

FELIPE DOS SANTOS BOQUIMPANI

***Caracterização das interações entre pigmentos
artísticos e fontes de luz***

São Paulo

2011

FELIPE DOS SANTOS BOQUIMPANI

***Caracterização das interações entre pigmentos
artísticos e fontes de luz***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro.

Orientador:
Prof. Dr. Augusto Camara Neiva

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo

2011

Trabalho de Conclusão de Curso sob o título "*Caracterização das interações entre pigmentos artísticos e fontes de luz*", elaborado por Felipe dos Santos Boquimpani.

Felipe dos Santos Boquimpani

Augusto Camara Neiva
Orientador

“O homem só é levado ao desejo de conhecer se fenômenos notáveis lhe chamam a atenção. Para que esta perdure, é preciso haver interesse mais profundo, que nos aproxime cada vez mais dos objetos. Observamos então uma grande diversidade diante de nós. Somos obrigados então a separá-la, distingui-la e recompô-la, daí resultando uma ordenação que pode ser apreciada com maior ou menor satisfação.”
(Goethe, Doutrina das Cores)

Resumo

Este Trabalho de Conclusão de Curso se propõe a entender e facilitar o entendimento científico e a apreensão do mundo das cores. Primeiramente procuramos entender, através de experimentações, o processo de transformação da radiação eletromagnética em dados específicos de uma fotografia digital. O que uma conhecida cor (interação pigmento e fonte) daria de resposta em arquivo digital? Tendo verificado a correspondência da “cor física” com a “cor digital”, passamos à caracterização por dados digitais de pigmentos artísticos históricos conhecidos. Concomitante e dependentemente, foi desenvolvido uma formatação de procedimentos e metodologia, assim como ferramentas computacionais a compor o software produto. Numa segunda etapa, suplementos à técnica foram estudados de modo a fornecer dados adicionais à caracterização e à identificação de pigmentos, como a possibilidade de estímulo por fontes de radiação de espectro pouco suave (lâmpadas de descarga) e a fotografia em infravermelho. Ao final uma proto-ferramenta computacional desenvolvida é avaliada.

Abstract

This research aims to understand and facilitate the scientific understanding and apprehension of the color world. Through experimentation we seek to understand the transformation process of electromagnetic radiation to digital photograph data. What would a known color (pigment interaction and source) answer in a digital file? Having established the correspondence of “physical color” with “digital color”, we go for the digital data characterization of known historical art pigments. Dependently and concomitantly, procedures and methodology were developed as well as computational tools to compose the software product. Further, the technical supplements were studied in order to provide additional data to characterization and identification of pigments, such as the possibility of stimulus by sources of sharp spectrum radiation (discharge lamps) and infrared photography. At the end of a proto-developed computer tool is evaluated.

Lista de Figuras

1.1	Espectros de corpos negros a diferentes temperaturas.	p. 7
1.2	Esquema de níveis energéticos de números quânticos n e l	p. 8
1.3	Transições eletrônicas para séries de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett e Pfund.	p. 9
1.4	Diagrama esquemático do olho humano.	p. 11
1.5	Curva de sensibilidade de um observador padrão da CIE	p. 12
1.6	Valores <i>tristimuli</i> RGB para sensibilização espectral do observador padrão CIE(1931).	p. 15
1.7	Valores <i>tristimuli</i> XYZ para sensibilização espectral dos observadores padrão CIE.	p. 17
1.8	Diagrama de cromaticidade xy (CIE(1931)) com sensações de cor mapeadas.	p. 17
1.9	Diferenças cromáticas no diagrama xyY (CIE(1931))	p. 18
1.10	Diferenças cromáticas no diagrama Lu'v' (CIE(1976))	p. 19
1.11	Diagrama esquemático do modelo La*b* (CIE(1976))	p. 20
1.12	Diagrama de cromaticidade xy com a curva de Planck e alguns iluminantes.	p. 21
1.13	Linhas de isoterma para o diagrama xyY (CIE(1931)).	p. 21
1.14	Linhas de isoterma para diagrama USC uv CIE(1960).	p. 22
2.1	Esquema de iluminação homogênea de um segmento de largura $2X$	p. 28
2.2	Distribuição de luminosidade insatisfatória com lâmpadas LED.	p. 30
2.3	Distribuição de luminosidade satisfatória com lâmpadas LED.	p. 30
2.4	Análise de fotografia do cartão <i>x-rite Color Checker®</i> pelo programa ARI-LUHIEN II.	p. 32
2.5	Etapa de retirada do filtro IV da câmera fotográfica.	p. 32
2.6	Verificação de sensibilização do fotorreceptor por radiação IV.	p. 33
2.7	Análise de fotografia sensível ao IV pelo programa ARI-LUHIEN II.	p. 34
2.8	Programa ARI-LUHIEN II durante análise de fotografia em radiação visível dos pigmentos metaméricos A, B e C.	p. 34
2.9	Programa ARI-LUHIEN II durante análise de fotografia em radiação IV dos pigmentos metaméricos A, B e C.	p. 35
2.10	Etapa de retirada do filtro IV da câmera fotográfica.	p. 36

2.11	Esquema das regiões pintadas e suas numerações.	p. 36
2.12	Imagem do programa ARI-LUHIEN II para pigmentos 49 - 52 e 69 - 72.	p. 39
2.13	Imagem do programa ARI-LUHIEN II em IV, para pigmentos 49 - 52 e 69 - 72	p. 40
2.14	Lâmpada de descarga em câmara cilíndrica para tomada espectral.	p. 41
3.1	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>R</i> no experimento preliminar.	p. 43
3.2	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>G</i> no experimento preliminar.	p. 43
3.3	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>B</i> no experimento preliminar.	p. 44
3.4	Distribuição de luminosidade para duas fontes idênticas, <i>L</i> = 55 <i>cm</i> fixo e <i>F</i> de 92 a 97 <i>cm</i> . p. 46	
3.5	Distribuição de luminosidade para duas fontes diferentes, <i>L</i> = 55 <i>cm</i> fixo e <i>F</i> de 92 a 97 <i>cm</i> . p. 47	
3.6	Distribuição do desvio padrão da coordenada <i>R</i>	p. 48
3.7	Distribuição do desvio padrão da coordenada <i>G</i>	p. 48
3.8	Distribuição do desvio padrão da coordenada <i>B</i>	p. 48
3.9	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>R</i> no experimento de verificação colorimétrica.	p. 49
3.10	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>G</i> no experimento de verificação colorimétrica.	p. 50
3.11	Relação experimental/nominal para a coordenada <i>B</i> no experimento de verificação colorimétrica.	p. 50
3.12	Distribuição do desvio padrão da coordenada <i>IV</i>	p. 52
3.13	Determinação do sinal <i>IV</i> em relação ao sinal <i>R</i>	p. 53
3.14	Determinação do sinal <i>IV</i> em relação ao sinal <i>G</i>	p. 53
3.15	Determinação do sinal <i>IV</i> em relação ao sinal <i>B</i>	p. 54
3.16	Comportamento dos pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob diferentes fontes de luz para coordenada <i>R</i> . p. 55	
3.17	Comportamento dos pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob diferentes fontes de luz para coordenada <i>G</i>	p. 56
3.18	Comportamento dos pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob diferentes fontes de luz para coordenada <i>B</i> . p. 56	
3.19	Coordenadas <i>RGB</i> para os pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob lâmpada fluorescente.	p. 58
3.20	Coordenadas <i>RGB</i> para os pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob lâmpada <i>LED</i>	p. 58
3.21	Comportamento dos pigmentos <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> sob photoflood em diferentes coordenadas.	p. 59
3.22	Variação do sinal <i>IV</i> conforme aumento da porcentagem da coordenada <i>R</i> no sinal <i>RGB</i> . p. 60	
3.23	Variação do sinal <i>IV</i> conforme classificação cromática visual das cores dos pigmentos. p. 60	

3.24	Distribuição espectral da lâmpada de descarga vermelha da XELUX.	p. 62
3.25	Distribuição espectral da lâmpada de descarga lilás da XELUX.	p. 63
3.26	Distribuição espectral da lâmpada de descarga azul da FUJI LIGHT.	p. 63
3.27	Distribuição espectral da lâmpada de descarga verde da FUJI LIGHT.	p. 64
3.28	Distribuição espectral da lâmpada de descarga rosa da FUJI LIGHT.	p. 64
3.29	Exemplificação de caso de metamerismo teoricamente.	p. 65

Lista de Tabelas

2.1	Coordendas colorimétricas nominais do cartão de cores padrão.	p. 28
2.2	Identificação de bases usadas no quadro.	p. 37
2.3	Identificação de pigmentos e vernizes usados no quadro.	p. 38
2.4	Identificação de folhas metálicas usadas no quadro.	p. 38
2.5	Parâmetros das fotografias de pigmentos históricos.	p. 39
3.1	Coordendas colorimétricas obtidas do cartão fotografado no experimento preliminar. . .	p. 42
3.2	Coordendas colorimétricas RGB-IV experimentais para pigmentos históricos azuis. . .	p. 61

Sumário

Resumo	p. iv
Abstract	p. v
Introdução	p. 1
0.1 Uma questão primordial	p. 1
0.2 A questão prática	p. 3
1 Revisão Bibliográfica	p. 5
1.1 As causas dos componentes do estímulo de cor por radiação eletromagnética	p. 5
1.1.1 Incandescência	p. 5
1.1.2 Excitação de gases	p. 6
1.2 A cor medida: colorimetria, modelos e padrões	p. 9
1.2.1 Fontes de radiação visível e iluminantes	p. 10
1.2.2 Observadores da radiação visível	p. 10
1.2.3 Modelos para as cores	p. 13
1.3 Índices relevantes à colorimetria	p. 20
1.3.1 Temperatura correlata de cor	p. 20
1.3.2 Índice de Reprodução de Cores	p. 22
1.4 Sobre pigmentos	p. 24
1.4.1 Propriedades importantes	p. 24
2 Materiais e Métodos	p. 27
2.1 Verificação colorimétrica de pigmentos	p. 27
2.1.1 Experimento preliminar	p. 27
2.1.2 Cálculo da posição ideal das fontes de radiação	p. 27
2.1.3 Experimento de verificação colorimétrica	p. 29

2.2	Fotografia sensível ao infravermelho	p. 31
2.3	Caracterização RGB-IV de pigmentos metaméricos	p. 33
2.4	Caracterização RGB-IV de pigmentos artísticos históricos	p. 35
2.5	Obtenção de espectros de emissão de lâmpadas de descarga e simulação de meta- merismas	p. 40
3	Resultados e Discussão	p. 42
3.1	Verificação colorimétrica de fotografia	p. 42
3.1.1	Experimento preliminar	p. 42
3.1.2	Cálculo da posição ideal das fontes de radiação	p. 45
3.1.3	Experimento de verificação colorimétrica	p. 47
3.2	Fotografia sensível ao infravermelho	p. 51
3.3	Caracterização RGB-IV de pigmentos metaméricos	p. 55
3.4	Caracterização RGB-IV de pigmentos artísticos históricos	p. 59
3.5	Obtenção de espectros de emissão de lâmpadas de descarga e simulação de meta- merismas	p. 61
4	Conclusão	p. 66
	Referências Bibliográficas	p. 67

Introdução

“Neste ponto, estendendo-me sobre o tema da luz, expliquei detidamente qual era aquela que se devia encontrar no sol e nas estrelas e, como, a partir daí, atravessava num instante os imensos espaços dos céus e como se refletia dos planetas e dos cometas pra terra.”

(Descartes, *Discurso do Método*)

0.1 Uma questão primordial

A questão da luz e das cores é, antes de tudo, uma questão filosófica.

As ciências naturais costumam indagar “o que faz daquela bola uma bola vermelha?”, ou “como se obtém uma certa tinta verde?”, ou “essa lâmpada terá boa reprodutibilidade de cores?”. A fisiologia, por sua vez, procura pelos mecanismos que produzem a sensação de claro/escuro ou de amarelado/azulado. No entanto, há uma questão acima destas: “Isso que vejo magenta é, de fato, magenta?” Quando a realidade se torna magenta no caminho da *res* à percepção do indivíduo? A questão que todo aquele que já se debruçou sobre as cores não conseguiu responder então assola a mente: “Esse verde pra mim é o mesmo verde pra você?” Assola e torna-se fundamental no tratamento do método científico sobre o assunto.

Newton, na sua *Óptica* de 1704, já salvaguardava o pensamento científico da exploração simplista:

Se em algum momento eu falo de Luz e Raios coloridos ou dotados de Cores, eu gostaria de ser entendido por falar não filosofica e apropriadamente, mas grosseiramente, e de acordo com tais concepções que as Pessoas comuns, ao ver todos esses Experimentos, estariam aptas a conceber. Pois os raios, para falar corretamente, não são coloridos. Neles não há nada mais que certa força e disposição para aticar¹ a sensação desta ou daquela Cor... Cores no Objeto são nada mais que uma disposição de refletir este ou aquele tipo de raios mais copiosamente que o resto; nos raios não há nada mais que a disposição de propagar esta ou aquela Moção no *Sensorium*, e no *Sensorium* elas são Sensações dessas Moções em forma de Cores. (tradução nossa.)^[3]

Entretanto, a prática newtoniana e toda a ciência física seguinte se debruçam sobre a reflexão deste ou daquele “tipo de raio” (estímulo) utilizando todo o vocabulário de cores (sensação) para descrevê-los fisicamente. Ainda na falta de um termo específico para uma determinada posição do espaço colorimétrico, utilizam de seus híbridos amarelo-avermelhado, azul-violáceo, etc. Em oposição a esta

¹Poderíamos traduzir o presente período por “*provocar* a sensação desta ou daquela Cor...”. No entanto, a locução *stir up* parece evocar de dentro do indivíduo uma memória ou o conceito anterior da “sensação”. Tal acepção, de estímulo que movimenta o sujeito a encontrar a Cor, é favorecida pelo termo excitativo “aticar” – em contraposição à possibilidade de geração externa que o termo “provocar” suscita. Esta interpretação do texto de Newton o aproxima em princípio ao seu contrapositor, Goethe – a exemplo do poema de Plotino duplamente citado por Goethe em sua Doutrina das Cores: “Se o olho não tivesse sol,/Como veríamos a luz?/Sem a força de Deus vivendo em nós,/Como o divino nos seduz?”^[1].

postura vem à tona o apontamento filosófico mais recente na questão das cores, posto por Wittgenstein, precedendo seus postulados sobre a certeza:

Quem conheça um verde avermelhado deveria estar em condições de produzir uma sequência colorida que comece com o vermelho, termine com o verde e forme, talvez também para nós, uma passagem contínua entre eles. Mostrar-se-ia então que lá onde vemos o mesmo tom, por exemplo, de marrom, ele vê ora marrom ora verde avermelhado; que ele por exemplo pode diferenciar pela cor dois compostos químicos que para nós têm a mesma cor, e a um nomeia marrom e ao outro verde avermelhado.
[4]

Assim, pelo campo das proposições gramaticais, Wittgenstein revela dois problemas fundamentais do estudo das cores. O primeiro é o problema fenomenológico da identificação das cores (e sua específica abordagem espectroscópica conhecida por *colour matching*, que veremos no decorrer deste trabalho). De acordo com o próprio Wittgenstein, a análise fenomenológica “é uma análise conceitual e não pode nem definir a física, nem contradizê-la”^[1]. Dessa forma, mesmo que o problema da nomenclatura das cores fosse isoladamente ultrapassado não se poderia relacionar os estímulos de cor (fisicamente a radiação) com as sensações de cor específicas para mais do que cada condição específica. Ou seja, dado que a identificação da consequência cor é conceitual, os pensamentos indutivos ou dedutivos da física nada podem afirmar sobre sua causa. É apenas a *práxis* que poderá reger a identificação de cores.

Tendo em vista a prática da engenharia, este trabalho operará a identificação daquilo que costuma-se nomear por “cor” de duas formas independentes. Uma delas utiliza o indivíduo perceptor (equipado de seu olho, nervo óptico, córtex visual e linguagem para as cores) como instrumento; evitando-se medições qualitativas impróprias, utiliza-se o impreciso vocabulário corrente de cores (como amarelo-esverdeado, amarelo-melão, amarelo-Austrália) e os dêitico “este”, “aquele”, etc. para indicar comparação com cores-padrão (e.g. padrões da escala Munsell, ou quadro de cores *x-Rite*). A outra forma utiliza equipamentos não humanos com saídas numéricas, como espectrofotômetros e imagens fotográficas digitais; evitando-se nomeações quantitativas imprecisas, utiliza-se dados espectrais e parâmetros deles obtidos (como valores RGB) referenciados sempre por sinais alfabéticos. Quando necessário, um mesmo objeto de estudo é avaliado pelas duas formas, porém sem causalidade de uma para a outra.

O segundo problema posto por Wittgenstein é o do metamerismo: dois objetos que ora são da mesma cor ora são de cores diferentes. Este é um dos temas deste trabalho. Para análise do fenômeno, ao se encontrar um caso de metamerismo, na condição em que é possível diferenciar duas cores, a definição de suas singularidades deve expor a diferença entre elas, quer seja pelo instrumental gramatical humano quer seja pelo instrumental matemático. Há preferência para que ambas sejam feitas, uma vez que uma não nega ou invalida a outra e suas relevâncias são distintas; o perceptivo para fins humanos e o numérico para fins matemáticos.

Embora haja diversas formas de produzir a sensação de cor – como a pressão lateralmente sobre o olho, o estímulo elétrico aos neurotransmissores do nervo óptico, o uso de certas substâncias psicotrópicas ou mesmo a indução durante os sonhos e certas enxaquecas –, neste trabalho vamos trabalhar apenas com o estímulo descrito pela teoria mais amplamente aceita e comprovada de geração das sensações visuais: a radiação eletromagnética compreendida entre 380nm e 780nm.

Também iremos distinguir as sensações visuais dos estímulos visuais aqui tratados: à sensação

nos referiremos por “cores”; aos estímulos, por “radiação”.

0.2 A questão prática

As práticas experimentais deste trabalho tiveram a pretensão de levantar dados sobre a interação de determinados pigmentos artísticos com fontes de radiação eletromagnética visível para posteriormente poder identificar estes pigmentos e simular sua resposta sob um iluminante.

No entanto, qual a relevância desta prática? Já há na literatura um extenso levantamento de espectros de refletância de pigmentos artísticos^[5]; para filtros são fornecidos seus espectros de transmitância^[6], quando não também suas coordenadas colorimétricas sob determinado iluminante^[7]; as fontes de radiação por incandescência são facilmente medeladas por corpos negros^[8]; e as lâmpadas comerciais geralmente são obtidas com os dados de seu espectro de emissão^[9-13]. Além disso, em todos estes casos, espectros podem ser obtidos por metodologia já bastante conhecida^[8, 14]. Como os espectros de emissão, transmitância e refletância são as melhores informações para fins colorimétricos sobre o comportamento de um corpo à radiação eletromagnética, sendo todas as outras informações dele derivadas, o que ainda se pode fazer?

O vislumbre da resposta está em que, embora a metodologia para obtenção de espectros eletromagnéticos por espectrofotômetros seja bem conhecida, sua prática exige: i) aparelhagem financeiramente custosa para aqueles que não façam parte de instituições de pesquisa; ii) tratamento de dados de entendimento confuso e capcioso por aqueles que não se debruçam a estudar os fundamentos e avanços da colorimetria. Para uma prática mais acessível e [não apenas eficaz, mas] também eficiente, procuramos uma técnica mais integrada à vivência cotidiana daqueles que possam se interessar pela caracterização, identificação e/ou simulação da resposta de pigmentos à luz. A proposta deste trabalho recai então sobre a integração da fotografia digital com softwares de saídas colorimétricas esquemática e numérica.

Por um lado, uma máquina fotográfica digital apresenta difundido conhecimento de usabilidade, além da já ampla e ainda crescente disponibilidade. Por outro, um software de simples manipulação aproximaria o usuário da obtenção de informações rigorosas compreensíveis, sem perder a motivação pessoal na pesquisa ou cair no ditatismo. Este caminho fundamenta a própria confiabilidade *a priori* da técnica proposta: pela apropriação que o indivíduo do início do século 00 dispõe destas duas ferramentas e pelo reconhecido desenvolvimento tecnológico da indústria fotográfica digital.

Da mesma forma que o aparato visual humano integra os estímulos eletromagnéticos gerando três sinais responsáveis pela transmissão da sensação de cor, assim a fotografia digital integra o espectro eletromagnético em três sinais que codificam a informação de cor – usualmente no sistema RGB, ou sRGB. Como o sistema nervoso humano processa os pulsos elétricos dos neurônios e gera um espaço tridimensional de cores – onde cada ponto do espaço visual se localiza e apresenta, portanto, uma distância colorimétrica entre cada outro ponto –, assim um software pode dispor a localização de pontos ou áreas fotografadas no espaço de algum modelo colorimétrico, como CIE-xyY ou CIE-Lu'v'.

Assim propomos uma técnica que apresente uma alternativa mensurável à comparação visual idiossincrática. Vamos ao desenvolvimento!

Como saber se a cor de uma fotografia do “Retirantes” de Portinari, impressa na capa de um livro, vista por um indivíduo na tela de seu computador é a mesma cor que se pode observar ao ver a obra exposta sob as luzes do MASP? Para reproduzir fielmente as cores, as indústrias gráfica e fotográfica produziram cartões de cores padrão, cujas coordenadas colorimétricas são conhecidas quando iluminadas por um iluminante padrão da CIE. Dessa forma, quando uma imagem é fotografada juntamente com esses cartões é possível saber, pela comparação dos valores nominais com as coordenadas colorimétricas RGB identificadas na fotografia, o quanto e como as cores da imagem estão distorcidas. Então pode-se ajustar a relação dos sensores de uma máquina fotográfica digital, ou cada emissor da tela de um computador, ou os parâmetros de cada pigmento para uma impressão.

Como elemento adicional à caracterização por coordenadas RGB obtidas por fotografia foram elaborados experimentos de fotografia sensível ao infravermelho. Sendo a radiação infravermelha em geral proporcionada pelos mesmos mecanismos da radiação visível e tendo os fotossensores de câmeras fotográficas digitais também sensibilidade à esta faixa de radiação, pode-se usar a luminosidade deste modo obtida como uma coordenada a mais para caracterização de pigmentos. Assim, poderá haver um espaço quadridimensional RGB-IV que revele semelhanças e distinções invisíveis ao olho humano.

Além da técnica de fotografia sensível ao infravermelho, que fornece uma coordenada adicional para a caracterização de pigmentos, há a possibilidade de gerar alguns outros dados adicionais selecionando apenas certas partes do espectro eletromagnético. Enquanto uma lâmpada incandescente produz um espectro contínuo que abrange toda a sensibilidade de um sensor fotográfico, certas lâmpadas de descarga gasosa produzem espectros de raias que estimulariam apenas trechos curtos da curva de sensibilidade de um sensor fotográfico, gerando dados específicos daquela região. Tal ferramenta pode ser útil para a caracterização de pigmentos, no entanto, corre-se o risco de adicionar dados excessivos ao tratamento da ferramenta de análise simples a que este trabalho se propõe. Uma quantidade grande de lâmpada de descargas, pode ter difícil reprodutibilidade de espectros e gerar uma quantidade de dados que tornaria mais simples e mesmo intuitivo o tratamento direto dos espectros de transmitância inteiros dos pigmentos. Entretanto, por parecer muito útil para distinguir ou criar metamerismas, procederemos como um estudo adicional deste trabalho. A fim de não nos restringirmos aos dados já integrados de coordenadas RGB, procederemos nesta parte com um estudo espectroscópico. Aproveitaremos, então, para desenvolver ferramentas computacionais simples que tratem dados espectrais e ampliem a disponibilidade de entendimento do ramo colorimétrico.

1 *Revisão Bibliográfica*

1.1 **As causas dos componentes do estímulo de cor por radiação eletromagnética**

1.1.1 **Incandescência**

A incandescência é uma forma de emissão de radiação eletromagnética apenas por efeito térmico. Seus exemplos de ocorrência mais comuns são metais aquecidos (inclusive em lâmpadas de filamento), estrelas e partículas de carbono nas chamas.

Por definição, a energia térmica de um corpo é a soma das energias cinéticas de suas partículas constituintes em relação ao centro de massa deste mesmo corpo. Assim, pode-se dizer que com a elevação da temperatura de determinado objeto, aumentam as vibrações de seus elétrons, átomos e moléculas. Em equilíbrio com cada vibração de cada partícula deste objeto está a emissão de radiação eletromagnética com mesma energia que esta vibração^[15]. Desta forma, todo corpo absorve e emite energia de acordo com sua temperatura – sendo que a 0K não há emissão nem absorção. Denomina-se também “corpo negro” o corpo ideal que absorve completamente toda radiação incidente sobre ele, não reflete nem transmite qualquer radiação e emite conforme sua temperatura.

Como a energia de uma onda eletromagnética é proporcional à sua frequência pela constante de Planck, conforme a equação 1.1 abaixo,

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

tem-se que a energia de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda pela constante de Planck e pela velocidade da onda, conforme a equação 1.2 abaixo.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

onde:

h Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$);

c Velocidade da luz ($2,996 \cdot 10^8 m/s$);

λ Comprimento de onda (*nm*).

Assim, para energias baixas, o comprimento de onda da radiação emitida/absorvida por uma vibração é grande; para altas energias, o comprimento de onda é baixo. Então objetos frios tenderiam a emitir radiação na faixa do infravermelho, enquanto objetos quentes radiações visíveis e ultravioletas.

De fato observa-se que um sólido, facilmente um metal de alto ponto de fusão, ao ser aquecido começa a emitir uma radiação observada visualmente como avermelhada que conforme se aumenta a temperatura fica alaranjada e depois amarelada. Se não houvesse o limite do ponto de fusão, observaria-se a continuidade para uma coloração bastante branca e em seguida braco-azulada, como em certas estrelas.

No entanto, seguindo a Física Clássica para cálculos da energia total emitida por um corpo negro, Rayleigh e Jeans observaram que conforme se acompanhava a diminuição do comprimento de onda da radiação emitida, a energia emitida teoricamente tendia ao infinito, divergindo das observações experimentais. Resolvendo este problema conhecido por catástrofe do ultravioleta, Max Planck propôs então que a energia das vibrações fosse limitada aos múltiplos inteiros de uma quantidade fundamental de energia. Ou seja, a energia só existiria em pacotes, denominados *quanta* (no singular: *quantum*). Resolveu-se a discrepância e a formulação ficou conhecida por Lei de Planck^[16], cuja equação básica é:

$$E_B \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot d\lambda}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (1.3)$$

sendo:

E_B Energia emitida em um hemisfério do corpo negro ($W \cdot m^{-2}$);

h Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$);

c Velocidade da luz ($2,996 \cdot 10^8 m/s$);

k Constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$);

λ Comprimento de onda (nm);

T Temperatura (K).

A Figura 1.1 mostra as curvas espectrais de corpos negros a diferentes temperaturas, com a energia dada em $kJ \cdot nm^{-1}$. Conforme a temperatura de um corpo negro é elevada, sua coloração percebida por um indivíduo de visão normal passa de negra, para avermelhada, alaranjada, amarelada, branca e então braco-azulada. Mesmo que a temperatura se eleve ao infinito, há um limite de coloração atingido que corresponde a um certo azul. A curva da temperatura de cor de um corpo negro pode ser vista mais a frente, na Figura 1.12, quando trataremos do índice Temperatura Correlata de Cor.

Mas embora a definição de corpo negro seja bastante útil, este é um comportamento ideal que muitas vezes não pode ser seguido. Em engenharia uma série de modelos de desvios são então levados em consideração. Em geral pode-se utilizar os conceitos de “corpo cinza” – cuja emissão a cada comprimento de onda é proporcional à emissão do corpo negro por um fator de emissividade, ε , inferior a uma unidade e não dependente do comprimento de onda – e de “corpo branco” cuja emissividade depende do comprimento de onda e é obtida experimentalmente.

1.1.2 Excitação de gases

A geração de radiação visível por excitação de gases e vapores decorre do retorno ao estado fundamental de elétrons excitados a orbitais mais energéticos. A excitação por energia elétrica é usualmente

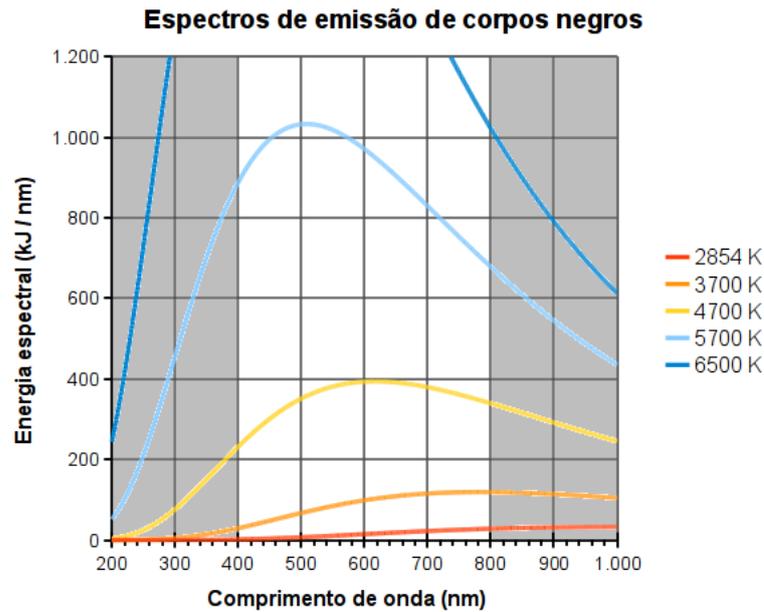


Figura 1.1: Espectros de emissão de corpos negros a diferentes temperaturas. (A região clara corresponde a parte do espectro visível por seres humanos de visão normal. A temperatura de 2854 K corresponde à temperatura de uma lâmpada incandescente comum. A temperatura de 5700 K corresponde à Temperatura Correlata de Cor da luz do céu ensolarado.)

empregada na produção de lâmpadas de descarga, neon e fluorescentes e certos tipos de laser, mas também é conhecida geradora de relâmpagos. Energia térmica é a propulsora no caso de chamas coloridas usuais em aulas de química inorgânica. Mas talvez o caso mais surpreendente seja o das auroras e coronas; fenômenos eventuais nos polos do planeta em decorrência de ventos solares carregados de íons altamente energéticos que entram em colisão com átomos gasosos e moléculas a centenas de quilômetros na atmosfera gerando estados eletrônicos excitados e posterior descarga em radiação eletromagnética^[16].

Segundo o modelo atômico de Schrödinger, o elétron não é mais descrito como uma partícula orbitando um núcleo, mas como uma onda de matéria. Assim, para um instante de tempo t o estado de um elétron é completamente definido por uma função de onda, sendo as funções de onda permitidas dadas pelas soluções da Equação de Schrödinger. Portanto, além da energia do elétron ser quantizada, agora apenas alguns estados são permitidos, correspondendo a apenas certos níveis de energia para o elétron.

Tais níveis de energia podem ser descritos por três números inteiros referentes aos orbitais atômicos: o número quântico principal ($n = 1, \dots, 7$), o número quântico de momento angular ($l = 0, \dots, n - 1$ ou s, p, d, f, g) e o número quântico magnético ($m_l = -l, \dots, +l$). Para cada átomo, a distribuição eletrônica segue o princípio de exclusão de Pauli e a regra de Hund, de tal forma que no máximo dois elétrons possam ter os mesmos números quânticos n, l e m_l . Há ainda um quarto número quântico, o de spin ($m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$), que distingue este par de elétrons, mas que não difere a energia destes elétrons a menos que haja um campo magnético. A Figura 1.2 mostra esquematicamente a distribuição de níveis de energia possíveis para os números quânticos principal e de momento angular para os elétrons de um átomo.

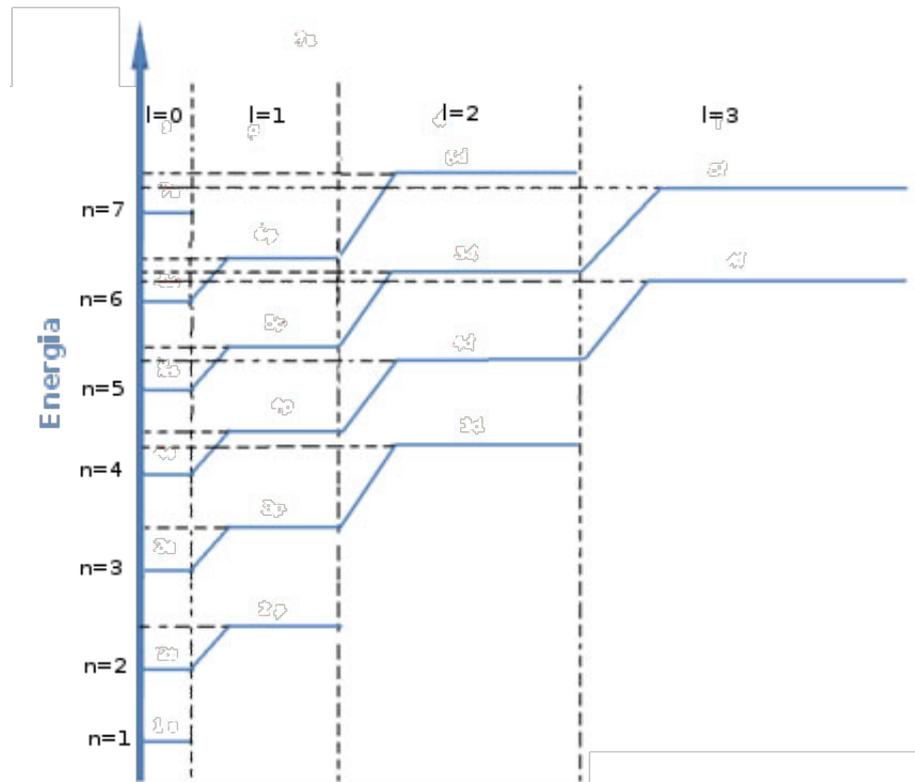


Figura 1.2: Esquema de níveis energéticos de números quânticos n e l

Se há determinados níveis de energia, um elétron pode então absorver uma determinada quantidade de energia e ser excitado de um nível de menor energia a outro de maior energia. Pela instabilidade do nível de maior energia, o elétron relaxa rápida e espontaneamente ao nível fundamental liberando a energia correspondente à diferença destes níveis na forma de radiação eletromagnética. No entanto não são permitidas transições entre quaisquer níveis energéticos. As transições possíveis são dadas pelas séries de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett e Pfund, cuja fórmula geral que dá o comprimento de onda das possíveis emissões, e portanto de suas energias, foi desenvolvida por Rydberg e é apresentada na equação 1.4 abaixo, para um átomo de hidrogênio.

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1.4)$$

sendo:

R Constante de Rydberg para o átomo de hidrogênio (m^{-1});

n Valor inteiro tal que $n = 1$ (*Lyman*), 2 (*Balmer*), 3 (*Paschen*), 4 (*Brackett*), ou 5 (*Pfund*);

m Valor inteiro tal que $m = n + 1, \dots + \infty$, para cada série.

A Figura 1.3 mostra esquematicamente as possíveis transições eletrônicas de um átomo segundo tais séries.

Para determinadas transições da série de Balmer, a emissão de radiação eletromagnética tem comprimentos de onda que estimulam a visão humana, apresentando-se como sensações coloridas.

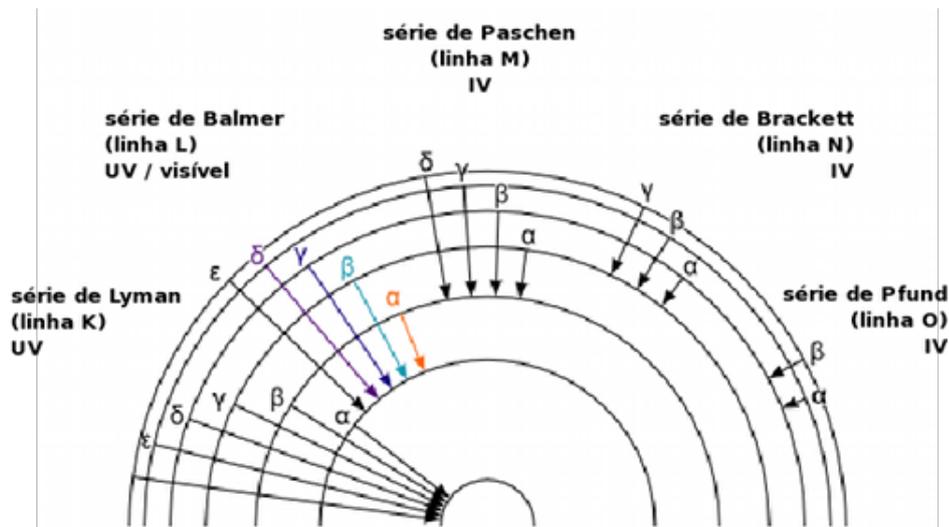


Figura 1.3: Transições eletrônicas para séries de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett e Pfund.

Cada elemento tem as suas emissões características e discretas. Assim, um átomo de sódio quando excitado por uma energia de exatamente $5,12 \text{ eV}$, é ionizado, passa a um estado instável de alta energia e retorna ao estado atômico emitindo o mesmo pacote de energia de $5,12 \text{ eV}$ na forma de radiação eletromagnética de 589 nm . Já o estrôncio, pelo mesmo processo, emite radiação eletromagnética visível com comprimentos de onda de $408, 461, 606$ e 687 nm .

Pelo fato das emissões serem de comprimentos de onda específicos, lâmpadas de descarga em geral estimulam apenas a sensação de poucas cores. Pode-se utilizar de fluorescência para absorver certas emissões e convertê-las em reemissões de energias mais baixas e mais distribuídas – como é o caso das ditas lâmpadas fluorescentes que convertem inclusive radiações ultravioleta para radiações visíveis. Ou pode-se utilizar diversos elementos num mesmo tubo de descarga para obter emissões de diversos comprimentos de onda. Há o conhecido caso das lâmpadas de sódio que trabalham a alta voltagem e alta pressão para aumentar as colisões e as energias absorvidas pelos átomos, gerando mais outras emissões menos prováveis. Porém, o espectro de emissão por excitação gasosa é inerentemente discreto.

Quando o tempo entre a excitação e a emissão espontânea é longo (o que depende especificamente dos níveis energéticos em questão), um fóton passante pode interagir com o estado excitado induzindo a uma chamada “emissão estimulada”, na qual os dois fótons se propagam em fase e na mesma direção. Este tipo de emissão por descarga gasosa é utilizada na produção de lasers dos sistemas hélio-neônio, hélio-cádmio, argônio e kriptônio, que operam em radiações visível ao ser humano normal, ou de dióxido de carbono, que opera no infravermelho.

1.2 A cor medida: colorimetria, modelos e padrões

A colorimetria é a prática científica que se ocupa em quantificar a cor, sendo esta entendida como um componente da sensação visual definida num ponto do espaço da percepção e que depende fundamentalmente da distribuição espectral da radiação estimulante. Segundo suas premissas, uma cor

específica somente é percebida quando o estímulo radiado é processado pelas células fotossensoras e pelos sistema nervoso ocular e sistema nervoso central. Ainda, esta cor específica só consegue ser distinguida de outra quando o resultado do processamento dos dois estímulos são distintos. Assim, a definição de uma cor é modelada como uma função sobrejetora, na qual cada estímulo corresponde a apenas uma sensação de cor, mas uma sensação pode ser correspondida por mais de um estímulo e, além disso, o contradomínio das sensações é maior que imagem das sensações. Mas apesar da definição precisa *a priori* da cor, como a percepção das cores é subjetiva – sendo inclusive questionável a convenção de cor como pontual^[4, 17] – e difere de indivíduo para indivíduo, a cor somente existe como construção mental individual. Portanto, para dar conta dos aspectos psicológicos e subjetivos não mensuráveis associados à percepção da cor, a colorimetria na prática utiliza métodos comparativos (*color matching*) associados à definição de um observador padrão e a medições de fenômenos físicos correlacionados à percepção da cor.

Mas antes de se falar em cor, é preciso falar daquilo da qual ela, a princípio, parece decorrer: a luz, sem atributos, ou, puramente a radiação visível ao ser humano. Para isso é preciso rever o mecanismo através do qual um indivíduo percebe sensações visuais.

1.2.1 Fontes de radiação visível e iluminantes

Iluminantes padrão da CIE

Define-se uma fonte de radiação como aquilo que realmente emite um espectro eletromagnético. Já um iluminante é uma definição ideal, *a priori*, de uma fonte – podendo não existir de fato uma fonte correspondente a cada iluminante. Assim, a CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) especificou três iluminantes pela distribuição espectral do fluxo radiante em forma de tabela^{[8]*}, para comprimentos de onda de 380nm a 780nm.

- Iluminante A: Lâmpada com filamento de tungstênio (temperatura de cor ¹ 2854K);
- Iluminante B: Modelo de luz solar ao meio dia (temperatura de cor 4800K);
- Iluminante C: Modelo de luz do dia (temperatura de cor de 6500K).

Os iluminantes B e C podem ser gerados utilizando-se o iluminante A em conjunto com filtros especiais. Em 1965, a CIE aumentou o número de iluminantes padrão para um total de dezenove. Convém ressaltar que, a menos do Iluminante A, os demais não são fontes reais e sim modelos definidos através de distribuições espectrais do fluxo radiante.

1.2.2 Observadores da radiação visível

O modelo do observador humano

O olho humano é um mecanismo complexo. Referido por globo ocular, é constituído basicamente de um conjunto óptico transparente responsável pela organização do feixe de radiação, denominado

¹ Temperatura de cor é a temperatura de um corpo negro cuja radiação apresenta as mesmas coordenadas de cromaticidade da cor em questão.

aparelho dióptrico, e um conjunto de fotorreceptores e neurotransmissores responsáveis pela transformação da radiação eletromagnética recebida em pulsos elétricos para o sistema nervoso central. No sentido da entrada da radiação, o aparelho dióptrico é constituído de (i) uma poderosa lente (córnea) cuja principal função é a convergência das ondas eletromagnéticas; (ii) um orifício (pupila), por onde entra a radiação convergida pela córnea, envolto por um conjunto de músculos e células pigmentadas (íris) que regulam o tamanho deste orifício e conseqüentemente a quantidade de radiação captada e; (iii) uma segunda lente flexível (cristalino) que ajusta a direção da radiação incidente previamente colimada pela pupila para focalização sobre as células fotossensíveis. Já o aparelho nervoso ocular é formado por (i) uma superfície de células fotorreceptoras (retina) localizada sobre o fundo do globo ocular; (ii) uma região de pequena depressão da retina (fóvea) na qual há uma maior concentração de células fotorreceptoras e onde a focalização é mais precisa; (iii) o neurotransmissor (nervo óptico) que transmite os pulso elétricos das células fotossensíveis ao sistema nervoso central.^[8, 18] Um esquema do aparelho óptico humano pode ser visto na Figura 1.4.

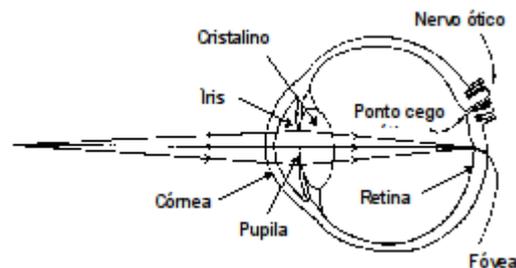


Figura 1.4: Diagrama esquemático do olho humano.

Mais detalhadamente, a retina é formada de diversos tipos de células. No sentido da penetração da radiação eletromagnética, a primeira camada de células corresponde a fibras nervosas que darão origem ao nervo óptico, transmitindo a cada ponto os pulsos elétricos das camadas mais profundas. A seguir, encontram-se as camadas de células ganglionares, células amácrinas, células bipolares e células horizontais. Tais células se conectam complexamente constituindo uma pequena rede neural de processamento, conhecida como sistema nervoso ocular^[18]. É apenas na última camada da retina que as reações fotoquímicas e a conversão em pulso elétrico irão ocorrer nas células fotorreceptoras e, detalhe importante, estas ainda têm a região fotossensível direcionada para trás.

A Fisiologia diz que existem basicamente duas células sensíveis à radiação eletromagnética da faixa que se chama costumeiramente de visível. Os *bastonetes* são totalmente insensíveis a cores e respondem a estímulos em baixa luminosidade, sendo determinantes das características da visão noturna (ou escotópica). A discriminação de cores só ocorre pela sensibilização de três diferentes *cones*, os quais se diferenciam pelo tipo de fotopigmento e curva de sensibilidade à radiação. Estes fotorreceptores, por sua vez, necessitam de níveis luminosidade maiores, o que caracteriza a visão diurna (ou fotópica)^[8]. Um exame microscópico de retina revela que, em média, um indivíduo de visão normal apresenta cerca de 6 milhões de cones e 120 milhões de bastonetes. Sendo ainda que, os cones se concentram sobre a fóvea, enquanto os bastonetes ficam distribuídos quase homogeneamente sobre toda a retina^[18]. Por isso é difícil enxergar com detalhes sob pouca luz; não pela falta de estímulo, mas pela dificuldade de focalização que a distribuição de bastonetes corresponde.

Modelando um observador

Temos que o olho pode ser considerado um sensor de radiação seletivo que detecta apenas uma parcela restrita do espectro ($380nm \leq \lambda \leq 780nm$) da energia radiante. Assim, a curva de resposta do olho é seletiva pois, para uma potência radiante constante, a luminância² na retina varia com o comprimento de onda λ . Em 1924, a CIE, com o objetivo de tornar a avaliação da radiação visível independente das idiosincrasias de um observador, elaborou uma curva de sensibilidade $V(\lambda)$ que caracteriza a visão fotóptica de um observador padrão e cujo olho encontra-se adaptado à luz diurna. Em 1951, foi elaborada uma curva suplementar $V'(\lambda)$ para caracterizar a visão escotóptica de um observador padrão, cujo olho encontra-se adaptado à pouca luz, ou luz noturna. Ambas são fornecidas sob forma de tabelas^[8] e apresentadas graficamente na Figura 1.5.

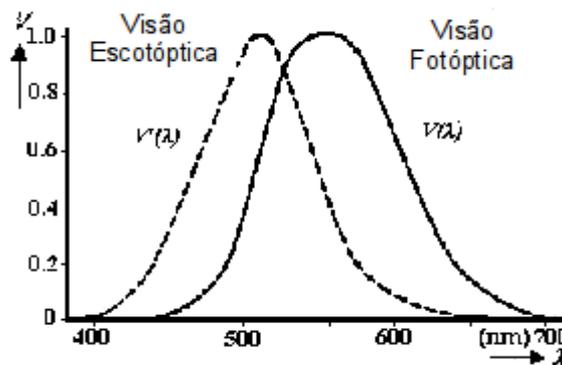


Figura 1.5: Curva de sensibilidade de um observador padrão da CIE

Conforme temos referido, toda usualmente dita fonte de luz é na verdade uma fonte de radiação eletromagnética. Para a prática científica, os dados físicos da emissão de uma fonte são dados pela distribuição espectral de fluxo radiante³ $S(\lambda)$, que pode ser obtida por um espectroradiômetro. Também o olho funciona como um filtro que aproveita apenas uma parcela desta energia. Portanto para efeito de iluminação, uma fonte de luz deve ser caracterizada pelo seu fluxo luminoso Φ , definido pela convolução de $S(\lambda)$ com a curva de sensibilidade fotóptica $V(\lambda)$, sendo seu valor em lúmen⁴ dado pela expressão:

$$\Phi = 683 \cdot \int_{400}^{780} S(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \simeq 683 \cdot \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.5)$$

Os fundamentos da visão colorida são baseados nas teorias tricromáticas de Young-Helmholtz (1896) (retina com três receptores cromáticos) e Hering (1920) (processos fotoquímicos envolvendo três pares de cores oponentes). Os processos de avaliação da cor (“color matching”) são fundamentados na tricromaticidade e baseados em processos combinatórios (aditivos ou subtrativos) de cores, ou seja, uma dada cor é identificada pelas proporções de três componentes independentes (valores primários) que a compõe.^[8]

Os processos combinatórios aditivos obedecem os postulados propostos em 1853 por Grassmann:

²Luminância é a intensidade luminosa (fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido) por unidade de área medida segundo o eixo normal da superfície.

³Fluxo radiante é o fluxo de energia radiante por unidade de tempo, em geral expresso em watts.

⁴Lúmen é o fluxo luminoso emitido em um ângulo sólido de 1 esferoradiano por uma fonte pontual com intensidade luminosa uniforme de 1 candela.

i) qualquer cor pode ser obtida pela combinação linear de três cores primárias, desde que nenhuma delas possa ser obtida pela combinação das outras duas; ii) cores idênticas, porém com distribuições espectrais distintas (metâmeros), produzem o mesmo efeito num processo de combinação aditivo de cores e iii) duas cores mantêm sua equivalência, independente dos níveis de luminância, desde que respeitados os limites da visão fotóptica.

1.2.3 Modelos para as cores

Na colorimetria, modelos são utilizados para classificar e quantificar as cores de acordo com atributos como matiz, saturação, croma, brilho ou lividez. Na literatura são bastante conhecidos os seguintes modelos: RGB(CMY), Munsell, HSB/HLS e os da CIE.

A CIE, com sede em Viena, foi criada em 1913 como um fórum para troca de informações e padronização de grandezas relacionadas com iluminação. Em 1931, o comitê de visão e cor elaborou um primeiro modelo para a cor, baseado na percepção de cor e totalmente independente de qualquer dispositivo e das características da fonte de emissão. A premissa do modelo foi a padronização dos iluminantes e das características do observador. Depois deste, vários outros modelos CIE foram elaborados. Alguns serão estudados com mais detalhes a frente. Mesmo que esses modelos sejam muito bem embasados fisiologicamente – quanto aos estímulos dos três cones –, ignoram diversos problemas de psicologia da percepção (como a percepção de cor em relação a todo o campo visual^[4, 18] e o fenômeno da cor inexistente^[17]). Além disso, em geral não disponibilizam para quais os limites de luminância são válidos, embora estes existam e sejam recorrentes principalmente nos casos de fonte de radiação direta.

Num caminho distinto, o artista americano Albert Henry Munsell publicou em 1905 um modelo com notação decimal baseado em três variáveis: matiz (*Hue*), valor (*Value*) e croma (*Chroma*), que, segundo ele, “descreve a cor de forma racional sem a utilização de nomes desconexos” e foi concebido para ser utilizado na indústria gráfica e na produção de pigmentos. Munsell idealizou um modelo orbital (na realidade uma esfera) no qual bandas de cores giram em torno do equador e o eixo orbital indica uma escala de tonalidade, o norte apontando para o branco, e o sul para o preto. Segundo Munsell: “a matiz é a qualidade que distingue uma cor da outra, o valor diferencia uma cor clara de outra escura e a croma diferencia os vários tons de uma matiz”.

Os modelos HSB (*Hue, Saturation, Brightness*), ou seja, (matiz, saturação, brilho) e HLS (*Hue, Lightness, Saturation*), ou seja, (matiz, lividez, saturação) são duas variantes de um mesmo modelo e similares ao sistema Munsell. São utilizados como padrões na computação gráfica e descrevem as qualidades bastante “aparentes” da percepção de cor.

RGB e CMY

O sistemas RGB (*Red, Green, Blue*) e CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*) são os mais conhecidos popularmente, o primeiro pela utilização em sistemas de iluminação, como monitores de televisão e projeção de imagens, e o segundo pela utilização nas artes gráficas. Estes ainda estão correlacionados, pois os estímulos primários (cores primárias) de um correspondem no outro aos estímulos secundários

(cores secundárias), obtidos por processo combinatório.

Baseado na teoria tricromática de Young-Helmholtz^[17, 18] o máximo de cores possíveis ao universo humano é dado pela combinação dos estímulos de três fotorreceptores. Assim, ao estimular separadamente cada receptor, poderia-se reproduzir toda a gama de cores humanas. Embora não haja radiação eletromagnética que estimule separadamente cada cone, uma vez que suas curvas de sensibilidade são sobrepostas^[16, 18], há formas de se estimular prioritariamente cada um deles.

O modelo RGB parte então deste princípio e combina três emissões de um único comprimento de onda conhecidas como valores *tristimuli* $R(\lambda_R = 700,0nm)$, $G(\lambda_G = 546,1nm)$ e $B(\lambda_B = 435nm)$, para produzir uma vasta gama de sensações de cores^[8]. Cada um destes sinais estimula prioritariamente um fotorreceptor, sendo que apenas o estímulo R gera uma sensação de vermelho, apenas o G uma de verde e apenas o B de azul; daí o nome.

Então, em 1931, a CIE realizou uma série de experimentos para definir a composição RGB das sensações de várias cores espectrais⁵. Cada indivíduo submetido ao teste, olhando através de uma fenda que restringe o campo de visão para 2° , o que engloba somente a fóvea, via uma tela de 100% de refletância (branca) dividida horizontalmente por um bloqueio opaco de 0% de refletância (negro). Sobre uma metade da tela era projetada uma cor espectral com uma lâmpada de teste, enquanto na outra controlava-se a intensidade projetada de três lâmpadas de mesma potência emitindo radiação monocromática dos valores *tristimuli*. O ajuste RGB era feito até se equiparar a cor desta mistura com aquela projetada pela lâmpada de teste. Caso assim não fosse possível casar as cores, uma das lâmpadas RGB poderia ser retirada e colocada junto à lâmpada de teste, controlando-se sua luminosidade projetada; tal procedimento foi interpretado como gerador de um valor negativo. O procedimento foi repetido para comprimentos de onda entre $380nm$ e $780nm$ registrando-se os componentes RGB. Utilizando a média dos resultados obtidos com grupos de 15 a 20 indivíduos adultos, com visão considerada normal, foi obtida a distribuição espectral de um observador padrão^[8, 19], que é mostrada na Figura 1.6.

Cabe ressaltar que a sensação de cor referente a R apenas não é “o vermelho”, mas um tom de vermelho, e assim para os outros *stimuli*. Além disso, este modelo não permite a reprodução de todas as cores, como demonstra a exigência de valores negativos em certos casos de *color matchig*. Uma vez que apenas três emissões espectrais são utilizadas, o espaço das cores deste modelo na prática é restrito aos estímulos originários da combinação positiva destes três comprimentos de onda. Entretanto, outras emissões espectrais não contidas no espaço RGB estimulam os cones de formas diferentes e acabam por produzir outras sensações de cor não representadas positivamente por este modelo.

Pela razão de constituir um espaço positivo de cores restrito, o modelo RGB pode ser nomeado como um “sistema de cores”; conceito que comportaria apenas algumas sensações, mas não a representação de todas as sensações possíveis. Da mesma forma, poderia-se constituir um sistema baseado em dois estímulos fundamentais, o que geraria um espaço ainda menor, ou um sistema com 4, 5, 10, n estímulos fundamentais. Como os cones são em três, a maior representação do espaço colorimétrico com base linearmente independente também deve ser constituída de três estímulos – e assim é o modelo RGB. No entanto, como os próprios fotossensores humanos têm sinais cruzados, uma base ortogonal não

⁵Cor espectral é a sensação de cor produzida pelo estímulo de uma fonte real, cujo espectro de emissão apresenta uma única raia com comprimento de onda bem definido.

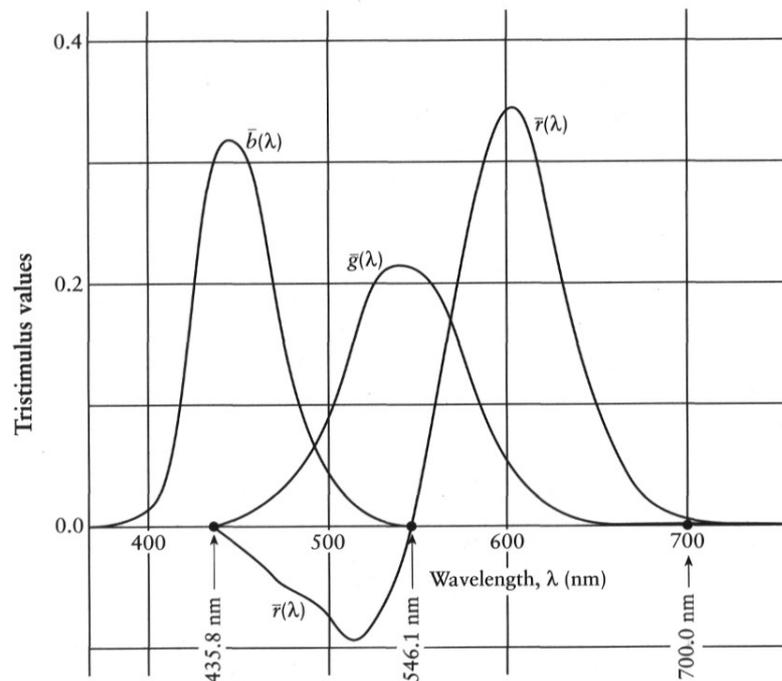


Figura 1.6: Valores *tristimuli* RGB para sensibilização espectral do observador padrão CIE(1931).

poderá representar todas as sensações de cor. A maior representação será apenas aquela que tiver como base todos os estímulos não idênticos aos quais os cones sejam sensíveis, ou seja, todo o espectro dito visível.

Todavia, para situações práticas de representação visual, os problemas do sistema RGB são minimizados. Em primeiro lugar as cores que este sistema não representa são justamente aquelas mais “escuras”, cuja distinção de outras cores é mais difícil^[18]. Fato explicado, pois emissões espectrais puras não são casos recorrentes na natureza, para os quais o organismo humano não evoluiu. Além disso, para casos artificiais, decorre a baixa viabilidade prática para fins visuais (e não apenas colorimétricos como em análises químicas) de se gerar altas intensidades de uma radiação de um único comprimento de onda. Em segundo lugar, para comprimentos de onda muito longos, ou muito curtos, as diferenças de estímulos entre os cones não é muito grande, gerando um espaço de cores adicionais bastante pequeno para trechos um tanto grandes do espectro visível. O maior problema do sistema RGB recai nas sensações de verdes próximos a cores espectrais verdes; como pode-se observar pela preponderância de valores R negativos e baixos valores G e B na região de 450nm a 550nm . Pela diversidade de tons de verde distinguíveis na natureza e apenas um emissor G próximo, o problema poderia ser reduzido por uma outra emissão de um único comprimento de onda estimuladora de sensações verdes. Entretanto nenhum esforço nesse sentido é reportado na literatura^[19, 20].

Ainda pela dificuldade de altas luminosidades em emissões de um único comprimento de onda, o modelo RGB recebeu várias alterações. A maioria delas tenta trazer os sinais R , G e B para emissões mais viáveis do ponto de vista de obtenção de manufatura e capacidade quantitativa de estímulo. Assim, muitos sistemas RGB são feitos de LEDs com emissões que estimulam sensações de cores semelhantes aos R , G e B espectrais, ou de uma mesma fonte com três filtros que geram colorações vermelha, verde e azul – sendo todos estes nomeados indiscriminadamente e igualmente ‘sistema

RGB'. Um destes sistemas é o sRGB, desenvolvido numa parceria da Hewlett-Packard com a Microsoft e amplamente usado nos equipamentos digitais, como câmeras fotográfica e monitores^[21].

Já o modelo CMY é o correspondente ao modelo RGB atuando em síntese subtrativa. Enquanto as fontes de luz R , G e B somam energias luminosas pra formar diversos estímulos para sensações mais claras – realizando uma síntese aditiva – o modelo CMY utiliza três absorvedores de radiação eletromagnética primários, cuja mistura produz diferentes formas de absorção e portanto estímulos para outras sensações mais escuras. Cada absorvedor separado produz a sensação de ciano (C , *cyan*), magenta (M , *magenta*) e amarelo (Y , *yellow*), originando o nome do sistema. Como a síntese total por pigmentos CMY não provoca a ausência de reflexão ou transmissão de radiação eletromagnética (dando uma sensação ocre bastante escura apenas), a indústria gráfica utiliza-se de um quarto pigmento negro, referido como 'chave' (K , *key*), dando origem ao sistema CMYK.

Modelo CIE xyY

Durante os trabalhos de especificação do observador padrão em 1931, a CIE verificou que o modelo RGB apresentava alguns inconvenientes. O principal deles é que o sistema RGB, baseado em valores *tristímuli* $R(\lambda_R = 700,0nm)$, $G(\lambda_G = 546,1nm)$ e $B(\lambda_B = 435nm)$, não consegue representar todas as cores espectrais sem introduzir valores *tristímuli* negativos^[8, 19]. Então, ainda em 1931, a CIE concebeu um primeiro modelo que utiliza somente valores *tristímuli* positivos, denominado XYZ, obtido do sistema RGB a partir da seguinte transformação matemática:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0607 & 0,1763 & 0,2001 \\ 0,2988 & 0,5868 & 0,1143 \\ 0,0000 & 0,0661 & 1,1149 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Posteriormente, em 1964, a CIE ainda levantou a curva de um observador padrão suplementar, agora num experimento cujo campo de observação fosse de 10° , dando resultados mais apurados para amostras de cores maiores^[19]. A Figura 1.7 mostra a curva de resposta de valores *tristímuli* XYZ conforme *colour matching* de estímulos de um único comprimento de onda, para observadores padrão de 1931 e de 1964. Convém ressaltar, que os valores *tristímuli* XYZ são apenas grandezas matemáticas; não representam diretamente as sensações das cores vermelho, verde e azul, ou mesmo a sensibilidade dos cones ao estímulo eletromagnético.

Neste modelo da CIE, a curva do valor *tristímuli* $\bar{Y}(\lambda)$ do observador padrão foi construída de tal modo que correspondesse à resposta do olho humano para a potência total da fonte (vide curva $V(\lambda)$ na Figura 1.5). Por esta razão o valor de Y é denominado fator de luminância. Por conveniência os valores XYZ foram normalizados para que Y sempre tenha valor máximo 100 e ainda formulou-se um conjunto normalizado de coordenadas de cromaticidade xyz dado por:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1.7)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (1.8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (1.9)$$

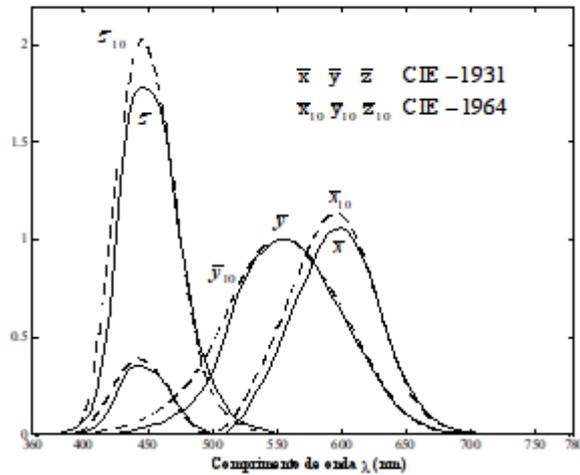


Figura 1.7: Valores *tristimuli* XYZ para sensibilização espectral dos observadores padrão CIE.

É importante notar que os valores *tristimuli* XYZ são sempre indicados em letra maiúscula, enquanto que as coordenadas de cromaticidade xyz são representadas em minúsculo.

Uma vez que $x + y + z = 1$, a CIE elaborou um diagrama de cromaticidade (Figura 1.8) utilizando as coordenadas xyY, cuja representação bidimensional tem os eixos x e y com valores entre 0 e 1 e cujo eixo tridimensional, Y, varia de 0 a 100.

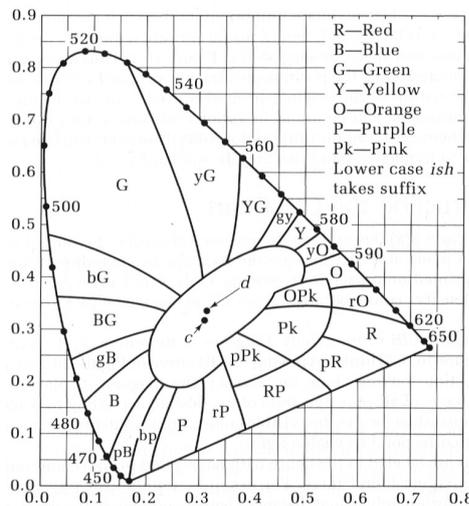


Figura 1.8: Diagrama de cromaticidade xy (CIE(1931)) com sensações de cor mapeadas.

A curva em forma de ferradura é o lugar geométrico das cores espectrais e o espaço delimitado no seu interior representa toda a gama de cores possíveis. A terceira dimensão (valor *tristimulu* Y) indica o valor de luminância da cor. Este diagrama de cromaticidade CIE-1931 permite verificar se duas cores são ou não iguais (*color matching*). Para utilizá-lo basta medir a distribuição espectral da radiação emitida, transmitida ou refletida pela amostra k e calcular as coordenadas de cromaticidade utilizando

as curvas de um observador padrão e as seguintes expressões:

$$X_k = \int_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda) \cdot d\lambda \simeq \sum_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.10)$$

$$Y_k = \int_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda) \cdot d\lambda \simeq \sum_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.11)$$

$$Z_k = \int_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda) \cdot d\lambda \simeq \sum_{380}^{780} S_k(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.12)$$

$$x_k = \frac{X_k}{X_k + Y_k + Z_k} \quad (1.13)$$

$$y_k = \frac{Y_k}{X_k + Y_k + Z_k} \quad (1.14)$$

Porém, o diagrama de cromaticidade xy é uma representação plana de um espaço curvo, que, por ser não uniforme, torna-se inadequado como ferramenta para quantificar diferenças entre cores. Seu comportamento é similar à projeção de Mercator do mapa mundi. A Figura 1.9 ilustra o grau de distorção associado ao diagrama de cromaticidade xy. Cada segmento corresponde a uma mesma diferença quantitativa de cor. Nota-se que as diferenças entre duas cores ligeiramente distintas são amplificadas na região verde do diagrama e comprimidas na região azul do mesmo.

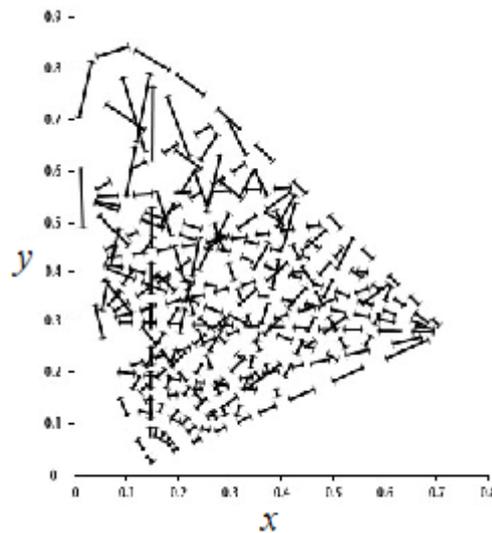


Figura 1.9: Diferenças cromáticas no diagrama xyY (CIE(1931))

Modelo CIE Lu'v'

Em 1960, foi proposto um diagrama de cromaticidade uniforme, uv, obtido do sistema xy a partir da transformação:

$$u = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (1.15)$$

$$v = \frac{6 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{6 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (1.16)$$

O efeito desta modificação foi alongar as regiões azul-vermelha do diagrama xy e realocar a po-

sição do iluminante padrão C de forma a reduzir a disparidade visual na região verde. O diagrama no entanto ainda continha imperfeições e não representava satisfatoriamente o espaço de cores.

Em 1976, foram apresentados dois novos modelos uniformes de cores: CIE Lu'v' e CIE La*b*. Ambos utilizam uma escala de luminância L* (de 0 a 100), em substituição a Y, para modelar de forma mais precisa a grandeza “valor” proposta por Munsell. O diagrama de cromaticidade u'v' é similar ao de 1960 (a coordenada v foi multiplicada por 1,5) e pode ser obtido do sistema XYZ pelas relações:

$$u' = \frac{4 \cdot X}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{4 \cdot x}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (1.17)$$

$$v' = \frac{9 \cdot Y}{X + 15 \cdot Y + 3 \cdot Z} = \frac{9 \cdot y}{-2 \cdot x + 12 \cdot y + 3} \quad (1.18)$$

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{100} \right)^{1/3} - 16 \quad (1.19)$$

Pelas alterações propostas, no diagrama u'v', uma dada diferença de cor é representada pela mesma distância entre quaisquer dois pontos do espaço, conforme ilustra a Figura 1.10.

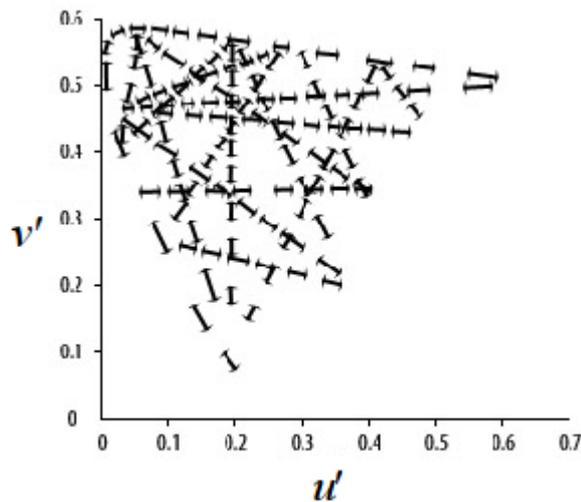


Figura 1.10: Diferenças cromáticas no diagrama Lu'v' (CIE(1976))

Modelo CIE La*b*

O modelo CIE La*b* é fundamentado na teoria de Hering, de acordo com a qual, em algum ponto entre o nervo ótico e o cérebro, ocorrem distinções entre as grandezas opostas claro e escuro, vermelho e verde e azul e amarelo, as quais são representadas pelos três eixos L, a* e b* conforme mostra o diagrama esquemático da Figura 1.11.

Os eixos são baseados na premissa (com base no funcionamento neurológico), que uma cor não pode ser simultaneamente vermelha e verde ou azul e amarela por serem cores oponentes. Este sistema é utilizado como modelo de cores pelo padrão *Adobe Postscript*.

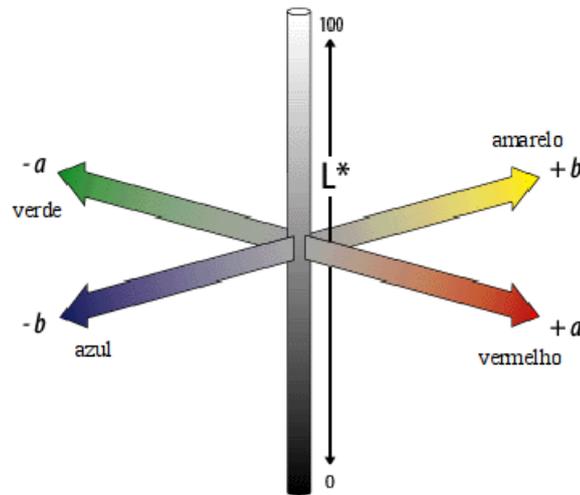


Figura 1.11: Diagrama esquemático do modelo La*b* (CIE(1976))

1.3 Índices relevantes à colorimetria

1.3.1 Temperatura correlata de cor

O termo temperatura de cor é utilizado para caracterizar a cor de uma fonte de luz. A CIE define temperatura de cor de uma fonte de luz não seletiva⁶ como a temperatura absoluta de um corpo negro ou irradiador de Planck, cuja radiação emitida tem as mesmas coordenadas de cromaticidade da fonte em questão. A Figura 1.12 mostra as coordenadas de cromaticidade no diagrama CIE xyY - 1931 da curva de Planck, dos iluminantes A, B e C e de diversas cores espectrais indicadas pelo seu comprimento de onda em nanômetros.

A densidade de potência E_B irradiada por um corpo negro a uma temperatura T é dada pela expressão (equação de Planck):

$$E_B \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot d\lambda}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (1.20)$$

sendo:

E_B Energia emitida em um hemisfério do corpo negro ($W \cdot m^{-2}$);

h Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$);

c Velocidade da luz ($2,996 \cdot 10^8 m/s$);

k Constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23} J/K$);

λ Comprimento de onda (nm);

T Temperatura (K).

Integrando-se a equação 1.20, resulta o valor total da densidade de potência irradiada pelo corpo

⁶Irradiador não seletivo é uma fonte radiante cuja emissividade não varia com o comprimento de onda.

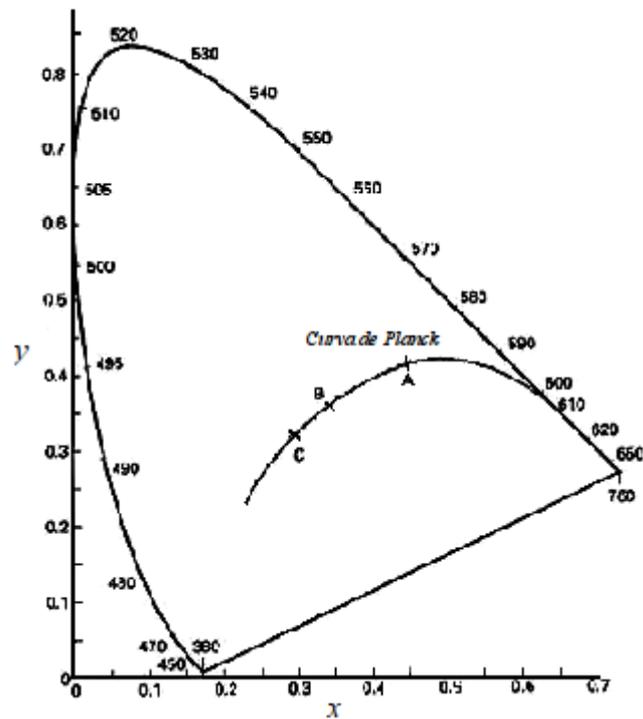


Figura 1.12: Diagrama de cromaticidade xy com a curva de Planck e alguns iluminantes.

negro:

$$E_{B_{total}} = 5,670 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \quad W/cm^2$$

A menos das lâmpadas incandescentes, a maioria das demais fontes de luz (todas as lâmpadas a descarga) são irradiadores seletivos que não acompanham a curva de Planck. Em 1936, Judd definiu o termo Temperatura Correlata de Cor (TCC) para caracterizar a cor de fontes de luz, cujas coordenadas de cromaticidade não estão localizadas exatamente sobre a curva de Planck, porém muito próximas^[8]. Partindo do diagrama de cromaticidade CIE xyY, Judd, através de transformações matemáticas, elaborou um diagrama de cromaticidade uniforme a partir do qual traçou “linhas de isotemperatura” que interceptam a curva de Planck. Na realidade, estas curvas são isocromáticas, pois constituem o lugar geométrico dos pontos com valores tristimuli muito próximos aos do ponto de intersecção com a curva de Planck. As distorções cromáticas inerentes ao diagrama de cromaticidade xyY CIE(1931) podem ser visualizadas na Figura 1.13, na qual são apresentadas as “linhas de isotemperatura” em intervalos de 10μrd (micro reciprocal Kelvin degrees).

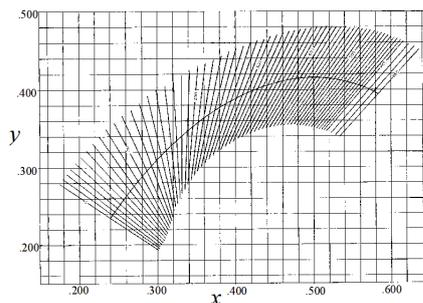


Figura 1.13: Linhas de isotemperatura para o diagrama xyY (CIE(1931)).

Na sua publicação mais recente sobre este assunto, a CIE (CIE 13.3, 1995) define TCC de uma fonte de luz com base no diagrama de cromaticidade uniforme uv CIE(1960) como o valor de temperatura associado ao ponto da curva de Planck, cuja distância ao ponto representativo da fonte é mínima. Convém notar, que no diagrama uv as “linhas de isotemperatura” são retas perpendiculares à curva de Planck, conforme mostra a Figura 1.14.

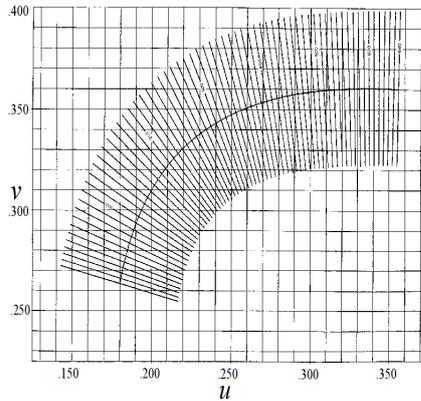


Figura 1.14: Linhas de isotemperatura para diagrama USC uv CIE(1960).

A utilização de TCC para caracterizar a cor de uma fonte luminosa só faz sentido quando a diferença de cromaticidade ΔC , ou seja, a distância (medida em um diagrama cromaticidade uniforme) entre o ponto característico da fonte (u_k, v_k) e a curva de Planck $(u_b(T), v_b(T))$, for pequena, tipicamente:

$$\Delta C = \sqrt{(u_b(T) - u_k)^2 + (v_b(T) - v_k)^2} \lesssim 0,05 \quad (1.21)$$

A partir do exposto fica claro que o valor de TCC não é medido diretamente e sim obtido através de algoritmos matemáticos das coordenadas de cromaticidade.

Em 1977, um renomado pesquisador da Kodak publicou um artigo com o título sugestivo “Correlated color temperature?”^[8] no qual levanta a seguinte questão: uma lâmpada fluorescente ($x = 0,38$, $y = 0,349$) apresenta os seguintes valores de TCC calculados a partir de diferentes diagramas de cromaticidade uniformes: 3770K (uv CIE(1960)); 4070K (CIE Lu’v’) e 4300K (CIE La*b*). Qual está correto?

Em 1980, Grum et al. detectou variações de até 15 % no coeficiente angular das “linhas de isotemperatura” de um diagrama para outro, que justificam os desvios observados por MacAdam. Na realidade não se pode afirmar qual deles é o correto. Até a presente data, a CIE (CIE 13.3, 1995) adota como padrão os resultados obtidos com o diagrama uv CIE(1960)^[8].

1.3.2 Índice de Reprodução de Cores

Considere duas fontes de luz, ou metaméricas (cromaticidades idênticas porém espectros distintos) ou com a mesma temperatura correlata de cor, iluminando uma superfície colorida. As cromaticidades das radiações refletidas e/ou transmitidas pela superfície não são necessariamente iguais! O índice de reprodução de cor CRI (*Color Rendering Index*) é um número adimensional (de 1 a 100) que compara a qualidade da reprodução de cores de uma fonte de luz com a de um iluminante CIE padrão de mesma

cor (na realidade com coordenadas de cromaticidade similares às da fonte). É escolhido um arranjo padrão de oito ou de quatorze amostras padrão de cor e para cada uma é calculado um índice a partir da diferença de cromaticidade entre as radiações refletidas pela amostra, quando iluminada pela fonte e pelo iluminante padrão. O CRI é a média aritmética dos índices.

A CIE (CIE 13.3, 1995) fornece um algoritmo de cálculo baseado no modelo de cromaticidade uniforme uv CIE(1960) que requer apenas a distribuição espectral do fluxo radiante da fonte. A CIE disponibiliza 14 amostras padrão de cor, fornecendo os seus valores de refletância em intervalos de $5nm$ para comprimentos de onda entre $380nm$ e $780nm$.

O iluminante padrão deve ser selecionado dentre os 19 padronizados pela CIE. Adota-se aquele iluminante, cuja diferença de cromaticidade ΔC em relação à fonte seja inferior a $5,5 \cdot 10^{-3}$. Este valor corresponde a distância (medida em um diagrama cromaticidade uniforme) entre o ponto característico da fonte e o do iluminante.

Esta tolerância corresponde a uma variação de aproximadamente $15\mu rd$ na temperatura correlata de cor. A CIE realiza uma correção das cromaticidade da radiação refletida pela amostra padrão de cor para levar em consideração os efeitos de “adaptação cromática” do observador. “Adaptação” é o processo pelo qual as propriedades do processo visual são modificadas por “*stimuli*” com diferentes distribuições espectrais. O termo “adaptação cromática” se refere ao processo de adaptação quando os “*stimuli*” envolvem variações de potência espectral relativa. Resumindo, o processo de “adaptação” leva em conta as alterações de sensibilidade de um observador quando exposto à luz. A CIE adota um método de correção proposto por J. A. von Kries^[8] no começo do século. Kries postulou que o processo de adaptação a um estímulo luminoso envolve somente uma correção no módulo dos três mecanismos de sensibilidade a cor, sem alterações na sua distribuição espectral. Em outras palavras, as coordenadas de cromaticidade são corrigidas por um coeficiente que leva em conta a variação da potência espectral do estímulo.

A própria CIE (CIE 13.3, 1995) reconhece que o cálculo do CRI envolve diversas incertezas e o resultado depende: i) da escolha do iluminante padrão e das amostras padrão de cor; ii) do processo de medição do espectro, como por exemplo a seleção dos intervalos de amostragem e integração, geometria da medição; iii) dos processos numéricos adotados para o cálculo das coordenadas de cromaticidade. De acordo com a CIE as incertezas acima listadas podem facilmente provocar variações de até 3 unidades em um dos índices R_i ; e que uma diferença de 5 unidades já pode se tornar perceptível para um observador. Por outro lado, como o CRI é um valor médio de índices individuais, o impacto de pequenas variações na percepção de um observador não consegue ser quantificado.

Finalmente, o índice de reprodução de cor não é uma quantidade absoluta. Duas fontes com valores de CRI elevados e próximos, porém com valores de TCC distintos, não apresentam necessariamente as mesmas propriedades de reprodução de cores, visto que os iluminantes padrão adotados no cálculo podem apresentar CRIs distintos.

1.4 Sobre pigmentos

Pigmentos são substâncias usualmente dispersas num veículo ou substrato para a atribuição de determinadas características ópticas e colorimétricas, por exemplo a tintas, plásticos, superfícies de papel e têxtil. A adição de pigmentos normalmente causa alterações ópticas pelo espectro seletivo de absorção e pela maneira como espalha a luz. No entanto, diferentemente do conceito de corante – que é qualquer substância que fornece uma color permanente a outra substância^[22] –, pigmentos não são quaisquer substâncias coloridas. Segundo a *Dry Color Manufacturers Association* (DCMA), pigmentos são particulados sólidos orgânicos ou inorgânicos, coloridos, pretos, brancos ou fluorescentes e usualmente insolúveis no – e também física e quimicamente não afetados pelo – veículo ou substrato no qual estão incorporados^[23].

Sendo os principais componentes responsáveis pela resposta óptica de pinturas artísticas – não somente na região de luz visível, mas também no IV e no UV –, estudar os diferentes pigmentos orgânicos e inorgânicos representa etapa fundamental para o entendimento do fenômeno de percepção visual e da caracterização espectral. Do lado da caracterização espectral, são as relações entre a estrutura do pigmento, sua relação com o substrato e o conseqüente espectro de absorção que desejamos conhecer. Tais relações permitiriam a identificação de pigmentos por técnicas não invasivas e forneceriam subsídios para a escolha do tipo de pigmento, suas especificações técnicas e o substrato a ser utilizado, em função da qualidade colorimétrica desejada. Do lado da percepção visual, é necessário ainda entender a determinação de propriedades ópticas macrométricas, como brilho e opacidade, assim como as relações com as fontes de luz.

1.4.1 Propriedades importantes

Opacidade é o grau de impenetrabilidade à radiação eletromagnética, ou seja, para um filme de pigmento, quanto maior a opacidade menor a passagem de luz. É essencialmente controla pelo índice de refração e pelo tamanho das partículas. A dependência em relação ao índice de refração foi deduzida por Fresnel:

$$F = \frac{(n_{\text{pigmento}} - n_{\text{veículo}})^2}{(n_{\text{pigmento}} + n_{\text{veículo}})^2} \quad (1.22)$$

Dessa forma, o Dióxido de Titânio (TiO_2), que é o pigmento de maior índice de refração conhecido atualmente, apresenta o maior potencial de opacidade^[23].

Índice de refração é uma relação entre a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo e num determinado meio. Como geralmente a luz visível é uma mistura de ondas de vários comprimentos de onda, é usual falar de um índice de refração médio (n), mas, na realidade, há um valor para cada comprimento de onda, uma vez que ondas de altos comprimentos de onda propagam-se mais rapidamente que as de baixo comprimento de onda. Este índice é usado na avaliação de fenômenos de refração, isto é, quando ocorre mudança na direção de propagação de uma onda eletromagnética por mudança de meio. Quanto maior a diferença entre os índices de refração dos dois meio envolvidos, maior a mudança de direção, conforme mostra a Lei de Snell-Descartes:

$$\text{sen}(\theta_1) \cdot n_1 = \text{sen}(\theta_2) \cdot n_2 \quad (1.23)$$

Dessa forma, há um ângulo de incidência limite L que corresponde a um ângulo de refração de 90° , dado por $L = \arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$. A partir do ângulo limite há reflexão total da onda incidente.

O índice de refração de um material é associado a sua estrutura cristalina, que é subjacente de sua estrutura ordenada ao nível atômico. Portanto o processo de manufatura de um pigmento não tem qualquer controle sobre o valor de seu índice de refração.^[23]

O índice de refração esta relacionado com a opacidade proporcionada por um pigmento, portanto de seus poderes de tingimento e de cobertura.

Tamanho das partículas refere-se ao tamanho de cada partícula sólida do pigmento. Usualmente as partículas são aproximadas por esferas, sendo o diâmetro equivalente a dimensão de interesse. No entanto, como cada partícula tem um tamanho há, na verdade, uma distribuição de tamanho de partículas (DTP), caracterizada por um tamanho médio e por uma variância.

É importante observar que o tamanho médio dos cristais do pigmento é controlado pelo processo de manufatura, mas o tamanho das partículas na sua aplicação final (tinta seca), depende da eficiência do processo de dispersão.

Quanto maior o tamanho médio das partículas, maior a dispersão causada pela camada de pigmento portanto maior sua opacidade. O tamanho médio das partículas também influencia na micro-rugosidade ($\leq 0,6\mu m$) de uma camada de pigmento, que por sua vez tem uma significativa responsabilidade pelo brilho da camada.^[23]

Concentração volumétrica de pigmento^[24] é uma referência para a descrição de uma tinta, dando basicamente o quanto de pigmento há na tinta. Esse índice é encontrado, dividindo-se o volume de pigmento pelo volume total sólido, como mostra a equação 1.24.

$$PVC = \frac{V_{particulas}}{V_{particulas} + V_{veiculo}} \times 100\% \quad (1.24)$$

A PVC, juntamente com o tamanho das partículas, dita a dispersão de luz e portanto a opacidade. Além disso, pode-se dizer que – embora o brilho dependa do tipo de pigmento, de veículo e do processo de dispersão e secagem – tintas foscas apresentam PVC em torno de 50 a 55%, enquanto tintas de altobrilho PVC de 20 a 25%.

Outro parâmetro importante é a concentração volumétrica de pigmento crítica (CVPC), que ocorre quando a máxima quantidade de partículas de pigmento são molhadas pelo veículo, resultando em uma grande alteração das propriedades ópticas da formulação. A CPVC dita o máximo de pigmentação que uma tinta pode ter.

Dispersibilidade é capacidade de distribuição das partículas de pigmento na sua aplicação final, ou seja, é uma medida do quanto os particulados de pigmentos estão distantes uns dos outros quanto o produto encontra-se pigmentado e curado. A dispersibilidade é governada pelas ligações intermoleculares pigmento-pigmento, pigmento-veículo. Se as ligações pigmento-pigmento forem razoavelmente mais fortes que as pigmento-veículo há floculação do pigmento diminuindo a dispersibilidade. É importante não se enganar; se o pigmento tiver bastante afinidade com o solvente suas partículas estarão bastante dispersas, mas após a evaporação do solvente o pigmento pode formar aglomerados.^[23]

Poder de tingimento é a habilidade de um pigmento modificar a cor de um outro pigmento, sendo bastante influenciado pela dispersão do pigmento e sua opacidade. Tal propriedade é de grande importância no controle fino da cor, principalmente no usual branqueamento por óxido de titânio.

Poder de cobertura é a opacidade associada com os fenômenos de superfície, de molhamento, de um pigmento. Ou seja, é o quanto um pigmento consegue molhar uma superfície, cobrindo-a de forma estável, e não deixar passar luz.

2 ***Materiais e Métodos***

2.1 **Verificação colorimétrica de pigmentos**

Para entender o processo de verificação colorimétrica, na primeira etapa experimental foram feitas fotografias de um cartão de cores padrão *x-rite Color Checker®*. Os arquivos digitais gerados foram analisados por ferramentas computacionais gráficas e comparados aos dados fornecidos pelo fabricante do cartão.

2.1.1 **Experimento preliminar**

Num primeiro experimento, o quadro de cores padrão *x-rite Color Checker®* foi montado sobre um suporte estável e fotografado com uma câmera fotográfica *Canon PowerShot S3 IS*. Foi utilizada iluminação ambiente e por lâmpada fluorescente tubular. Então, utilizando software PIXEUR v3.2.0.0, fornecido pela Veign Companie^[25], foram tomadas manualmente as coordenadas colorimétricas sRGB de pontos aleatórios para cada região do cartão padrão.

As coordenadas RGB tomadas do arquivo fotográfico digital foram então comparadas em gráfico de dispersão com as coordenadas nominais fornecidas pelo fabricante do cartão. Foram feitas regressões lineares para cada série de coordenada RGB e calculados seus coeficientes de determinação. Os dados fornecidos pelo fabricante do cartão – contendo número de referência, nome da cor, coordenadas sRGB e coordenadas CIE $L^*a^*b^*$ – são exibidos na Tabela 2.1. Aqui serão utilizados apenas os dados referentes ao sistema sRGB.

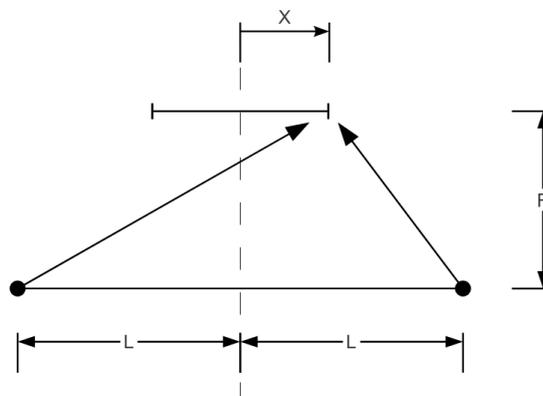
2.1.2 **Cálculo da posição ideal das fontes de radiação**

Para garantir a distribuição de luminosidade sobre a área a ser fotografada, foi calculada a posição teórica ideal de duas fontes pontuais de radiação dispostas em simetria lateral, de modo a iluminar homoganeamente um segmento horizontal à mesma altura. A situação descrita é ilustrada pela Figura 2.1.

Considerando o problema simetricamente, pode-se avaliar a distribuição de luminosidade para apenas um lado da área a ser iluminada e então replicar para o outro lado. Assim, sendo a luminosidade de um ponto inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto e a fonte de radiação, utilizamos como cálculo da luminosidade de um ponto X sobre o suporte a ser iluminado a seguinte

Tabela 2.1: Coordenadas colorimétricas nominais do cartão de cores padrão.

Número da cor	Nome	sRGB			CIE L*a*b*		
		R	G	B	L*	a*	b*
1	<i>Dark skin</i>	115	82	68	37,986	13,555	14,059
2	<i>Light skin</i>	194	150	130	65,711	18,13	17,81
3	<i>Blue sky</i>	98	122	157	49,927	-4,88	-21,925
4	<i>Foliage</i>	87	108	67	43,139	-13,095	21,905
5	<i>Blue flower</i>	133	128	177	55,112	8,844	-25,399
6	<i>Bluish green</i>	103	189	170	70,719	-33,397	-0,199
7	<i>Orange</i>	214	126	44	62,661	36,067	57,096
8	<i>Purplish blue</i>	80	91	166	40,02	10,41	-45,964
9	<i>Moderate red</i>	193	90	99	51,124	48,239	16,248
10	<i>Purple</i>	94	60	108	30,325	22,976	-21,587
11	<i>Yellow green</i>	157	188	64	72,532	-23,709	57,255
12	<i>Orange yellow</i>	224	163	46	71,941	19,363	67,857
13	<i>Blue</i>	56	61	150	28,778	14,179	-50,297
14	<i>Green</i>	70	148	73	55,261	-38,342	31,37
15	<i>Red</i>	175	54	60	42,101	53,378	28,19
16	<i>Yellow</i>	231	199	31	81,733	4,039	79,819
17	<i>Magenta</i>	187	86	149	51,935	49,986	-14,574
18	<i>Cyan</i>	8	133	161	51,038	-28,631	-28,638
19	<i>White (.05*)</i>	243	243	242	96,539	-0,425	1,186
20	<i>Neutral 8 (.23*)</i>	200	200	200	81,257	-0,638	-0,335
21	<i>Neutral 6.5 (.44*)</i>	160	160	160	66,766	-0,734	-0,504
22	<i>Neutral 5 (.70*)</i>	122	122	121	50,867	-0,153	-0,27
23	<i>Neutral 3.5 (.1.05*)</i>	85	85	85	35,656	-0,421	-1,231
24	<i>Black (1.50*)</i>	52	52	52	20,461	-0,079	-0,973

Figura 2.1: Esquema de iluminação homogênea de um segmento de largura $2X$.

expressão:

$$Luminosidade_X \propto \frac{1}{L^2 + X^2 + F^2 + 2 \cdot X \cdot L} + \frac{1}{L^2 + X^2 + F^2 - 2 \cdot X \cdot L} \quad (2.1)$$

Baseado na equação 2.1, foi então desenvolvida uma ferramenta gráfica em OPENOFFICE.ORG CALC para estudar a variação de luminosidade de um ponto a uma distância lateral X do centro da área a ser iluminada por duas fontes de radiação conforme a Figura 2.1. Esta ferramenta exige como entrada a luminosidade em dimensão arbitrária para cada fonte de radiação, bem como seis pares de distâncias L e F a serem analisados. A saída gráfica gerada mostra curvas de distribuição de luminosidade percentual relativa ao centro para distâncias até 10 cm à esquerda e à direita do centro.

2.1.3 Experimento de verificação colorimétrica

Neste segundo experimento, novamente foram feitas fotografias do quadro de cores padrão; desta vez sob condições controladas de posicionamento e iluminação.

Todo o conjunto de iluminação e suporte do objeto a ser fotografado foi montado sobre um mesmo suporte rígido de madeira e metal. Ambas as fontes de radiação foram dispostas a uma mesma altura fixa do suporte e com uma distância fixa de 110 cm entre elas. O arranjo foi feito a permitir movimentação do conjunto de iluminação como um todo apenas no plano horizontal. Tal mobilidade é permitida para que haja o ajuste da intensidade de radiação incidente sobre a área fotografada sem alterar as características emissivas da fonte. Se ainda assim não for possível obter homogeneidade aceitável na iluminação, filtros difusores de distância regulável acoplados ao suporte metálico são posicionados – preferencialmente a meio caminho entre a fonte de radiação e a área iluminada.

De modo a manter as fontes de radiação e o centro da fotografia sob a mesma altura, foi inscrito sobre o fundo de suporte do objeto a ser fotografado um sistema de alvo-mira – marcando com linhas horizontais a altura das fontes de iluminação (centro) e iguais distâncias acima e abaixo; e com linhas horizontais o centro do suporte e iguais distâncias à esquerda e à direita. Para ajustar a altura da área do objeto a ser fotografada um suporte plástico de altura variável foi acoplado ao suporte. Foi utilizada um máquina fotográfica *Canon PowerShot S3 IS*, montada sobre um tripé com o centro da objetiva à mesma altura das fontes de radiação e na linha de centro do suporte de iluminação e alvo.

Arranjo montado, segue-se à etapa de ajuste de distribuição da iluminação sobre a área a ser fotografada. Escolhida a fonte de radiação, uma folha de papel branco é posicionada sobre o alvo e procede-se com o Balanço de Branco manual, isto é, através da função *Set WB* (WB: White Balance, traduzido diretamente por Balanço de Branco), define-se que a imagem do papel branco apresenta relação unitária entre os sinais *R*, *G* e *B*. Deste modo evita-se que o Branco definido automaticamente pela câmera para uma fonte de tungstênio não seja exatamente o mesmo Branco produzido pela fonte de tungstênio em utilização.

Em seguida, ainda para um fundo de 100% de refletância, é avaliada a distribuição de luminosidade. Uma fotografia de uma área de 10 cm horizontais e 6 cm verticais centralizados é feita com as fontes de radiação a uma distância de um metro da área fotografada. Então o arquivo digital da fotografia é visualizado e avaliado pelo programa ARI-LUHIEN II desenvolvido neste trabalho sobre pseudo-linguagem VISUAL BASIC®. Tal programa percorre horizontalmente a imagem da saída em tela

efetuando a média dos sinais RGB de áreas de 21 vs. 21 pixels e calculando seus desvios padrão. Os dados obtidos são fornecidos em dados e plotados por categoria “coluna”. Avalia-se então a variação do sinal de luminosidade $R + G + B$ ao longo destas colunas considerando que o sinal $R + G + B$ varia de 0 a 765 e que o desvio padrão de cada coordenada é da ordem de três unidades. A Figura 2.2 mostra a saída plotada de um caso de distribuição de luminosidade considerada insatisfatória utilizando-se duas lâmpadas LED.

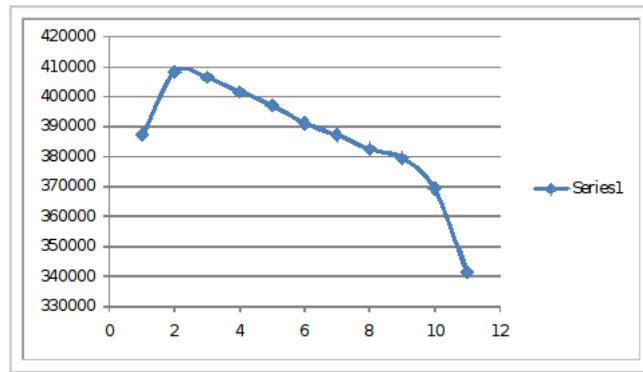


Figura 2.2: Distribuição de luminosidade insatisfatória com lâmpadas LED. (A ordenada refere-se à luminosidade $R + G + B$ multiplicada por mil. A abcissa refere-se às áreas calculadas em numeração crescente da esquerda pra direita; cada área afasta-se da outra em cerca de 1.5 cm)

Como observado na Figura 2.2, se um lado apresentar maior luminosidade que outro a fonte de radiação deste lado é afastada da área a ser fotografada, ou a outra fonte é aproximada – dependendo do grau de saturação da sensor, dando preferência a aproximar fontes para diminuir problemas numéricos de baixas luminosidades. Caso o centro da área esteja mais iluminado, há preferência por aproximar as fontes, pois a lateralidade das fontes de luz afastadas 110 cm uma da outra favorece a iluminação das extremidades de uma área com apenas 10 cm de largura. Caso contrário há preferência por afastar as fontes. O critério utilizado para definir uma boa distribuição é que a variação de luminosidade $R + G + B$ na área a ser fotografada não seja superior ao desvio das coordenadas lidas pelo programa ARI-LUHIEN II, ou seja, deve ser menor ou igual a 9, uma vez que cada coordenada tem um desvio padrão médio da ordem de três unidades. A Figura 2.3 mostra o caso anterior corrigido ao aproximar a fonte da esquerda e afastar a fonte da direita em 1 cm cada.

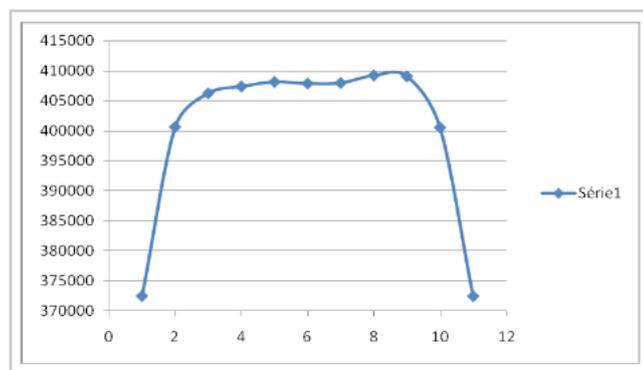


Figura 2.3: Distribuição de luminosidade satisfatória com lâmpadas LED. (A ordenada refere-se à luminosidade $R + G + B$ multiplicada por mil. A abcissa refere-se às áreas calculadas em numeração crescente da esquerda pra direita; cada área afasta-se da outra em cerca de 1.5 cm)

Em comparação à distribuição teórica calculada (vide Cálculo da posição ideal das fontes de radiação), vemos que não há grandes discrepâncias quanto ao formato da distribuição; apenas com queda abrupta da luminosidade nas extremidades para os dados experimentais, no entanto, longe o suficiente da área a ser fotografada.

Já quanto aos valores numéricos de desvios de luminosidade, observa-se uma grande diferença. No cálculo teórico, para a mesma distância de 110 *cm* entre as fontes, a posição ótima gera variações inferiores a 0.01% da luminosidade de um ponto a 10 *cm* do centro e a luminosidade central. Já na distribuição experimental tal variação está na ordem de 2.5% para a luminosidade $R + G + B$. Além disso, diferenças de apenas 1 *cm* na distância frontal calculada geram desvios de apenas 0.01% da luminosidade da extremidade em relação à do centro, enquanto na prática tal mudança de posição gera correções também da ordem de 2.5%. Como o procedimento teórico utilizou como modelo fontes pontuais de radiação homogênea – o que difere consideravelmente das lâmpadas comerciais de custo acessível, por apresentarem área radiante não aproximável por um ponto às distâncias aqui consideradas e muitas vezes sistemas de reflexão direcionados – nos limitaremos aqui a considerar o cálculo teórico como uma boa posição inicial para o procedimento experimental. Ressalva-se que tal ação não deve comprometer os resultados, uma vez que a diferença de luminosidade encontrada na prática entre as extremidades de uma área com 10 *cm* de largura e o centro é cerca de quatro vezes menor que o desvio inerente das coordenadas RGB coletadas (cerca de 0.4% entre uma coordenada RGB da borda da fotografia e do centro desta, para cerca de 1.17% de desvio para cada coordenada coletada pela média de 441 pixels).

Em suma, a posição inicial é calculada pelo procedimento discutido em “Cálculo da posição ideal das fontes de radiação” então seguem ajustes empíricos no posicionamento do arranjo com auxílio do programa ARI-LUHIEN II desenvolvido neste trabalho.

Luminosidade apropriada, são feitas fotografias de quatro em quatro dos 24 pigmentos do cartão *x-rite Color Checker*®. Os parâmetros utilizados foram: ISO 80; velocidade de 1/25; abertura de 3.2f; e distância focal de 72.0 *mm* – os quais foram escolhidos por gerar um fator em torno de ± 0 (eV) para a maior parte dos quadros. É preferível que este fator seja em geral positivo, em vez de negativo, por luminosidades maiores reduzirem o problema numérico de altos desvio para baixos valores RGB.

Os arquivos fotográficos são então analisados pelo programa ARI-LUHIEN II, como mostra a Figura 2.4. Os dados coletados são dispostos graficamente e analisados como no “Experimento preliminar”. Desta vez também são gerados gráficos da variação do desvio padrão de cada coordenada com seus valores R , G e B .

2.2 Fotografia sensível ao infravermelho

Para fotografar imagens com sensibilidade ao infravermelho, no entanto é necessário retirar o filtro *hot mirror* que impede a passagem de radiação não visível de estimular os fotossensores de uma máquina fotográfica. Para tanto, foi feita uma operação em câmera, do tipo webcam, *Logitech QuickCam Pro 9000*. Abriu-se a proteção externa, desparafusou-se a unidade fotoreceptora da placa eletrônica e então raspou-se as bordas do filtro IV até que este fosse rompido e se soltasse do restante. A Figura 2.5

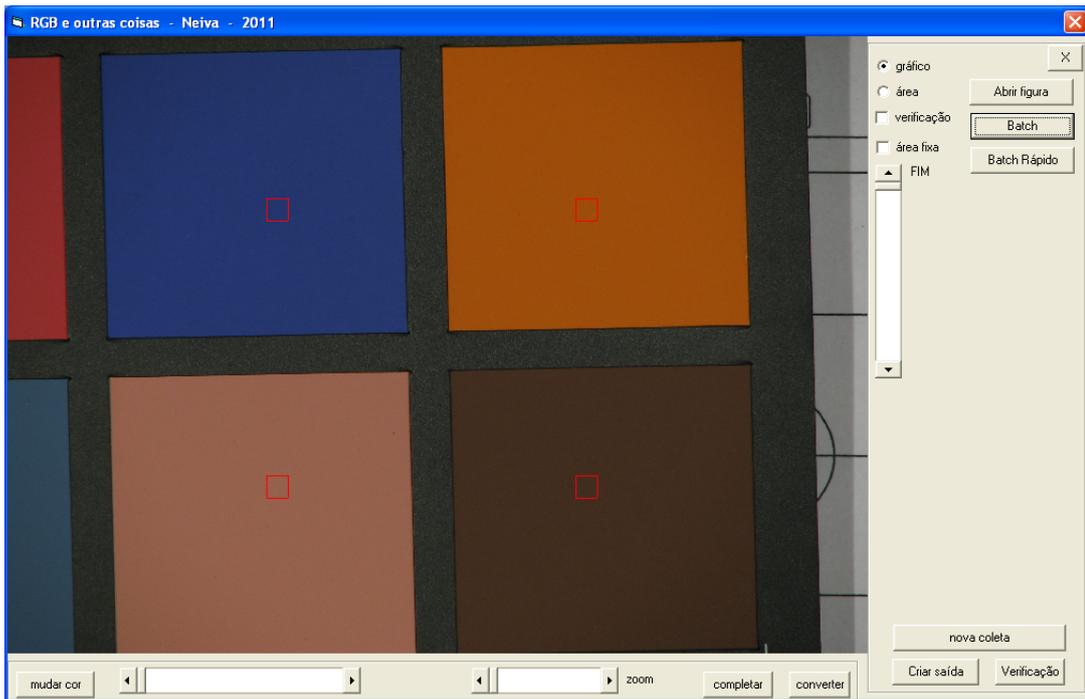
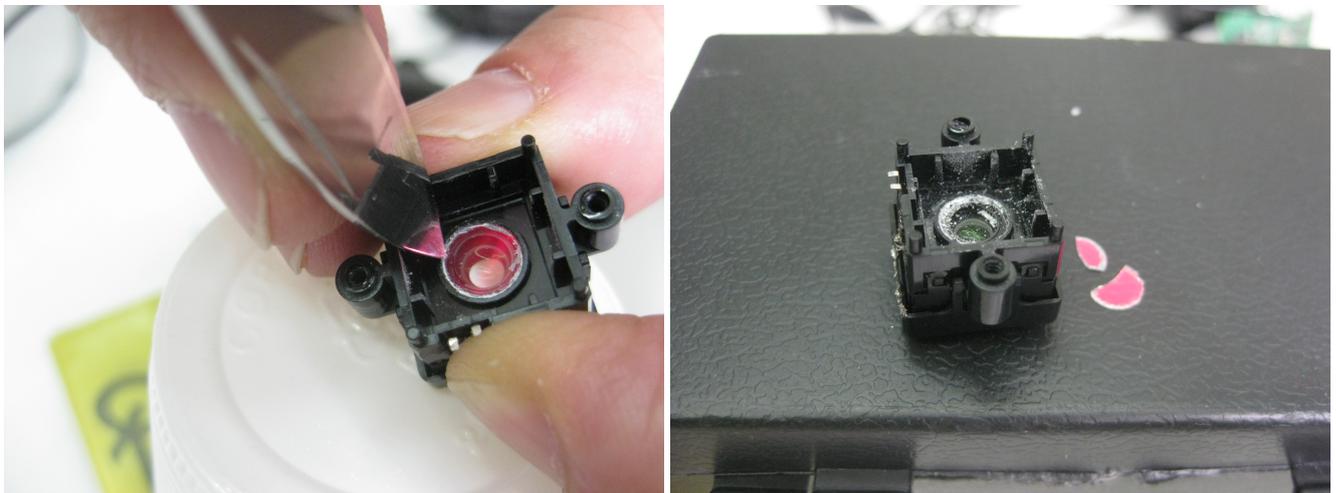


Figura 2.4: Análise de fotografia do cartão *x-rite Color Checker®* pelo programa ARI-LUHIEN II.

mostra a etapa de raspagem do filtro infravermelho da unidade fotoreceptora.

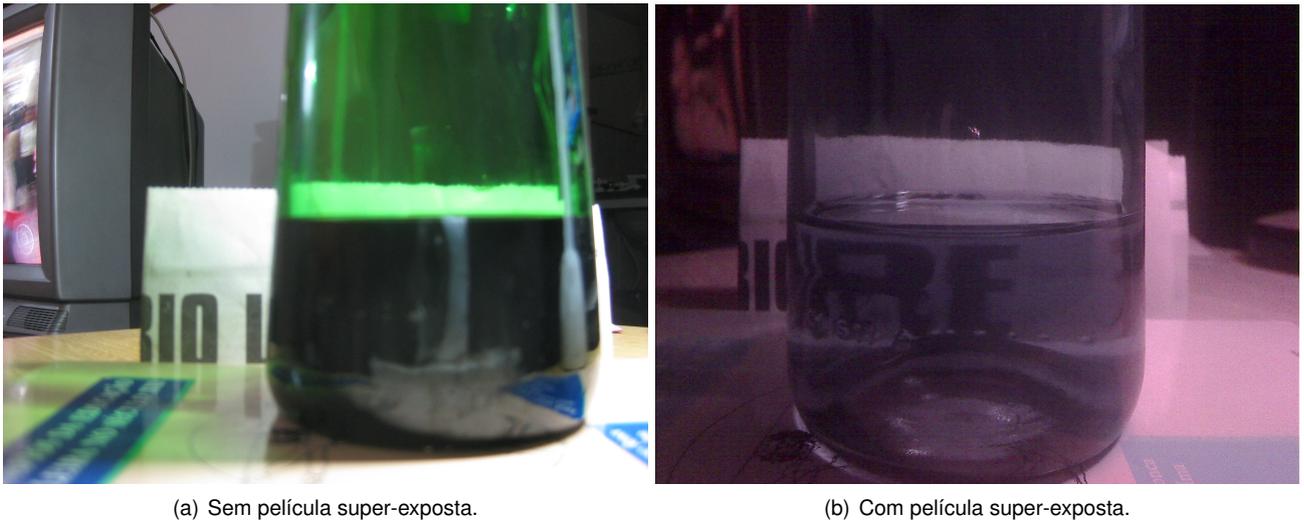


(a) Raspagem.

(b) Unidade fotoreceptora sem o filtro IV.

Figura 2.5: Etapa de retirada do filtro IV da câmera fotográfica.

Dessa forma a câmera fotográfica passa a ser sensibilizada pela radiação infravermelha, tendo a seus sinais RGB o adicional do estímulo por IV. Para verificar tal ocorrência, montou-se um experimento simples: foi colocada uma garrafa de vinho tinto na frente de um jornal e fotografou-se, usando iluminação fluorescente. Depois, colocou-se na frente da lente objetiva da câmera fotográfica uma película fotográfica velada (“filme fotográfico queimado”), que sabidamente absorve radiação eletromagnética de comprimentos de onda visíveis, mas não infravermelhos. As duas fotografias são mostradas na Figura 2.6.



(a) Sem película super-exposta.

(b) Com película super-exposta.

Figura 2.6: Verificação de sensibilização do fotorreceptor por radiação IV.

Verificamos claramente que, sem qualquer filtro entre a câmera e a garrafa de vinho, não é possível ver o jornal através do vinho, ou seja, este absorve grande parte da radiação que poderia chegar do jornal aos fotossensores da câmera. Já com a filtragem de radiação feita com película fotográfica super-exposta, não é mais possível ver as diferentes cores da imagem anterior, no entanto, pode-se observar que o texto do jornal, antes ilegível pela opacidade do vinho tinto, agora passa a ser a visível. Tal ocorrência indica duas coisas: primeira, que o filme fotográfico permite a passagem de radiação infravermelha e que a câmera fotográfica apresenta-se sensível a esta radiação; segunda, que os sensores da máquina são estimulados quase igualmente, conforme suas curvas de sensibilidade no IV são semelhantes^[14], produzindo uma imagem cinzenta ($R \approx G \approx B$).

Comprovado o funcionamento da fotografia sensível ao IV, com o mesmo sistema de suporte e iluminação utilizado nos experimentos de verificação colorimétrica, foram tomadas fotografias sensíveis ao IV do quadro de cores padrão *x-rite Color Checker®*. Os dados foram analisados pelo programa *ARILUHIEN II*, tal como mostra a Figura 2.7 e então plotados em gráficos de dispersão em comparação aos dados RGB obtidos pela fotografia comum do experimento anterior dipostos em ordem crescente, a fim de se avaliar alguma relação entre estes valores.

2.3 Caracterização RGB-IV de pigmentos metaméricos

Para verificar a utilidade da fotografia sensível ao IV como fornecedora de mais uma coordenada colorimétrica para caracterização de pigmentos, foram realizadas ambas as metodologias para uma folha com três pigmentos metaméricos exibidos na contracapa de Billmeyer e Saltzman (1981). Os pigmentos A, B e C fornecidos pela *MUNSELL COLOR, MACBETH DIVISION, KOLLMORGEN CORPORATION* são metâmeros sob determinadas condições: A e B se apresentam idênticos quando iluminados pelo iluminante *Macbeth 7500K Daylight*, enquanto B e C são idênticos sob luz de lâmpada fluorescente braca-azulada e nenhum deles se assemelha sob lâmpada incandescente^[19]. Para tanto os procedimentos foram levados a cabo utilizando a) lâmpadas incandescentes halógenas com espelho dicróico, b) lâmpada LED ($X 0.15 \sim 0.25$; $Y 0.15 \sim 0.25$), c) lâmpada fluorescente eletrônica e d) lâmpada photo-



Figura 2.7: Análise de fotografia sensível ao IV pelo programa ARI-LUHIEN II.

flood 250W; sendo que para fotografia IV apenas photoflood foi utilizada. As Figuras 2.8 e 2.9 mostram as telas do programa ARI-LUHIEN II em análise das fotografias em visível e em IV obtidas neste experimento com os pigmentos metaméricos.

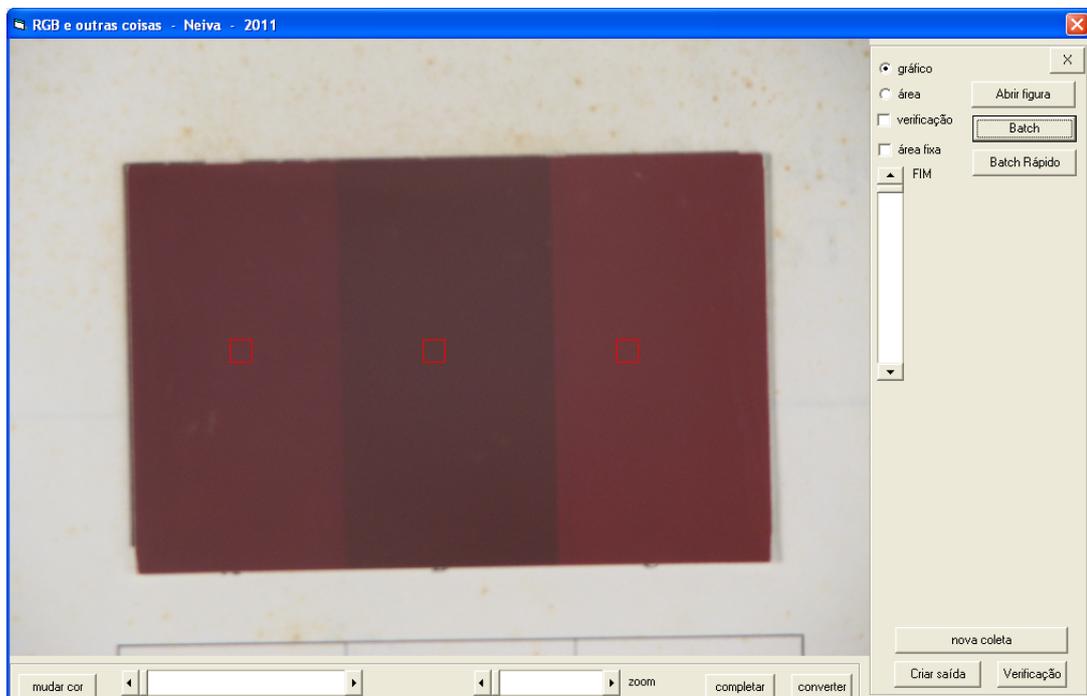


Figura 2.8: Programa ARI-LUHIEN II durante análise de fotografia em radiação visível dos pigmentos metaméricos A, B e C.

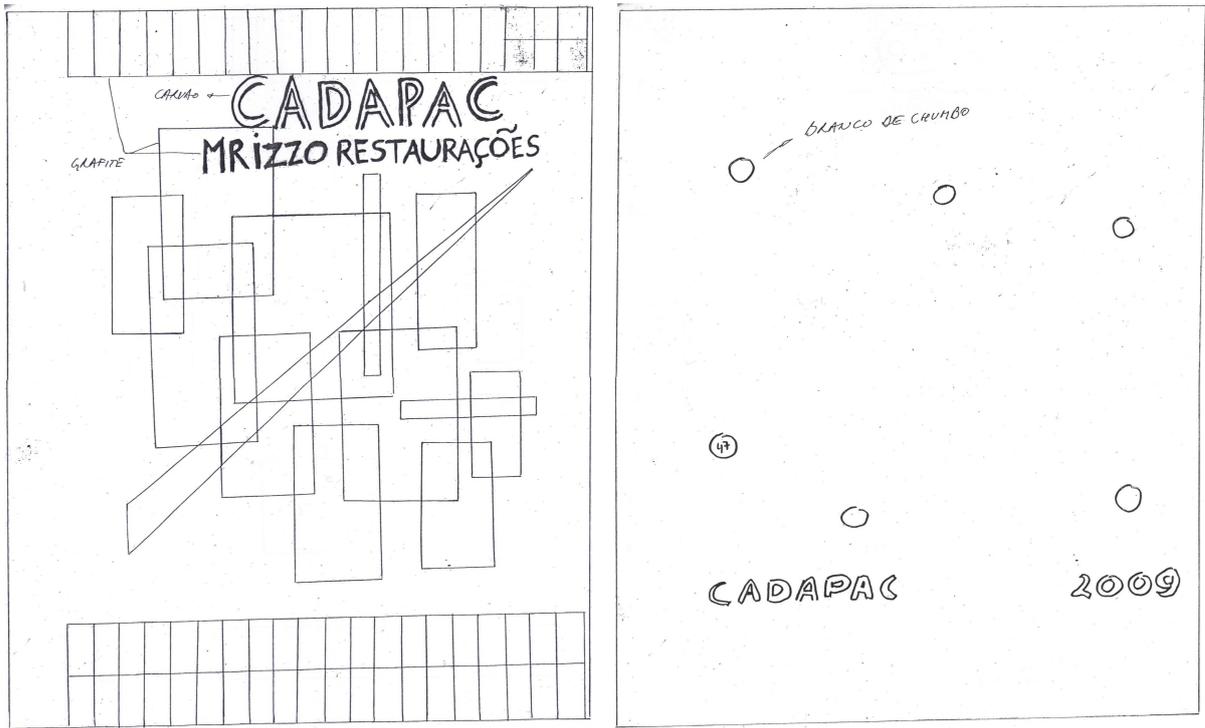


Figura 2.9: Programa ARI-LUHIEN II durante análise de fotografia em radiação IV dos pigmentos meta-méricos A, B e C.

2.4 Caracterização RGB-IV de pigmentos artísticos históricos

Para caracterizar pigmentos artísticos relevantes a restauração de obras de arte históricas, um experimento seguindo os modelos do “Experimento de verificação colorimétrica” foi realizado. Em vez de objeto de análise um quadro de cores padrão, nesta etapa foi estudado um quadro de pigmentos históricos conhecidos. O quadro, emprestado pela restauradora Márcia Rizzo, foi produzido em várias etapas. Após a montagem da tela, diferentes regiões no quadro foram delimitadas e numeradas a grafite. Na parte superior, também foram feitas as inscrições “MRIZZO RESTAURAÇÕES”, a grafite, e “CADAPAC”, a carvão. O esquema desta etapa é mostrado na Figura 2.10(a). Numa segunda etapa, foram pintadas as diferentes regiões do quadro com tintas preparadas a base de pigmentos e Paraloid™ B72, assim como aplicadas folhas de ouro e prata em regiões específicas. Por último, foram pintadas com tinta de branco de chumbo, sobre o fundo já pintado de branco, pequenos círculos, espalhados pelo quadro, e inscrição “CADAPAC 2009”, na parte inferior do quadro. As coberturas de branco de chumbo são indicadas na Figura 2.10(b).

A Figura 2.11 mostra um diagrama esquemático do quadro, indicando por números o pigmento, base, verniz e folhas metálicas usados em cada região. Tais números estão referenciados aos nomes usuais dos pigmentos nas Tabelas 2.2 a 2.4.



(a) Inscrições e delimitações a grafite e carvão.

(b) Inscrições e círculos feitos com branco de chumbo.

Figura 2.10: Etapa de retirada do filtro IV da câmera fotográfica.

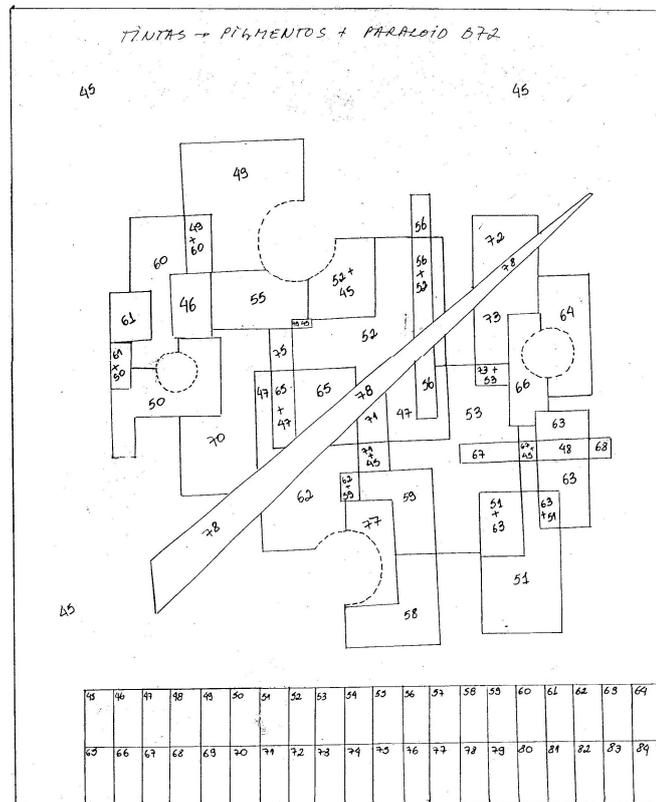


Figura 2.11: Esquema das regiões pintadas e suas numerações.

Tabela 2.2: Identificação de bases usadas no quadro.

Numeração	Base
1	cola de coelho
2	cola de ossos
3	goma arábica
4	cera microcristalina
5	cera de abelha
6	cera de carnaúba
7	resina copal
8	resina mastique
9	goma laca
10	PVA
11	metacrilato
12	resina acrílica
13	beva
14	poliamida
15	resina damar
16	caseína
17	clara de ovo
18	gema de ovo
19	óleo de linhaça
20	betume
21	betume
22	gesso
23	bolo de Armênia
24	resina colofônia
25	cola de coelho
26	cola de ossos
27	goma arábica
28	resina copal
29	resina mastique
30	PVA
31	PVA
32	primal
33	BEVA 371
34	óleo
35	goma laca
36	extrato noqueira

Tabela 2.3: Identificação de pigmentos e vernizes usados no quadro.

Numeração	Pigmento ou verniz
45	Branco de titânio
46	Branco de zinco
47	Branco de prata
48	Amarelo de zinco
49	Amarelo de cádmio médio
50	Amarelo indiano
51	Amarelo de Nápolis claro
52	Azul de cobalto turquesa
53	Azul cerúleo
54	Azul esverdeado ftalocianina
55	Azul ultramarino francês artificial
56	Violeta ultramarino
57	Laca violeta
58	Laca magenta
59	Violeta de manganês
60	Vermelho de cádmio médio
61	Vermelho inglês
62	Vermelho de ferro
63	<i>vermelho # 63</i>
64	<i>vermelho # 64</i>
65	Cinabrese
66	Verde óxido de cromo
67	Verdegris
68	Verde ultramar
69	Verde esmeralda standard
70	Verde cinabro
71	Terra Verde
72	Terra de Siena natural del Monte Amiato
73	Morellone
74	Terra sombra natural Maimeri
75	Terra Siena natural Maimeri
76	Terra de Cassel
77	Terra negra romana
78	Preto de marfim
79	Bianco d'Argento / óleo

Tabela 2.4: Identificação de folhas metálicas usadas no quadro.

Numeração	Folha metálica
42	ouro 23kl.
43	prata
44	Ouro 2,5kl.

De posse desses dados e seguindo o mesmo procedimento para o “Experimento de verificação colorimétrica” realizamos diversas fotografias com a máquina fotográfica *Canon PowerShot S3 IS*, variando-se o parâmetro de tempo de exposição. As fontes de radiação utilizadas foram lâmpadas photoflood brancas de 250W. Cada fotografia abrangeu a área de teste de oito pigmentos, a saber quatro na linha de cima e quatro na linha de baixo. A Tabela 2.5 mostra os parâmetros utilizados em cada série para fotografar todo o quadro.

Tabela 2.5: Parâmetros das fotografias de pigmentos históricos.

Fonte de radiação	Velocidade do obturador	Abertura do diafragma	ISO	Distância focal
Photoflood	1/25	3.5f	80	72.0 mm
Photoflood	1/40	3.5f	80	72.0 mm
Photoflood	1/60	3.5f	80	72.0 mm
Photoflood	1/100	3.5f	80	72.0 mm

Cada fotografia foi então submetida ao programa ARI-LUHIEN II, como mostra a Figura 2.12. Por excesso de dados a serem analisados, escolheu-se analisar apenas as fotografia com velocidade do obturador de 1/25, cujo fator de exposição (eV) valorou ± 0 para a maioria das fotografias.¹



Figura 2.12: Imagem do programa ARI-LUHIEN II aplicado à fotografia dos pigmentos 49 - 52 e 69 - 72.

Posteriormente, seguindo a metodologia exposta em “Fotografia sensível ao infravermelho”, foram tomadas fotografias IV das mesmas regiões fotografadas em radiação visível. Os dados foram analisados pelo ARI-LUHIEN II, conforme mostra a Figura 2.13 e dispostos em gráficos de dispersão confrontando os valores obtidos por IV com cada coordenadas RGB disposta em ordem crescente, a fim de se avaliar alguma relação entre estes valores.

¹As fotografias com velocidade de 1/40 também apresentaram (eV) em torno de ± 0 , no entanto preferiu-se as de 1/25 por minimizarem os problemas numéricos de baixos valores RGB.

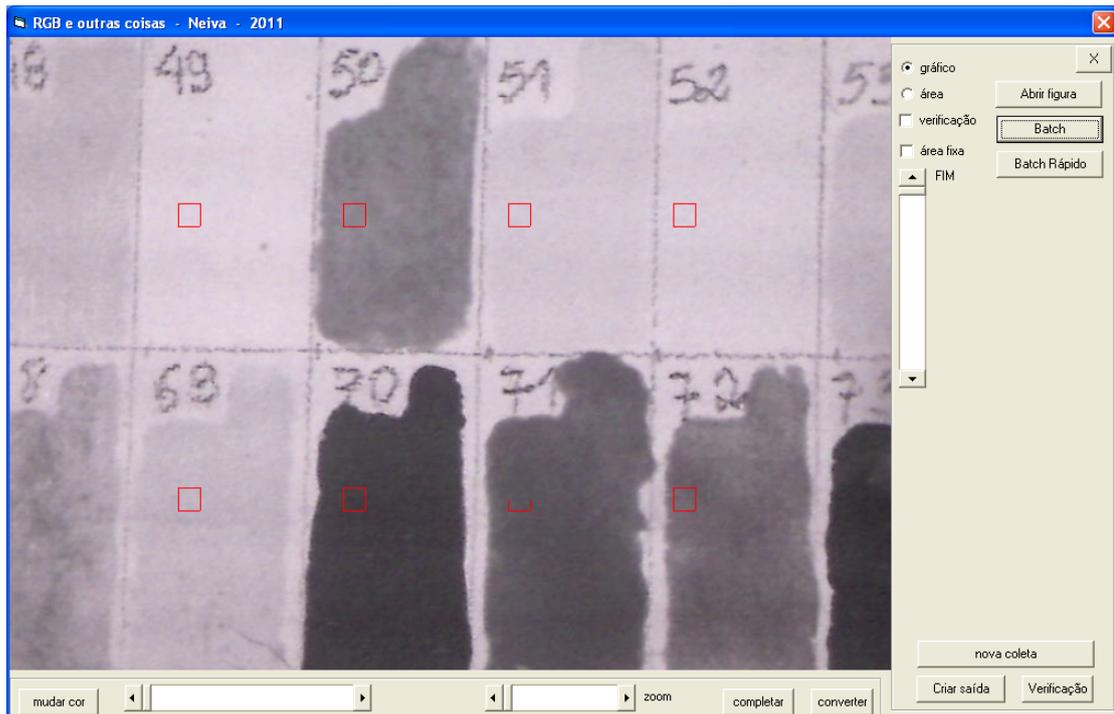


Figura 2.13: Imagem do programa ARI-LUHIEN II aplicado à fotografia sensível ao infravermelho dos pigmentos 49 - 52 e 69 - 72.

2.5 Obtenção de espectros de emissão de lâmpadas de descarga e simulação de metamerismas

Primeiramente foram obtidos espectros de emissão de lâmpadas de descarga em ponto de operação nominal. Foram utilizadas lâmpadas de 150W nas colorações vermelha e lilás, da Xelux, e azul, verde e rosa, da Fuji Light. Para a realização das medições espectrais, as lâmpadas foram ligadas ao conjunto reator-ignitor de valores nominais indicados à operação destas lâmpadas. A fonte de radiação foi colocada no centro de uma câmara cilíndrica de alumínio com 25 cm de diâmetro. Esta câmara (vide Figura 2.14) apresenta uma abertura lateral onde são inseridos filtros ópticos e a fibra óptica que capta a luz a ser enviada ao espectrofotômetro. Este é acoplado por uma porta USB a um microcomputador, que realiza o processamento dos dados utilizando o programa OOIBASE32.

Para o registro e análise da radiação emitida foi utilizado um espectrofotômetro com resolução de 1 nm da OCEANOPTICS INC., modelo USB200, com uma rede de difração tipo 2 (banda espectral 188 nm – 858 nm) e uma fenda de 10 μm. A luz incidente é coletada por uma fibra ótica, colimada pela fenda e dispersa através da rede de difração sobre um detetor CCD (*Charge-coupled Device*) linear SONY ILX511 com 2048 elementos. As pequenas capacitâncias do CCD são carregadas por fotodiodos e, ao final de um período de integração preestabelecido por software, a sua carga é transferida através de um mecanismo de chaveamento para um *shift-register*. Os dados são lidos por uma placa de aquisição de dados (32 bits e frequência de amostragem de 500 kHz) e transferidos para o microcomputador por uma porta USB.

O processamento dos dados é realizado pelo software dedicado OOIBASE32, que determina o intervalo de integração, gera uma saída gráfica e um vetor de dados em formato ASCII. O tempo mínimo



Figura 2.14: Lâmpada de descarga em câmara cilíndrica para tomada espectral.

para uma aquisição é da ordem de 3 ms . O sistema é aferido utilizando-se uma lâmpada incandescente halógena rastreável pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) conectada a um filtro de Lambert que funciona como um padrão de calibração para medições absolutas de intensidade.

As medições da energia radiante em lâmpadas de descarga de vapor multimetálico requerem a utilização de filtros para atenuar a radiação incidente e uma seleção adequada do intervalo de integração para evitar a saturação do CCD. No arranjo experimental utilizam-se associações de filtros de densidade neutra (SHIRO PHOTO CO. LTD) do tipo ND2 (50% de transmissão), ND4 (25% de transmissão) e ND8 (12,5% de transmissão).

Com este mesmo arranjo e o software OOIBASE32 (no modo “scope”), foi obtida a curva de transmissão de cada filtro a partir de uma fonte de referência com espectro contínuo. Como referência foi utilizada uma lâmpada incandescente convencional de 150 W , alimentada por uma fonte CC estabilizada com 127 V (condição nominal). Os dados da curva de transmitância ficam armazenados como um arquivo ASCII no software OOIBASE32 e são contabilizados durante o processamento dos espectros.

Os dados acumulados pelo OOIBASE32 são plotados para análise qualitativa do resultado obtido e então uma rotina em MATLAB® disponibilizada pelo prof. Dr. Walter Kaiser calcula a Temperatura Correlata de Cor (TCC), as coordenadas colorimétrica xy e os Índice de Reprodução de Cores para 14 cores padrão IRC-14) e para 8 cores padrão (IRC-8). Os dados ainda são tratados por uma rotina do software ARI-LUHIEN II que os interpola de modo a obter as intensidades (de emissão, transmissão, reflexão) para os mesmos valores de comprimentos de onda para os quais a CIE fornece a curva de sensibilidade do observador padrão de 1964 – isto é, de 360 a 830 nm com passo fixo de 5 nm . Dados de refletância de outros 73 pigmentos artíficos obtidos de Mayer e Sheehan (1991), também são submetidos à mesma rotina do ARI-LUHIEN II. Tendo dados de emissão para as cinco lâmpadas de descarga, calculando-se os dados de um corpo negro pela Equação de Planck (1.20) e tendo os de refletância para diversos pigmentos, uma planilha de cálculos elaborada em OPENOFFICE.ORG CALC procede os cálculos das coordenadas xy , faz a transformação para as coordenadas $L'u'v'$ e dá a saída gráfica das coordenadas $u'v'$ no diagrama de ferradura correspondente para a composição lâmpada-pigmento desejada. Diversas composições podem ser dispostas graficamente ao mesmo tempo.

3 Resultados e Discussão

3.1 Verificação colorimétrica de fotografia

3.1.1 Experimento preliminar

Os dados das coordenadas colorimétricas obtidos com o software PIXEUR v3.2.0.0 no Experimento preliminar são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Coordenadas colorimétricas obtidas do cartão fotografado no experimento preliminar.

Número da cor	R	G	B
1	53	41	29
2	131	94	85
3	42	77	109
4	40	60	32
5	79	91	135
6	64	147	139
7	152	74	10
8	27	55	120
9	138	46	57
10	38	35	56
11	104	144	33
12	156	120	5
13	14	36	94
14	36	104	43
15	116	28	27
16	162	151	7
17	136	61	118
18	18	101	141
19	181	191	192
20	144	158	159
21	111	123	123
22	77	86	86
23	45	55	54
24	24	31	30

Para comparar os dados das coordenadas RGB obtidos da fotografia pelo software PIXEUR v3.2.0.0 com os valores fornecidos pelo fabricante do cartão padrão, dispusêmo-los em forma gráfica. A Figura 3.1 mostra a o eixo das ordenadas com os valores da coordenada R experimental enquanto a abcissa apresenta os valores nominal. As Figuras 3.2 e 3.3 têm a mesma forma para as coordenadas G e B . Para os três casos foram feitas regressões lineares, cujas equações e coeficientes de determinação R^2 são dados nos gráficos.

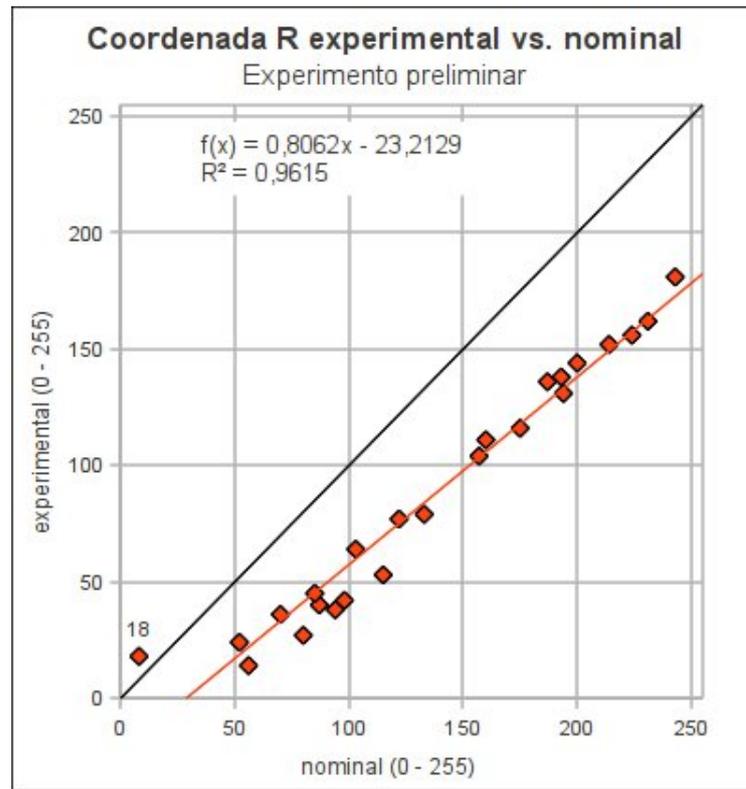


Figura 3.1: Relação experimental/nominal para a coordenada *R* no experimento preliminar.

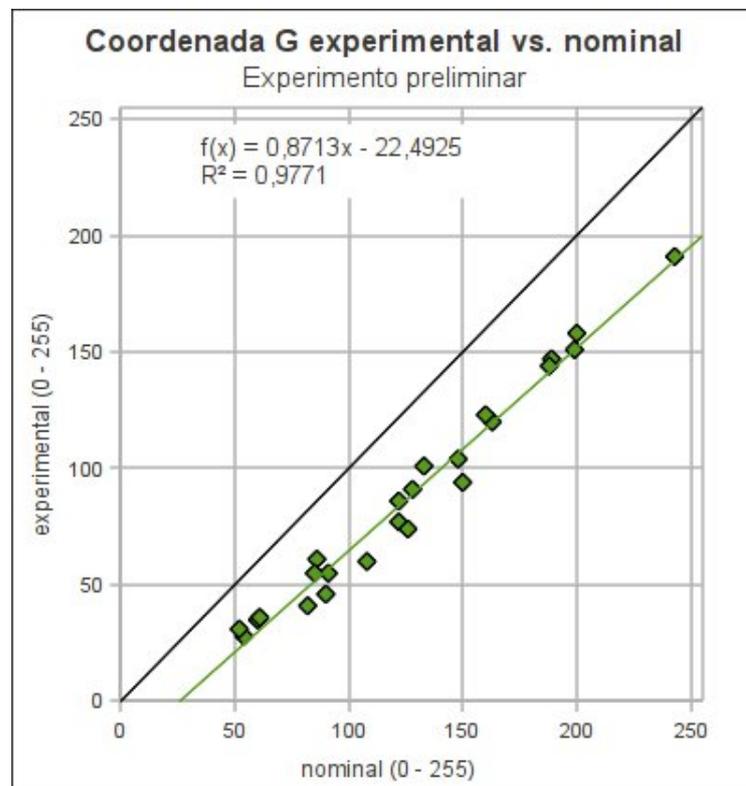


Figura 3.2: Relação experimental/nominal para a coordenada *G* no experimento preliminar.

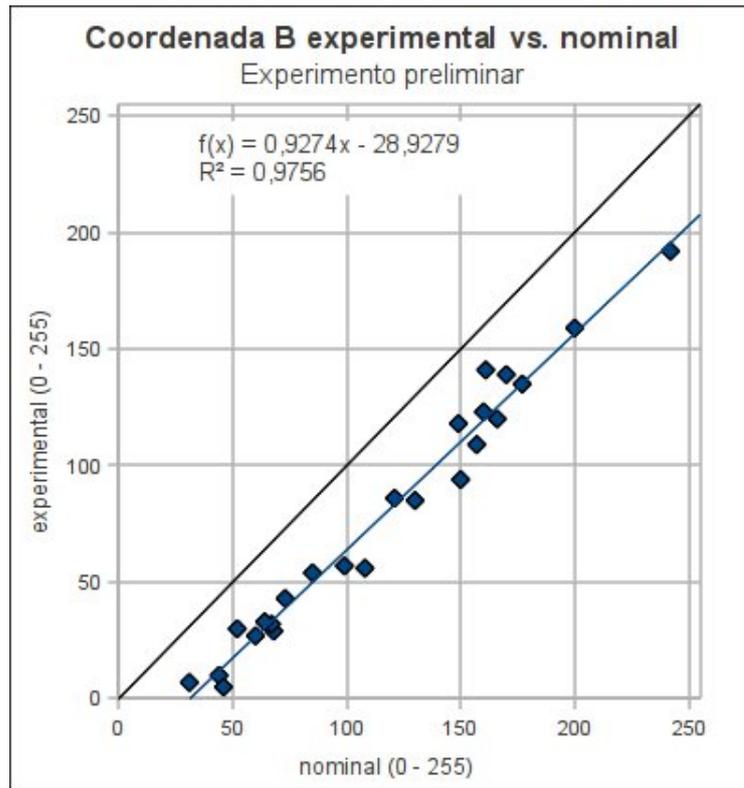


Figura 3.3: Relação experimental/nominal para a coordenada B no experimento preliminar.

Há, obviamente, pelo menos uma faixa de luminosidade adequada para a comparação entre os valores nominais e experimentais; uma vez que sob luminosidade nula todos os valores RGB seriam nulos e sob luminosidade excessiva há a tendência de saturação dos sensores, o que levaria todos a seu máximo de 255. Ambos os casos impedem qualquer avaliação colorimétrica, já que nem se poderia falar em cores – apenas em preto e branco. Sob este aspecto os dados apresentados são comparáveis, já que o menor valor experimental foi de 5 e o maior 192. Ainda sobre a faixa de valores apresentados, nota-se que, à excessão do valor R para a cor 18, todos os valores experimentais são menores que os valores nominais. Tal fato, assim como o coeficiente angular inferior à unidade para cada regressão linear, demonstra primariamente que a fotografia apresenta baixa luminosidade. Há pelo menos duas formas de se resolver este problema: 1) pode-se usar o ajuste automático dos parâmetros de abertura do diafragma e velocidade de obturação (ou tempo de abertura do obturador), para que uma correta exposição seja alcançada; ou, 2) pode-se ajustar manualmente os parâmetros e escolher posteriormente qual fotografia apresenta-se mais adequada – neste caso igualar o fator de exposição (eV) exibido no display da maioria das câmeras digitais a zero pode auxiliar.

Outra observação importante deve residir sobre a qualidade das regressões lineares, seus coeficientes e desvios. Pode-se constatar que em geral os pontos dos gráficos desviam-se das linhas de tendência por distâncias razoavelmente constantes, não sendo observada nenhuma tendência de acordo com o valor absoluto da coordenada. Isto leva a maiores desvios proporcionais entre os dados experimental e nominal para aqueles cujos valores absolutos são baixos, o que indica que quanto menor o valor do sinal RGB, maior sua imprecisão. De fato, já é de se esperar tal ocorrência uma vez que os dados armazenados são sempre números inteiros, o que diminui a precisão para valores baixos. No

entanto, além disso, ao se variar os pontos de uma determinada cor na utilização do software verifica-se que a variação do valor de pontos contíguos é razoavelmente a mesma para qualquer cor. Ou seja, parece haver uma variação média entre 2 e 3 no valor do sinal RGB qualquer que seja seu valor absoluto. Tal fato pode ser devido ao modo como o sinal eletrônico é processado pela câmera fotográfica ou por interferências ópticas no caminho da radiação eletromagnética da fonte ao sensor. De qualquer forma, para ambas as hipóteses, não há procedimento viável aos fins da pesquisa deste trabalho que reduza a fonte do problema. Pode-se proceder, entretanto, com luminosidades mais altas – desde que não se sature os fotossensores –, reduzindo-se assim ambos os problema de sinais baixos inerentes à fotografia digital.

Para além de o coeficiente angular das regressões lineares ser inferior a uma unidade, poderia-se dizer que, pelos valores dos coeficientes de determinação aparentemente altos ($R_R^2 = 0.9615$, $R_G^2 = 0.9771$, $R_B^2 = 0.9756$), há um valor que revelaria o quanto a imagem está sub-exposta. No entanto, não podemos afirmar tal tendência por conta das condições de luminosidade utilizadas. A luz ambiente, em primeiro lugar, apresenta baixíssima reprodutibilidade e pode ter espectros muito variados. A composição com lâmpadas fluorescente tubular ainda agrava as condições, uma vez que nenhum procedimento de Balanço de Branco foi tomado e este tipo de fonte de radiação geralmente têm espectros bastante descontínuos, o que reduz consideravelmente seu IRC (Índice de Reprodução de Cores)^[8] e pode ser responsável pelos desvios entre as coordenadas coletadas e as nominais. Sobre tudo isso, tem-se também uma má distribuição geral de luminosidade, uma vez que a lâmpada fluorescente foi posicionada acima do quadro, irradiando consideravelmente mais para certas regiões que para outras, o que eleva a imprecisão da avaliação. Assim, ainda não podemos afirmar se os coeficientes de determinação são de fato altos ou se são baixos.

Portanto, para as etapas posteriores os seguintes cuidados serão tomados: i) utilização de fonte de radiação eletromagnética com alta fidelidade de reprodução de cores e espectro suave e equilibrado (como lâmpadas incandescentes); ii) procedimento de Balanço de Branco; iii) ajuste ou seleção de parâmetros para exposição adequada à luminosidade. Então os novos dados poderão ser comparados a estes.

3.1.2 Cálculo da posição ideal das fontes de radiação

A Figura 3.4 mostra a saída gráfica para duas fontes de mesma intensidade dispostas a 110 *cm* uma da outra (55 *cm* do centro). Tal distância foi escolhida por sua lateralidade não resultar em reflexos especulares contra a lente objetiva da câmera fotográfica e por facilidade da montagem experimental das fontes de radiação a esta posição. Foram variadas as medidas de profundidade (F) manualmente até se encontrar um conjunto de posições cuja distribuição de luminosidade fosse mais homogênea.

Vê-se da saída calculada que há uma posição ótima cuja distribuição se apresenta excelente; sua variação percentual é de menos de 0.005% para uma área de 20 *cm* de largura (X de -10 a +10 *cm*). Além disso, posições com 1 *cm* a mais ou a menos também apresentam ótima distribuição para uma área de 10 *cm* de largura (X de -5 a +5 *cm*)¹. Sendo que estas variações percentuais são bastante

¹Seria preferível que fotografia de grandes áreas fosse tomadas, por praticidade de execução. No entanto, grandes áreas perdem em definição, o que pode ser bastante problemático em fotografia de quadro artísticos com muitos detalhes. Além disso pela operação realizada na câmera *Logitech QuickCam Pro 9000* exposta na seção "Fotografia sensível ao infravermelho" no

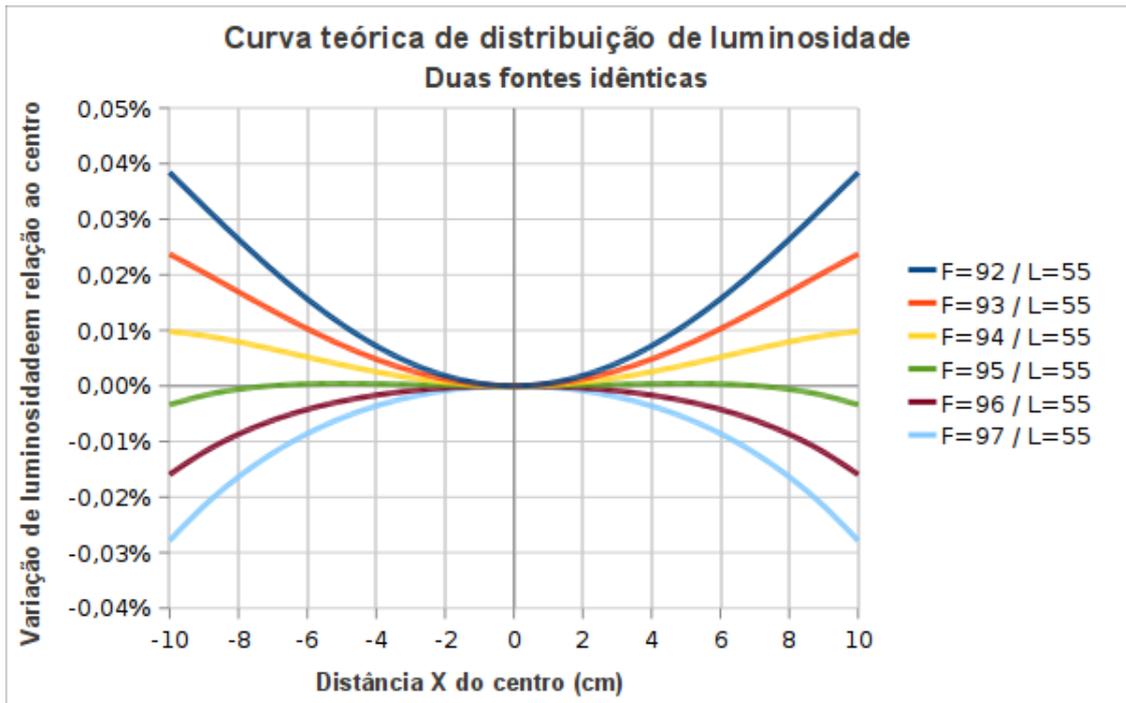


Figura 3.4: Distribuição de luminosidade para duas fontes idênticas, $L = 55 \text{ cm}$ fixo e F de 92 a 97 cm .

inferiores aos desvios inerentes da tomada de coordenadas RGB via software, podemos considerar que a precisão de 1 cm a mais ou a menos para a posição das fontes de radiação é mais que suficiente para o escopo deste trabalho. Dessa forma corrobora-se também a posição fixa das fontes de radiação em 110 cm uma da outra, não sendo necessário considerar outros ajustes senão o de profundidade e de eventual diferença de intensidade entre as duas fontes. Importante ressaltar que a distância ótima calculada de 92 cm não apresenta inconvenientes de impedimento espacial do arranjo experimental nem gera reflexos especulares indesejados ou sombras no relevo da pintura.

Previendo que duas fontes de radiação de mesmas denominações possam ter variações significativas de intensidade (o que pode variar conforme tempo de vida para todos os tipos de lâmpadas comerciais, de lote pra lote em lâmpadas de descarga e mesmo de unidade pra unidade em lâmpadas LED usuais), simulamos também o caso de fontes de luz em posições simétricas mas com diferentes intensidades luminosas. O resultado para as distâncias previstas neste trabalho são enormes. A Figura 3.5 mostra a saída gráfica para as mesmas posições já apresentadas anteriormente com mesmas intensidades das fontes, mas desta vez com uma diferença de apenas 0.5% entre uma fonte e outra.

Observa-se que para estas condições não há qualquer posição simétrica que apresente diferença de luminosidade inferior a 0.04%. Diminuindo-se a homogeneidade da incidência de radiação sobre a área a ser fotografada em quase 10 vezes com uma diferença de intensidade luminosa de apenas 0.5%, vemos que o fator crítico da disposição das fontes de radiação não é a posição, mas sim a diferença entre as duas fontes.

Dessa forma a mobilidade do suporte das fontes de radiação pode fornecer um ajuste importante para se homogeneizar a luminosidade da fotografia. Em vez de confiar no cálculo teórico puramente,

capítulo "Materiais e Métodos", a distância focal desta foi bastante reduzida, o que limita a área a ser fotografada em foco. Por estes motivos, consideramos na análise de resultados deste procedimento áreas de fotografia viável de 10 a 20 cm de largura.

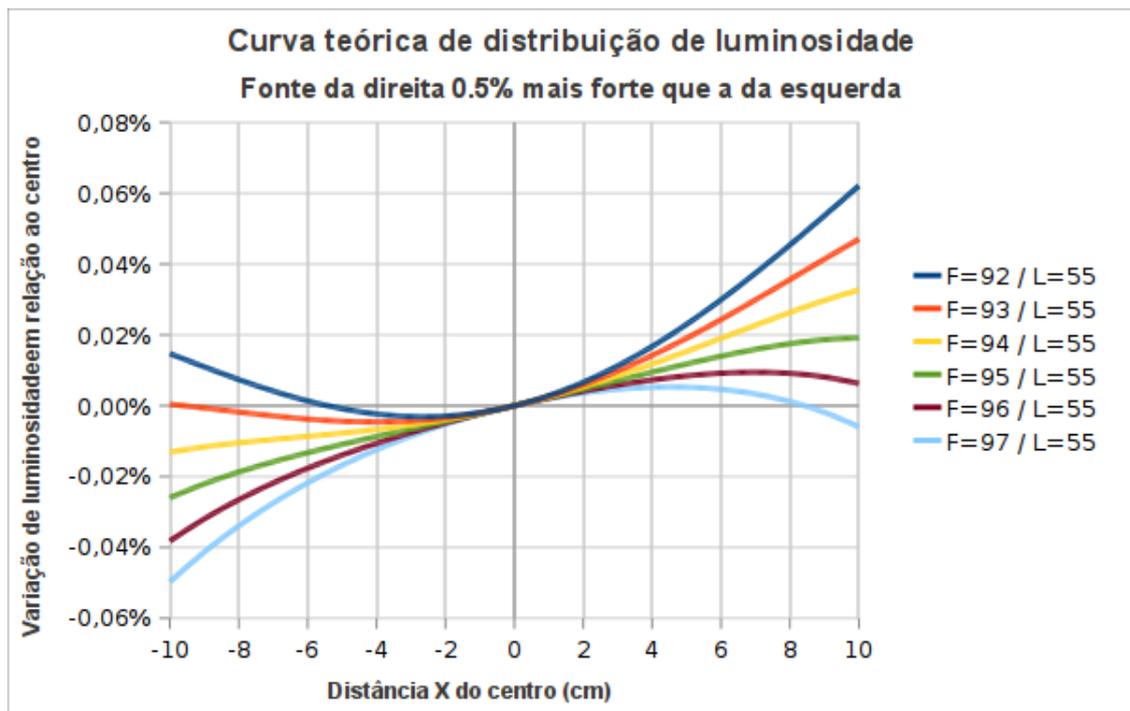


Figura 3.5: Distribuição de luminosidade para duas fontes diferentes, $L = 55 \text{ cm}$ fixo e F de 92 a 97 cm .

deve-se considerar as simplicidades desta modelagem – principalmente quanto à semelhança das duas fontes e idealidade da superfície a ser fotografada em questão de rugosidade e planicidade – e ajustar empiricamente as posições das fontes de radiação. Pode-se utilizar uma metodologia iterativa de posicionamento e verificação pela própria fotografia. Além disso, fontes de características confiáveis (como lâmpadas incandescentes recém-adquiridas e com mesmo tempo de utilização) passam a ser exigências quando se pretende reprodutibilidade e agilidade no procedimento experimental.

A problemática da diferença de intensidade poderia ser mitigada com o afastamento de ambas as fontes, uma vez que conforme as distâncias aumentam suas influências prevalecem sobre a quantidade de energia emitida (vide equação 2.1). Entretanto dimensões maiores também exigem lâmpadas de alta potência, cujo custo é maior, e espaço de grandeza inconveniente para um projeto de praticidade.

3.1.3 Experimento de verificação colorimétrica

O primeiro passo foi avaliarmos a qualidade dos dados obtidos e verificar a distribuição de desvios deduzida no “Experimento preliminar”. Para tanto dispusemos o desvio padrão de cada coordenada ordenados quanto ao valor da mesma coordenada sRGB em ordem crescente. As Figuras 3.6 a 3.8 mostram tal tratamento com distinção em duas séries; uma trata apenas dos quadrados referentes à escala de cinza (branco, quatro cinzas e preto), já a outra trata das 18 cores propriamente ditas.

Vê-se logo que o desvio tende a diminuir conforme aumenta-se o valor da coordenada, para qualquer que esta seja. Tal fato corrobora a impressão anteriormente tida de que os desvios absolutos geram imprecisão para baixos valores RGB.

Observa-se também que não há grande distinção entre a série de escala de cinzas e a colorida e

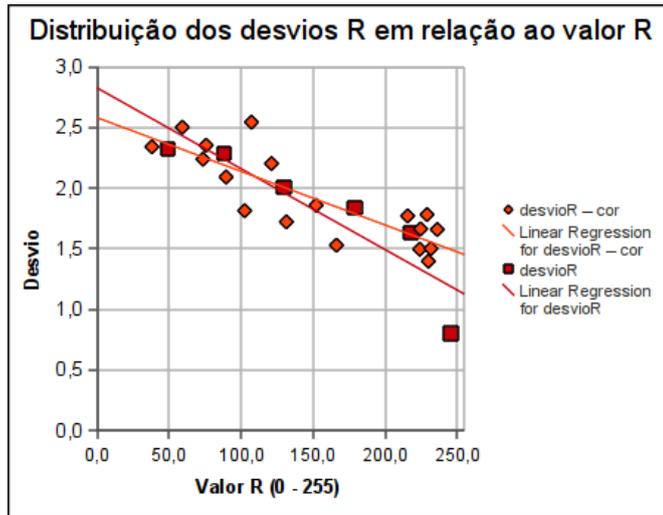


Figura 3.6: Distribuição do desvio padrão da coordenada R.

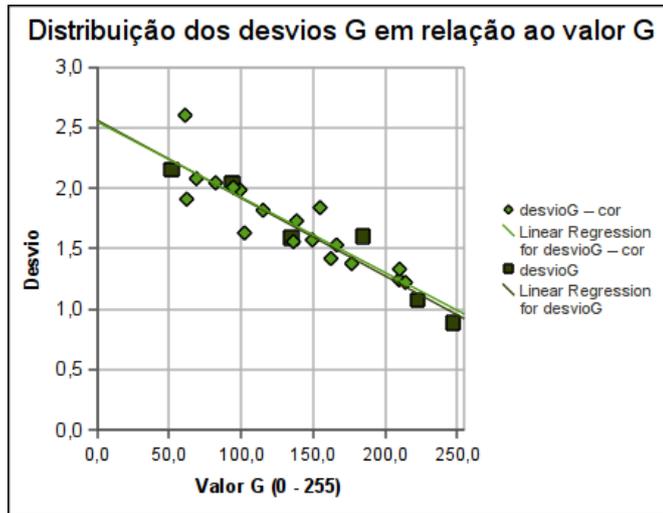


Figura 3.7: Distribuição do desvio padrão da coordenada G.

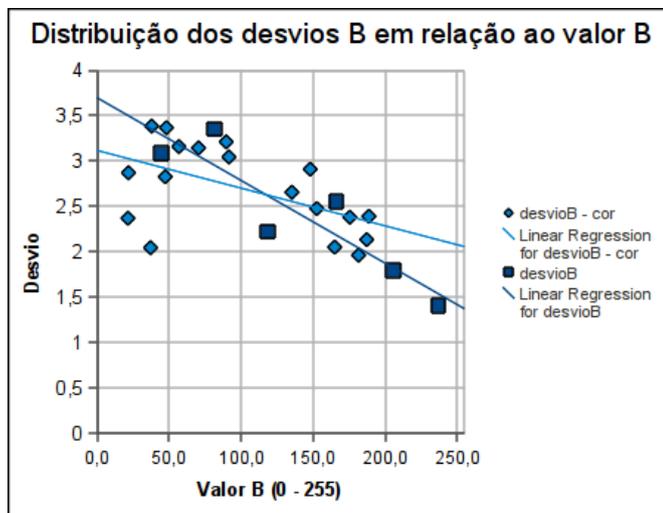


Figura 3.8: Distribuição do desvio padrão da coordenada B.

que para as coordenadas R e G a regressão linear é conveniente e os desvios (entre 3 e 1) são baixos. Já para a coordenada B, o comportamento linear parece forçado – principalmente para três cores de baixo valor B – e os desvios estão entre 3.5 e 1.5. No entanto, nota-se a tendência de decréscimo do desvio com o aumento do valor B; o que é suficiente para a profundidade de análise estatística e acerca do funcionamento dos sensores fotográficos deste trabalho.

Sabendo da qualidade dos desvios padrão das informações obtidas pelo ARI-LUHIEN II, procedemos com a análise dos resultados principais conforme o “Experimento preliminar”. As coordenadas RGB tomadas do arquivo fotográfico digital foram comparadas em gráfico de dispersão com as coordenadas nominais fornecidas pelo fabricante do cartão *x-rite Color Checker*®. Foram feitas regressões lineares para cada série de coordenada RGB e calculados seus coeficientes de determinação, como mostram as Figuras 3.9 a 3.11.

Notou-se primeiramente que os valores experimentais apresentaram quase identidade com os valores nominais, o que pode ser visto pela proximidade à unidade dos coeficientes angulares das equações de regressão linear. Tal fato demonstra pelo menos uma correta exposição à luminosidade segundo a metodologia seguida, em oposição às retas de coeficiente angular inferiores à unidade do “Experimento preliminar”.

No entanto é preciso avaliar a qualidade da regressão linear. Os fatores de determinação R^2 apresentaram ótimo índice – muito próximo a 1 –, entretanto, à exceção da coordenada G, estão abaixo dos obtidos no “Experimento preliminar” realizado sob iluminação pouco controlada, má distribuída e de IRC questionável. Que podemos concluir disso? Um experimento tomado em condições descontro-

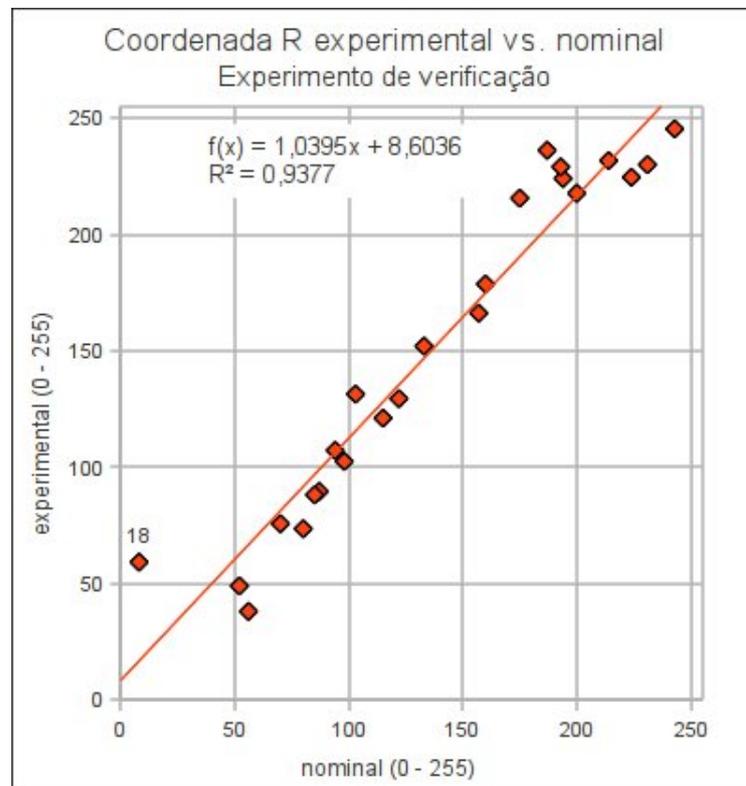


Figura 3.9: Relação experimental/nominal para a coordenada R no experimento de verificação colorimétrica.

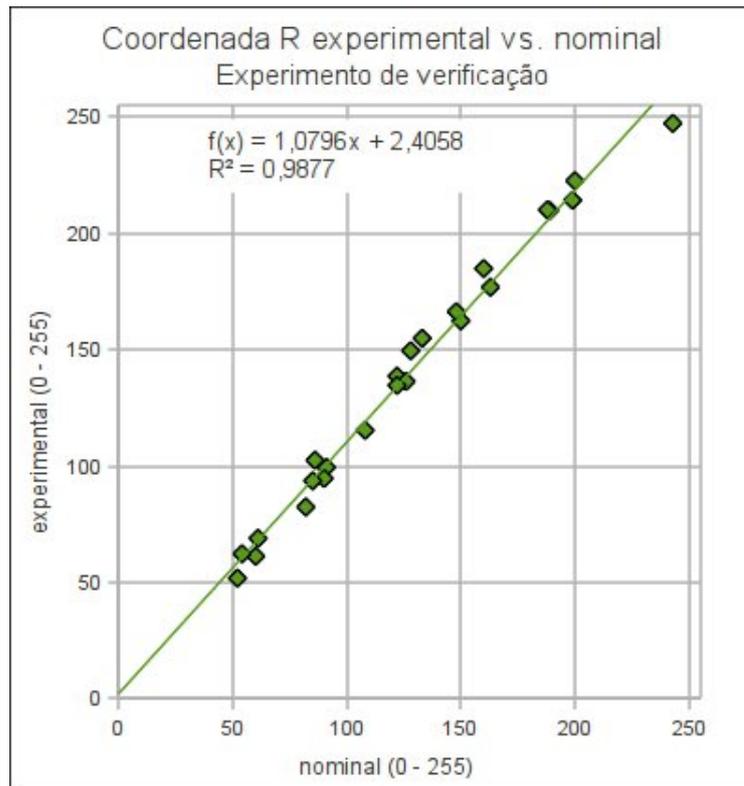


Figura 3.10: Relação experimental/nominal para a coordenada G no experimento de verificação colorimétrica.

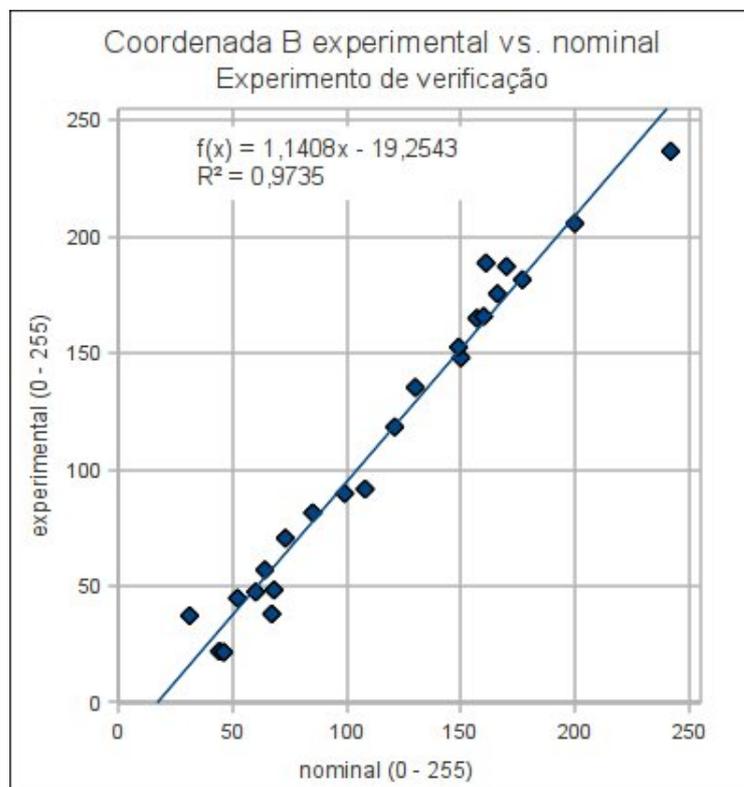


Figura 3.11: Relação experimental/nominal para a coordenada B no experimento de verificação colorimétrica.

ladas fornece dados mais correlacionados com os valores nominais que um experimento tomado em condições controladas, reproduzíveis e segundo a metodologia da Fotografia. . . Ou o método científico caiu sobre um assunto caótico com olhares deterministas ou o quadro de cores padrão não tem grande utilidade para o ajuste dos parâmetros colorimétricos de uma máquina fotográfica. Afirmamos que é de boa utilidade para aferir a correta exposição de luminosidade de uma máquina, mas para isso dois ou três cores da escala de cinza já são suficientes. Seria útil também caso houvesse uma grande desregulagem dos sensores, mas não é de problemas técnicos da tecnologia que estamos tratando. Sobre este tópico ainda podemos ressaltar que para as três coordenadas o pigmento 19 (branco), cujos valores RGB são os mais os altos, como esperado, a reta obtida pela regressão extrapola um valor experimental maior que o de fato observado. Podemos mostrar a hipótese de que o branco do cartão estivesse sujo, mas visto que assim não pareceu em momento algum o branco pode também não ser uma boa cor para regulagem colorimétrica, restringindo-se sua utilização para o ajuste do Balanço Branco.

Observa-se também que a regressão linear com maior coeficiente de determinação (G), é a que a teve também o melhor ajuste linear dos desvios. Talvez isso tenha uma causa específica, mas conquanto não saibamos podemos dizer que a coordenada G é a mais confiável.

Por último, lembrando-se da hipótese de problema numérico para baixos valores RGB levantada no “Experimento preliminar” para explicar o *outlier* pigmento 18 na série R, aqui novamente podemos proceder com tal explicação. Embora não seja o único grande desvio da coordenada R, o pigmento 18 é sem dúvida o maior problema. O valor experimental é de quase 10 vezes o valor nominal! Caso singular, a hipótese de desvio linearmente dependente não é suficiente para explicar tal comportamento. É interessante notar que o valor R para o 18 - Cian (tido como cor oposta ao vermelho nas teorias tricromáticas) é de 5 segundo a tabela fornecida pelo fabricante. Tal valor é tão baixo que apresenta-se inferior mesmo ao pigmento preto, cujo valor R é de 25. Temos assim um pigmento singular que dificilmente deve ter sua representação natural pura ou mesmo no universo dos pigmentos artificiais anteriores ao século XX^[22-24]. Portanto, para a aplicação da fotografia como técnica de caracterização de pigmentos históricos ou colorações naturais, não precisamos por ora nos preocupar com este caso; contudo sua elucidação possa ser reveladora de entendimentos e ferramentas úteis a esta mesma pesquisa por praticidade.

3.2 Fotografia sensível ao infravermelho

O primeiro fato notável ao se observar os dados obtidos pelo ARI-LUHIEN II para as fotografias sensível ao IV foi que as coordenadas R , G e B tinham valores diferentes para a mesma região. Qual o significado e como proceder? Sendo que as coordenadas R e B apresentavam sempre valores maiores que a coordenada G , temos duas hipóteses fortes: i) Os sensores R e B são mais sensíveis à radiação infravermelha; ii) Radiação eletromagnética de espectro com comprimentos de onda entre 400 e 700 nm além da infravermelha foi transmitida pelo filtro de filme fotográfico velado estimulando mais os sensores R e B que o G . A primeira hipótese é enfraquecida segundo Twede^[14] por sensores G e B terem curvas de sensibilidade semelhantes, enquanto o sensor R tem curva de sensibilidade bastante diferente. Já a segunda hipótese é fortalecida ao se observar o filtro fotográfico velado visualmente contra a luz. Observa-se que aquilo que se apresenta azulado e, principalmente, avermelhado continua

a ter certa transmissão de luz através do filtro, enquanto aquilo que anteriormente aparecia como esverdeado pelo filtro apresenta-se negro. Há portanto um melhor bloqueamento da radiação dita visível que estimula o sensor *G*. Por isso e por este apresentar dados mais consistentes (vide discussão em “Experimento de verificação colorimétrica”) escolhemos os dados *G* da fotografia sensível ao infravermelho para representar a sensibilidade a esta radiação e por isso denominaremos esta coordenada por *IV*.

Da mesma forma que procedemos com a análise de dados para a fotografia em radiação visível, também aqui plotamos um gráfico com a distribuição dos desvios padrão *IV* em relação à coordenada *IV*. Tal tratamento é exposto na Figura 3.12 abaixo.

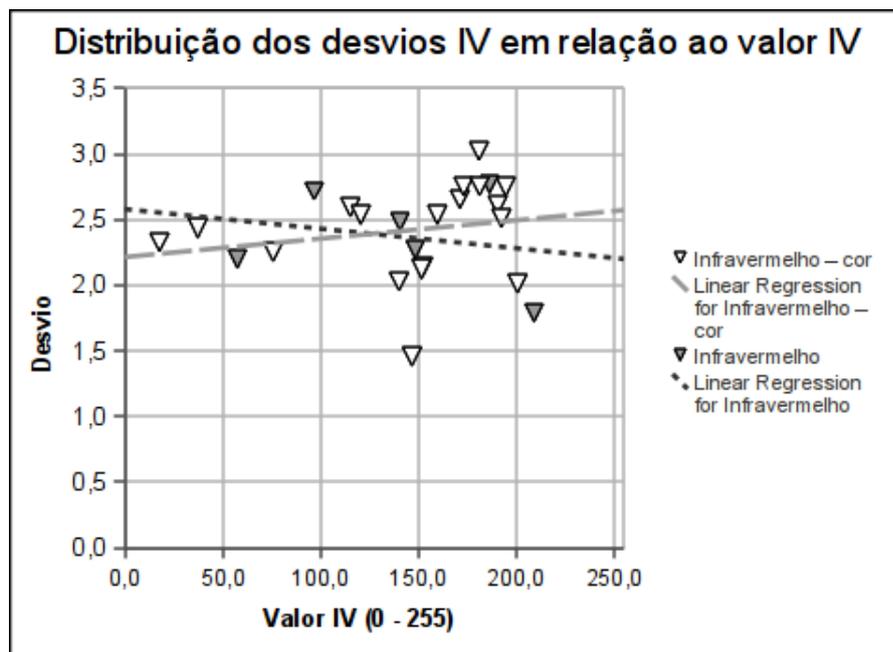


Figura 3.12: Distribuição do desvio padrão da coordenada *IV*.

Diferentemente da distribuição para as coordenadas RGB, vê-se que não há qualquer relação linear ou de crescimento/decrescimento dos desvios em relação à coordenada *IV*. Há apenas uma faixa entre 1.5 e 3 na qual recaem os desvios, semelhante ao comportamento das coordenadas RGB. Na ausência de dados precisos sobre a transmissância do filme velado e sobre a faixa de radiação infravermelha na qual o sensor fotográfico é estimulado, nos limitamos a levar a informação que o desvio padrão para *IV* nas condições trabalhadas está entre 1.5 e 3.

Outro procedimento de análise foi ordenar os pigmentos em ordem crescente do valor de uma coordenada RGB e dispor num mesmo gráfico uma série com este valor e uma com o valor *IV*. Os gráficos de linha são mostrados nas Figuras 3.13 a 3.15.

Pela proximidade das regiões vermelha e infravermelha do espectro eletromagnético e pelos muitos mecanismos de geração de radiação em comum dessas regiões, esperávamos que houvesse uma certa correspondência do valor *R* com o valor *IV* para alguns pigmentos. No entanto o que se pode observar é que apenas há coincidência dos valores *R* e *IV* para os pigmentos 20, 21, 22, 23 e 24 em ordem crescente e uma certa coincidência para o pigmento 12 - Orange Yellow. Sendo que para o pigmento 24 - preto os valores *R* e *IV* são os mais próximos, é de se supor que a nulidade de

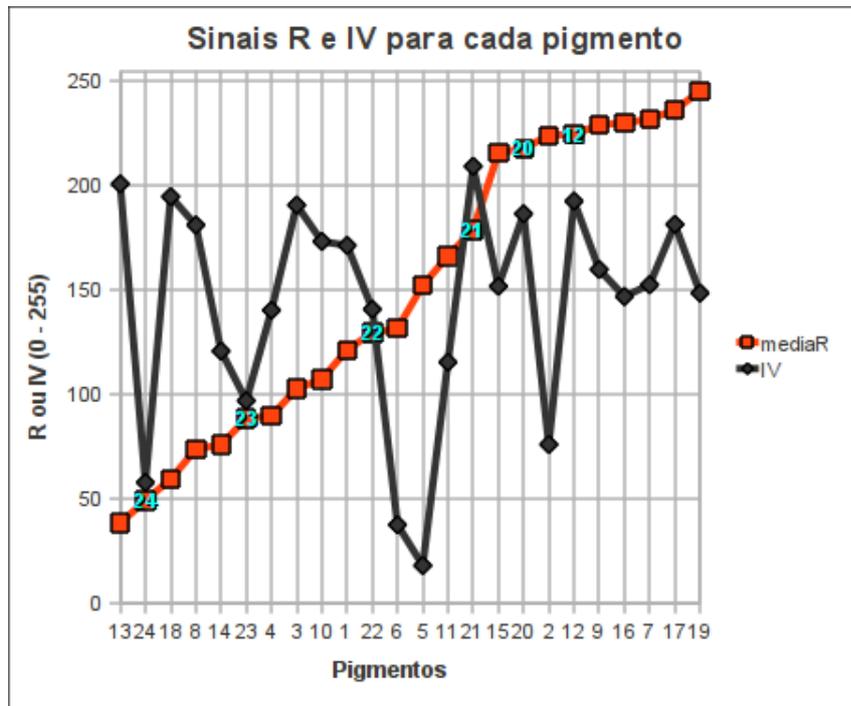


Figura 3.13: Determinação do sinal IV em relação ao sinal R.

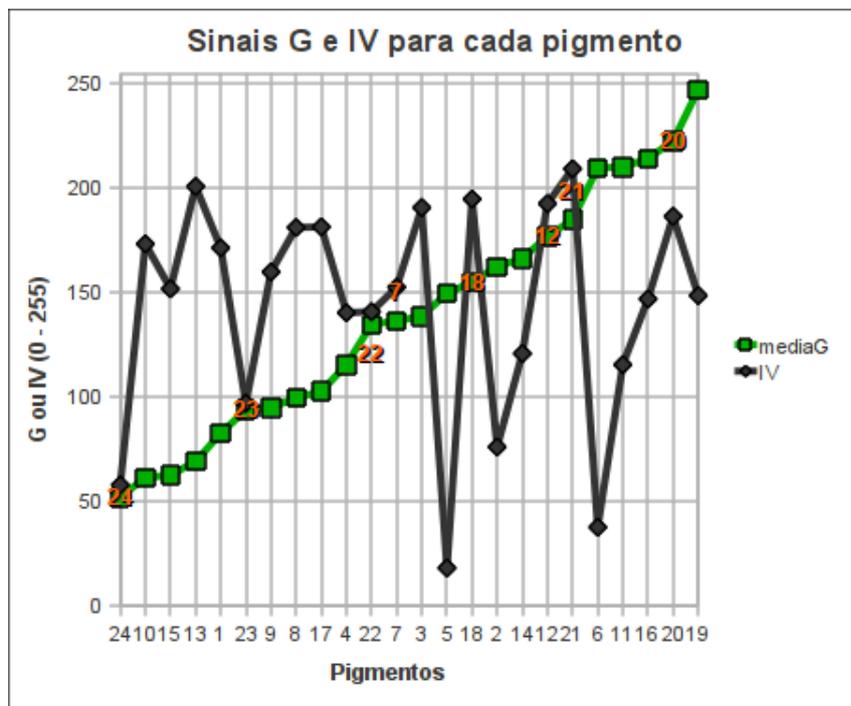


Figura 3.14: Determinação do sinal IV em relação ao sinal G.

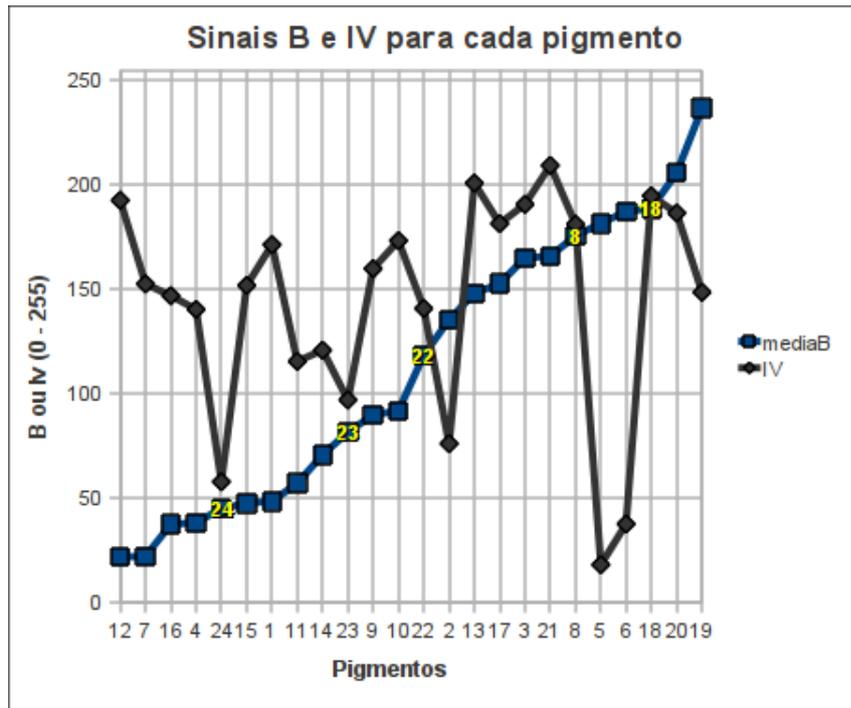


Figura 3.15: Determinação do sinal IV em relação ao sinal B.

cor seja dada por seu espectro de reflexão ser baixo e planar por uma longa extensão, cobrindo a região visível e, por continuidade do mesmo mecanismo, a infravermelha. Podemos dizer também que o branco tem nulidade de cor, mas nesse caso não temos um comportamento semelhante; com uma reflexão IV de valor $IV=149$, o branco corresponde a uma certa absorção da radiação infravermelha. Este comportamento, contudo, não é absurdo nem inesperado uma vez que os pigmentos brancos com melhor poder de cobertura e portanto mais utilizados são justo aqueles que apresentam uma queda logo após o fim da região dita visível da curva de refletância^[23, 24]. A partir destes dois comportamentos previsíveis compomos por mistura o comportamento dos pigmentos 20 a 23; cinzas cada vez mais escuros, estes apresentam cada vez maior coincidência dos valores R e IV, demonstrando um caminho de mistura do branco ao preto. Dado que a curva espectral de refletância destes pigmentos deve ser razoavelmente plana, deduz-se que tal tendência deva-se repetir em G e B; e de fato ocorre.

Assim como o pigmento 12 exhibe valores R e IV próximos, também há outros pigmentos com a mesma disposição para as coordenadas G e B. No entanto, não há qualquer correlação entre tais coincidências e suas cores. Consideramos então apenas coincidências.

Apesar dos mecanismos de produção da radiação serem semelhantes para os casos de infravermelho e emissões em torno de 450 nm ditas visíveis, não necessariamente deve haver coincidência ou continuidade do comportamento espectral nessa faixa. Ainda mais que o cartão de cores padrão é produzido para casamento apenas de cores “visíveis” por uma máquina fotográfica comum, é plausível que haja misturas de pigmentos para compor uma cor com determinado valor R, G ou B e que isto resulte em qualquer coisa para a região infravermelha, não sendo possível identificar qualquer tendência por que de fato qualquer que pudesse haver foi escondida e diluída. Daí pode-se explicar um comportamento errôneo da coordenada IV ao longo do crescimento de R, G e B.

Pode-se dizer que o cartão *x-rite Color Checker*[®] também não apresenta nenhuma utilidade para a caracterização IV que não apresente uma escala de cinzas e assim corroboramos o afirmado na seção anterior. Por fim concluímos deste experimento que não basta cores conhecidas para prever ou relacionar um comportamento IV, é preciso saber que se trata de pigmentos pouco misturados.

3.3 Caracterização RGB-IV de pigmentos metaméricos

A profusão de dados coletados neste experimento apresenta uma primeira dificuldade de organização. Se para cada fonte de radiação, cuja intensidade luminosa é uma diferente, há fotografias para velocidades de abertura distintas, como comparar os dados RGB-IV entre elas? Poderia-se utilizar uma luminância padrão e tratar todas as fotos cujo fator de exposição gerasse tal luminância. Mas como obtê-la se estamos tratando de metamerismas, que esperamos mudar de comportamento colorimétrico a cada fonte? Podíamos ter disposto um padrão conhecido ao lado dos pigmentos metaméricos e dele obter tal luminância com auxílio do programa ARI-LUHIEN II. No entanto tal procedimento não foi levado a cabo durante as realizações experimentais. Por ora, então, selecionamos as fotografias cujo fator de exposição (eV) fosse ± 0 , mesmo que impreciso e não nos forneça segurança de mesma luminosidade. Avaliaremos, portanto, apenas de maneira qualitativa.

Para análise do comportamento RGB sob radiação dita visível, dipusemos os dados obtidos em um gráfico para cada coordenada ordenando-os por fonte de radiação, vide Figuras 3.16 a 3.18.

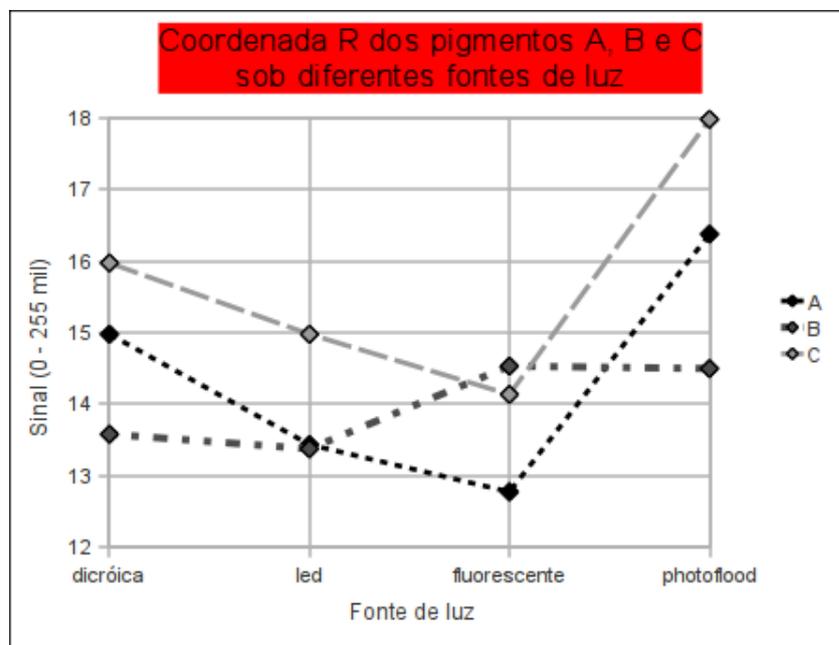


Figura 3.16: Comportamento dos pigmentos A, B e C sob diferentes fontes de luz para coordenada R.

O primeiro aspecto destes dados que deve ser ressaltado é a ordem de grandeza das coordenadas. Como observado do espectro dos pigmentos como dispostos na bibliografia², os três pigmentos absorvem quase totalmente para baixos comprimentos de onda, apenas o pigmento B tem alguma

²Os espectros não foram aqui reproduzidos por não termos autorização para tanto. Para informações consultar Billmeyer e Saltzman (1981).

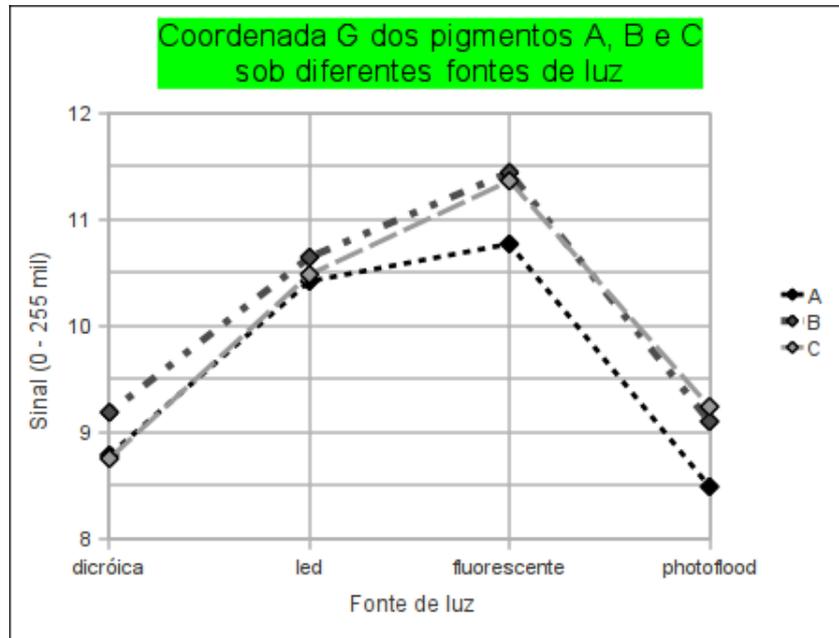


Figura 3.17: Comportamento dos pigmentos A, B e C sob diferentes fontes de luz para coordenada G.

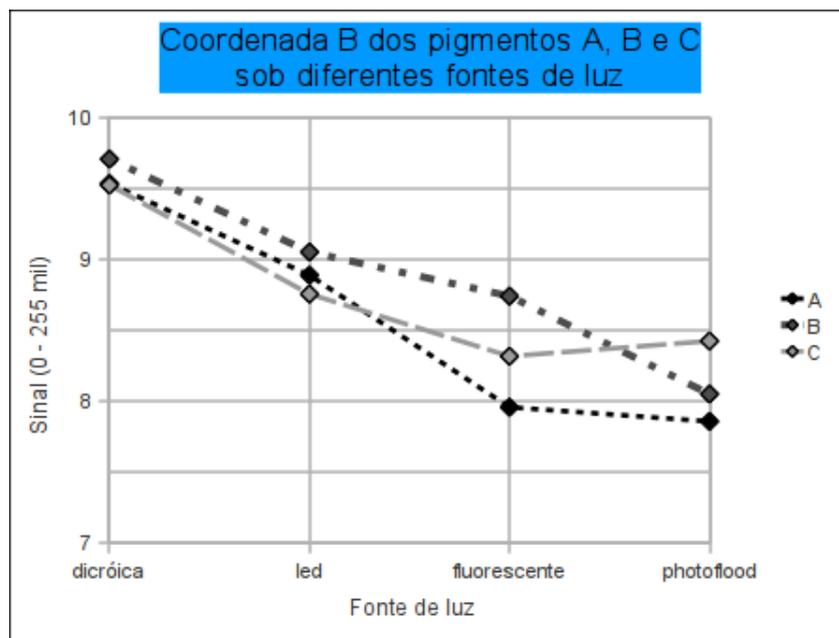


Figura 3.18: Comportamento dos pigmentos A, B e C sob diferentes fontes de luz para coordenada B.

reflexão para médios comprimentos de onda e os pigmentos A, B e C absorvem medianamente, em ordem crescente respectivamente, para altos comprimentos de onda; o espectro fornecido é para λ de 400 a 700 nm^[19]. Assim, as coordenadas RGB, principalmente *G* e *B*, apresentam valores muito baixos e próximos do desvio inerente a sua tomada de dados, o que imprecisa a avaliação. Entretanto, assim mesmo vamos a algumas considerações.

Para a coordenada *G*, não há uma grande mudança de comportamento; o pigmento C aproxima-se de A para iluminação por dicróica e LED, depois aproxima-se de B sob fluorescente e photoflood; os valores *G* para o pigmento B são sempre superiores ao de A, mas diminuem abaixo do pigmento C para iluminação sob photoflood. Com uma análise atenta observa-se que as variações para a coordenada *B* seguem razoavelmente a mesma ordem, apenas com mudança mais acentuada na mudança de fluorescente para photoflood. Como a refletância destes pigmentos para médios e baixos comprimentos de onda é bastante pequena, podemos supor que tais variações referem-se mais à diferença de luminosidade que às características dos pigmentos. No entanto certos cruzamentos não podem ser assim interpretados. A ascendência do valor *G* para o pigmento C quando iluminado sob fluorescente e photoflood (que por conterem fósforo em suas superfícies acabam por converter emissões de baixos comprimentos de onda em médios comprimentos de ondas) denota claramente sua maior refletância para a faixa central do espectro dito visível que o pigmento A, assim como observado ligeiramente em seus espectros de refletância.

Já para a coordenada *R* temos mais informações interessantes. Pode-se ver que os pigmentos A e C têm comportamento semelhante, flutuando da mesma forma apenas com distâncias variáveis entre si para cada lâmpada. Disso pode-se afirmar portanto que o formato semelhante de seus espectros não só determina seus valores *R*, mas também que a partir de uma constância de valores *R* podemos supor um espectro semelhante na região de altos comprimentos de onda. Podemos ainda fazer dedução mais fina ao observarmos que a menor distância entre estes pigmentos segundo a coordenada *R* se dá para a lâmpada dicróica, enquanto a maior distância sob lâmpada LED. Disso podemos dizer que o espectro de C é mais sensível a vermelhos de baixo comprimento de onda que a vermelhos bem próximos da região infravermelha; e de fato observa-se isto em seus espectros.

Quanto ao pigmento B na coordenada *R*, vemos que assume valor *R* maior que os pigmentos A e C quando iluminado por lâmpada fluorescente, o que denota sua maior refletância para os vermelhos próximos ao verde³. Por que em algumas ocasiões a lâmpada LED fornece melhor estímulo de comprimentos de onda medianos, em outras a lâmpada fluorescente e em outras a photoflood não sabemos explicar apenas com os dados que dispomos; seria preciso obter seus espectros de emissão e cruzá-los com os espectros de refletância dos pigmentos e as curvas de sensibilidade dos sensores fotográficos. No entanto, que a lâmpada dicróica não estimula preferencialmente o surgimento da sensação verde parece ser patente.

É importante ainda compararmos estas observações numéricas com as visuais tomadas no ato da fotografia. Se considerarmos que maior valor de *R* gera uma cor mais avermelhada, que menor $R + G + B$ uma maior escuridão da cor e que maior *G*, por oposição ao tom avermelhado, geraria uma cor mais castanha que vermelha, teremos que as distinções visuais se equiparam ou mesmo prevalecem

³Por denominarmos aqui comprimentos de onda por cores causamos uma confusão proposital provocativa. Para entendimento físico leia-se "sua maior refletância para radiações estimuladoras do sensor *R* com menor comprimento de onda; mais próximas daquelas que estimulam o sensor *G*".

sobre as numéricas de RGB. Para a lâmpada fluorescente, por exemplo, observamos visualmente um pigmento A mais escuro, um pigmento B mais claro e avermelhado e um pigmento C quase tão claro quanto B mas menos avermelhado. Já para a lâmpada LED, notamos que os pigmentos A e B eram quase um metamerismo, mas B era ligeiramente mais claro e ocre que vermelho; já C era bem mais avermelhado. Como podemos ver nas Figuras 3.19 e 3.20, onde dispusemos os mesmos dados já apresentados agora por fonte de radiação, tais observações visuais se equiparam à análise de RGB.

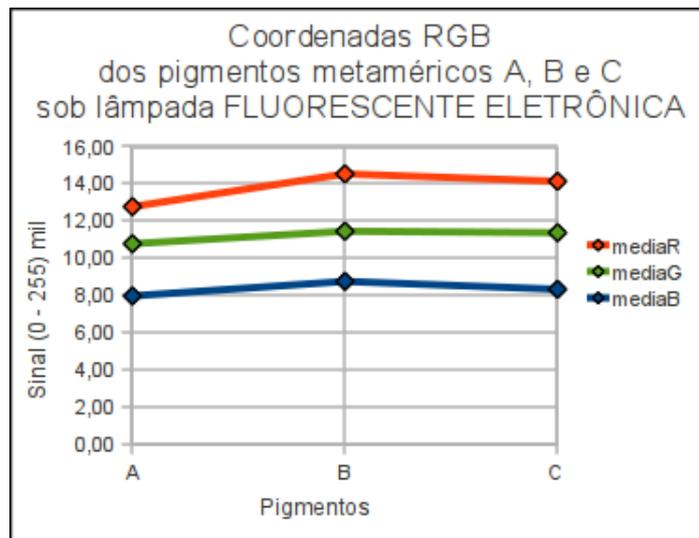


Figura 3.19: Coordenadas RGB para os pigmentos A, B e C sob lâmpada fluorescente.

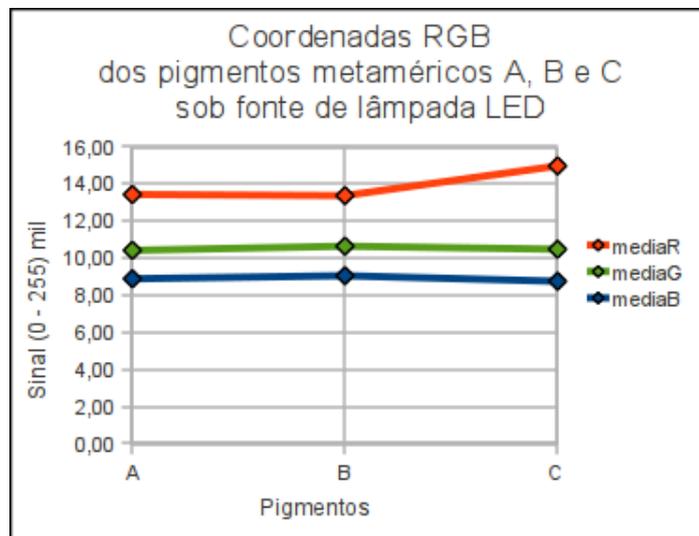


Figura 3.20: Coordenadas RGB para os pigmentos A, B e C sob lâmpada LED.

Pensando e estudando porque os valores RGB são dados de 0 a 255 e não em outra configuração múltipla de um bit, chegamos a que esta escala fornece distinção de cores próxima a que o ser humano comum é capaz de realizar. Assim, não seria necessário uma ferramenta computacional que transforme os dados distinguíveis intuitivamente em distâncias numéricas de difícil comparação. A menos da dificuldade de nomenclatura e comparação verbal de cores, um indivíduo que passa a se prestar mais a atenção das cores, no entanto, há de superar a quantidade de cores distinguíveis de um sistema RGB de 256 níveis por variável.

Então, verifiquemos se o infravermelho pode fornecer dados adicionais não observáveis visualmente e portanto viabilizar a técnica de caracterização colorimétrica por fotografia digital frente à análise visual. Para tanto sua coordenada IV obtida sob iluminação de photoflood é apresentada, da mesma forma que viemos fazendo, na Figura 3.21.

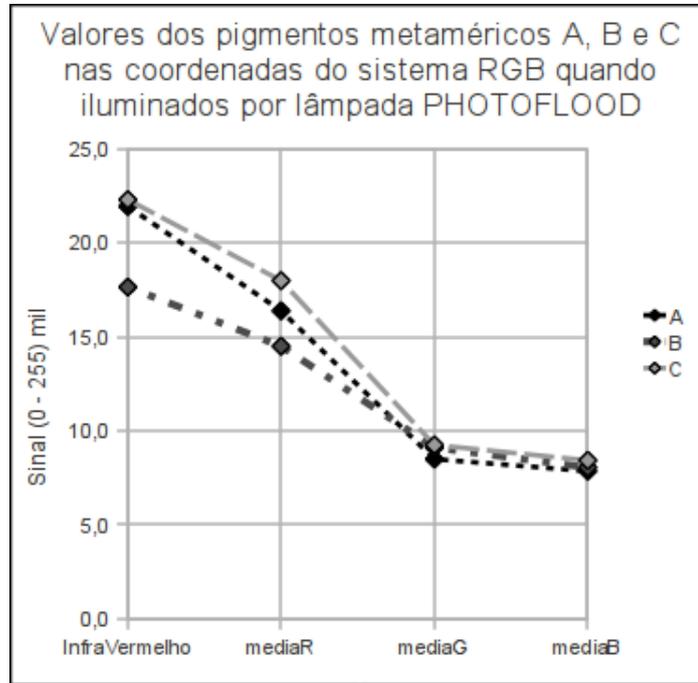


Figura 3.21: Comportamento dos pigmentos A, B e C sob photoflood em diferentes coordenadas.

Embora continuemos com o problema da luminância média, aqui ainda com o agravante de não sabermos qual a faixa de infravermelho que estimula o sensor fotográfico, podemos observar que os pigmentos A e C têm valores maiores e próximos, enquanto o pigmento B apresenta um valor IV menor. Podemos primariamente dizer que tal observação revela a tendência de continuidade dos espectro de transmitância ao observarmos baixos comprimentos de onda. Como a extrapolação do espectro de A diria, há a tendência de se equiparar com C, enquanto o espectro de B parece continuar no mesmo patamar. Entretanto tal análise é pernisciosa como pudemos observar da ausência de relação entre IV e RGB quando analisamos o quadro de cores padrão *x-rite Color Checker®*. Por ora podemos apenas afirmar que no infravermelho A e C podem ser distinguidos de B por fotografia sensível ao IV como aqui fizemos.

3.4 Caracterização RGB-IV de pigmentos artísticos históricos

Como um procedimento experimental mais próximo das possibilidades de aplicação da caracterização RGB-IV por fotografia, procedeu-se com a análise de um quadro de pigmentos artísticos históricos. Novamente a profusão de dados RGB e a carência de dados espectrais sobre o material estudado trouxe empecilho à pesquisa. Para verificação da relação do sinal R com o sinal IV pela proximidade de suas faixas de comprimento de onda, os pigmentos foram ordenados de forma crescente segundo a percentagem do valor de R na luminosidade $R + G + B$. Os dados R e IV foram plotados seguindo esta

ordenação, como mostra a Figura 3.22.

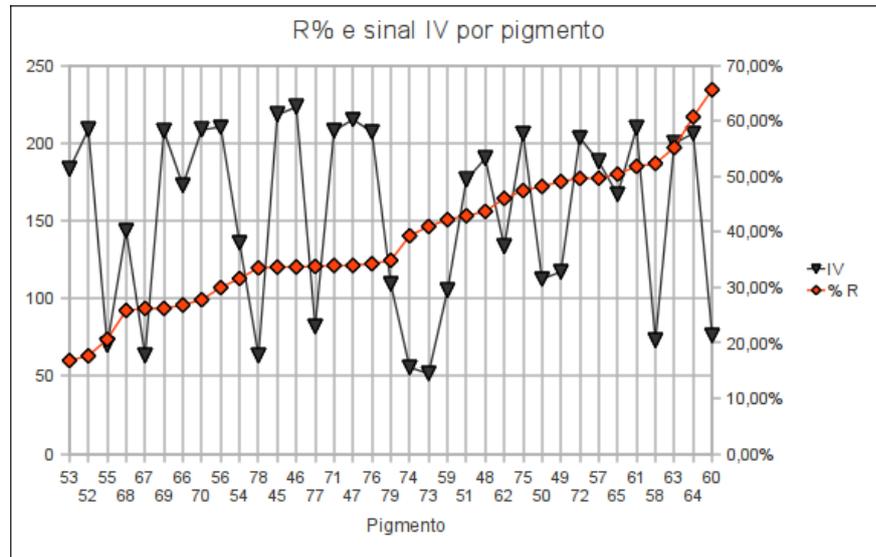


Figura 3.22: Variação do sinal IV conforme aumento da porcentagem da coordenada R no sinal RGB.

Vê-se que não há qualquer relação, mesmo sendo estes pigmentos naturais e anteriores ao século XX, como hipótese esperada anteriormente. No entanto duas hipóteses ainda resguardam a possibilidade de relação de R com IV: i) a faixa sensível ao infravermelho desta metologia pode ser muito vasta, indo além das regiões de IV próximas a 400 nm ; ii) a preparação das tintas com o pigmento, vernizes e lacas podem afetar a o comportamento da radiação infravermelha de uma região colorida, assim seu fundo se a camada de pigmento for bastante fina. Para a primeira hipótese podemos passar a utilizar filtros mais controlados, já para a segunda uma análise separada das bases e vernizes utilizados pode elucidar o caso.

Numa abordagem isenta da influência das coordenadas numéricas RGB, ainda a procura do valor do sinal IV para a caracterização de pigmentos, dispusemos apenas a coordenada IV para os diversos pigmentos classificados pela sua coloração visual. Tal procedimento é encontrado na Figura 3.23.

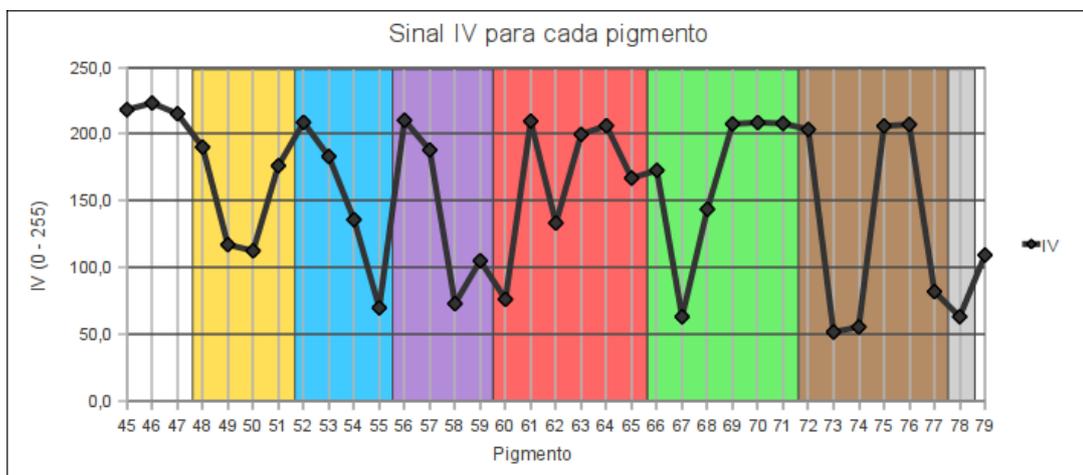


Figura 3.23: Variação do sinal IV conforme classificação cromática visual das cores dos pigmentos.

À primeira impressão esta disposição pode também não elucidar nenhuma correlação ou utilidade.

De fato não há relação evidente entre a coloração nomeada visualmente e os valores IV, no entanto vislumbra-se uma possibilidade de aplicação direta da técnica. Visto que pigmentos azuis geralmente apresentam valores B muito próximos e valores R e G de variações muitas vezes pequenas, podemos identificar os pigmentos 52 a 54 apenas pelo seu valor IV, que apresenta valores bastante distintos para cada um destes pigmentos. Dessa forma dado um azul entre estes, podemos definir qual seja não por análise visual ou química, mas pela coordenada IV definida pela metodologia deste trabalho. Se tabelarmos os valores RGB-IV para estes pigmentos azuis, como mostrado na Tabela 3.2, vemos claramente que a maior distinção entre tais pigmentos se dá pela coordenada IV. Há, claro, possibilidade de distinção deste pigmentos pela coordenada G , restando confuso apenas 54 e 55 que podem ser distinguidos pela própria coordenada B , mas a coordenada IV apresenta a maior distinção, além de ser mais simples por envolver apenas uma coordenada.

Tabela 3.2: Coordenadas colorimétricas RGB-IV experimentais para pigmentos históricos azuis.

# pigmento	Nome do pigmento	R	G	B	IV
52	Azul de cobalto turquesa	80,5	182,5	193,0	208,6
53	Azul cerúleo	56,7	115,4	165,3	183,1
54	Azul esverdeado ftalocianina	65,6	74,6	67,6	135,8
55	Azul ultramarino francês artificial	56,5	77,9	139,2	69,8

Da mesma forma podemos distinguir os pigmentos verdes 66, 67 e 68 dos 69 a 71. Mas também podemos indetificar estes pigmentos 69 a 71 entre si por terem o mesmo valor IV; é possível que tenham um composto em comum que reflete radiação infravermelha. daí também observamos que há uma certa linha de refletividade IV máxima, à qual pertencem os pigmentos brancos; o azul 52; o violeta 56; os vermelhos 61, 63 e 64; os verdes 69 a 71; e as terras 71, 75 e 76. Talvez estes tenham algum componente ou estrutura em comum que possa ser identificada por esta fotografia IV; cabe a um aprofundamento de pesquisa.

3.5 Obtenção de espectros de emissão de lâmpadas de descarga e simulação de metamerismas

Os espectros obtidos são mostrados nas Figuras 3.24 a 3.28.

Em primeiro lugar deve-se ressaltar a presença de um amortecimento à direita dos picos de certas lâmpadas. Tal fato pode ser devido a um mau posicionamento da fibra óptica que coleta a radiação a ser analisada. Se a fibra óptica estiver apontada para o cilindro de alumínio que reveste o arranjo experimental ainda assim a radiação será coletada, no entanto com amortecimento. Embora não impeça a continuidade da análise deste primeiro experimento na área, é importante lembrar que os resultados podem ser pouco menos fiéis à realidade direta da lâmpada. Pensemos então na luz refletida por uma luminária com uma destas lâmpadas e temos o caso prático de sua aplicação.

Já da observação dos picos e *background* do espectro de emissão, podemos perceber que os espectros das lâmpadas vermelha/XELUX e lilás/XELUX apresentam pouco *background* e são extremamente semelhantes. No entanto, os valores de seus índices colorimétricos são bastante diferentes – a exemplo do IRC-14 que pra primeira vale 45.5293 enquanto pra segunda 24.6957, segundo calculado

por uma rotina em MATLAB[®][8]. Disso, poderíamos concluir que as deduções qualitativas com base no formato dos espectros são ineficientes para aferir a qualidade colorimétrica de uma fonte de radiação, ou que o IRC não apresenta boa metodologia para lâmpadas de espectros pouco suaves.

Ainda exercitando a análise qualitativa, podemos tirar que o espectro da lâmpada azul/FUJI LIGHT apresenta forte *background* e portanto não serviria para os fins de pesquisa de dados colorimétricos pontuais, pois fornece muitos comprimentos de onda a serem refletidos pelo pigmentos, aumentando a reprodução de todo seu espectro. De fato, esta lâmpada é a que apresenta maior IRC-8 e maior IRC-14, de todas as aferidas. então embora pouco possamos dizer sobre a influência de picos sobre a reprodutibilidade de cores, a presença de *background* é um fator certo.

Contraopondo então à ideia de que ausência de *background* diminuiria a reprodução de cores, os espectros das lâmpadas verde/FUJI LIGHT e rosa/FUJI LIGHT – principalmente a primeira, que apresenta somente três picos, sendo um muito pequeno e outro muito grande – acabam por implodir a premissa confirmada pela análise da lâmpada azul/FUJI LIGHT. O espectro da lâmpada verde/FUJI LIGHT não apresenta qualquer pico ou *background* nas regiões de comprimentos de onda inferiores a 500 nm e superiores a 600 nm. No entanto, o IRC-8 desta lâmpada vale 78.7838 e o IRC-14 vale 73.5737 – valores acima do esperado, inclusive maiores que das lâmpadas vermelho/XELUX e lilás/XELUX que apresentam uma distribuição bem maior de picos.

Destas análises qualitativas, portanto, pouco podemos inferir sobre este Índice de Reprodução de Cores e qual sua influência sobre a tomada de coordenadas colorimétricas originais.

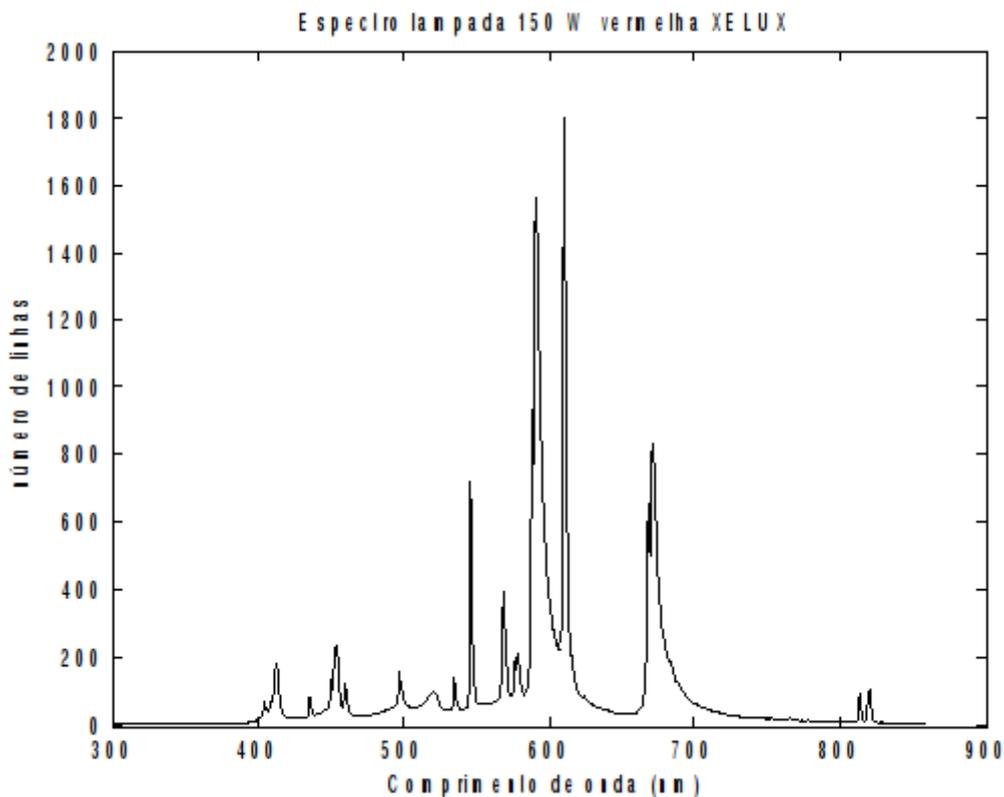


Figura 3.24: Distribuição espectral da lâmpada de descarga vermelha da XELUX.

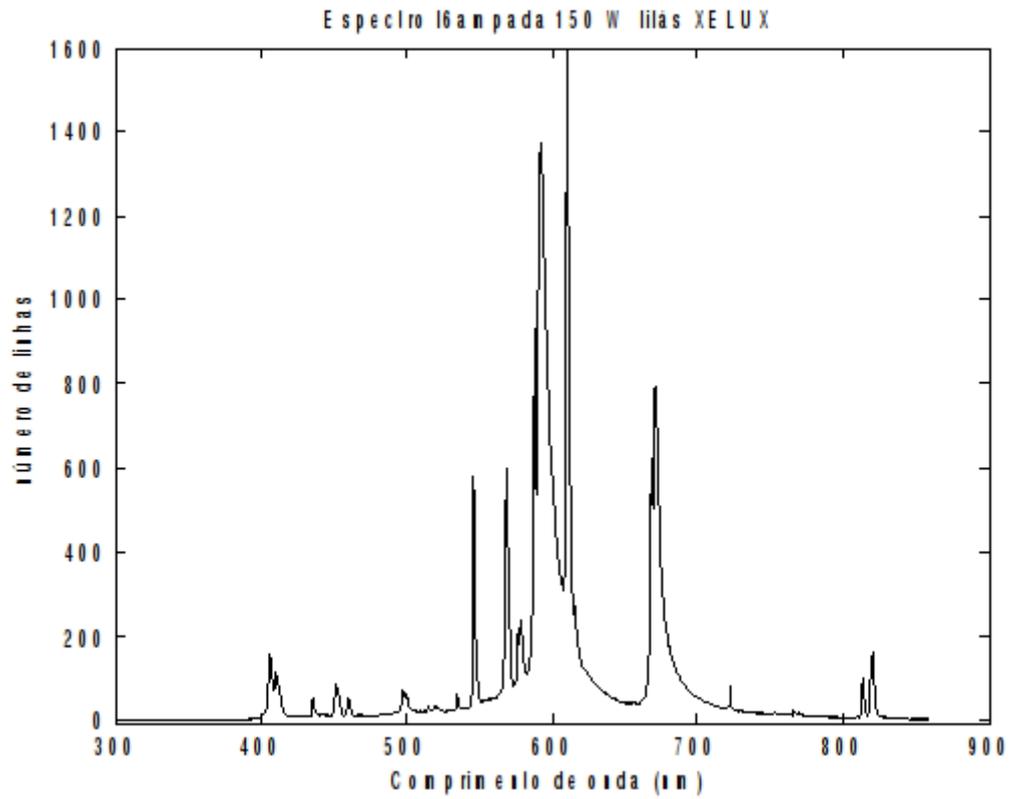


Figura 3.25: Distribuição espectral da lâmpada de descarga lilás da XELUX.

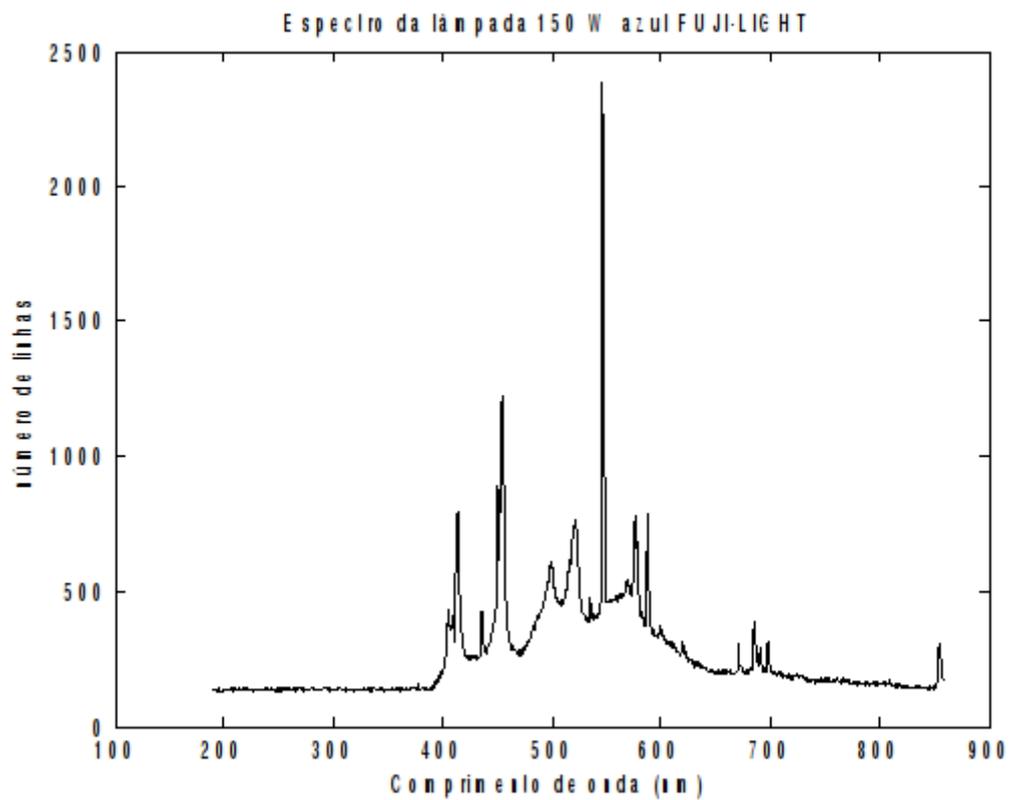


Figura 3.26: Distribuição espectral da lâmpada de descarga azul da FUJI LIGHT.

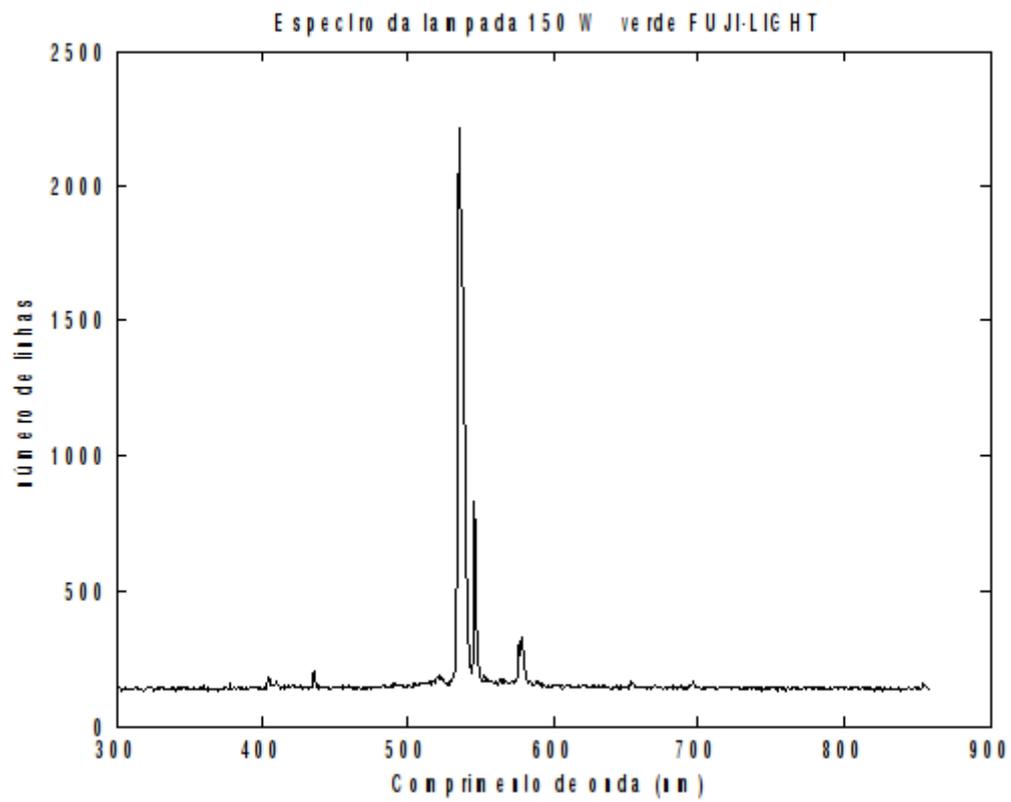


Figura 3.27: Distribuição espectral da lâmpada de descarga verde da FUJI LIGHT.

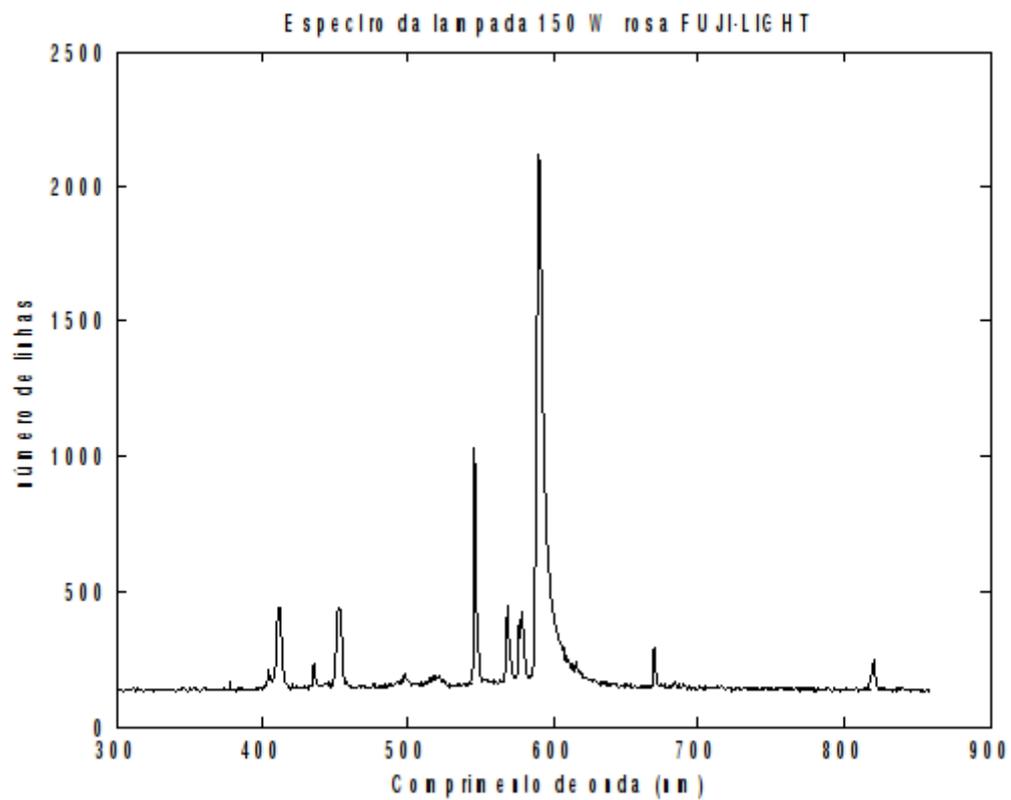


Figura 3.28: Distribuição espectral da lâmpada de descarga rosa da FUJI LIGHT.

Passando para a análise do próprio método de obtenção desses índices – além da escolha pouco relevante das cores padrão – encontramos o problema: a escolha de um iluminante padrão. O IRC é calculado pela diferença cromática das cores padrão quando iluminadas pela fonte em questão e por uma fonte padrão semelhante a esta. Não existindo um iluminante padrão semelhante às lâmpadas aqui testadas, a rotina implementada pelo MATLAB® escolheu como referência o iluminante padrão da série F (lâmpada fluorescentes), o que obviamente não deve fornecer resultados satisfatórios.

Da outra parte deste experimento, a verificação de existência de metamerismas entre certos pigmentos artificiais de espectros fornecidos por Mayer e Sheehan (1991) quando iluminados por estas lâmpadas de descarga, verificamos que de fato há esta possibilidade, como é mostrado na Figura 3.29.

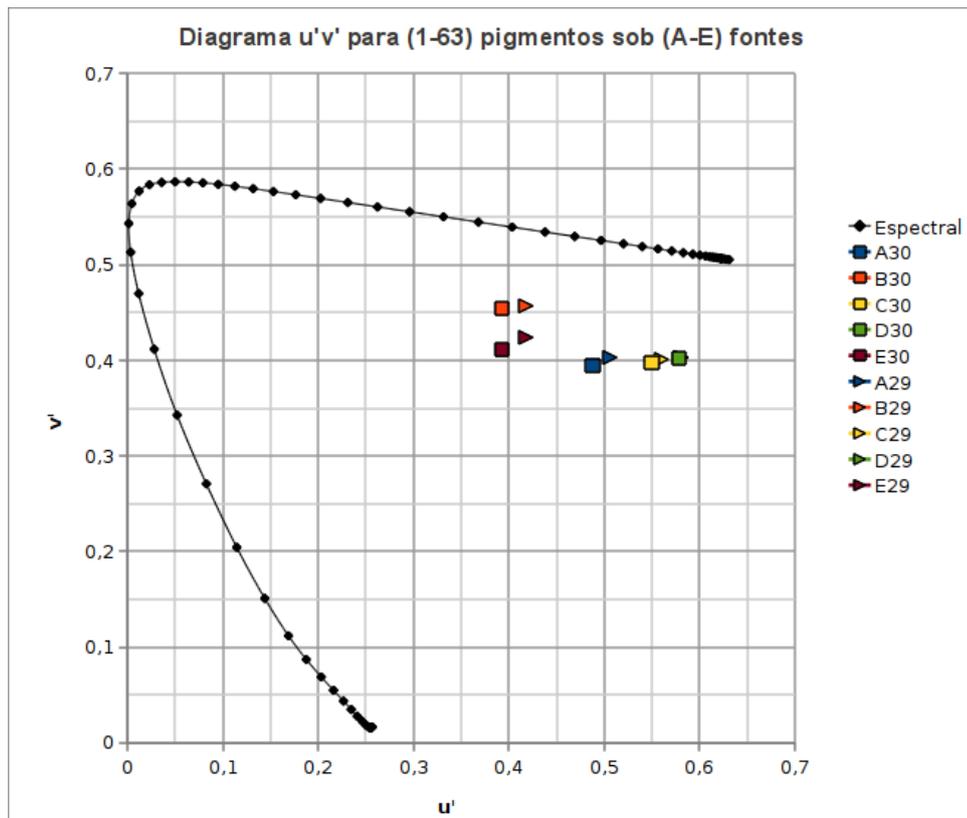


Figura 3.29: Exemplificação de caso de metamerisma teoricamente.

Aqui foi utilizado o espaço colorimétrico $L^*u^*v^*$ por ser este mais apropriado para avaliar distância colorimétrica que o espaço xyY . Vê-se da Figura 3.29 que para a fonte D (verde/FUJI LIGHT) os pigmentos 29 e 30 têm quase as mesmas coordenadas colorimétricas ($u'_{29} = 0.347; u'_{30} = 0.348; v'_{29} = v'_{30} = 0.543$). Já para as fontes B (lilás/XELUX) e E (rosa/FUJI LIGHT) as coordenadas são bastante diferentes. Sendo possível encontrar metamerismas teoricamente encaminhamos a possibilidade de distinção deles.

4 *Conclusão*

Em que se constitui a conclusão de um Trabalho de Conclusão de Curso? Devo aqui tirar minhas conclusões sobre a importância da pesquisa de engenharia, ou uma conclusão deste trabalho que é apenas uma fatia de uma extensa pesquisa? Uma aprovação de banca, um reconhecimento de grau e anos vividos são guardados em algum lugar com título de conclusão, de fechamento. Quer seja uma resposta quer seja outra, a conclusão é o capítulo mais mal nomeado de um trabalho de vida ou de uma pesquisa científica. Não se quer repetir aqui as pequenas revelações expostas durante resultados e discussões como pedem as diretrizes. Exige-se uma avaliação de todo o trabalho ou propostas de continuidade. Isso nada tem a ver com conclusão; é como tentar encontrar o fim do vermelho e emendar num rosa, lilás, violeta, azul e ver o sol nascendo por detrás de si.

O universo das cores nesse trabalho acabou sendo um espaço quase tempo. Quase tempo porque numa atitude capciosa enganou e voltou atrás e enganou da mesma forma de antes. A pesquisa de cores é um campo vasto e muito pouco explorado em totalidade. Há desenvolvimentos incríveis na matemática da colorimetria, na fisiologia dos olhos, na utilização de cores em artes e comunicação. Mas quem integra essas áreas e cria o espaço daquele que não é nem médico, nem engenheiro, nem artista, mas brilham os olhos de uma certa cor?

Nesse sentido, sim, podemos dizer que tivemos algum avanço e revelamos certas dificuldades. A começar pela proposta prática deste trabalho, levantamos que é possível caracterizar pigmentos pela fotografia RGB, no entanto pouca vantagem à distinção visual se apresenta até agora. Já aliada a fotografia IV, embora apenas para casos de pigmentos puros, pode ser uma ferramenta simples e poderosa. Esta própria fotografia sensível ao infravermelho pode ser tida como uma conquista; simples de se obter, é reveladora de uma quarta dimensão das cores.

Referências Bibliográficas

- 1 GOETHE, Johann W. *Doutrina das Cores*. Tradução: Marco Giannotti. 2a. ed. São Paulo: Nova Alexandria, 2005. 176 p.
- 2 DESCARTES, René. *Discurso do Método*. 10a. ed. [S.l.]: Escala, 2005. 82 p.
- 3 COHEN, Jozef B. *Visual Colour and Colour Mixture: The fundamental colour space*. [S.l.]: University of Illinois, 2001.
- 4 WITTGENSTEIN, Ludwig. *Anotações sobre as cores*. Apresentação, estabelecimento do texto, tradução e notas: João Carlos Salles Pires da Silva. Campinas: Editora da Unicamp, 2009.
- 5 MAYER, R.; SHEEHAN, S. *The artist's handbook of materials and techniques*. [S.l.]: Viking, 1991.
- 6 ELLEN, Shane. *Transmission Spectra of Filters for Ultraviolet and Infrared Photography*. Disponível em: <<http://www.beyondvisible.com/BV3-filter.html>>. Acesso em: 03 de agosto de 2011.
- 7 LEE FILTERS. *Colours SwachtBall*. Disponível em: <<http://www.leefiltersusa.com/lighting/products/colors/>>. Acesso em: 03 de agosto de 2011.
- 8 KAISER, Walter. *Alimentação pulsada de lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão*. Tese (Livre Docência) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- 9 OSRAM. *Catálogo Geral 2009-2010*. [S.l.], 2009.
- 10 PHILIPS. *Lâmpadas de descarga de Alta Intensidade MASTERColour CDM-TD*. [S.l.], Out. 2009.
- 11 PHILIPS. *Lâmpadas de descarga de Alta Intensidade MHN-TD*. [S.l.], Out. 2009.
- 12 PHILIPS. *Lâmpadas de descarga de Alta Intensidade Artcolour - MH-T*. [S.l.], Out. 2009.
- 13 PHILIPS. *Lâmpadas Fluorescentes Tubulares MASTER TL 5 Super 80*. [S.l.], Out. 2009.
- 14 TWEDE, David. *Introduction to Full-Spectrum and Infrared photography*. Disponível em: <http://surrealcolor.110mb.com/IR_explained_web/IR_explained.htm#CamColor>. Acesso em: 03 de agosto de 2011.
- 15 SHEVELL, S.K.; AMERICA, Optical Society of. *The science of color*. [S.l.]: Elsevier, 2003.
- 16 NASSAU, Kurt. *The physics and chemistry of color: The fifteen causes of color*. [S.l.]: Wiley, 1983.
- 17 PEDROSA, Israel. *Da cor à cor inexistente*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. ISBN 9788574582672.
- 18 QUIRINO, Edda; TIEDEMANN, Klaus B. *Psicologia da percepção I*. São Paulo: [s.n.], 1985.
- 19 BILLMEYER, Fred W.; SALTZMAN, Max. *Principles of color technology*. [S.l.]: Wiley, 1981.
- 20 BAMFIELD, Peter; HUTCHINGS, Michael G. *Chromic Phenomena: Technological applications of colour chemistry*. 2a. ed. Cambridge: RSC Publishing, 2010. ISBN 978-1-84755-868-8.
- 21 W3C. *A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB*. Disponível em: <<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>>. Acesso em: 02 de agosto de 2011.
- 22 GUARATINI, Cláudia C. I.; ZALNONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. *Química Nova*, v. 23, n. 1, jan./fev. 2000.
- 23 LEWIS, Peter A. *Pigment Handbook*. 2a. ed. New York: Wiley, 1988.

- 24 FAZENDA, Jorge M. R. *Tintas e vernizes: ciência e tecnologia*. 2a. ed. São Paulo: Abrafati, 1995.
- 25 VEIGN COMPANIE. *Página de download do Pixeur 1.1.0.1*. Disponível em: <<http://www.filesland.com/companies/Veign/27359-download.html>>. Acesso em: 25 de outubro de 2010.