.3.2.4 (*Análise da solução binária com os corantes Vermelho Malaquita (VM) e Auramina (AU)*), as bandas que melhor se relacionam com a concentração dos corantes AU e VM são B e G, respectivamente.

Nos resultados obtidos no espectrofotômetro, o comprimento de onda relativo ao corante VM, 617,5 nm, demonstra uma correlação com o corante de 0,94. Enquanto isso, o comprimento relativo ao corante AU, 424,5 nm, apresenta um valor de correlação de 0,85. Portanto, seja o corante variável ou constante na solução, não há redução nos valores obtidos, sugerindo que os resultados para as soluções dos corantes estudados são meras coincidências. Logo, o fator determinante para a sensibilidade da substância à análise digital de imagens são suas propriedades cromóforas.

A Tabela 20 resume os resultados e a comparação com o espectrofotômetro os resultados obtidos na solução binária com os corantes VM e AU, comparando com os obtidos quando os corantes estão puros.

Tabela 20: Bandas do método RGB e comprimentos de onda relativos aos corantes VM e AU e a solução binária entre eles, conforme gráficos de correlação entre os valores da absorbância e a concentrações.

Banda	Corantes puros		Solução binária	
	VM	AU	VM	AU
	Correlação entre absorbância e concentração			
R	0,90	-0,07	0,93	-0,04
G	0,97	0,74	0,98	0,07
B	0,92	0,97	-0,35	0,83
Comprimento de onda				
617,5 nm	0,8	-	0,94	-
424,5 nm	-	0,96	-	0,85

O Anexo I inclui os espectrofotômetros correspondentes a cada batelada de todas as soluções, enquanto o Anexo II contém as tabelas que compreendem os principais dados analíticos extraídos de cada experimento, tanto para ADI quanto para o método espectrofotométrico.

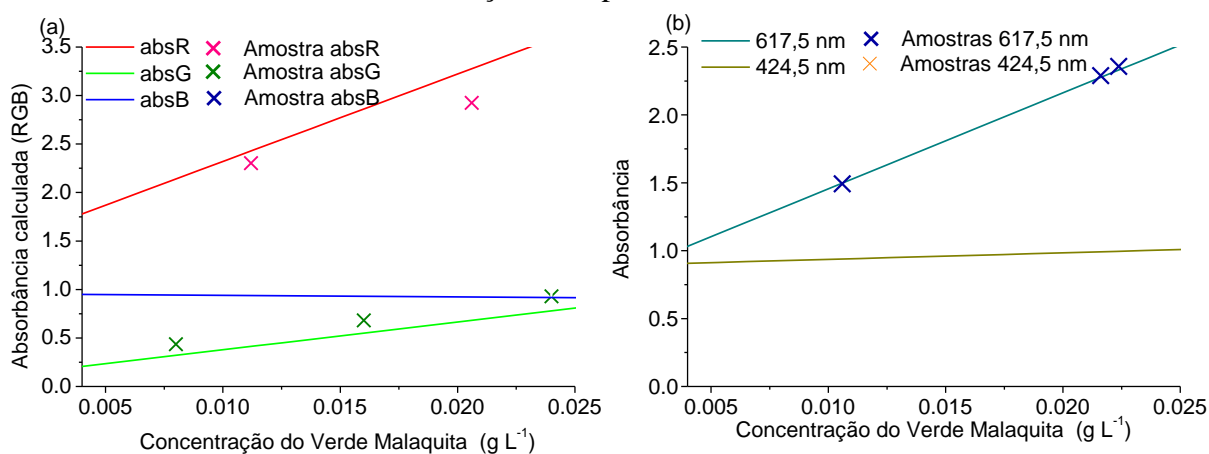
Para verificar se a análise é realmente capaz de tal afirmação, foram realizados testes com cada uma das três soluções, como será discutido nas seções seguintes.

4.6. Validação do experimento

Com o propósito de avaliar a eficácia dos modelos desenvolvidos para a quantificação das concentrações dos corantes, foram conduzidos testes utilizando concentrações desconhecidas aplicadas aos modelos criados. Os resultados foram então comparados com os valores obtidos pelo modelo de regressão gerado a partir do espectrofotômetro.

Inicialmente, foi proposta uma análise com a solução mantendo variável a concentração do corante VM e constante a concentração do corante AU ($0,0144 \text{ g. L}^{-1}$) para verificar se o modelo consegue prever a concentração do corante constante (AU), utilizando três amostras com concentrações desconhecidas, como pode ser observado na Figura 77.

Figura 77 - Solução binária com os corantes AU com concentração [g. L^{-1}] variável ($0,0048$ a $0,024$) e VM com concentração [g. L^{-1}] constante ($0,0144$). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



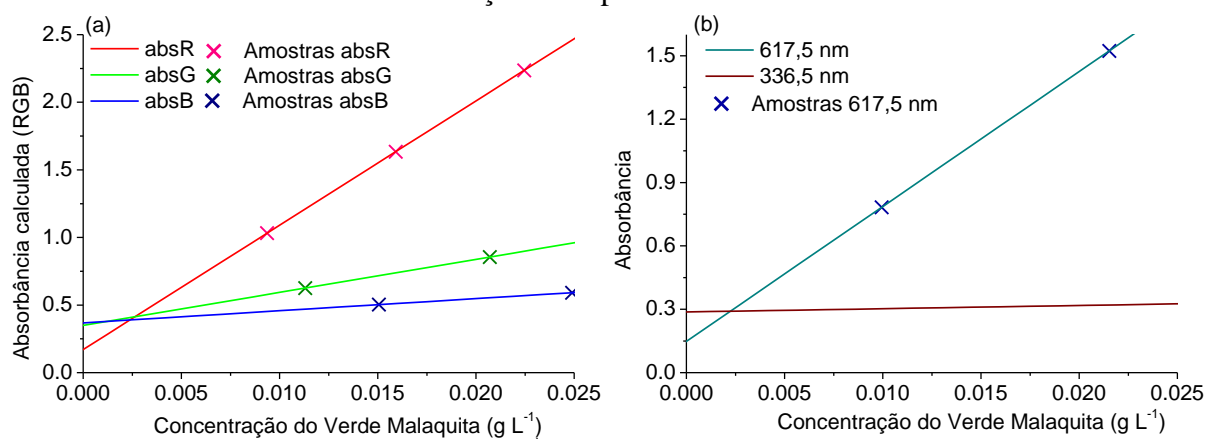
Verifica-se que, para o modelo RGB, apenas duas amostras apresentaram uma adequada correspondência com as curvas absR e absG e apenas uma para a curva absB. No entanto, para uma comparação precisa dos resultados, é imperativo reunir os dados obtidos na curva RGB. Comparando esses resultados com o método de ADI, observou-se que o menor erro de medição foi encontrado na banda R, com erros de 6,09% e 4,45%. Esses erros são suficientemente

pequenos para considerar a análise como uma alternativa viável na quantificação da concentração do corante VM.

Como visto anteriormente, o corante VM pode ser relacionado tanto para a banda G quanto para a banda R, apresentando em ambas ótimas correlações. Logo, para uma solução contendo os dois corantes, AU e VM, nas concentrações estudadas, é possível aproximar-se da concentração do corante VM no meio utilizando ADI.

Prosseguindo com a validação das curvas padrões RGB criadas, foi realizado um experimento com concentrações desconhecidas dos corantes VM e VC para a solução binária destes corantes onde o corante VM varia sua concentração de 0,0006 a 0,024 g. L⁻¹ e o corante VC é mantido em 0,012 g. L⁻¹, como ilustrado na Figura 78.

Figura 78 - Solução binária com os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,012). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



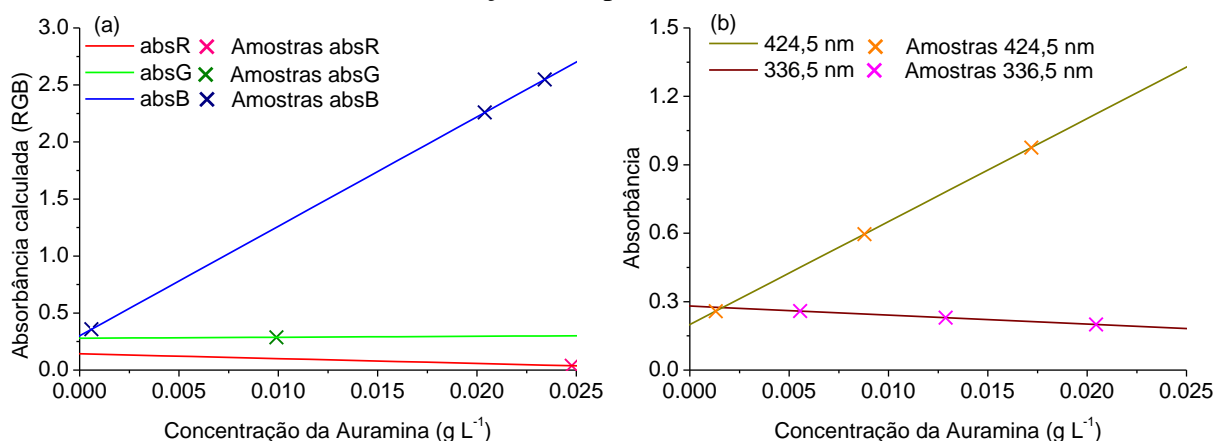
No teste realizado para a solução binária dos corantes VM e VC, observou-se que as bandas G e B apresentaram adequação para o modelo espectrofotométrico em apenas duas das três amostras preparadas, enquanto a banda R exibiu concentrações e valores de absorvância para todas as três amostras investigadas. No entanto, o espectrofotômetro não forneceu dados para o comprimento de onda relativo ao corante VC, 336,5 nm, dentro das faixas de concentração analisadas, resultando na exclusão desses dados da comparação com ADI. Para o comprimento de onda de 617,5 nm (VM), apenas duas amostras apresentaram concentrações dentro da faixa analisada.

A comparação entre os dois métodos revela que a banda R registrou o menor erro em relação ao comprimento de onda associado ao corante VM, com valores de 5,8% e 4,3%. Conforme discutido anteriormente, essa banda demonstrou ser adequada para representar o

corante VM, com um fator de correção de 0,85 na análise RGB. Portanto, o baixo valor de erro absoluto encontrado sugere que o método pode ser aplicado com eficácia para quantificar a concentração do corante VM em uma solução binária com o corante VC.

O último experimento foi realizado com a solução binária dos corantes AU e VC, onde AU variou entre 0,0006 a 0,024 g. L⁻¹ e VC foi mantido fixo em 0,012 g. L⁻¹, conforme ilustrado na Figura 79.

Figura 79 - Solução binária com os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,012). (a) Modelos criados a partir dos valores de absorvância calculada, onde absR é a absorvância em relação à banda R; absG é a absorvância em relação à banda G e; absB é a absorvância em relação à banda B. (b) Curva de calibração do espectrofotômetro.



No último experimento, utilizando a solução contendo os corantes AU e VC, na análise RGB, foi observado que apenas uma das três amostras apresentou concentrações dentro da faixa de dados estudada para as bandas R e G, ou seja, concentrações entre 0,0006 a 0,024 g. L⁻¹. No entanto, a banda B forneceu dados para todas as três amostras desconhecidas, todas sobrepostas à curva da regressão linear. Portanto, a banda B, para esta solução, seria correspondente ao corante AU. Uma vez que AU é apresenta maior variação de concentração (0,0006 a 0,024 g. L⁻¹), o corante possui maior dispersão dos valores de absorvância calculada para a curva de calibração desenvolvida, ou seja, a reta referente à banda B, permitindo melhor adequação de dados e portanto, melhor adequação dos dados obtidos nas três amostras experimentais. Em contrapartida, para as curvas padrão do espectrofotômetro, todas as três amostras apresentaram resultados relacionados à curva de calibração. Ao comparar os gráficos a e b, percebe-se que a análise RGB não obteve um desempenho satisfatório para a solução multicomponentes estudada.

Ao calcular as diferenças entre as duas medições, ou seja, o erro absoluto, os resultados apresentaram erros acima de 40% para qualquer corante e banda. É necessário considerar que

os corantes AU e VC possuem comprimentos de onda muito próximos entre si (424,5 nm e 336,5 nm, respectivamente), o que pode levar a redução da sensibilidade do método espectrofotométrico de análise. A análise de imagens, apesar de ter uma ampla gama de variação de 255 tons, utiliza apenas três bandas para identificação de cada corante. Quando corantes com cores muito semelhantes são misturados, pode ocorrer erros de medição na análise, dificultando a quantificação da concentração de cada analítico.

Em resumo, o método ADI para soluções multicomponentes com apresenta resultados melhores que o métodos espectrofotométricos, mostrando-se uma alternativa viável econômica e operacionalmente quando comparada ao equipamento espectrofotômetro. O pH exerce um papel significativo na absorção espectral do corante VC, influenciando a faixa de absorção e o comprimento de onda do espectrofotômetro. Por outro lado, o corante VM demonstrou pouca variação em relação ao pH em relação a soluções com correção do pH e aquelas sem a tamponização do pH. Quanto ao corante AU, o pH mostrou-se relevante na análise RGB, embora tenha apresentado pouca importância para o método espectrofotométrico.

Na solução binária com os corantes VM e AU, a banda G apresenta uma boa correlação com o corante VM, com valor de 0,94, indicando uma resposta diretamente ligada ao aumento da concentração, enquanto a banda B demonstra bons resultados para o corante AU, com uma forte relação, alcançando uma correlação de 0,9. Na solução binária dos corantes VM e VC, observa-se que a banda G tem uma interação melhor com o corante VM do que com o VC, o que também foi evidenciado na banda R. No entanto, a absorbância calculada da banda B mostra uma correlação melhor com o corante VC do que com o VM. Embora o corante VM possa ser representado pela banda G, ele também apresentou correlações relevantes com a banda R. Da mesma forma, o corante VC pode ser representado pela banda B. Assim, em uma solução binária dos corantes VC e VM, suas bandas predominantes são B e R, com correlações de 0,80 e 0,95, respectivamente. Por fim, a solução binária dos corantes VC e AU, é possível induzir que, nas concentrações estudadas para a solução dos dois corantes, as bandas G e B são os mais representativos para os corantes VC e AU, com valores correlacionais de 0,89 e 0,95, respectivamente.

Os resultados foram avaliados e validados através de soluções com concentrações desconhecidas dos corantes, o que indicou que para soluções com os corantes VM e AU, VM pode ser relacionado a banda R ou G, sendo a primeira apresentando erro aproximado de 6%. Já na análise da solução dos corantes VM e VC, o erro para a banda R do corante VM foi de 5,8%, resultado relevante considerando sua correlação com a concentração de 0,85.

Portanto, nas soluções binárias entre os corantes VM-AU e VM-VC, foi possível a determinação quantitativa de um corante independente da presença de outro analito (corante) no meio, o que não ocorre no método espectrofotométrico. Porém, segundo o comportamento da solução binária dos corantes AU-VC neste estudo, os resultados não demonstraram a mesma precisão do que as demais soluções (VM-AU e VM-VC), portanto, é necessário a realização de estudos aprofundados para determinação dos fatores dependentes das concentrações dos corantes AU e VC, bem como de suas características cromóforas, frente a respostas da ADI.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi o desenvolvimento de um sistema de visão artificial para análise de soluções binárias com os corantes AU, VM e VC, utilizando técnicas de processamento de imagens e estatística espacial, onde os resultados apresentaram respostas mais precisas e que o método espectrofotométrico. Os corantes AU, VC e VM possuem boa sensibilidade ao método ADI, com boa repetibilidade e precisão na quantificação de suas concentrações quando em soluções aquosas. Os corantes AU e VC possuem como característica sua capacidade de mudança de comprimento de onda quando em diferentes pH, sendo necessário a tamponização do meio para que haja constância nos resultados. Em pH igual a 5,0, o corante VC apresentou coloração absorvida na faixa do ultravioleta, com comprimento de onda de 336,5 nm, e o corante AU, com coloração absorvida no comprimento de 424,5 nm, faixa azulada, sendo ambos apresentando correlação com a banda B (azul) da análise ADI. Já o corante VM possui pouca variação de suas características cromóforas para pequenas mudanças de pH, localizando seus valores de pico no comprimento de 617,5 nm (cor absorvida laranja) e alta correlação com as bandas G e B. Em soluções multicomponentes, os corantes apresentam suas características intrínsecas em ambas as técnicas estudadas, (espectrofotometria e ADI), sendo possível a determinação quantitativa de um dos corantes (AU, VM ou VC) quando o segundo corante se apresenta invariável na solução. A ADI possui a capacidade de detectar analitos com grande variabilidade nas amostras, onde o método apresenta melhores resultados em meios com diferentes concentrações do analito. Ao quantificar o corante VM na solução contendo 0,018 g. L⁻¹ do corante AU, o erro em relação ao espectrofotômetro foi de 4,45% para banda R. Já na solução binárias dos corantes VM e VC (0,012 g. L⁻¹), o erro da banda R foi de 4,3% para concentrações do corante VM. Nas amostras com os corantes AU e VC, devido à proximidade dos comprimentos de ondas e as consequentes interferências, os equipamentos apresentaram limitações.

6. REFERÊNCIAS

- ABEL, A. The history of dyes and pigments. *Em: BEST, J. (Ed.). . Colour Design* . 2. ed. [s.l.] Woodhead Publishing, 2012. p. 557–587.
- AHAMAD, M. S. S.; MAIZUL, E. N. M. Digital Analysis of Geo-Referenced Concrete Scanning Electron Microscope (SEM) Images. **Civil and Environmental Engineering Reports**, v. 30, n. 2, p. 65–79, 1 jun. 2020.
- AHMED, M.; OATLEY-RADCLIFFE, D.; WILLIAMS, P. M. Treatment of highly saline brines using a static freeze crystallisation process. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, v. 213, p. 1–25, 2021.
- AL-NIDAWI, M.; ALSHANA, U. Reversed-phase switchable-hydrophilicity solvent liquid-liquid microextraction of copper prior to its determination by smartphone digital image colorimetry. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 104, p. 104140, dez. 2021.
- AMIRI-HOSSEINI, S.; HASHEMPOUR, Y. Photocatalytic removal of Malachite green dye from aqueous solutions by nano-composites containing titanium dioxide: A systematic review. **Environmental Health Engineering and Management**, v. 8, n. 4, p. 295–302, 22 nov. 2021.
- ANDERSON, M.; MOTTA, R.; CHANDRASEKAR, S.; STOKES, M. **Proposal for a standard default color space for the Internet - sRGB**4th Color Imaging Conference - Color Science, Systems and Applications. **Anais...**1996
- AOULAD EL HADJ ALI, Y.; AHROUCH, M.; AIT LAHCEN, A.; ABDELLAOUI, Y.; STITOU, M. Recent Advances and Prospects of Biochar-based Adsorbents for Malachite Green Removal: A Comprehensive Review. **Chemistry Africa** **2022 6:2**, v. 6, n. 2, p. 579–608, 18 jun. 2022.
- ARDILA-LEAL, L. D.; POUTOU-PIÑALES, R. A.; PEDROZA-RODRÍGUEZ, A. M.; QUEVEDO-HIDALGO, B. E. A Brief History of Colour, the Environmental Impact of Synthetic Dyes and Removal by Using. Laccases Enhanced. **Molecules**, v. 26, n. 13, p. 3813, 2021.
- ARLETE, J.; CAMARGOS, A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. 2001.
- AZEVEDO, C. C. J.; OLIVEIRA, R. DE; SUARES-ROCHA, P.; SOUSA-MOURA, D.; LI, A. T.; GRISOLIA, C. K.; ARAGÃO UMBUZEIRO, G. DE; MONTAGNER, C. C. Auramine dyes induce toxic effects to aquatic organisms from different trophic levels: an application of predicted non-effect concentration (PNEC). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 2, p. 1866–1877, 28 jan. 2021.
- AZEVEDO, C.; KASAHARA, M.; MONTAGNER, C. Método Analítico para Determinação dos Corantes Auramina em Testes de Ecotoxicidade e em Águas Superficiais. **Química Nova**, 2021.
- BAEK, K.; KIM, Y.; MOHD-NOOR, S.; HYUN, J. K. Mie Resonant Structural Colors. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 5, p. 5300–5318, 2020.
- BARKA, N.; ASSABBANE, A.; NOUNAH, A.; ICHOU, Y. A. Photocatalytic degradation of indigo carmine in aqueous solution by TiO₂-coated non-woven fibres. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 3, p. 1054–1059, abr. 2008.

BARNETT, J. R.; MILLER, S.; PEARCE, E. Colour and art: A brief history of pigments. **Optics and Laser Technology**, v. 38, n. 4–6, p. 445–453, jun. 2006.

BARSAN, V.; MERTICARIU, A. Goethe's theory of colors between the ancient philosophy, middle ages occultism and modern science. **Cogent Arts and Humanities**, v. 3, n. 1, 2016.

BRASIL. **Instrução normativa nº 9, de 21 de fevereiro de 2017**. Publicar o plano de amostragem e limites de referência para o Plano Nacional de Controle de Resíduos e contaminantes em Produtos de Origem Animal - PNCRC de 2017 para as cadeias de carnes bovina, suína, caprina, ovina, equina, coelho, aves, avestruz, de leite, pescado, mel e ovos, na forma do Anexo desta Instrução Normativa. Brasília: DOU Diário Oficial da União. Publicado em: 8 de março de 2017.

BEZRYADIN, S.; BOUROV, P.; ILINI, D. Brightness Calculation in Digital Image Processing. **International Symposium on Technologies for Digital Photo Fulfillment**, v. 1, n. 1, p. 10–15, 1 jan. 2007.

BÖCK, F. C.; HELFER, G. A.; COSTA, A. B. DA; DESSUY, M. B.; FERRÃO, M. F. Rapid Determination of Ethanol in Sugarcane Spirit Using Partial Least Squares Regression Embedded in Smartphone. **Food Analytical Methods**, v. 11, n. 7, p. 1951–1957, 24 jul. 2018.

BRANDELERO, C.; BERRA, E. F.; BACKES, K. S.; PEREIRA, R. S.; BRUN, E. J. ESPECTRORADIOMETRIA NA REGIÃO DO VISÍVEL E DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 1, p. 215–222, 2012.

BURGESS, C. The Basis for Good Spectrophotometric UV–Visible Measurements. *Em: UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater*. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 1–35.

BYRNE, A.; HILBERT, D. R. Color realism and color science. **Behavioral and Brain Sciences**, v. 26, p. 3–64, 2003.

CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; LÓPEZ-RUIZ, N.; MARTÍNEZ-OLMOS, A.; ERENAS, M. M.; PALMA, A. J. Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review. **Analytica Chimica Acta**, v. 899, p. 23–56, 29 out. 2015.

CHEN, Y.; DING, M.; LI, J.; SHENG, W.; LIU, B.; ZHANG, Y.; WANG, S. Fluorescence Quenching Immunoaffinity Test Column with Quantum Dots as Fluorescence Donors for the Quick Detection of Malachite Green and Crystal Violet in Aquatic Products. **Food Analytical Methods**, v. 11, n. 12, p. 3362–3370, 2 dez. 2018.

CHEN, Y.; YANG, J.; PAN, Q.; VAZIRIAN, M.; WESTLAND, S. A method for exploring word-colour associations. **Color Research and Application**, v. 45, n. 1, p. 85–94, 1 fev. 2020.

CHOODUM, A.; SRIPROM, W.; WONGNIRAMAİKUL, W. Portable and selective colorimetric film and digital image colorimetry for detection of iron. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 208, p. 40–47, fev. 2019.

CHOUHDURY, A. K. R. 1 - Characteristics of light sources. *Em: Principles of Colour and Appearance Measurement - Object Appearance, Colour Perception and Instrumental Measurement*. [s.l.] Woodhead Publishing. Limite, 2014a. p. 1–52.

_____. 3 - Colour and appearance attributes. *Em: Principles of Colour and Appearance Measurement*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2014b. p. 103–143.

____. 2 - Object Appearance and Colour. *Em: Principles of Colour and Appearance Measurement*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2014c. p. 53–102.

____. 6 - Colour measurement instruments. *Em: Principles of Colour and Appearance Measurement*. [s.l.] Woodhead Publishing, 2014d. p. 221–269.

CHOUDHURY, A. K. R.; NASKAR, B. Comparison of visual (MUNSELL) and instrumental measures (CIELAB) of coloured textile standard samples. **Research Journal of Textile and Apparel**, v. 23, n. 4, p. 340–354, 5 dez. 2019.

CHRISTIE, R. M. **Colour chemistry**. 2. ed. [s.l.] Royal Society of Chemistry, 2015. v. 2
CIE. **Colorimetry**. [s.l.: s.n.].

____. **International Lighting Vocabulary**. [s.l.: s.n.].

COCHRANE, S. The Munsell Color System: A scientific compromise from the world of art. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, v. 47, p. 26–41, 1 set. 2014.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em:
https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 9 mai. 2024.

COSKUN, A. F.; WONG, J.; KHODADADI, D.; NAGI, R.; TEY, A.; OZCAN, A. A personalized food allergen testing platform on a cellphone. **Lab Chip**, v. 13, n. 4, p. 636–640, 2013.

CSILLAG, K.; EMRI, T.; RANGEL, D. E. N.; PÓCSI, I. pH-dependent effect of Congo Red on the growth of *Aspergillus nidulans* and *Aspergillus niger*. **Fungal Biology**, v. 127, n. 7–8, p. 1180–1186, 1 jul. 2023.

DANTAS, H. V.; BARBOSA, M. F.; PEREIRA, A.; PONTES, M. J. C.; MOREIRA, P. N. T.; ARAÚJO, M. C. U. An inexpensive NIR LED Webcam photometer for detection of adulterations in hydrated ethyl alcohol fuel. **Microchemical Journal**, v. 135, p. 148–152, 1 nov. 2017.

DENG, P.; FENG, J.; WEI, Y.; XIAO, J.; LI, J.; HE, Q. Fast and ultrasensitive trace malachite green detection in aquaculture and fisheries by using hexadecylpyridinium bromide modified electrochemical sensor. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 102, 1 set. 2021.

DERHAK, M. W. **Spectrally Based Material Color Equivalency: Modeling and Manipulation**. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2015.

DINIZ, P. H. G. D. **Chemometrics-assisted color histogram-based analytical systems**. **Journal of Chemometrics**. John Wiley and Sons Ltd, , 1 dez. 2020.

DONDELINGER, R. M. Spectrophotometers. **Biomedical instrumentation & technology**, v. 45, n. 2, p. 139–143, mar. 2011.

DU, H.; HE, L.; ZHANG, M.; MANYANDE, A.; CHEN, H. Carbon quantum dots derived from fish scales as fluorescence sensors for detection of malachite green. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 4, p. 3368–3376, 1 ago. 2023.

EBBESEN, T. W.; LEZEC, H. J.; GHAEMI, H. F.; THIO, T.; WOLFF, P. A. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. **Nature** **1998** **391**:6668, v. 391, n. 6668, p. 667–669, 12 fev. 1998.

EL-SHEHRY, A. S.; YOUSSEF, Y. A.; ABDEL-SATAR, N. E. A.; SOLIMAN, E. A.; HASHEM, A. I. Optimization of Enzymatic Treatment and Reactive Dyeing of viscose fabric in One-bath Process. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 65, n. 5, p. 647–656, 1 maio 2022.

ESPOSITO, S. The colours of Newton's Opticks: A high-performance project for motivated students. **European Journal of Physics**, v. 41, n. 5, 1 set. 2020.

FAN, Y.; LI, J.; GUO, Y.; XIE, L.; ZHANG, G. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: A review. **Measurement**, v. 171, p. 108829, fev. 2021a.

_____. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: A review. **Measurement**, v. 171, p. 108829, 1 fev. 2021b.

_____. Digital image colorimetry on smartphone for chemical analysis: A review. **Measurement**, v. 171, p. 108829, 1 fev. 2021c.

FARA, P. **Newton shows the light: A commentary on Newton (1672) 'A letter . . . containing his new theory about light and colours . . . 'Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** Royal Society of London, , 13 abr. 2015.

FERGUSON, J. Munsell notations and color names: Recommendations for archaeological practice. **Journal of Field Archaeology**, v. 39, n. 4, p. 327–335, 1 nov. 2014.

FERNANDES, G. M.; SILVA, W. R.; BARRETO, D. N.; LAMARCA, R. S.; LIMA GOMES, P. C. F.; FLÁVIO DA S PETRUCI, J.; BATISTA, A. D. Novel approaches for colorimetric measurements in analytical chemistry – A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1135, p. 187–203, out. 2020.

FERREIRA, A. U. C. Estudo das interações entre o corante catiônico auramina O e partículas de argila em suspensão aquosa. 2015. 153 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

FILATAU, A.; LITVIN, A.; LITVIN, V.; KOVALEV, V. Anisotropy of CT images in the differential diagnosis of chronic pancreatitis and pancreatic cancer. **Pancreatology**, v. 14, n. 3, p. S89–S90, jun. 2014.

FINLAYSON, G.; SCHAEFER, G. **Hue that is invariant to brightness and gamma** 12th British Machine Vision Conference. **Anais...**2001. Acesso em: 17 maio. 2023

FIRDAUS, M.; APRIAN, A.; MEILEZA, N.; HITSMI, M.; ELVIA, R.; RAHMIDAR, L.; KHAYDAROV, R. Smartphone Coupled with a Paper-Based Colorimetric Device for Sensitive and Portable Mercury Ion Sensing. **Chemosensors**, v. 7, n. 2, p. 25, 17 maio 2019.

FIRDAUS, M. L.; ALWI, W.; TRINOVELDI, F.; RAHAYU, I.; RAHMIDAR, L.; WARSITO, K. Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. **Procedia Environmental Sciences**, v. 20, p. 298–304, 2014.

FLORES-VIDAL, P.; GÓMEZ, D.; CASTRO, J.; MONTERO, J. New Aggregation Approaches with HSV to Color Edge Detection. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 15, n. 1, p. 1–15, 1 dez. 2022.

FRASER, C. *Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae*. Carl Friedrich Gauss, G. W. Stewart. **Isis**, v. 86, n. 4, p. 660–661, dez. 1995.

FREEMANTLE, M. Paint Chemistry's image with color. **Chemical & Engineering News Archive**, v. 79, n. 9, p. 50, 2001.

FU, Y.; TIPPETS, C. A.; DONEV, E. U.; LOPEZ, R. **Structural colors: from natural to artificial systems**Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and NanobiotechnologyWiley-Blackwell, 1 set. 2016.

FULGÊNCIO, A. C. C.; ARAÚJO, V. P. T.; PEREIRA, H. V.; BOTELHO, B. G.; SENA, M. M. Development of a Simple and Rapid Method for Color Determination in Beers Using Digital Images. **Food Analytical Methods**, v. 13, n. 1, p. 303–312, 1 jan. 2020.

GAIKWAD, R. W.; KINLDY, S. A. M. Studies on auramine dye adsorption on psidium guava leaves. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 1, p. 102–107, 28 jan. 2009.

GAJIPARA, Y. N.; BALPANDE, D. N.; PATIL, P. S.; YADAV, A. A.; YADAV, M. D.; PATWARDHAN, A. V. Jackfruit Leaf-Based Natural Adsorbent for the Efficient Removal of Auramine O Dye. **Water Conservation Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 1 dez. 2023.

GARCÍA, R. D. Instrumentos que revolucionaron la química: la historia del espectrofotómetro. 2019.

GARDUÑO, A. P. (2023). Evaluación catalítica de un bionanocomposito generado a partir de nanopartículas de plata y Agave Lechuguilla en la degradación de los colorantes Rojo Congo, Verde Malaquita y Azul de Metileno [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137986>.

GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 185, n. C, p. 1–17, 1 jan. 1986.

GHARAVI-NAKHJAVANI, M. S.; NIAZI, A.; HOSSEINI, H.; AMINZARE, M.; DIZAJI, R.; TAJDAR-ORANJ, B.; MIRZA ALIZADEH, A. Malachite green and leucomalachite green in fish: a global systematic review and meta-analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 17, p. 48911–48927, 1 abr. 2023.

GOIAS. Assembleia Legislativa de Goiás. **Projeto de Lei nº 649 de 26 de junho de 2019**. Proíbe o lançamento de efluentes que contenham corantes em rios, lagos, represas e demais corpos de água doce do estado de Goiás, e determina a classificação dos corantes como contaminantes ambientais. Disponível em: <https://opine.al.go.leg.br/proposicoes/2019003941>. Acesso em: 9 mai. 2024.

GONZALEZ, C. I.; MELIN, P.; CASTRO, J. R.; CASTILLO, O. Edge detection methods based on generalized type-2 fuzzy logic systems. **SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology**, n. 9783319539935, p. 21–35, 2017.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71–78, 2000.

GUEDES, W. N.; PEREIRA, F. M. V. Raw sugarcane classification in the presence of small solid impurity amounts using a simple and effective digital imaging system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 307–311, 1 jan. 2019.

- GÜLŞEN BAKICI, G.; KADEM, F. D. One-Bath Dyeing and Finishing Process of Polyester Fabrics. **TEKSTİL ve KONFEKSİYON**, v. 31, n. 4, p. 306–3017, 2021.
- GÜNER, D.; ŞENER, B. B.; BAYRAÇ, C. Label free detection of auramine O by G-quadruplex-based fluorescent turn-on strategy. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 267, p. 120532, fev. 2022.
- GUO, P.; ASIF, M. S.; MA, Z. Low-Light Color Imaging via Cross-Camera Synthesis. **IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing**, v. 16, n. 4, p. 828–842, 1 jun. 2022.
- HAN, L.; CAI, Y. Automatic digital-numerical integrated analysis by the image-based meshless method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 119, p. 44–58, 1 out. 2020.
- HAN, P.; DONG, D.; ZHAO, X.; JIAO, L.; LANG, Y. A smartphone-based soil color sensor. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 232–241, 1 abr. 2016.
- HARDER, K. B. A Medley in the Spectrum: Color Names. **A Journal of Onomastics**, v. 47, n. 3, p. 243–248, 1999.
- HARRIS, D. C. Análise Química Quantitativa (tradução e revisão Barcia, O. E. e Afonso, J. C.), Ed. Gen/LTC, Rio de Janeiro. Skoog *et al.*. **Fundamentos da Química Analítica**, 8ª edição, 2012.
- HASHIMOTO, J. C.; PASCHOAL, J. A. R.; QUEIROZ, J. F. DE; REYES, F. G. R. Considerations on the Use of Malachite Green in Aquaculture and Analytical Aspects of Determining the Residues in Fish: A Review. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 20, n. 3, p. 273–294, jul. 2011.
- HAWKYARD, C. J.; BEZERRA, C. M. DE. Spectral power distributions for the CIE stimuli. **Color Research and Application**, v. 26, n. 6, p. 478–482, dez. 2001.
- HELLWIG, L.; FAIRCHILD, M. D. Brightness, lightness, colorfulness, and chroma in CIECAM02 and CAM16. **Color Research & Application**, v. 47, n. 5, p. 1083–1095, 1 out. 2022.
- HERRERO-LATORRE, C.; BARCIELA-GARCÍA, J.; GARCÍA-MARTÍN, S.; PEÑA-CRECENTE, R. M. Detection and quantification of adulterations in aged wine using RGB digital images combined with multivariate chemometric techniques. **Food Chemistry: X**, v. 3, p. 100046, set. 2019.
- HERRERO, M. S. Procesos avanzados de oxidación química y biológica combinados, aplicados a la degradación del colorante Auramina O y a la reducción de la contaminación acuática. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/553>. 2014
- HOA, D. T. N.; TOAN, T. T. T.; MAU, T. X.; HOAN, N. T. V.; TRAM, T. T. N.; MANH, T. D.; NGUYEN, V. T.; DUYEN, V. T.; THONG, P. L. M.; KHIEU, D. Q. Voltammetric determination of Auramine O with ZIF-67/Fe₂O₃/g-C₃N₄-modified electrode. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 31, n. 22, p. 19741–19755, 26 nov. 2020.
- HOANG, L. Q.; CHI, H. B. L.; KHANH, D. N. N.; VY, N. T. T.; HANH, P. X.; VU, T. N.; LAM, H. T.; PHUONG, N. T. K. Development of a low-cost colorimeter and its application for determination of environmental pollutants. **Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy**, v. 249, 15 mar. 2021.

HONG, W.; YUAN, Z.; CHEN, X. **Structural Color Materials for Optical Anticounterfeiting** Wiley-VCH Verlag, , 1 abr. 2020.

HOROBIN, R. W.; KIERNAN, J. A. **Conn's Biological Stains: A Handbook of Dyes, Stains and Fluorochromes for Use in Biology and Medicine**. 10. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2020.

HU, J.; LIU, Y.; WU, Z. Structural color for wood coloring: a review. **Bioresources**, v. 15, n. 4, p. 9917–9934, 2020.

HUANG, M.; LU, S. G.; REN, Y.; LIANG, J.; LIN, X.; WANG, X. **Structural coloration and its application to textiles: a review** *Journal of the Textile Institute* Taylor and Francis Ltd., , 3 maio 2019.

INDOW, T. Uniformities in OSA-UCS and in NCS tested by color difference prediction based on principal hue components. **9th Congress of the International Colour Association**, v. 4421, p. 844, 6 jun. 2002.

IQBAL, K.; JAVID, A.; REHMAN, ABDUR; REHMAN, AISHA; ASHRAF, M.; ABID, H. A. Single bath dyeing of modified nylon/cotton blended fabrics using direct/acid dyes. **Pigment and Resin Technology**, v. 49, n. 3, p. 165–170, 20 abr. 2020.

ISHIKAWA, F.; OISHI, M.; KIMURA, K.; YASUI, A.; SAITO, K. Determination of Synthetic Food Dyes in Food by Capillary Electrophoresis. **Journal of the Food Hygienic Society of Japan (Shokuhin Eiseigaku Zasshi)**, v. 45, n. 3, p. 150–155, 2004.

JIN, J.; LEE, D.; IM, H. G.; HAN, Y. C.; JEONG, E. G.; ROLANDI, M.; CHOI, K. C.; BAE, B. S. Chitin Nanofiber Transparent Paper for Flexible Green Electronics. **Advanced Materials**, v. 28, n. 26, p. 5169–5175, 1 jul. 2016.

JIN, L.-N.; QIAN, X.-Y.; WANG, J.-G.; ASLAN, H.; DONG, M. MIL-68 (In) nano-rods for the removal of Congo red dye from aqueous solution. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 453, p. 270–275, set. 2015.

JING, X.; WANG, H.; HUANG, X.; CHEN, Z.; ZHU, J.; WANG, X. Digital image colorimetry detection of carbaryl in food samples based on liquid phase microextraction coupled with a microfluidic thread-based analytical device. **Food Chemistry**, v. 337, p. 127971, fev. 2021.

KAHU, S. Y.; RAUT, R. B.; BHURCHANDI, K. M. Review and evaluation of color spaces for image/video compression. **Color Research & Application**, v. 44, n. 1, p. 8–33, 1 fev. 2019a.

_____. Review and evaluation of color spaces for image/video compression. **Color Research & Application**, v. 44, n. 1, p. 8–33, 1 fev. 2019b.

KANG, H. C.; HAN, H. N.; BAE, H. C.; KIM, M. G.; SON, J. Y.; KIM, Y. K. HSV Color-Space-Based Automated Object Localization for Robot Grasping without Prior Knowledge. **Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 7593**, v. 11, n. 16, p. 7593, 18 ago. 2021.

KANG, Y.-Y.; JEON, T.-W.; KIM, W.-I.; SHIN, S. K.; YEON, J.-M.; SOMASUNDARAM, S. Correlation study of hazardous waste characteristics among various chemical processes in Republic of Korea. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 3, p. 566–575, 29 jul. 2014.

KIM, D.-H. *et al.* Dissolvable films of silk fibroin for ultrathin conformal bio-integrated electronics. **Nat. Mater.**, v. 9, n. 6, p. 511–517, jun. 2010.

KIM, J. BIN; LEE, S. Y.; LEE, J. M.; KIM, S.-H. Designing Structural-Color Patterns Composed of Colloidal Arrays. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 11, n. 16, p. 14485–14509, 2019.

KIM, M.; GOLD, J. M.; MURRAY, R. F. What image features guide lightness perception? **Journal of Vision**, v. 18, n. 13, p. 1–1, 3 dez. 2018.

KINOSHITA, S.; YOSHIOKA, S. **Structural colors in nature: The role of regularity and irregularity in the structure** ChemPhysChem Wiley-VCH Verlag, , 12 ago. 2005.

KINOSHITA, S.; YOSHIOKA, S.; MIYAZAKI, J. Physics of structural colors. **Reports on Progress in Physics**, v. 71, n. 7, p. 30, 1 jul. 2008.

KIRILLOVA, N. P.; GRAUER-GRAY, J.; HARTEMINK, A. E.; SILEOVA, T. M.; ARTEMYEVA, Z. S.; BUROVA, E. K. New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 378–385, 1 dez. 2018.

KOCYIGIT, A.; YILMAZ, M.; İNCEKARA, Ü.; ŞAHİN, Y.; AYDOĞAN, Ş. The light detection performance of the congo red dye in a Schottky type photodiode. **Chemical Physics Letters**, v. 800, p. 139673, 1 ago. 2022.

KONG, C. P. Y.; SUHAIMI, N. A. A.; SHAHRI, N. N. M.; LIM, J. W.; NUR, M.; HOBLEY, J.; USMAN, A. Auramine O UV Photocatalytic Degradation on TiO₂ Nanoparticles in a Heterogeneous Aqueous Solution. **Catalysts**, v. 12, n. 9, p. 975, 1 set. 2022.

KOOHKAN, R.; KAYKHAI, M.; SASANI, M.; PAULL, B. Fabrication of a Smartphone-Based Spectrophotometer and Its Application in Monitoring Concentrations of Organic Dyes. **ACS Omega**, v. 5, n. 48, p. 31450–31455, 8 dez. 2020.

KRISHNAN, S.; SYED, Z. UL Q. Colorimetric Visual Sensors for Point-of-needs Testing. **Sensors and Actuators Reports**, v. 4, p. 100078, 1 nov. 2022.

KUEHNI, R. G. A structural comparison of the Munsell renotation and the OSA-UCS uniform color systems. **Color Research & Application**, v. 25, n. 3, p. 186–192, jun. 2000.

LAKSHMINARAYANAN, V. **Maxwell, color vision, and the color triangle** Light in Nature VII. **Anais...SPIE** 11099, 30 ago. 2019

LANDA, E. R. Albert H. Munsell: A sense of color at the interface of art and science. **Soil Science**, v. 169, n. 2, p. 83–89, 2004.

LEWIS, P. D., MORRIS, T. R. (2000). Poultry and coloured light. *World's Poultry Science Journal*, 56(3), 203–207. <https://doi.org/10.1079/WPS20000015>

LI, X.; YANG, F.; WONG, J. X. H.; YU, H. Z. Integrated Smartphone-App-Chip System for On-Site Parts-Per-Billion-Level Colorimetric Quantitation of Aflatoxins. **Analytical Chemistry**, v. 89, n. 17, p. 8908–8916, 5 set. 2017.

LILLO, J.; MOREIRA, H. Lightness Compression and Hue Changes. **The Spanish Journal of Psychology**, v. 9, n. 2, p. 300–311, 2006.

- LING, Y. Y.; MOHD SUAHA, F. B. Extraction of malachite green from wastewater by using polymer inclusion membrane. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 785–794, fev. 2017.
- LISERAS, E. R. G.; MELLO-ROMÁN, J. C.; NOGUERA, J. L. V.; LEGAL-AYALA, H. Image Brightness reduction by canceling bright areas using brightness level and reconstruction by geodesic dilation. **Proceedings - 2021 47th Latin American Computing Conference, CLEI 2021**, 2021.
- LITVIN, A. A.; BURKIN, D. A.; KROPINOV, A. A.; PARAMZIN, F. N. Radiomics and Digital Image Texture Analysis in Oncology (Review). **Sovremennye tehnologii v medicine**, v. 13, n. 2, p. 97, abr. 2021.
- LIU, F.; TAO, C.-A.; TANG, B. Recent advances in environmentally friendly structural colored fabrics. **Textile Research Journal**, v. 93, n. 8, p. 1861–1877, 2023.
- LIU, F.; ZHANG, S.; WANG, G.; ZHAO, J.; GUO, Z. A novel bifunctional molecularly imprinted polymer for determination of Congo red in food. **RSC Advances**, v. 5, n. 29, p. 22811–22817, 2015.
- LIU, L.; MI, Z.; WANG, J.; LIU, Z.; FENG, F. A label-free fluorescent sensor based on yellow-green emissive carbon quantum dots for ultrasensitive detection of congo red and cellular imaging. **Microchemical Journal**, v. 168, 1 set. 2021.
- LIU, P.; BAI, L.; YANG, J.; GU, H.; ZHONG, Q.; XIE, Z.; GU, Z. Self-assembled colloidal arrays for structural color. **Nanoscale Advances**, v. 1, n. 5, p. 1672–1685, 2019.
- LONG, K. D.; WOODBURN, E. V.; LE, H. M.; SHAH, U. K.; LUMETTA, S. S.; CUNNINGHAM, B. T. Multimode smartphone biosensing: the transmission, reflection, and intensity spectral (TRI)-analyzer. **Lab on a Chip**, v. 17, n. 19, p. 3246–3257, 26 set. 2017.
- LOPES, J. M. B. **Cor e Luz**. [s.l.: s.n.].
- LU, Y. C.; PRIYANTHA, N.; LIM, L. B. L.; SUKLUENG, M. Toxic yellow cow dung powder (Auramine O dye) removal via Ipomoea aquatica waste. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, v. 181, p. 422–435, 2020.
- LU, Y.; PRIYANTHA, N.; LIM, L. B. L. Ipomoea aquatica roots as environmentally friendly and green adsorbent for efficient removal of Auramine O dye. **Surfaces and Interfaces**, v. 20, p. 100543, set. 2020.
- MAHATO, K.; CHANDRA, P. Paper-based miniaturized immunosensor for naked eye ALP detection based on digital image colorimetry integrated with smartphone. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 128, p. 9–16, 2019.
- MALTHUS, T. J.; OHMSEN, R.; WOERD, H. J. VAN DER. An Evaluation of Citizen Science Smartphone Apps for Inland Water Quality Assessment. **Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1578**, v. 12, n. 10, p. 1578, 15 maio 2020.
- MARANHÃO, R. DE A. **HISTÓRIA DA TEORIA DAS CORES: UMA LEITURA FILOSÓFICA, ARTÍSTICA E FÍSICA-DE PITÁGORAS A ISAAC NEWTON VII** Congresso Nacional de Educação. **Anais...2021** Disponível em: <https://www.colorsistem.com/?page_id=31>

MARTÍNEZ-VERDÚ, F.; CHORRO, E.; PERALES, E.; VILASECA, M.; PUJOL, J. Camera-based colour measurement. **Colour Measurement: Principles, Advances and Industrial Applications**, p. 147-e2, 1 jan. 2010.

MARTINS, R. DE A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, 2015.

MASAWAT, P.; HARFIELD, A.; SRIHIRUN, N.; NAMWONG, A. Green Determination of Total Iron in Water by Digital Image Colorimetry. **Analytical Letters**, v. 50, p. 173–185, 2017.

MAULE, J.; SKELTON, A. E.; FRANKLIN, A. The Development of Color Perception and Cognition. **Annual Review of Psychology**, v. 74, p. 87–111, 2023.

MENG, X.; SCHULTZ, C. W.; CUI, C.; LI, X.; YU, H.-Z. On-site chip-based colorimetric quantitation of organophosphorus pesticides using an office scanner. **Sensors and Actuators B**, v. 215, p. 577–583, 2015.

MILTON, E. J. Review Article Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807–1827, 15 jun. 1987.

MITTAL, N.; JANSSON, R.; WIDHE, M.; BENSELFELT, T.; HÅ, K. M. O.; LUNDELL, F.; HEDHAMMAR, M.; DANIEL SÖ, L. Ultrastrong and Bioactive Nanostructured Bio-Based Composites. **ACS Nano**, v. 11, p. 19, 2017.

MONTAG, E. D.; BUCKLEY, S. G. Where Perception Meets Reality: The Science of Measuring Color. **Spectroscopy**, p. 21- 24,35, 1 out. 2022.

MORENO-VILLALBA, L.; ÁVILA-CAMACHO, F. J.; MONTES-CERÓN, I. G.; GARRIDO-HERNÁNDEZ, A.; CARDOSO-CHÁVEZ, C. A.; PACHECO-PIÑA, C. J. Diseño de un espectrofotómetro UV -VIS de bajo costo para la industria bioquímica: una revisión. **Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI**, v. 9, n. Especial 2, p. 19–28, 2021.

MORRIS-KAY, G. M. The evolution of human artistic creativity. **Journal of Anatomy**, v. 216, n. 2, p. 158–176, 2010.

Museo Galileo. Disponível em:

<<https://bibdig.museogalileo.it/tecanew/opera?bid=395712&seq=59>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

NANJAPPA, M. D.; JAYAPRAKASH, G. K. Some progress in voltammetric methods to detect malachite green in real samples using carbon electrodes. **Journal of Electrochemical Science and Engineering**, 2 jun. 2023.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 1031–1038, 2006.

NASEEM, K.; FAROOQI, Z. H.; BEGUM, R.; IRFAN, A. Removal of Congo red dye from aqueous medium by its catalytic reduction using sodium borohydride in the presence of various inorganic nano-catalysts: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 296–307, jun. 2018.

- NAUTIYAL, A.; SHUKLA, S. R. Silver nanoparticles catalyzed reductive decolorization of spent dye bath containing acid dye and its reuse in dyeing. **Journal of Water Process Engineering**, v. 22, p. 276–285, 1 abr. 2018.
- NGUYEN THI KIM, T.; BUI, T. T.; PHAM, A. T.; DUONG, V. T.; LE, T. H. G. Fast Determination of Auramine O in Food by Adsorptive Stripping Voltammetry. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**, v. 2019, p. 1–6, 12 mar. 2019.
- NOGUERA, J. L. V.; AYALA, H. L.; SCHAERER, C. E.; FACON, J. A color morphological ordering method based on additive and subtractive spaces. **2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2014**, p. 674–678, 28 jan. 2014.
- NOH, H.; LIEW, S. F.; SARANATHAN, V.; MOCHRIE, S. G. J.; PRUM, R. O.; DUFRESNE, E. R.; CAO, H. How noniridescent colors are generated by quasi-ordered structures of bird feathers. **Advanced Materials**, v. 22, n. 26–27, p. 2871–2880, 20 jul. 2010.
- NONNO, S. DI; ULBER, R. Smartphone-based optical analysis systems. **Analyst**, v. 146, n. 9, p. 2749–2768, 4 maio 2021.
- O'CONNOR, Z. Traditional colour theory: A review. **Color Research and Application**, v. 46, n. 4, p. 838–847, 2021.
- OHTA, N. Estimation of luminance factor from cie supplementary standard colorimetric observers. **Color Research & Application**, v. 17, n. 2, p. 123–126, 1992.
- OHTA, N.; ROBERTSON, A. R. CIE Standard Colorimetric System. *Em*: KRISS, M. A. (Ed.). **Colorimetry: Fundamentals and Applications**. [s.l.] John Wiley & Sons, Ltd, 2005. p. 63–114.
- OLEARI, C. **Color opponency and scale uniformity in the OSA-UCS system: the geometrical structure** SPIE 4421, 9th Congress of the International Color Association. **Anais...SPIE**, 6 jun. 2002. Acesso em: 25 maio. 2023
- ORLANDI, G.; CALVINI, R.; PIGANI, L.; FOCA, G.; VASILE SIMONE, G.; ANTONELLI, A.; ULRICI, A. Electronic eye for the prediction of parameters related to grape ripening. **Talanta**, v. 186, p. 381–388, 15 ago. 2018.
- ORNA, M. V. Historic mineral pigments: Colorful benchmarks of ancient civilizations. *Em*: **ACS Symposium Series**. [s.l.] American Chemical Society, 2015. v. 1211p. 17–69.
- OSORIO, F. S. M.; ESPINOZA, I. DE LOS A. P. **Calibración de un Espectrofotómetro UV-Visible y Evaluación de la Incertidumbre**. León: [s.n.].
- ÖZDEMİR, G. K.; BAYRAM, A.; KILIÇ, V.; HORZUM, N.; SOLMAZ, M. E. Smartphone-based detection of dyes in water for environmental sustainability. **Analytical Methods**, v. 9, n. 4, p. 579–585, 2017.
- ÖZTÜRK, L. D. Location of Munsell colors in the RAL design system. **Color Research and Application**, v. 30, n. 2, p. 130–134, abr. 2005.
- PASSOS, M. L. C.; SARAIVA, M. L. M. F. S. Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies. **Measurement**, v. 135, p. 896–904, mar. 2019.
- PASTILHA, R. C.; LINHARES, J. M. M.; RODRIGUES, A. I. C.; NASCIMENTO, S. M. C. Describing natural colors with Munsell and NCS color systems. **Color Research & Application**, v. 44, n. 3, p. 411–418, 1 jun. 2019.

- PATAER, P.; MUHAMMAD, T.; TURAHUN, Y.; YANG, W.; AIHEBAIER, S.; WUBULIKASIMU, M.; CHEN, L. Preparation of a stoichiometric molecularly imprinted polymer for auramine O and application in solid-phase extraction. **Journal of Separation Science**, v. 42, n. 8, p. 1634–1643, 6 abr. 2019.
- PHUNG, T. H.; KONG, X.; LELOUP, F. B.; SMET, K. A. G.; HANSELAER, P. Brightness appearance of self-luminous stimuli on a non-uniform background. **Color Research & Application**, v. 47, n. 6, p. 1330–1344, 1 dez. 2022.
- POMPE, M. T. Color vision testing in children. **Color Research and Application**, v. 45, n. 5, p. 775–781, 2020.
- PONS, X. *et al.* **Diseño y validación del protocolo de medida para el espectrorradiómetro Ocean Optics USB2000+ en aplicaciones con sensores aeroportados y a bordo de satélite** (J. Bustamante, R. Díaz-Delgado, D. Aragonés, I. Afán, & D. García, Eds.) Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección. **Anais...Sévilla**: out. 2015. Acesso em: 21 maio. 2023
- PRIDMORE, R. W. Complementary colors: A literature review. **Color Research & Application**, v. 46, n. 2, p. 482–488, 2020.
- PRIYE, A.; BALL, C. S.; MEAGHER, R. J. Colorimetric-Luminance Readout for Quantitative Analysis of Fluorescence Signals with a Smartphone CMOS Sensor. **Analytical Chemistry**, v. 90, n. 21, p. 12385–12389, 6 nov. 2018.
- QIN, X.; BAKHEET, A. A. A.; ZHU, X. Fe₃O₄@ionic liquid- β -cyclodextrin polymer magnetic solid phase extraction coupled with HPLC for the separation/analysis of congo red. **Journal of the Iranian Chemical Society**, v. 14, n. 9, p. 2017–2022, 15 set. 2017.
- QIU, J.; NA, L.; LI, Y.; BAI, W.; ZHANG, J.; JIN, L. N,S-GQDs mixed with CdTe quantum dots for ratiometric fluorescence visual detection and quantitative analysis of malachite green in fish. **Food Chemistry**, v. 390, p. 133156, out. 2022.
- QUINTERO-JARAMILLO, J. A.; CARRERO-MANTILLA, J. I.; SANABRIA-GONZÁLEZ, N. R. A Review of Caffeine Adsorption Studies onto Various Types of Adsorbents. **The Scientific World Journal**, v. 2021, p. 1–18, 19 jul. 2021.
- RACE, A. M.; BUNCH, J. **Optimisation of colour schemes to accurately display mass spectrometry imaging data based on human colour perception** *Analytical and Bioanalytical Chemistry* Springer Verlag, , 28 mar. 2015.
- RAMANATH, R.; SNYDER, W. E.; YOO, Y.; DREW, M. S. Color image processing pipeline. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 22, n. 1, p. 34–43, 2005.
- RAMOS, P. Estudo e aplicação de processos oxidativos avançados e ecotoxicológicos no tratamento de efluente contendo verde malaquita. Universidade Federal de Alagoas. 2018.
- RAVAL, N. P.; SHAH, P. U.; SHAH, N. K. Malachite green “a cationic dye” and its removal from aqueous solution by adsorption. **Applied Water Science**, v. 7, n. 7, p. 3407–3445, 18 nov. 2017.
- REIS, L. G. T. dos. Degradação do corante Vermelho Congo em solução aquosa através de plasma obtido por eletrólise de alta tensão. Universidade Federal de Viçosa. 2009
- REN, M.; ZHU, L.; MA, X.; CUI, L. Fabric Defect Detection Method Based on Coarseness Measurement and Color Distance. **Laser & Optoelectronics Progress**, v. 58, n. 4, fev. 2021.

- RODRIGUEZ, M. Graphic arts perspective on RGB-to-CMYK conversion. **IEEE International Conference on Image Processing**, v. 2, p. 319–322, 1996.
- ROWLAND, H. M.; BURRISS, R. P. Human colour in mate choice and competition. **Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological**, v. 372, n. 1724, 2017.
- SABZROO, N.; BASTAMI, T. R.; KARIMI, M.; HEIDARI, T.; AGARWAL, S.; GUPTA, V. K. Synthesis and characterization of magnetic poly(acrylonitrile-co-acrylic acid) nanofibers for dispersive solid phase extraction and pre-concentration of malachite green from water samples. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 60, p. 237–249, abr. 2018.
- SADHUKHAN, B.; MONDAL, N. K.; CHATTORAJ, S. Biosorptive removal of cationic dye from aqueous system: a response surface methodological approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 6, p. 1015–1025, 3 ago. 2014.
- SAHRAEI, R.; FARMANY, A.; MORTAZAVI, S. S.; NOORIZADEH, H. Spectrophotometry determination of Congo red in river water samples using nanosilver. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 94, n. 10, p. 1886–1892, dez. 2012.
- SALCEDO, A. R. M.; SEVILLA III, F. B. Colorimetric determination of mercury vapor using smartphone camera-based imaging. **Instrumentation Science & Technology**, v. 46, n. 4, p. 450–462, 2018.
- SANTOS, A. M. F. DOS; ALVIM, M. H. Estudo sobre a formação das cores na óptica: possibilidades a partir das Fontes Documentais Históricas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, p. 798–827, 15 dez. 2022.
- SANTOS, M. DA S. **Análise exploratória da correlação entre espectrorradiômetro de campo e variáveis de solo e planta em vinhedo**. Santa Maria: [s.n.].
- SANTOS NETO, J. H.; PORTO, I. S. A.; SCHNEIDER, M. P.; SANTOS, A. M. P. DOS; GOMES, A. A.; FERREIRA, S. L. C. Speciation analysis based on digital image colorimetry: Iron (II/III) in white wine. **Talanta**, v. 194, p. 86–89, mar. 2019.
- SCHANDA, J. CIE Colorimetry. *Em: Colorimetry: Understanding the CIE System*. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2007. p. 25–78.
- SHANG, L.; WEIXIA ZHANG, AB; XU, K.; ZHAO, Y. Bio-inspired intelligent structural color materials. **Materials Horizons**, v. 6, n. 5, p. 945–958, 2019.
- SHARMA, G. **Digital Color Imaging Handbook**. [s.l.] CRC Press, 2002.
- SHARMA, G.; VRHEL, M. J.; TRUSSELL, H. J. Color imaging for multimedia. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 6, p. 1088–1107, 1998.
- SHARMA, J.; SHARMA, S.; SONI, V. Toxicity of malachite green on plants and its phytoremediation: A review. **Regional Studies in Marine Science**, v. 62, p. 102911, 1 set. 2023.
- SHAUKAT, A.; NOBLE, F.; ARIF, K. M. Nanostructured Color Filters: A Review of Recent Developments. **Nanomaterials**, v. 10, n. 8, 2020.
- SHETTI, N. P.; MALODE, S. J.; MALLADI, R. S.; NARGUND, S. L.; SHUKLA, S. S.; AMINABHAVI, T. M. Electrochemical detection and degradation of textile dye Congo red at graphene oxide modified electrode. **Microchemical Journal**, v. 146, p. 387–392, 1 maio 2019.

SIDDIQUE, N.; DIN, M. I.; KHALID, R.; HUSSAIN, Z. A comprehensive review on the photocatalysis of Congo red dye for wastewater treatment. **Reviews in Chemical Engineering**, 3 ago. 2023.

SIUDA-KRZYWICKA, K.; BOROS, M.; BARTOLOMEO, P.; WITZEL, C. **The biological bases of colour categorisation: From goldfish to the human brainCortex**Masson SpA, , 1 set. 2019.

SIVAKUMAR, R.; LEE, N. Y. Recent progress in smartphone-based techniques for food safety and the detection of heavy metal ions in environmental water. **Chemosphere**, v. 275, p. 130096, jul. 2021.

SMITH, N. S.; BILLMEYER, F. W. Comparison of the colorcurve and SCA-2541 colour order systems using the OSA-UCS model. **Color Research & Application**, v. 19, n. 5, p. 363–374, 1994.

SMITH, T.; GUILD, J. The C.I.E. colorimetric standards and their use. **Transactions of the Optical Society**, v. 33, n. 3, p. 73, 1 jan. 1931.

SOLANA-ALTABELLA, A.; SÁNCHEZ-IRANZO, M. H.; BUESO-BORDILS, J. I.; LAHUERTA-ZAMORA, L.; MELLADO-ROMERO, A. M. Computer vision-based analytical chemistry applied to determining iron in commercial pharmaceutical formulations. **Talanta**, v. 188, p. 349–355, 1 out. 2018.

SONG, W.; JIANG, N.; WANG, H.; GUO, G. Evaluation of machine learning methods for organic apple authentication based on diffraction grating and image processing. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 88, p. 103437, maio 2020.

SOUZA, F. L. A. DE; AMORIM, C. G.; ARAÚJO, A. DA N.; ŠATÍNSKÝ, D.; PAIM, A. P. S.; MONTENEGRO, M. C. B. S. M. Malachite Green Optical Sensor Based on Electrospun Polyimide Nanofiber. **Chemosensors 2022, Vol. 10, Page 348**, v. 10, n. 9, p. 348, 25 ago. 2022.

STOCKMAN, A. Cone fundamentals and CIE standards. **Current Opinion in Behavioral Sciences**, v. 30, p. 87–93, 1 dez. 2019.

STRAUB, R. F.; VOYKSNER, R. D.; KEEVER, J. T. Determination of aromatic amines originating from azo dyes by hydrogen-palladium reduction combined with gas chromatography/mass spectrometry. **Analytical Chemistry**, v. 65, n. 15, p. 2131–2136, 1 ago. 1993.

SUGIURA, H.; KAGAWA, S.; KANEKO, H.; TAKAHASHI, M.; MATOBA, N.; NOSE, J. **Development of sRGB compliant front LCD projectors** (M. H. Wu, Ed.)30 abr. 2002

SUN, W.; YAO, Y. Degradation of Auramine-O in Aqueous Solution by Ti/PbO₂-Electro-Fenton Process by Hydrogen Peroxide Produced In Situ. **Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science**, v. 45, n. 1, p. 145–154, 1 fev. 2021a.

_____. Degradation of Auramine-O in Aqueous Solution by Ti/PbO₂-Electro-Fenton Process by Hydrogen Peroxide Produced In Situ. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science**, v. 45, n. 1, p. 145–154, 17 fev. 2021b.

TAMBARU, D.; RUPILU, R. H.; NITTI, F.; GAURU, I.; SUWARI. **Development of paper-based sensor coupled with smartphone detector for simple creatinine determination**2017

TANG, N. *et al.* Nonlinear color space coded by additive digital pulses. **Optica**, Vol. 8, Issue 7, pp. 977-983, v. 8, n. 7, p. 977–983, 20 jul. 2021.

TAO, Y.; CHEN, D.; CHAO, X.; YU, H.; YUANHU, P.; LIU, Z.; HUANG, L.; WANG, Y.; YUAN, Z. Simultaneous determination of malachite green, gentian violet and their leuco-metabolites in shrimp and salmon by liquid chromatography–tandem mass spectrometry with accelerated solvent extraction and auto solid-phase clean-up. **Food Control**, v. 22, n. 8, p. 1246–1252, ago. 2011.

TARA, N.; SIDDIQUI, S. I.; RATHI, G.; CHAUDHRY, S. A.; INAMUDDIN; ASIRI, A. M. Nano-engineered Adsorbent for the Removal of Dyes from Water: A Review. **Current Analytical Chemistry**, v. 16, n. 1, p. 14–40, 8 jan. 2020.

TATEBE, C.; ZHONG, X.; OHTSUKI, T.; KUBOTA, H.; SATO, K.; AKIYAMA, H. A simple and rapid chromatographic method to determine unauthorized basic colorants (rhodamine B, auramine O, and pararosaniline) in processed foods. **Food Science & Nutrition**, v. 2, n. 5, p. 547–556, 2 set. 2014.

TAYLOR, P. **Smartphone mobile network subscriptions worldwide 2016-2028** . Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>>. Acesso em: 28 maio. 2023.

TEYSSIER, J.; SAENKO, S. V; MAREL, D. VAN DER; MILINKOVITCH, M. C. Photonic crystals cause active colour change in chameleons. **Nature Communications**, v. 6, n. 6368, 2015.

TKALCIC, M.; TASIC, J. F. **Colour spaces - perceptual, historical and applicational background**. Ljubljana, Slovenia: [s.n.].

TREZONA, P. W.; PARKINS, R. P. Derivation of the 1964 colorimetric standards. **Color Research and Application**, v. 23, n. 4, p. 221–225, 1998.

UCHIKAWA, K. Categorical Color Perception of Color Normal and Deficient Observers. **Optical Review**, v. 21, n. 6, p. 911–918, 2014.

UTHOFF, R. D.; SONG, B.; MAAROUF, M.; SHI, V.; LIANG, R. Point-of-care, multispectral, smartphone-based dermoscopes for dermal lesion screening and erythema monitoring. **Journal of Biomedical Optics**, v. 25, n. 06, p. 1, 23 jun. 2020.

VALLIÈRES, M.; FREEMAN, C. R.; SKAMENE, S. R.; NAQA, I. EL. A radiomics model from joint FDG-PET and MRI texture features for the prediction of lung metastases in soft-tissue sarcomas of the extremities. **Physics in Medicine and Biology**, v. 60, n. 14, p. 5471–5496, 7 jul. 2015.

WALRAVEN, P. L. On the Bezold-Brücke Phenomenon. **JOSA**, Vol. 51, Issue 10, pp. 1113-1116, v. 51, n. 10, p. 1113–1116, 1 out. 1961.

WANG, J.; HONG, C.; LIN, Z.; HUANG, Z.-Y. Fluorescence detection of malachite green in fish based on aptamer and SYBR Green I. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 30, n. 3, p. 369–381, 14 set. 2022.

WANG, J.; SHI, K.; WANG, L.; LI, Z.; PAN, R.; GAO, W. Decoloration of Multi-Color Fabric Images for Fabric Appearance Smoothness Evaluation by Supervised Image-to-Image Translation. **IEEE Access**, v. 7, p. 181284–181294, 2019.

- WANG, J.; YANG, Y.; SHEN, Q.; SHEN, D.; KANG, Q. A smartphone-based long optical path colorimetric turntable for selective determination of malachite green and investigation the specific adsorption behavior of the imprinted cavities within molecularly imprinted polymers. **Microchemical Journal**, v. 190, 1 jul. 2023.
- WANG, W.; YANG, Z.; XIAO, L.; GUAN, T.; GONG, X.; HU, Q. Supersensitive detection of auramine O in food and drug samples by using carbon dots as sensing reagents. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 5, p. 5360–5370, 15 out. 2023.
- WANG, Y.; CHEN, L. Analysis of malachite green in aquatic products by carbon nanotube-based molecularly imprinted – matrix solid phase dispersion. **Journal of Chromatography B**, v. 1002, p. 98–106, out. 2015.
- WESTLAND, S. Review of the CIE System of Colorimetry and Its Use in Dentistry. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, v. 15, n. SUPPL. 1, p. S5–S12, 2003.
- WITZEL, C.; GEGENFURTNER, K. R. Color Perception: Objects, Constancy, and Categories. **Annual Review of Vision Science**, v. 4, p. 475–499, 2018.
- WU, Y.; CHEN, Y.; SONG, Q.; XIAO, S. **Dynamic Structural Colors Based on All-Dielectric Mie Resonators** *Advanced Optical Materials* John Wiley and Sons Inc, , 1 jun. 2021.
- XUAN, Z.; LI, J.; LIU, Q.; YI, F.; WANG, S.; LU, W. **Artificial Structural Colors and Applications** *The Innovation* Cell Press, , 28 fev. 2021.
- YANG, B.; LIU, W.; LI, Z.; CHENG, H.; CHOI, D. Y.; CHEN, S.; TIAN, J. Ultrahighly Saturated Structural Colors Enhanced by Multipolar-Modulated Metasurfaces. **Nano Letters**, v. 19, n. 7, p. 4221–4228, 10 jul. 2019.
- YAVUZ, G.; ZILLE, A.; SEVENTEKIN, N.; SOUTO, A. P. Structural coloration of chitosan-cationized cotton fabric using photonic crystals. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 254, n. 10, 2017.
- YUAN, Z.; HOU, G.; HAN, L. A Terbium-Based MOF as fluorescent probe for the detection of Malachite Green, Fe³⁺ and MnO₄⁻. **Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie**, v. 648, n. 17, 13 set. 2022.
- YUE, X.; LI, Y.; XU, S.; LI, J.; LI, M.; JIANG, L.; JIE, M.; BAI, Y. A portable smartphone-assisted ratiometric fluorescence sensor for intelligent and visual detection of malachite green. **Food Chemistry**, v. 371, 1 mar. 2022.
- ZHANG, W.; QIN, H.; LIU, Z.; DU, H.; LI, H.; FANG, L.; CHEN, Z. Quantitative Determination of Auramine O in Bean Curd Sheets by Dispersive Solid Phase Extraction with Dynamic Surfaced-Enhanced Raman Spectroscopy. **Analytical Letters**, v. 53, n. 8, p. 1282–1293, 23 maio 2020.
- ZHANG, Z.; CHEN, Z.; SHANG, L.; ZHAO, Y. **Structural Color Materials from Natural Polymers** *Advanced Materials Technologies* John Wiley and Sons Inc, , 1 nov. 2021.
- ZHOU, M.; JIN, K.; WANG, S.; YE, J.; QIAN, D. Color Retinal Image Enhancement Based on Luminosity and Contrast Adjustment. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 65, n. 3, p. 521–527, 1 mar. 2018.
- ZI, J.; YU, X.; LI, Y.; HU, X.; XU, C.; WANG, X.; LIU, X.; FU, R.; SHEN, Y. R. Coloration strategies in peacock feathers. **Cortex**, v. 118, p. 82–106, 2019.

ZWANENBURG, A. *et al.* The image biomarker standardization initiative: Standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping. **Radiology**, v. 295, n. 2, p. 328–338, 1 maio 2020.

ANEXO I – CURVAS DOS ESPECTROS DAS SOLUÇÕES BINÁRIAS

Figura 80 – Espectro (método espectrofotométrico) para a solução binária com corante VM com concentração $[g. L^{-1}]$ variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração $[g. L^{-1}]$ constante a: (a) 0,0048; (b) 0,0096; (c) 0,0144; (d) 0,0192 e (e) 0,024.

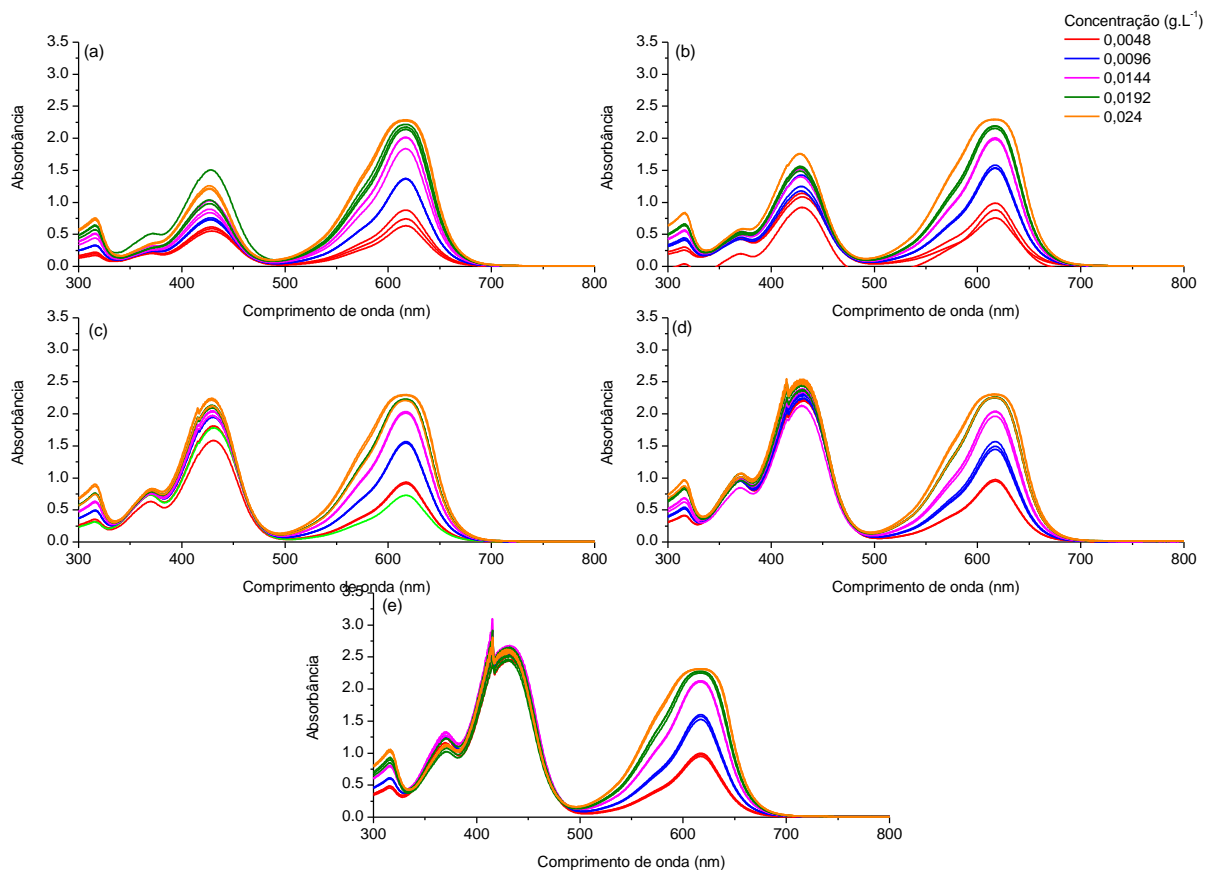


Figura 81 – Espectro (método espectrofotométrico) para solução binária com corante VM com concentração $[g. L^{-1}]$ variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração $[g. L^{-1}]$ constante a: (a) 0,0006; (b) 0,006; (c) 0,012; (d) 0,018 e (e) 0,024.

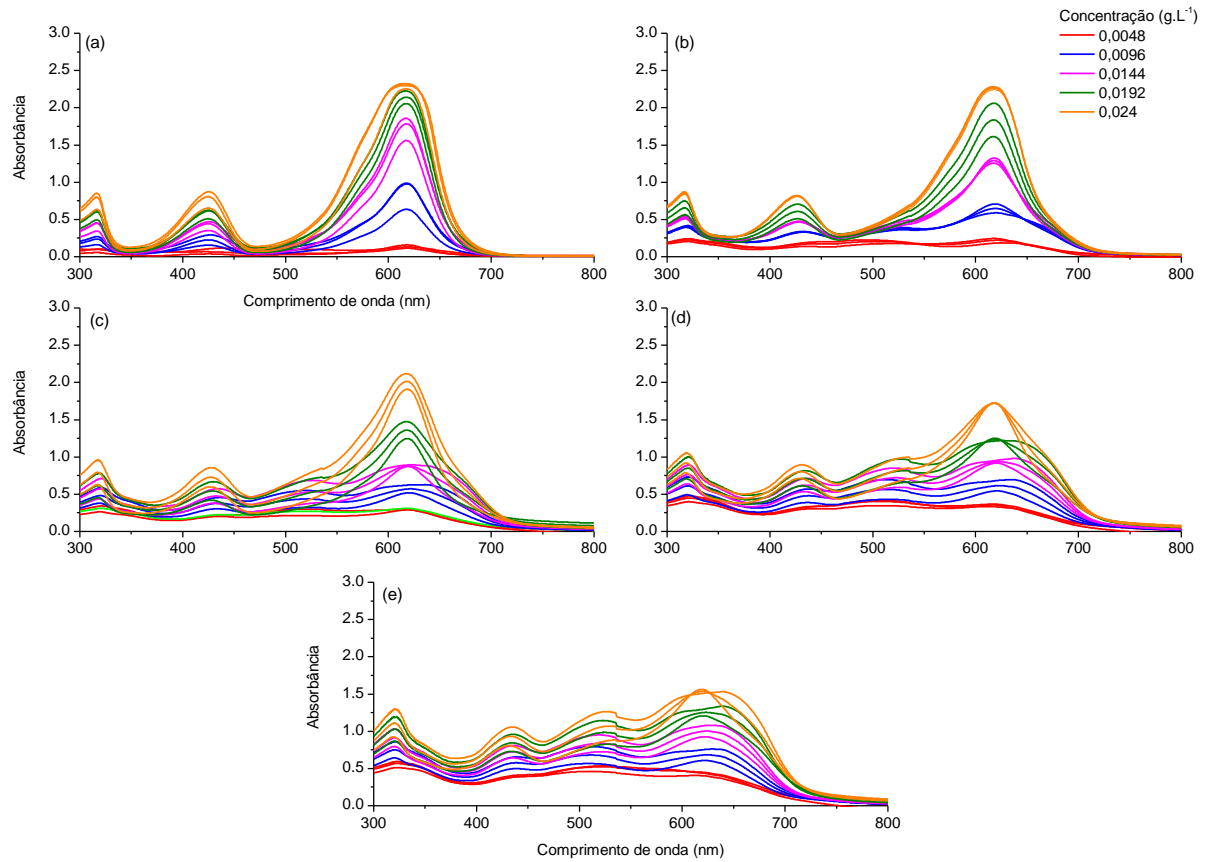
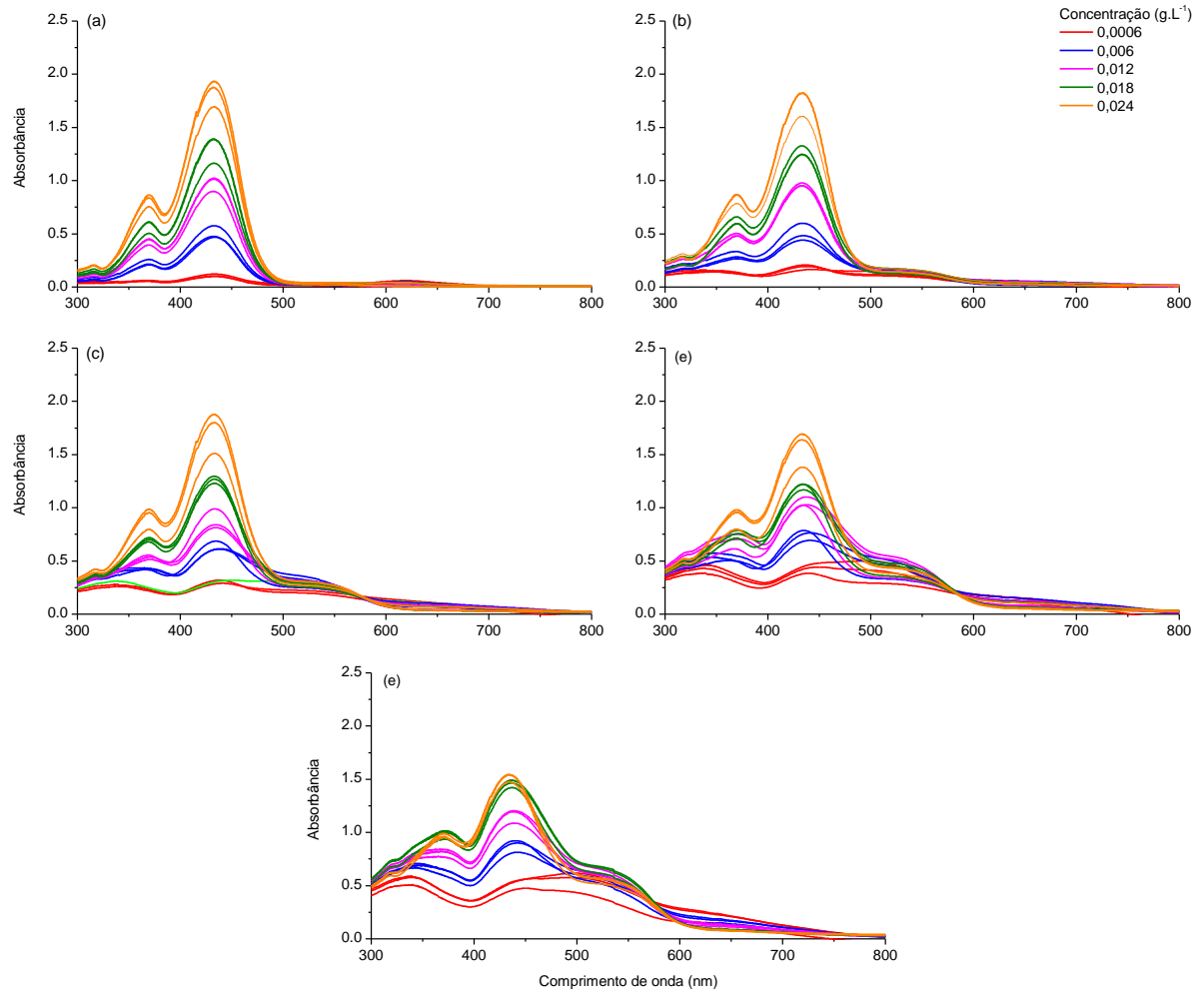


Figura 82 – Espectro (método espectrofotométrico) para solução binária com corante AU com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante a: (a) 0,0006; (b) 0,006; (c) 0,012; (d) 0,018 e (e) 0,024.



ANEXO II – PROPRIEDADES ANALITICAS DA ANÁLISE RGB E ESPECTROFOTOMETRIA

Tabela 21: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0048).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	424,5 nm
Intercepto	0,811	0,045	0,371	0,531	0,349
Coefficiente Angular	108,354	27,813	11,778	80,292	8,292
Coefficiente de correlação	0,914	0,992	0,703	0,950	0,451
R ²	0,835	0,983	0,494	0,902	0,204
R ² (adj)	0,822	0,982	0,455	0,894	0,142
p-valor	<0,0001	<0,0001	0,003	<0,0001	0,091
LOQ ¹	0,261	0,076	0,605	0,194	1,194
LOD ²	0,015	0,005	0,033	0,011	0,08

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 22: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0096).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	424,5 nm
Intercepto	1,412	0,092	0,957	0,79	0,880
Coefficiente Angular	90,174	28,66	- 1,674	68,535	5,236
Coefficiente de correlação	0,827	0,994	0,219	0,936	0,393
R ²	0,683	0,989	0,048	0,893	0,152
R ² (adj)	0,659	0,988	0	0,885	0,086
p-valor	0,0002	<0,0001	0,433	<0,0001	0,164
LOQ ¹	0,402	0,063	-	0,203	1,627
LOD ²	0,022	0,004	-	0,012	0,113

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 23: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0144).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	424,5 nm
Intercepto	1,563	0,187	1,552	0,726	1,56
Coefficiente Angular	65,938	30,972	-14,681	72,375	- 3,639
Coefficiente de correlação	0,771	0,983	- 0,738	0,930	- 0,363
R ²	0,595	0,967	0,545	0,865	0,132
R ² (adj)	0,564	0,965	0,510	0,854	0,065
p-valor	0,0008	<0,0001	0,002	<0,0001	0,183
LOQ ¹	0,49	0,108	-	0,233	-
LOD ²	0,027	0,006	-	0,013	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 24: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0192).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	424,5 nm
Intercepto	1,40	0,091	1,462	0,772	1,98
Coefficiente Angular	83,66	30,639	- 10,542	70,465	- 9,910
Coefficiente de correlação	0,823	0,996	- 0,732	0,949	- 0,665
R ²	0,015	0,001	0,12	0,901	0,442
R ² (adj)	0	0	0,051	0,893	0,399
p-valor	0,0002	<0,0001	0,002	<0,0001	0,007
LOQ ¹	0,407	0,049	-	0,195	-
LOD ²	0,022	0,003	-	0,011	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 25: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0048 a 0,024) e AU com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0240).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	424,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	1,715	0,084	1,830	0,822	2,42
Coefficiente Angular	93,319	37,271	- 20,09	70,09	-23,903
Coefficiente de correlação	0,842	0,996	- 0,921	0,933	- 0,934
R ²	0,151	0,002	0,083	0,870	0,872
R ² (adj)	0,085	0	0,013	0,860	0,863
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
LOQ ¹	0,379	0,049	-	0,227	-
LOD ²	0,021	0,003	-	0,013	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 26: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0006).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,575	0,115	0,086	0,278	0,036
Coefficiente Angular	127,633	28,237	13,513	86,805	0,145
Coefficiente de correlação	0,914	0,994	0,991	0,954	0,053
R ²	0,836	0,987	0,982	0,910	0,028
R ² (adj)	0,823	0,986	0,981	0,903	0
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,852
LOQ ¹	0375	0,097	0,114	0,266	20,868
LOD ²	0,018	0,005	0,006	0,013	8,835

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 27: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,006).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,211	0,216	0,243	0,153	0,191
Coefficiente Angular	110,654	33,784	13,823	82,048	2,233
Coefficiente de correlação	0,968	0,943	0,832	0,991	0,433
R ²	0,937	0,890	0,692	0,981	0,187
R ² (adj)	0,932	0,882	0,669	0,980	0,125
p-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,107
LOQ ¹	0,220	0,297	0,567	0,117	1,845
LOD ²	0,011	0,014	0,027	0,006	0,115

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 28: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,012).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,171	0,349	0,368	0,148	0,287
Coefficiente Angular	91,971	24,437	8,969	63,859	1,535
Coefficiente de correlação	0,989	0,823	0,561	0,973	0,138
R ²	0,978	0,678	0,314	0,942	0,019
R ² (adj)	0,976	0,653	0,261	0,926	0
p-valor	<0,0001	0,0002	0,03	<0,0001	0,624
LOQ ¹	0,128	0,585	1,273	0,201	6,912
LOD ²	0,006	0,028	0,068	0,010	1,243

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 29: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,018).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,244	0,468	0,532	0,273	0,422
Coefficiente Angular	78,678	29,806	12,392	49,082	4,927
Coefficiente de correlação	0,988	0,918	0,680	0,985	0,409
R ²	0,977	0,844	0,463	0,971	0,167
R ² (adj)	0,975	0,832	0,422	0,969	0,103
p-valor	<0,0001	<0,0001	0,005	<0,0001	0,131
LOQ ¹	0,131	0,366	0,928	0,146	1,980
LOD ²	0,006	0,017	0,045	0,007	0,130

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 30: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes VM com concentração [g. L⁻¹] variável (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,024).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	617,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,296	0,547	0,652	0,407	0,532
Coefficiente Angular	62,588	28,773	12,461	38,758	8,414
Coefficiente de correlação	0,946	0,844	0,567	0,989	0,609
R ²	0,895	0,713	0,321	0,977	0,371
R ² (adj)	0,887	0,691	0,269	0,976	0,323
p-valor	<0,0001	<0,0001	0,028	<0,0001	0,016
LOQ ¹	0,289	0,540	1,260	0,129	1,136
LOD ²	0,014	0,025	0,066	0,006	0,057

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 31: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,0006).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	424,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,024	0,033	0,121	0,039	0,006
Coefficiente Angular	0,303	0,754	109,726	57,182	0,929
Coefficiente de correlação	0,173	0,579	0,968	0,987	0,393
R ²	0,030	0,336	0,937	0,974	0,220
R ² (adj)	0	0,295	0,932	0,972	0,159
p-valor	0,537	0,024	<0,0001	<0,0001	0,148
LOQ ¹	5,10	1,212	0,220	0,139	1,600
LOD ²	0,780	0,063	0,011	0,007	0,098

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 32: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes AU (com concentração [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,006).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	424,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,055	0,136	0,085	0,099	0,131
Coefficiente Angular	- 0,818	1,062	111,13	51,056	- 2,25
Coefficiente de correlação	- 0,264	0,495	0,979	0,989	- 0,416
R ²	0,007	0,245	0,959	0,978	0,173
R ² (adj)	0	0,187	0,956	0,977	0,109
p-valor	0,341	0,061	<0,0001	<0,0001	0,123
LOQ ¹	-	1,597	0,174	0,126	-
LOD ²	-	0,088	0,008	0,006	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 33: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,012).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	424,5 nm	336,5 nm
Bandas/Comprimento de onda					
Intercepto	0,143	0,279	0,300	0,199	0,281
Coefficiente Angular	- 4,239	0,863	96,005	45,153	- 3,961
Coefficiente de correlação	- 0,774	0,283	0,982	0,973	- 0,711
R ²	0,600	0,080	0,964	0,947	0,506
R ² (adj)	0,569	0,009	0,962	0,943	0,468
p-valor	0,0007	0,307	<0,0001	<0,0001	0,003
LOQ ¹	-	3,490	0,162	0,199	-
LOD ²	-	0,278	0,008	0,010	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 34: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,018).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	424,5 nm	336,5 nm
Intercepto	0,22	0,468	0,596	0,368	0,441
Coefficiente Angular	- 6,937	- 1,036	84,691	33,54	- 5,729
Coefficiente de correlação	- 0,852	- 0,186	0,992	0,973	- 0,739
R ²	0,727	0,035	0,985	0,947	0,546
R ² (adj)	0,706	0	0,983	0,943	0,511
p-valor	<0,0001	0,506	<0,0001	<0,0001	0,002
LOQ ¹	-	-	0,106	0,200	-
LOD ²	-	-	0,005	0,010	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).

Tabela 35: Dados analíticos obtidos da análise RGB e espectrofotometria para amostras da solução binária entre os corantes AU com concentração [g. L⁻¹] (0,0006 a 0,024) e VC com concentração [g. L⁻¹] constante (0,024).

Método	Absorbância RGB			Absorbância espectral	
	R	G	B	424,5 nm	336,5 nm
Intercepto	0,303	0,662	0,799	0,48	0,593
Coefficiente Angular	-11,12	- 0,860	88,415	31,649	- 5,117
Coefficiente de correlação	-0,961	- 0,207	0,963	0,966	- 0,570
R ²	0,923	0,043	0,928	0,934	0,325
R ² (adj)	0,917	0	0,922	0,929	0,273
p-valor	<0,0001	0,459	<0,0001	<0,0001	0,027
LOQ ¹	-	-	0,236	0,226	-
LOD ²	-	-	0,011	0,011	-

¹Limite de quantificação (0,95). ²Limite de detecção (0,95).