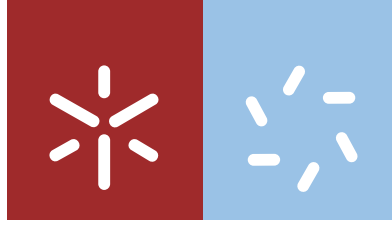


Universidade do Minho
Escola de Ciências

Andreia Esteves Gomes

**Perturbações Atmosféricas na Perceção
Cromática de Cenários Naturais Complexos**



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Andreia Esteves Gomes

Perturbações Atmosféricas na Perceção Cromática de Cenários Naturais Complexos

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho realizado sob orientação do
Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares
e do
Professor Doutor Sérgio Miguel Cardoso Nascimento

DECLARAÇÃO

Nome: Andreia Esteves Gomes

Cartão do Cidadão: 13848050

Endereço eletrónico: andreia.gomes.ni@gmail.com

Título da Dissertação: Perturbações Atmosféricas na Perceção Cromática de Cenários Naturais Complexos

Orientadores:

Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares

Professor Doutor Sérgio Miguel Cardoso Nascimento

Ano de conclusão: 2018

Mestrado em Optometria Avançada

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 28/02/2018

Assinatura: _____

"(...) life is just a mountain that we climb (...)"

Hybrid Minds – Ascent

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, e família, que me apoiam incondicionalmente, me ajudaram a chegar até aqui e a ser quem sou hoje.

Ao meu orientador Professor Doutor João Linhares, profissional e de bom caráter, foi dedicado em toda a elaboração deste trabalho. A sua ajuda e conselhos foram essenciais. Ao professor Doutor Sérgio Nascimento que, mesmo não podendo estar sempre presente, mostrou-se disponível para ajudar. A ambos, obrigada pela disponibilidade e partilha de conhecimentos.

A todos os observadores que participaram voluntariamente na experiência, obrigada pela ajuda e paciência.

Aos meus amigos universitários, por terem feito destes os melhores anos da minha vida. Um agradecimento especial àqueles que mais me marcaram durante esta fase do meu percurso académico: Luís, Galay, Joana, Diana, Ces, Cátia, Andreia e Rúben.

Ao meu grupo de amigas da “terrinha”, Ana, Carol, Dica, Guida, Juca e Tina, que têm vindo a acompanhar as várias fases da minha vida e estão sempre presentes.

O meu muito obrigada!

RESUMO

A luz sofre dispersão e absorção quando atravessa as partículas da atmosfera, causando diminuição da visibilidade e da diversidade cromática, modificando o modo como um cenário ou objeto é percebido. Este efeito visual aumenta com a distância. No entanto, ainda está por descobrir que informação visual cromática pode ser recuperada a partir de imagens alteradas pelo efeito atmosférico.

O objetivo principal deste estudo foi estimar de que forma estes efeitos são percebidos e reduzidos empiricamente pelo observador. Foi realizada uma experiência psicofísica para estimar a capacidade visual em recuperar o conteúdo cromático original de imagens complexas com simulações da influência do efeito atmosférico a diferentes distâncias de observação.

Foram utilizadas onze imagens hiperespetrais de cenários naturais complexos e, para cada uma delas, as propriedades cromáticas foram simuladas considerando o efeito da atmosfera com a distância de observação deste -200 até 2000 metros. Os valores negativos implicam um aumento da saturação original, em cor e luminância. As imagens foram apresentadas num monitor CRT, calibrado em cor e luminância, em passos de 50 metros, num ciclo de apresentação infinito, considerando todas as imagens disponíveis para apresentação.

Participaram 54 observadores jovens, saudáveis, sem alterações oculares ou anomalias visuais e com visão das cores normal. A tarefa do observador era selecionar uma imagem correspondente a uma distância de observação simulada através de um controlo remoto, de todas as imagens disponíveis. Na experiência 1 o observador deveria escolher a imagem que lhe parecesse mais natural e, na experiência 2, selecionar a que lhe parecesse não natural, partindo da imagem original, ou seja, encontrar a primeira imagem com alterações detetadas.

Na experiência 1 os observadores escolheram com maior frequência a imagem correspondente à distância de observação simulada de -0,90 metros ($\pm 5,39$ metros). Na experiência 2, as distâncias de observação simuladas mais frequentemente selecionadas foram -145,77 ($\pm 77,13$) e 218,47 ($\pm 25,97$) metros, para diminuição e aumento da distância de observação, respetivamente.

Os resultados obtidos sugerem que, apesar da degradação da diversidade de cor dos cenários naturais com o incremento da distância de observação, os observadores conseguem recuperar a informação cromática original com boa precisão.

Atmospheric Disorders in Chromatic Perception of Complex Natural Scenes

ABSTRACT

Light undergoes scattering and absorption when it passes through atmosphere, decreasing the visibility and the colour diversity and changing the way a landscape or an object is perceived. This visual effect increases with the increasing distance of observation. Nevertheless, the visual chromatic information that can be recovered from images modified by the atmospheric effect is still unknown.

The purpose of this study was to measure the influence of the atmospheric effects on viewing conditions and to verify if they could be empirically reduced by the observer. A psychological experiment was performed to estimate the visual ability to retrieve the original chromatic content of complex images simulated with the influence of the atmospheric conditions at several different distances of observation.

Eleven hyperspectral images of complex natural scenes were used and for each one of them the colour properties were simulated assuming observational distances from -200 to 2000 meters. The negative values represented an increment of the original saturation, both in colour and luminance. The images were presented in a CRT monitor calibrated both in colour and luminance. Steps of 50 meters were used, in an infinite cycle of presentation considering all the available simulated images.

54 young and healthy observers with no ocular changes or visual abnormalities and with normal colour vision participated in this experiment. The observers' task was to select an image correspondent to a desired simulated distance by using a remote control. In experiment 1 the observer should choose the image that looked more natural and in experiment 2 the one that looked unnatural, starting from the original image. In other words, finding the first image with detected changes from the original one.

It was found that most of the answers selected with higher frequency the image corresponding to the simulated distance of -0,90 meters ($\pm 5,39$ meters). On the second experiment, they detected with higher frequency at simulated distances of -145,77 ($\pm 77,13$) and of 218,47 ($\pm 25,97$) meters, for decreasing and increasing distances of observation, respectively.

The results seem to suggest that despite the damaged induced to the chromatic diversity of natural scenes with the increment of the observational distance, observers can retrieve the original chromatic information with good accuracy.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE.....	xi
ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xxiii
1. REVISÃO DA LITERATURA	25
1.1 Sistema Visual	25
1.1.1 Visão	25
1.1.2 Estruturas acessórias e externas	25
1.1.3 Composição do Globo Ocular	28
1.1.4 Perceção Visual	41
1.2 Visão das Cores	42
1.2.1 Luz e Cor.....	42
1.2.2 Sensibilidade Cones.....	43
1.2.3 Mistura de cores	44
1.2.4 Teorias da Visão das Cores	45
1.2.5 Espaços de Cor	48
1.2.6 Visão das Cores.....	58
1.2.7. Linhas de Confusão Cromáticas	62
1.2.8. Testes de Avaliação da Visão das Cores	63
1.2.9. Perceção Cromática.....	74
1.3. Memória de Cor.....	74
1.4. Cor em Cenários Naturais	75
1.5. Visão na Atmosfera	76
1.6. Imagiologia Hiperespectral	81
2. HIPÓTESE E OBJETIVO DE ESTUDO	83

2.2.	Formulação do Problema	83
2.3.	Hipóteses.....	83
2.4.	Objetivo.....	84
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	85
3.1.	Tipo de estudo.....	85
3.2.	Observadores	85
3.3.	Procedimento experimental	86
3.3.1.	Avaliação Optométrica	86
3.3.2.	Experiência Psicofísica	89
3.3.3.	Análise Estatística de Resultados.....	99
4.	RESULTADOS.....	101
4.1.	Caracterização da Amostra de Observadores	101
4.2.	Análise de Imagens: Variações Cromáticas segundo a Distância de Observação	102
4.2.1.	Nível de Correlação e Curva de Ajustamento	104
4.2.2.	Erro Total Associado	107
4.3.	Efeito Atmosférico na Composição Cromática de Imagens Complexas	108
4.3.1.	Experiência 1	108
4.3.2.	Experiência 2.....	111
5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	115
5.1.	Variação Cromática e Distância de Observação	116
5.2.	Experiência Psicofísica	118
5.3.	Vantagens e Limitações.....	121
6.	CONCLUSÕES.....	123
7.	TRABALHO FUTURO	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
	ANEXOS.....	135
	ANEXO 1: Consentimento Informado aos Observadores	137
	ANEXO 2: Folha de Registro.....	139
	ANEXO 3: Exemplo Folha Resultados Anomaloscópio	143
	ANEXO 4: Representação Gráfica dos Resultados Individuais.....	145

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

cd: candelas

cm: centímetros

CMF: *colour-matching-function* (Inglês) – funções de correspondência cromática (Português)

CSL: *Colour Science Lab* (Universidade do Minho, Braga, Portugal)

CIE: *Commission Internationale de l'Éclairage* (Francês) – Comissão Internacional da Iluminação (Português)

L: coordenada cromática da CIE que corresponde à luminosidade

D: dioptrias

ΔE : distância Euclidiana – distância entre pontos num espaço Euclidiano

γ : gama

Gamut de cores: gama ou escala de cores que podem ser representadas recorrendo a um ecrã.

°: graus

Locus: Conjunto de coordenadas que representam uma posição no espaço de cor

m: metros

μm : microns

mm: milímetros

nm: nanómetros

%: percentagem

km: quilómetros

RGB: *Red-Green-Blue* (Inglês) - Vermelho-Verde-Azul (Português)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Representação das estruturas externas do olho. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013 ¹)	25
Figura 1.2: Representação, de uma secção ao nível do nervo ótico, do globo ocular e os seus constituintes. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013 ¹)	28
Figura 1.3: Esquema representativo das diferentes camadas da córnea. (Adaptado de Snell,1998 ³)	31
Figura 1.4: Diagrama representativo das células da camada neural da retina. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013 ¹)	36
Figura 1.5: Comportamento do cristalino para distâncias diferentes: (A) em visão de longe o cristalino aplanar; (B) em visão de perto o cristalino fica mais curvo. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013 ¹).....	41
Figura 1.6: Espectro eletromagnético completo, com o intervalo do espectro visível ao olho humano. (Unidades: nanómetro). (Adaptado de Goldstein,2010 ²¹).....	43
Figura 1.7: Curvas de sensibilidade espectral dos cones (linha contínua à direita) e dos bastonetes (linha com pontos à esquerda). (Adaptado de Goldstein,2010 ²¹)	44
Figura 1.8: Esquema representativo da mistura de cores aditiva (A) – a sobreposição do vermelho, verde e azul resulta no branco - e da mistura de cores subtrativa (B) - a mistura do amarelo com magenta e azul ciano resulta no preto. (Adaptado de www.cvrl.org (Acedido a 04/12/17))	45
Figura 1.9: Espectro de absorção dos bastonetes (R), e dos cones com comprimento de onda curto (S), intermédio (M) e largo (L). (Adaptado de Goldstein,2010 ²¹)	46
Figura 1.10: Diagrama de cores oponentes. (Adaptado de www.cvrl.org (Acedido a 04/12/17))	47
Figura 1.11: A visão cromática depende dos mecanismos baseados nos três tipos de fotoreceptores e nas células oponentes. (Adaptado de Goldstein,2010 ²¹)	47

Figura 1.12: Funções de correspondência cromática (CMF) triestímulos r, g e b . (Adaptado de Benjamin,2006 ²³).....	48
Figura 1.13: Funções de correspondência cromática (CMF) dos triestímulos x, y e z segundo a CIE. (Adaptado de Benjamin,2006 ²³)	49
Figura 1.14: Diagrama da CIE de 1931 (x, y): os comprimentos de onda monocromáticos estão representados à volta da fronteira e o branco está no seu interior. (Adaptado de Schwartz,2010 ²⁴)	51
Figura 1.15: Diagrama CIE de 1931 e representação da curva de <i>Plankian</i> e dos iluminantes <i>standard</i> . A coordenada cromática H pode ser obtida através da combinação: do iluminante B com o comprimento de onda monocromático 510nm ou do iluminante D com o comprimento de onda monocromático 520nm. (Adaptado de Schwartz,2010 ²⁴)	51
Figura 1.16: CMF da CIE para um observador <i>standard</i> de: 1931 (linha contínua) e 1964 (linha tracejado). (Adaptado de Hunt,2011 ⁷)	53
Figura 1.17: Diagrama cromático da CIE x, y de 1931 (linha contínua) e diagrama cromático da CIE x_{10}, y_{10} de 1964 (linha a tracejado). (Adaptado de Hunt,2011 ⁷)	53
Figura 1.18: Diagrama cromático da CIE de 1976 (u', v') e a representação física das suas diferentes tonalidades. (Adaptado de [29]).....	54
Figura 1.19: Diagrama cromático da CIE de 1931 (x, y) - As linhas têm três vezes o tamanho da distância que representa a diferença que é detetável a 2º sob iluminação constante. (Adaptado de Hunt,2011 ⁷)	55
Figura 1.20: Diagrama cromático da CIE de 1976 (u', v') – as linhas são idênticas às da Figura 1.19. (Adaptado de Hunt,2011 ⁷)	55
Figura 1.21: Diagrama representativo do espaço cromático tridimensional CIE LAB: cilindro de cor (C^*_{ab}) constante e secção com tonalidades (h_a) constante. (Adaptado de Schanda,2007 ²⁶)	56
Figura 1.22: Diagrama tridimensional representativo do espaço cromático CIE LUV - não representa a saturação, ao contrário do CIELAB. (Adaptado de Schanda,2007 ²⁶)	57

Figura 1.23: Aspeto do espectro visível para o caso de um: (A) protanope, (B) deuteranope, (C) tritanope e (D) tricromata normal - o ponto neutro tem um aspeto esbranquiçado e separa as regiões azul e amarela nos prota e deuteranopes, e a região verde da vermelha no caso dos tritanopes. (Adaptado de Schwartz,2010 ²⁴)	60
Figura 1.25: Linhas de confusão de um protanope (B), deuteranope (A) e tritanope (C) num diagrama da CIE de 1931 (x,y) – à esquerda – e num diagrama da CIE de 1976 (u',v') – à direita: é de notar que as linhas alteram a sua orientação e ponto de convergência conforme o tipo de deficiência da visão das cores. (Adaptado de Dain,2004 ²⁸ ; Schwartz,2010 ²⁴)	62
Figura 1.26: Placas do teste de visão das cores Ishiara – (a): placa observada através de um tricromata (observa-se o número 74); (b): simulação da visão das cores de um daltónico (anomalia no verde-vermelho) para a mesma placa. (Adaptado de Goldstein,2010 ²¹).....	64
Figura 1.27: Placa de um teste de visão das cores AO-HRR. (Adaptado de Schwartz,2010 ²⁴)	65
Figura 1.28: Estímulo do CCT – as imagens P, as D e as T representam o estímulo apresentado aos protas, deuteranopes e tritanopes, respetivamente; a coluna da direita representa a mesma imagem com menos saturação o que aumenta o grau de dificuldade da discriminação cromática. (Adaptado de Regan,1994 ³⁴).....	66
Figura 1.29: Folhas de resultados do CCT num diagrama CIE 1976 (u',v') – exemplo de um indivíduo com visão das cores normal (A), um protanope (B), um deuteranope (C) e um tritanope (D). (Adaptado de Regan,1994 ³⁴).....	66
Figura 1.30: Aspeto do estímulo apresentado durante o CAD - quadrado colorido que se move ao longo de um fundo neutro com ruído. (Retirado de [36]).....	67
Figura 1.31: Teste de <i>Farnsworth-Munsell</i> de 100 tonalidades – as cápsulas estão divididas por quatro caixas. (Retirado de [37])	68
Figura 1.32: Folha de resultados do teste <i>Farnsworth-Munsell</i> de 100 tonalidades – representação dos padrões típicos de um indivíduo com visão das cores normal, e exemplos de prota, deuteranope e tritanope. (Adaptado de Benjamin 2006 ²³)	69
Figura 1.33: Cápsulas utilizadas no teste de <i>Farnsworth D 15</i> . (Retirado de [38])	70

Figura 1.34: Localização, no diagrama da CIE de 1931 (x,y), das cápsulas usadas no teste D-15 – “P” é a cápsula de referência – e eixos da linhas de confusão de cada tipo de deficiência cromática. (Adaptado de Benjamin,2006 ²³)	70
Figura 1.35: Folha de resultados do teste Fransworth D-15 - representação dos padrões típicos de um individuo com visão das cores normal (normal), e resultados tipo para observadores prota (protan), deutera (deutan), trita (tritan) e ainda monocromata (rod monochromat). (Adaptado de Benjamin,2006 ²³).....	71
Figura 1.36: Círculo segmentado observado através da ocular do anomaloscópio. Campo de mistura: metade de cima; Campo de referência: a metade de baixo. (Adaptado de Schwartz,2010 ²⁴)	72
Figura 1.37: Folha de resultados de um teste num anomaloscópio. (Adaptado de OCULUS ³⁹) ..	73
Figura 1.38: Volume de cores discriminadas em função das coordenadas cromáticas a* e b* do diagrama CIELAB, para um nível de luminosidade de 50, obtido a partir de 50 imagens hiperespetrais de cenários naturais. É possível comparar os resultados de Linhares,2008 (pontos cinza) e Pointer,1997 (linha a tracejado), com o valor teórico máximo (linha contínua), assumindo o iluminante <i>standard C</i> . (Adaptado de Linhares,2008 ⁴⁹)	76
Figura 1.39: Representação da área cromática para várias distâncias de observação, no espaço cromática da CIE de 1931. (Adaptado de Romero,2011 ⁵⁴).....	78
Figura 1.40: Quantidade relativa de cor em função da distância de observação - variação exponencial. (Adaptado de Luzón-González,2013 ⁵⁵)	79
Figura 1.41: Efeito atmosférico na percepção visual de montanhas - são notórias as alterações na cor e na visibilidade com a distância a que estão os objetos. (Retirado de [60])	80
Figura 1.42: Representação da informação capturada utilizando um sistema de imagiologia RGB (em cima) e um sistema de imagiologia hiperespectral (em baixo). (Adaptado de Varispec,2013 ⁶³)	81

Figura 1.43: Nas imagens hiperespectrais, cada pixel tem em conta a todo o espectro eletromagnético (dos 400 aos 720 nm), utilizando a informação de 33 comprimentos de onda. (Adaptado de Foster,2006 ⁶⁷)	82
Figura 3.1: Frontofocómetro utilizado para determinar o poder refrativo da graduação habitual dos observadores (AutoLensMeter, SPVMED,Lda, Portugal).	87
Figura 3.2: Lâmpada de fenda NIDEK SL980-Type 5X (CSO, Itália). (Retirado de [69])	88
Figura 3.3: Anomaloscópio Oculus (Oculus Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Alemanha). (Retirado de [70])	89
Figura 3.4: Imagens hiperespectrais de cenários naturais utilizadas no estudo, numeradas, representadas em RGB.	90
Figura 3.5: Sistema de imagiologia hiperespectral, disponível no <i>Colour Science Lab</i> (CSL) da Universidade do Minho (Braga, Portugal).....	91
Figura 3.6: Simulação do efeito visual de diferentes distâncias de observação. As simulações correspondem à imagem 8, assumindo o iluminante CIE D65. Os números acima de cada imagem correspondem à distância observacional correspondente em metros.	93
Figura 3.7: Volume cromático no diagrama de cor CIELAB para a Imagem 1 (cima) e 8 (baixo) a diferentes distâncias (representados com um número reduzido de pontos para uma melhor visualização). Os números no topo de cada representação gráfica (-200m, 0m, 1000m e 2000m) indicam a distância entre o observador e o cenário, em metros.	94
Figura 3.8: Monitor GDM-FW900 Trinitron Colour Graphic Display (Sony Corp., Japão). (Retirado de [77])	96
Figura 3.9: Gerador de Estímulos Visuais VISAGE (CRS-Cambridge Research System, Rochester, Reino-Unido).....	96
Figura 3.10: Esquema de montagem da experiência psicofísica. Montagem experimental numa perspetiva lateral (esquema (A)) e vista de cima (esquema (B)). (Nota: esquema não está à escala).	97

Figura 4.1: Percentagem dos gêneros feminino (cinza escuro) e masculino (cinza claro) da amostra de observadores que participaram neste estudo. (n=54)	101
Figura 4.2: Frequência de idades dos observadores que participaram neste estudo. (n=54)...	101
Figura 4.3: Variação entre os pontos extremos de distância de observação (-200 e 2000 metros) para o volume no espaço de cor CIELAB (barra cinza) e o número de cores distinguíveis correspondentes (barra preta).....	102
Figura 4.4: Diferenças de cor estimadas a partir da distância Euclidiana (ΔE) de todas as imagens em função da média das coordenadas cromáticas do espaço de cor CIELAB L^* (barra preta), a^* (barra cinza claro) e b^* (barra branca), assumindo o espaço de cor tridimensional CIELAB, simulando as distâncias de observação extremas (-200 e 2000 metros). A barra cinza escura representa a diferença no espaço tridimensional, enquanto que as outras barras representam as diferenças para cada uma das coordenadas individualmente.....	103
Figura 4.5: Variação média do volume, e desvio-padrão correspondente, em função da distância de observação (metros). A linha cinza corresponde à curva de ajustamento exponencial aos dados, cuja a equação é $y=50228,16+120202,64e-0,00347x$ e o coeficiente de correlação (r^2) é 0,969.	104
Figura 4.6 Variação média do número de cores distinguíveis, e desvio-padrão correspondente, em função da distância de observação (metros). A linha cinza corresponde à curva de ajustamento exponencial aos dados, cuja a equação é $y=7903,04+20134,59e-0,00241x$ e o coeficiente de correlação (r^2) é 0,988.....	105
Figura 4.7: Diferenças no espaço de cor CIELAB segundo as coordenadas cromáticas L^* (quadrados pretos), a^* (círculos vermelhos) e b^* (triângulos verdes), e respetivo desvio padrão, em função da distância de observação (metros). A linha corresponde à curva de ajustamento exponencial às coordenadas cromáticas L^* (linha preta), a^* (linha vermelha) e b^* (linha verde), cujas as equações estão descritas no texto anterior e o coeficiente de correlação (r^2) é de 0,992, 0,993 e 0,986, respetivamente.	106

Figura 4.8: Erro total geral médio (%) de todos os pixéis com algum erro (barras cinza) e erro total grave médio (%) de todas as imagens ignorando os pixéis com $L < 2 \text{ cd/m}^2$ (barras pretas), em função da distância simulada de observação, em metros. 107

Figura 4.9: Frequência de resposta de todos os observadores em função da distância simulada de observação, em metros, para todas as imagens de cenários naturais (quadrados). A linha cinza representa a função *Pseudo-Voigt* ajustada aos resultados considerando todas as imagens, em que o seu máximo se encontra a $-0,90 \pm 5,39$ metros. 109

Figura 4.10: Frequência de resposta dos observadores em função da distância de observação simulada (metros) para as imagens de cenários urbanos (quadrados pretos) e rurais (círculos vermelhos). As linhas representam o ajuste da função *Pseudo-Voigt* aos resultados, considerando as imagens de cenários urbanos (linha preta) e rurais (linha vermelha). O máximo da função de ajuste *Pseudo-Voigt* é a $-54,38 \pm 8,16$ metros e $36,91 \pm 7,43$ metros, para cenários urbanos e rurais respetivamente. 110

Figura 4.11: Frequência de resposta dos observadores como função dos limiares de distância de observação simulada (metros), para todas imagens. A linha representa a função *Pseudo-Voigt* adequada aos resultados das 11 imagens. Verificam-se dois picos máximos, aos $-145,77 \pm 77,13$ metros e aos $218,47 \pm 25,97$ metros de distância de observação. O pico máximo para a distância simulada decrescente não aparece representado dada a escala do gráfico, no entanto a posição do máximo foi registada..... 112

Figura 4.12: Frequência de resposta dos observadores em função dos limiares de distância de observação simulada (metros), para as imagens de cenários urbanos (quadrados pretos) e rurais (círculos vermelhos). A linha representa a função *Pseudo-Voigt* ajustada aos resultados das imagens de cenários urbanos (linha preta) e rurais (linha vermelha). Verificam-se dois picos máximos, para o limiar de distância de observação simulada, aos $-196,75 \pm 10,30$ metros e aos $211,26 \pm 41,65$ metros para cenários urbanos e aos $-146,74 \pm 48,17$ metros e aos $203,34 \pm 10,74$ metros para cenários rurais. 113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Tipo, tamanho e quantidade das partículas atmosféricas para diferentes condições atmosféricas. (Adaptado de McCartney, 1976 ²⁵)	77
Tabela 1.2: Intervalo de visibilidade (R) em metros e coeficiente de extinção (β) correspondentes a cada tipo de condição atmosférica. (Adaptado de McCartney, 1976 ²⁵)	80
Tabela 4.1: Máximo da função de ajuste (<i>Pseudo-Voigt</i> ou <i>Gauss</i>) e desvio-padrão associado para todas as imagens, imagens de cenários urbanos e rurais e para cada uma das imagens individualmente. Valores negativos significam frequências de seleção maiores para imagens mais próximas que o original.....	111
Tabela 4.2: Valor máximo, e desvio-padrão correspondente, da função de ajuste <i>Pseudo-Voigt</i> , no sentido decrescente e decrescente do limiar da distância de observação percebida, para todas as imagens e imagens de cenários urbanos e rurais.	114

1. REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Sistema Visual

1.1.1 Visão

A visão é o mais importante e dominante dos 5 sentidos, uma vez que cerca de 70% de todos os recetores sensoriais do corpo humano estão localizados no olho e quase metade do córtex cerebral está envolvido de alguma forma no processamento visual¹. Assim sendo, a perda de visão traz consequências graves e dificuldades extremas ao quotidiano. É considerado, também, um tema complexo pois abrange várias áreas da ciência².

1.1.2 Estruturas acessórias e externas

Para além das principais estruturas oculares, o sistema visual humano é composto por várias estruturas acessórias (Figura 1.1), essenciais para uma boa visão, que servem de suporte, proteção, limpeza e conforto, tais como: sobrancelhas, pálpebras, conjuntiva, sistema lacrimal e músculos oculares extrínsecos.

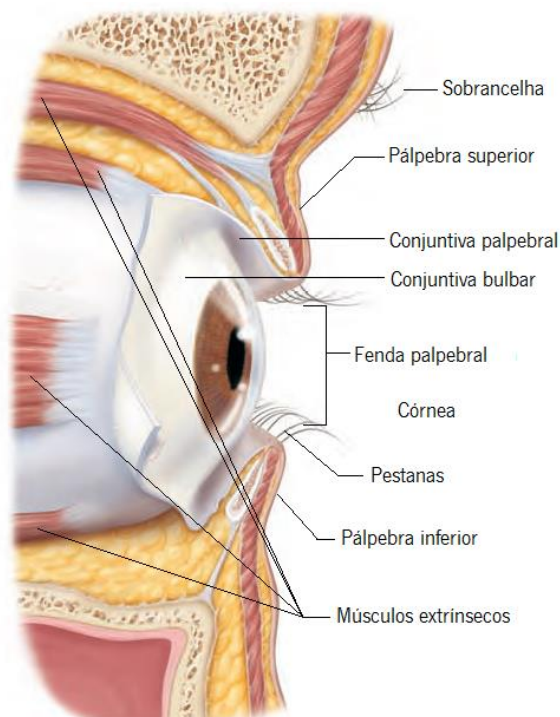


Figura 1.1: Representação das estruturas externas do olho. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013)

- **Sobrancelhas**

As sobrancelhas são estruturas externas e estão localizadas na margem superior da órbita ocular³. São constituídas por vários pelos curtos e grossos, horizontais em direção à lateral^{1,3}. São consideradas um mecanismo de proteção passivo que protege o olho da luz e da transpiração da testa¹. Por influência dos músculos faciais, as sobrancelhas podem movimentar-se³.

- **Pálpebras e Pestanas**

As pálpebras, superior e inferior, são estruturas musculares cobertas por pele que estão separadas pela fissura palpebral e unidas na parte nasal e lateral¹. A pálpebra superior é maior e movimenta-se mais do que a pálpebra inferior: quando o olho está aberto e a olhar em frente, a pálpebra superior cobre somente a margem superior da córnea, enquanto que a pálpebra inferior fica logo abaixo do limbo esclero-corneano; quando o olho está fechado, a pálpebra superior cobre completamente a córnea e a superfície ocular e a pálpebra inferior sobe ligeiramente³. O seu movimento vertical é a base do mecanismo de pestanejo¹. O mecanismo de pestanejo tem a função de limpeza, renovação e distribuição lacrimal, contribuindo para uma boa qualidade ótica, nutrição da superfície ocular anterior através dos seus vasos sanguíneos na sua superfície posterior e proteção do globo ocular quando ameaçado por corpos estranhos, através do fecho das pálpebras^{1,3}. O pestanejo, quando prolongado, também protege do excesso de luz³. O reflexo de pestanejo é involuntário e ocorre para proteger o olho de possíveis lesões e/ou corpos estranhos. O reflexo do pestanejo também acontece quando a superfície corneal começa a ficar desidratada, este mecanismo estimula a produção de lágrima e assegura que o filme lacrimal fique espalhado uniformemente por toda a superfície corneal³.

Nos bordos da fenda palpebral, desde o canto lateral ao medial, podemos encontrar as pestanas, pelos curtos, grossos e curvos, muito sensíveis, que são responsáveis por proteger o olho da sujidade e poeiras^{1,3}.

- **Conjuntiva**

A conjuntiva é uma camada mucosa transparente que cobre a parte interna das pálpebras – conjuntiva palpebral - e a superfície anterior e visível da esclera – conjuntiva bulbar – que tem

como principal missão lubrificar o olho para diminuir o efeito do atrito durante o mecanismo de pestanejo^{1,3,4}.

- **Aparelho lacrimal**

O aparelho lacrimal, é composto pela glândula lacrimal principal, pelas glândulas acessórias e seus canais de drenagem. A glândula lacrimal principal, situada no canto superior lateral, está constantemente a libertar secreção lacrimal, ou lágrimas, que são espalhadas ao longo da superfície ocular pelas pálpebras, pela ação do pestanejo, movimentando-se em direção ao ponto lacrimal, entrando no canaliculo lacrimal e atravessando o saco lacrimal e o canal nasolacrimal através do qual são expelidas para a cavidade nasal^{1,3}.

A principal função da lágrima é conservar o epitélio corneal húmido, mantendo a superfície corneal uniforme e preservando o meio refrativo mais importante do olho, promovendo uma boa qualidade ótica^{3,5}. Também tem como função limpar e lubrificar a superfície ocular para facilitar o pestanejo, assegurando a suavidade e o conforto ocular^{3,5}. Funciona como protetor primário da superfície da córnea de invasões microbacterianas, e de lesões químicas, tóxicas ou causadas por corpos estranhos⁵. Fornece nutrientes, propriedades imunológicas e regenerativas para a saúde e recuperação da superfície ocular⁶.

O filme lacrimal é composto por três camadas: lipídica, aquosa e mucosa³. A camada lipídica é a camada mais externa, produzida pelas glândulas de meibômio e pelas glândulas de *Zeis* e de *Moll* (localizadas no interior da pálpebra superior), que impede a camada aquosa de evaporar tão facilmente^{3,6}. A camada aquosa, é a camada mediana e mais espessa, secretada pela glândula lacrimal principal, contém a lisozima, imunoglobulina e beta-lisina responsáveis pela defesa contra vírus e bactérias invasoras^{3,6}. A camada de mucina, é a mais interna e está em contacto direto com o epitélio, sendo produzida pelas células conjuntivais caliciformes e por células da glândula lacrimal, permite a adesão da camada aquosa à superfície ocular^{3,6}.

O excesso de produção lacrimal, tal como acontece quando lacrimejamos, é controlado pela estimulação da glândula lacrimal principal³. Em condições normais, a lágrima em excesso perde-se por evaporação ou é secretada para o canal nasolacrimal³.

- **Músculos extrínsecos**

O olho tem três níveis de posição: a posição primária – quando o olhar se dirige para a frente-, as posições secundárias – quando o olhar se dirige para cima e para baixo, lateralmente e medialmente-, e ainda as posições terciárias – em que o olhar se dirige para posições oblíquas³. Os músculos extrínsecos suportam e sustentam o olho e são os principais responsáveis pelo movimento do globo ocular para as diferentes posições³.

Existem seis músculos extrínsecos oculares – quatro músculos retos e dois músculos oblíquos -, que vão desde o osso da órbita, onde se inserem, até à superfície do globo ocular onde se inserem na esclera, responsáveis pelo controlo dos movimentos oculares e por sustentarem o olho dentro da cavidade orbital¹.

1.1.3 Composição do Globo Ocular

O globo ocular (Figura 1.2), ou olho, assemelha-se a uma esfera ligeiramente irregular, medindo entre 23-25 milímetros de diâmetro, aproximadamente, no caso de um humano adulto^{1,3,5,7}.

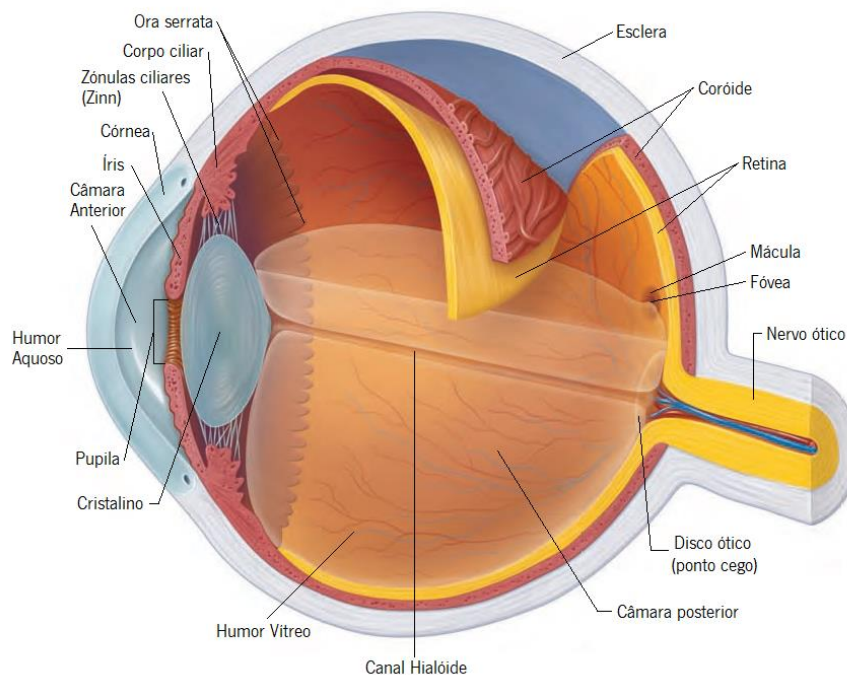


Figura 1.2: Representação, de uma secção ao nível do nervo ótico, do globo ocular e os seus constituintes. (Adaptado de Marieb e Hoehn,2013⁴)

A maior parte do globo ocular está inserido na órbita ocular sendo que apenas um sexto do seu volume total é visível do exterior¹. A córnea e a esclera são únicas estruturas visíveis expostas ao meio ambiente. O globo ocular ocupa um terço do volume total da órbita, sendo o espaço que resta ocupado por gordura orbital, músculos, nervos, vasos sanguíneos e nervo ótico⁸. Está envolvido por uma bainha conhecida como cápsula de *Tenon* que separa o globo ocular da gordura orbital e que está afastada da esclera devido ao espaço episcleral⁸.

O globo ocular é constituído por 3 camadas, sendo da mais externa para a mais interna: a camada fibrosa, a vascular e a nervosa^{1,3,4,8}.

(A) Camada Fibrosa ou Externa

É a camada mais externa do olho e é composta por duas regiões diferentes, a esclera e, na sua área frontal, a córnea, separadas pelo limbo esclero-corneal^{1,3,4,8}.

- **Esclera**

A esclera cobre cerca de cinco sextos do globo ocular^{1,3}, desde o limbo esclero-corneano na parte anterior até ao nervo ótico na parte posterior⁹. Confere proteção e resistência ao globo ocular contribuindo para a sua forma e estrutura que se mantém estável por ação da pressão intraocular^{1,4,8}. Pode ser dividida em três camadas diferentes – da mais externa à mais interna: episclera, estroma escleral e lâmina fusca³. É nesta camada onde os músculos extrínsecos se inserem e é perfurada pelo nervo ótico – zona designada de lâmina crivosa^{1,3}.

A transição entre a córnea e a esclera ocorre no limbo esclero-corneano^{1,3}. O tecido corneal funde-se progressivamente com a esclera, e embora tenham ambos a mesma composição histológica, as fibras de colagénio da esclera têm maior diâmetro e existe maior espaço entre elas, havendo menor organização das mesmas e, conseqüentemente, mais opacidade, o que dá o aspeto áspero e esbranquiçado à esclera e transparente à córnea^{1,3,9}.

- **Córnea**

A córnea é uma estrutura transparente que funciona como via de entrada de luz no olho, considerada como a “janela” para o mundo exterior e com características anatómicas e propriedades óticas únicas.

Está localizada na parte anterior do olho¹ e ocupa cerca de um sexto da superfície exterior do globo ocular³. A separar a córnea da esclera existe o limbo esclero-corneano^{1,3}, onde o tecido transparente se transforma em tecido opaco. Isto acontece porque nessa transição as camadas altamente organizadas da córnea, vão perdendo gradualmente a sua uniformidade e organização, transformando-se em camadas desorganizadas passando a ser esclera³. Essa fronteira mede cerca de 1.5 a 2.0 milímetros³.

É uma lente transparente em forma de menisco positivo que separa a câmara anterior, onde está em contacto com o humor aquoso, do meio exterior onde se distribuiu o filme lacrimal^{2,3,5}. Na parte anterior, tem um aspeto côncavo e um formato ligeiramente ovalado, com diâmetro vertical médio de aproximadamente 10.6 milímetros e horizontal de 11.7 milímetros³. Posteriormente, também é côncavo, mas tem uma forma circular com um diâmetro de cerca de 11.7 milímetros³. A sua curvatura é de cerca de 7.7 milímetros na face anterior e de cerca de 6.9 milímetros na face posterior, aplanando do centro para a periferia^{2,3,6}. Tem uma espessura de aproximadamente 0.5-0.6 milímetros (em olhos humanos). Este valor aumenta do centro para a periferia passando a cerca de 0.7 milímetros de espessura^{3,6,10}. O seu índice de refração médio é de cerca de 1.33, havendo variações ao longo do seu volume³.

A córnea é altamente innervada e a maior parte das terminações nervosas são recetores de dor^{1,3,6}. Embora a córnea seja uma das partes do olho mais exposta e vulnerável, é altamente sensível, e conseqüentemente sempre que entra em contacto com um corpo estranho ocorre o reflexo do pestanejo e lacrimejo, o que já foi explicado anteriormente^{1,6}.

Por outro lado, a córnea é avascular e isenta de drenagem linfática, ou seja, não tem vasos sanguíneos nem linfáticos^{1,3}, o que contribui para a sua transparência (entre outras propriedades descritas mais adiante). Logo, os nutrientes e oxigénio provêm do meio exterior, do filme lacrimal, do humor aquoso, de pequenos vasos ciliares próximos do limbo esclero-corneal e da conjuntiva tarsal^{3,6}. Na eventualidade de surgirem vasos na córnea, para além do limbo esclero-corneal, é sinal de que existem alterações patológicas na sua estrutura³.

A córnea é a principal estrutura responsável pela refração da luz que entra no olho³. É uma lente fundamental para nosso sistema visual pois é a que tem maior poder dióptrico, responsável por dois terços da potência total do olho^{7,11}, em média, cerca de 43.00D¹². Todo esse poder refrativo ocorre na superfície da face anterior da córnea, onde o índice de refração da córnea (1.33), embora próximo do da lágrima (1.34)¹³, é bem diferente do índice de refração do ar (1.00)³. Por todas as razões anteriormente referidas, a sua estrutura deve ser transparente, óticamente limpa e sem irregularidades, para além de altamente resistente para suportar a estrutura do globo ocular e da pressão intraocular^{11,14}.

Grande parte da córnea é constituída por fibras de colagénio que garantem a resistência corneal e a sua transparência para uma boa qualidade ótica³. Embora existam outro tipo de células, a córnea é maioritariamente composta por células epiteliais com a forma de células basais, aladas e escamosas/superficiais, queratócitos estromais e células endoteliais¹⁵.

A córnea pode ser dividida, histologicamente, por várias camadas. As principais camadas são - da parte mais externa à mais interna (Figura 1.3): epitélio, membrana de Bowman, estroma, membrana de Descemet e endotélio^{3,6}.

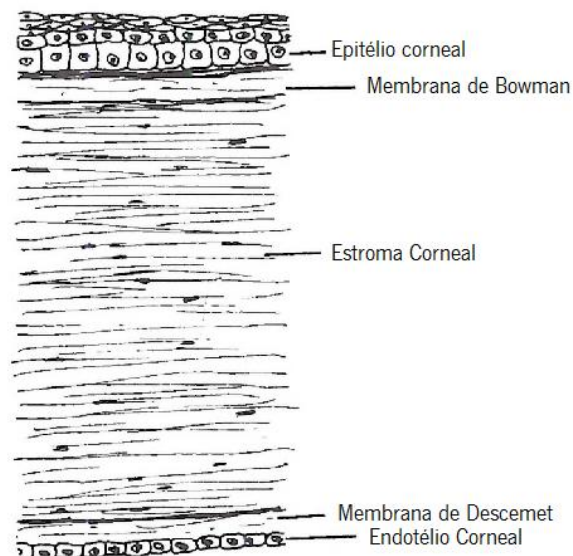


Figura 1.3: Esquema representativo das diferentes camadas da córnea. (Adaptado de Snell, 1998)

Epitélio:

Ocupa cerca de 10% da espessura corneal total (50-60 μm), é a camada mais anterior e superficial que está em contacto com o exterior, onde se distribui o filme lacrimal responsável pela hidratação, limpeza, funcionando como primeira barreira de proteção ocular^{3,6}. Sendo o epitélio a primeira barreira entre o ar e o olho, tem de ser resistente às agressões, toxinas e micróbios vindos do exterior⁶. A forte ligação entre as células superficiais do epitélio impede a entrada de fluido lacrimal no estroma⁶. Uma das propriedades desta camada é a sua incrível capacidade de regeneração celular^{1,3}.

Membrana de *Bowman* ou membrana limitadora anterior:

Tem uma espessura de 8-12 μm , e ajuda a sustentar o formato do globo ocular^{3,6}.

Estroma:

É a camada intermédia de tecido conectivo mais espessa da córnea ocupando cerca de 90% da espessura total desta^{3,6,9,15-18}, espessura que aumenta do centro para a periferia⁶, sendo a camada que mais contribui para manter a integridade da estrutura e curvatura corneal¹⁰. É constituído por centenas de lamelas – cada lamela com cerca de 200 a 250 lâminas^{3,6} - com fibras de colagénio longas e cilíndricas¹⁹, de diâmetro semelhante⁹, com um comprimento que atinge os pontos extremos na córnea e um espaçamento de cerca de 55 nanómetros entre fibras, que estão envolvidas numa substância extrafibrilar circundante^{9,17} que é óticamente homogénea¹⁰. Em cada lamela, as fibras são paralelas umas às outras e à superfície corneana ao longo de todo o seu comprimento^{9,10}. Os proteoglicanos têm propriedades estruturais e ajudam na regulação da hidratação corneana, que não deve ultrapassar os 78%⁶. Os queratócitos têm um papel importante na transparência corneal ao manter a organização e a uniformidade das fibras de colagénio, e conteúdo cristais que parecem reduzir a dispersão causada pelos queratócitos⁶. Grande parte dos autores indica que o valor do índice de refração corneal é aproximadamente, e em média, 1,375¹⁷. Sendo que o índice refrativo das fibras de colagénio é de cerca de 1,47 e da substância extrafibrilar é de 1.35, aproximadamente¹⁷.

A transparência é uma condição essencial da córnea, para existir uma boa qualidade ótica. Os fatores estruturais que promovem a transparência corneal são: a organização das lamelas e fibras de colagénio e do seu diâmetro reduzido, o mecanismo de controle de hidratação, a proximidade de valores de índices de refração, a quase invisibilidade das células existentes, a espessura fina da córnea, se se considerar que a luz dispersada é diretamente proporcional ao

número de elementos dispersores existentes, e a interferência da luz (destrutiva e não destrutiva) dispersa pelas diferentes fibras que reduz a dispersão, o que não aconteceria se a luz se espalhasse por cada fibra independentemente umas das outras^{3,6,9,14-16,20}. Qualquer tipo de alteração em pelo menos uma destas características estruturais pode ser suficiente para aumentar a dispersão luminosa e pôr em causa a transparência.

Membrana de *Descemet* ou membrana limitadora posterior:

Camada estruturante entre o estroma e o endotélio, forte e homogênea, com cerca de 10 µm de espessura³.

Endotélio:

Camada interna unicelular de células hexagonais, que mantém o estado de deturgência corneal garantindo a nitidez da visão uma vez que é o principal regulador de hidratação corneal^{3,6}. O endotélio controla e mantém o conteúdo de água do estroma em níveis baixos, de modo a preservar a transparência da córnea^{1,3,6}:

- Através de uma barreira limitadora, composta por células com separações muito estreitas e ligações fortes, que separa o estroma corneal da cavidade anterior evitando que o excesso de água do humor aquoso atinja o estroma.
- Por meio de uma bomba de sódio potássio que funciona por transporte ativo: A bomba de sódio-potássio permite o transporte de iões de sódio e potássio para formar o gradiente osmótico necessário para o escoamento de fluídos do estroma. Este processo necessita de energia uma vez que os fluídos têm de se deslocar desde o estroma hipo-osmótico para o humor aquoso hiper-osmótico.

A sua densidade celular vai diminuindo ao longo da vida, deste modo as células aumentam de tamanho (polimegatismo) e alteram a sua forma (pleomorfismo) para ocupar o espaço vazio deixado pelas células mortas e manter a barreira hídrica, diminuindo a sua função e aumentando o risco do surgimento de edema corneal⁶.

(B) Camada Vascular ou Intermédia

A camada vascular, ou úvea, é uma camada intermédia de tecido pigmentado localizada entre a esclera e a retina e é constituída pela coróide, íris e corpo ciliar^{3,4,8}. As suas principais funções são a vascularização e a nutrição da esclera e da retina⁸.

- **Íris**

A íris é um diafragma pigmentado, fino e contrátil com um orifício central conhecido como pupila^{1,3,5,7,8}. Está localizada entre a córnea e o cristalino, envolvida em humor aquoso, com a sua periferia agarrada ao corpo ciliar, dividindo a câmara anterior em segmento anterior e posterior^{3,8}. Tem um aspeto circular e é constituída por um músculo radial e um músculo circular que ajudam na regulação da dimensão da pupila^{1,5}. Há dois tipos de movimentos³: Miose – quando o músculo circular contrai e o tamanho pupilar diminui - e Midríase – pupila completamente dilatada.

A íris controla a quantidade de luz que entra para dentro do olho através da variação do tamanho da pupila, alterando a *performance* visual em determinadas condições^{1-3,5,7}. O seu tamanho varia consoante a intensidade luminosa que existe no exterior e a distância a que o olho está a focar: aumenta de tamanho em condições de baixa iluminação e para objetos a longas distâncias e diminui em condições de elevada iluminação e para objetos a distâncias muito próximas; sendo esta reação igual em ambos os olhos, em condições normais^{1,5,7,8}. A íris também tem função protetora, uma vez que diminui em condições de muita luz e protege da exposição excessiva. O orifício pode medir menos de 2 milímetros de diâmetro em elevada iluminação e mais de 8 milímetros em muito baixa iluminação⁵. Para além de diminuir com o aumento da intensidade da iluminação incidente e para visão de perto, também diminui com o incremento da idade². O tamanho pupilar também pode variar por influencia das emoções, estado de espírito, fármacos e drogas^{1,2}.

É caracterizada pela sua variação de cor de indivíduo para indivíduo consoante o montante e a organização dos pigmentos que a constituem⁵.

- **Corpo ciliar**

O corpo ciliar tem o formato de um anel em redor do cristalino e faz ligação com o mesmo através das zónulas de *Zinn*, ou ligamentos suspensórios, ligando o cristalino ao corpo ciliar^{1,3,8}. Está unido à parte posterior e periférica da íris e à parte anterior da coróide. Esta zona de ligação denomina-se de ora serrata^{1,3,8}, sendo a fronteira entre o corpo ciliar e a retina⁸. Para além de sustentar o cristalino, é no corpo ciliar que se produz o humor aquoso³.

- **Coróide**

A coróide encontra-se entre a esclera na parte exterior e o epitélio pigmentar da retina na parte interna, prolongando-se a partir da ora serrata^{3,8}. É um tecido muito pigmentado, fazendo com que a luz seja absorvida e não refletida nem dispersada^{1,8}. É altamente vascularizada sendo responsável por nutrir todas as camadas do globo ocular que a contactam^{1,3,8}.

(C) Camada Nervosa ou Interna

- **Retina**

A retina, também denominada de camada interna ou nervosa, está posicionada entre a coróide na face externa e o humor vítreo na face interior, ocupando uma grande extensão da parte interna e posterior do olho, possuindo um aspeto avermelhado^{1,3,5,7,8}.

Estrutura e Camadas:

De um modo muito geral a retina pode ser dividida em duas partes^{1,3,8}:

- Pigmentar: camada mais externa constituída pelo epitélio pigmentar da retina, que tem como função absorver a luz após a sua passagem pelos fotorreceptores evitando assim a dispersão luminosa e nutrir os fotorreceptores.
- Sensorial: camada mais interna (mais próxima do humor vítreo) composta pelos fotorreceptores que são encarregados de transformar o estímulo luminoso num estímulo nervoso, células ganglionares, células bipolares e elementos neuronais da retina que transmitem a informação para o córtex cerebral.

Microscopicamente, é possível dividir a retina (Figura 1.4) em 10 camadas diferentes – da mais externa à mais interna: epitélio pigmentar, fotorreceptores (cones e bastonetes), membrana limitante externa, membrana nuclear externa, membrana plexiforme externa, membrana nuclear interna, membrana plexiforme interna, células ganglionares, camada de fibras nervosas e membrana limitante interna³.

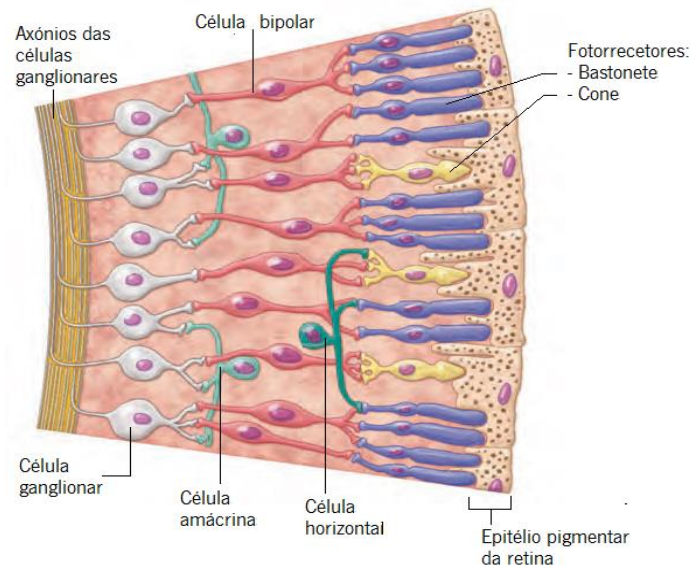


Figura 1.4: Diagrama representativo das células da camada neural da retina. (Adaptado de Marieb e Hoehn, 2013)

A luz que vem do exterior, entra no olho através da córnea, passando pelo humor aquoso, cristalino, humor vítreo, atravessando toda a retina neural até aos fotorreceptores, excitando-os¹. O sinal eletromagnético é produzido, através da fototransdução, em resposta ao estímulo luminoso e transmitido desde os fotorreceptores, passado pelas células bipolares, até às células ganglionares onde são gerados os potenciais de ação. As células amácrinas e horizontais também têm um papel no processamento visual¹.

Fotorreceptores:

Estão situados entre o Epitélio Pigmentar da Retina e a Membrana Limitante Externa, posicionados em paralelo uns com os outros e orientados com a sua extremidade orientada para a esclera^{1,7}.

Os fotorreceptores são células retinianas, de tamanho muito reduzido, sensíveis à luz, e responsáveis por transformar o estímulo luminoso num sinal elétrico, através de um processo denominado de fototransdução¹.

Existem dois tipos de fotorreceptores, cones e bastonetes, denominados desta forma por causa dos seu aspeto e forma^{1,7}:

- **Bastonetes:** de aspeto cilíndrico, são mais numerosos e, na sua maioria, posicionados na periferia retiniana, são muito sensíveis, funcionam melhor em condições de baixa

iluminação, proporcionam fraca acuidade visual e uma vez que só existe um tipo de bastonetes, proporcionam visão monocromática.

- Cones: a sua forma é semelhante a um cone, são menos numerosos, localizam-se mais na fóvea da retina, têm menor sensibilidade absoluta que os bastonetes, funcionam melhor em condições de boa iluminação, proporcionam uma boa acuidade visual e uma visão das cores normal (tricomata), pois existe comparação dos sinais obtidos a partir dos três tipos de cones.

A distribuição dos fotorreceptores vai variando ao longo da camada retiniana: na fóvea existe apenas um tipo de fotorreceptor, os cones. A concentração de cones vai diminuindo, aumentando a quantidade de bastonetes, à medida que nos afastamos do centro e nos aproximamos da periferia^{1,4,7,21}.

A maneira como os fotorreceptores se ligam com as fibras nervosas também varia: na foveola, cada cone está ligado a uma fibra nervosa, mas na periferia cada fibra nervosa pode fazer ligação com centenas de fotorreceptores⁷.

- **Disco ótico ou Ponto cego**

O disco ótico está na parte posterior do olho, e corresponde à zona de perfuração da artéria e veia central da retina^{7,8}. Esta área encontra-se ligeiramente acima do meridiano horizontal e a cerca de 3 milímetros nasais relativamente à macula⁷. O disco ótico é considerado um ponto cego uma vez que não tem fotorreceptores e, portanto, não é sensível à luz^{7,8,21}. Geralmente, essas lacunas na nossa visão passam despercebidas, uma vez que o nosso cérebro, através de um processo complexo chamado “preenchimento”, consegue compensar a informação que falta^{1,21}. Ou seja, o nosso cérebro utiliza informação sobre as imagens da periferia do disco ótico e do olho contralateral, fazendo com que o ponto cego não seja percebido no campo visual.

- **Mácula, Fóvea e Foveola**

A cerca de 3,5 milímetros do lado temporal do disco ótico, está a mácula, uma região circular de aspeto amarelado que contém uma depressão circular de menor dimensão denominada de fóvea^{1-3,5,7,8}. Dentro da fóvea existe a foveola⁷.

A fóvea é a parte mais fina da retina e tem apenas como fotorreceptores os cones^{1,2,4,5,21}. Essa depressão, que surge por afastamento das fibras nervosas, permite que a luz, em vez de atravessar as várias camadas da retina, passe de forma quase direta para os fotorreceptores, aumentando a capacidade de detetar o detalhe e, conseqüentemente, melhorando a acuidade visual¹.

A retina não tem a capacidade de distinguir o detalhe de forma homogênea ao longo de toda a sua superfície, atingindo o seu pico máximo de resolução espacial na foveola^{1,2,4,5,21}. Como a fóvea é de tamanho reduzido, apenas consegue processar uma pequeníssima parte do campo visual, assim, para fazer a leitura de tudo aquilo que se passa à nossa volta, é necessário que o olhar esteja constantemente em movimento até encontrar o estímulo que se quer focar^{1,21}. Devido à alta definição da fóvea, os olhos movem-se de maneira eficaz em direção ao objeto pretendido⁵, garantindo assim que a área de melhor visão do olho esteja permanente orientada com o objeto a observar. A retina periférica, embora tenha menor resolução espacial quando comparada com a parte central, é muito importante na percepção de movimento e detecção de objetos no campo visual periférico^{5,7}.

Da mesma forma pode dizer-se que a sensibilidade cromática retiniana também não é a mesma por toda a retina, uma vez que a distribuição dos fotorreceptores vai variando ao longo da camada interna do globo ocular^{1,4,7,21}. Como consequência, dentro dos 40° do eixo visual, a capacidade de ver cor em detalhe vai aumentando à medida que nos aproximamos da fóvea^{1,7,21}. Na zona além dos 40° do eixo visual, onde existem mais bastonetes do que cones, a visão das cores é fraca, sendo mais sensível à detecção de movimento⁷.

Função:

A retina é a camada sensorial e neuronal do olho ⁸ que capta e processa a luz⁴. Funciona como um ecrã onde a imagem é projetada e formada, e é onde a imagem ótica deve coincidir quando o foco da imagem está nítido^{2,3,5}.

(D) Cavidades e Meios oculares

As cavidades oculares contêm no seu interior três estruturas transparentes: humor aquoso, humor vítreo e cristalino⁴. Os fluídos, ou humores, que preenchem as cavidades ajudam a manter a forma do olho e as estruturas que os rodeiam no devido lugar¹.

- **Câmara Posterior e Humor Vítreo**

A câmara posterior ocupa dois terços do volume total do olho⁸. O humor vítreo preenche a câmara posterior que vai desde a face posterior do cristalino e da úvea até à retina, estando ligado a ela na zona da ora serrata e do disco ótico^{1,5,8}. O humor vítreo é um meio que transmite luz, atua como suporte e sustenta todas estas estruturas impedindo a sua implosão, contribuindo para pressão intraocular^{1,8}. O globo ocular contém cerca de 4 ml de humor vítreo, este é composto por 98.99% de água, uma malha de colagénio, uma quantidade reduzida de proteínas solúveis, alguns sais e ácido hialurónico⁸. Com o avançar da idade, o humor vítreo vai ficando cada vez mais líquido fazendo com que ligações com partes da retina se deterioreem, podendo degenerar em complicações retiniais⁸.

- **Câmara Anterior e Humor Aquoso**

A câmara anterior é uma cavidade, com cerca de 3.0 milímetros de profundidade, que vai desde a face posterior da córnea até à face anterior da íris, e do cristalino na pupila, preenchida com um fluído transparente constituído por 98% de água apelidado de humor aquoso^{1-3,5}. Existe cerca de 0,2mL de humor aquoso no olho e este tem a principal missão de nutrir a córnea³. O humor aquoso, ao contrário do humor vítreo, forma-se e drena continuamente, estando em constante movimento e mantendo uma pressão intraocular estável de cerca de 16mmHg, esta ajuda a suportar a estrutura do olho¹. É produzido nos processos ciliares na parte posterior da câmara anterior, depois atravessa a pupila em direção à parte anterior da câmara anterior e é expulso pelo canal de *Schlemm* no ângulo iridocorneano^{1,8}. Uma má drenagem deste fluído pode levar a aumento da pressão intraocular do olho, podendo causar patologias como o glaucoma³ ou alterar a transparência corneal. A função do humor aquoso é fornecer oxigénio e nutrientes à córnea, ao cristalino e algumas células da retina, e ainda expulsar restos metabólicos¹.

- **Cristalino**

O cristalino é uma lente transparente, biconvexa, que está imersa entre o humor aquoso e o humor vítreo^{1,3,8,12}, dividindo a câmara posterior da câmara anterior. Esta lente é sustentada pelas zónulas de *Zinn* que estão ligadas ao músculo do corpo ciliar^{2,3,5,8}. À semelhança da córnea o cristalino é avascular para manter a transparência¹. Em junção com a córnea, transmite e refrata a luz e contribui para a formação da imagem invertida na retina^{5,7}. Tem menor poder refrativo quando comparado com a córnea, mas enquanto que esta tem uma potência refrativa fixa, o cristalino, por ser uma estrutura ótica ativa, altera a sua potência^{2,3,5,7}. Tem a capacidade de focar a diferentes distâncias através de um mecanismo denominado de acomodação^{2,3,12,21}.

Acomodação:

O processo de acomodação ocorre de maneira inconsciente e incrementa o poder refrativo do cristalino^{1,21}. Este mecanismo funciona devido à função dos músculos do corpo ciliar, que controlam a curvatura do cristalino modificando a sua potência^{2,5}.

Quando se observa um objeto a uma distância reduzida (Figura 1.5(B)), este fica desfocado obrigando o cristalino a acomodar para focar: há contração do músculo ciliar, as zónulas de *Zinn* relaxam, fazendo com que o cristalino adquira uma forma mais arredondada com maior curvatura e menor raio em ambas as faces, o que provoca um incremento da potência do cristalino e uma diminuição da profundidade de câmara anterior^{3,12,21}.

Para além da acomodação, existem mais dois mecanismos que ocorrem em simultâneo – Triade Proximal - a constrição pupilar e a convergência ocular, que são ativados quando a imagem retiniana está desfocada¹. A pupila torna-se mais pequena, fazendo com que os raios luminosos que mais dispersam não entrem no olho evitando a visão desfocada, e aqueles que entram no olho e chegam à retina, atravessam a parte mais espessa do cristalino, ampliando o efeito da acomodação^{1,3}. Ao focarmos um objeto de perto os nossos olhos convergem, de modo a que a imagem próxima fique focada na fóvea¹.

Para objetos em visão de longe (Figura 1.5 (A)), os raios que chegam ao olho são essencialmente paralelos, então o músculo ciliar relaxa, aumenta a tensão das zónulas de *Zinn* que esticam o cristalino^{1,21}. A pupila dilata e não há convergência uma vez que ambos os olhos olham em frente¹.

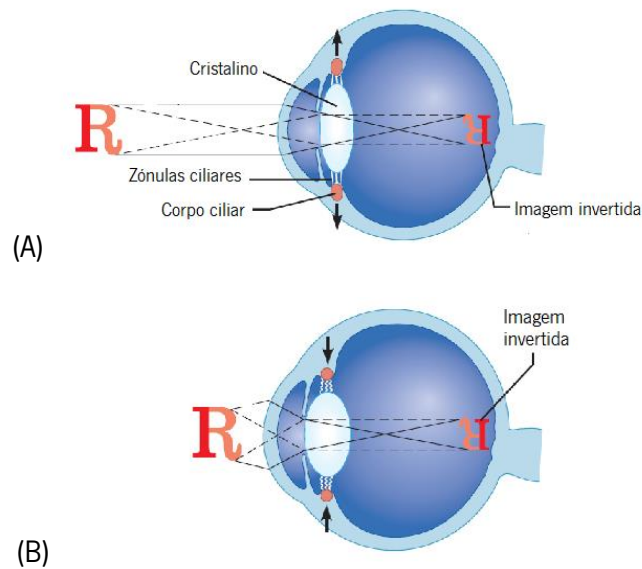


Figura 1.5: Comportamento do cristalino para distâncias diferentes: (A) em visão de longe o cristalino aplanar; (B) em visão de perto o cristalino fica mais curvo. (Adaptado de Marieb e Hoehn, 2013)

Idade:

Com a idade, o cristalino vai perdendo flexibilidade e elasticidade pois este vai ficando mais denso e os músculos ciliares vão perdendo eficiência, como consequência há uma perda gradual da habilidade de focar para perto, surgindo assim a presbiopia^{1-3,5,21}.

Com a idade também vão surgindo opacidades, também derivado do aumento da densidade e espessura do cristalino, causando a sua perda de transparência, denominadas de cataratas, dando um aspeto distorcido do meio envolvente^{1-3,8}.

1.1.4 Percepção Visual

A percepção dá-nos a sensação de que estamos em contacto direto com o meio envolvente²¹. No entanto, ainda está por descobrir a forma como os estímulos exteriores recebidos pelos órgãos sensoriais é transformada em sensações únicas e características de cada indivíduo^{2,12}.

A percepção visual é um processo indireto, uma vez que temos em consideração vários mecanismos visuais antes da chegada da informação ao cérebro e posterior percepção²¹. A maneira como percebemos as coisas não depende apenas na imagem retiniana, esta imagem é apenas o início do processamento visual. A percepção visual está intimamente relacionada com o processamento neuronal em diferentes áreas cerebrais².

A informação recebida pode ser suprimida e/ou interpretada com base na experiência e memórias do passado². Uma característica marcante da nossa percepção visual é o facto de todos os desenhos ou formas, mesmo simples, serem interpretados com um significado ou representam alguma preferência do sujeito².

Um dos tópicos mais importantes da percepção visual é a visão das cores, o mecanismo que figura proeminentemente na ótica fisiológica².

1.2 Visão das Cores

1.2.1 Luz e Cor

A luz entra no olho, é refratada pelas estruturas anteriores – córnea e cristalino – e focada na retina, estimulando os seus recetores que transformam a luz em sinais elétricos, levando essa informação através do nervo ótico até ao cérebro²¹. Essa luz que chega ao olho, vinda de um objeto ou cenário, pode ser descrita através do espectro de distribuição de potência ou espectro eletromagnético²².

O espectro eletromagnético representa a intensidade de cada uma das ondas eletromagnéticas da luz de forma contínua e descrita através do comprimento de onda – distância entre os picos das ondas eletromagnéticas²¹. A unidade utilizada para descrever apropriadamente o comprimento de onda é o nanómetro (nm), em que 1 nanómetro é igual a 10^{-9} metros⁷. O espectro contém desde comprimentos de onda reduzidos (10^{-3} nanómetros) – raios gama - até comprimentos de onda maiores (10^{15} nanómetros) – ondas^{7,21}.

Apenas uma pequena parte do espectro eletromagnético é visível aos nossos olhos, sendo que o espectro visível vai desde os 400 até aos 700 nanómetros (Figura 1.6)^{7,21,22}. Dentro deste intervalo, os comprimentos de onda de luz estão associados a percepção de cores diferentes, ou seja, a capacidade humana de distinguir as cores não é igual em todas as regiões do espectro visível^{21,23,24}: 400-450 nanómetros é o violeta; 450-490 nanómetros é o azul; 500 – 575 nanómetros é o verde; 575 – 590 nanómetros é o amarelo; 590 – 620 nanómetros é o laranja; 620 – 700 nanómetros é o vermelho. Podemos dizer, de forma abreviada, que os comprimentos de onda curtos aparentam ser azuis, os comprimentos de onda médios aparentam ser verdes e os comprimentos de onda largos aparentam ser vermelhos²¹.

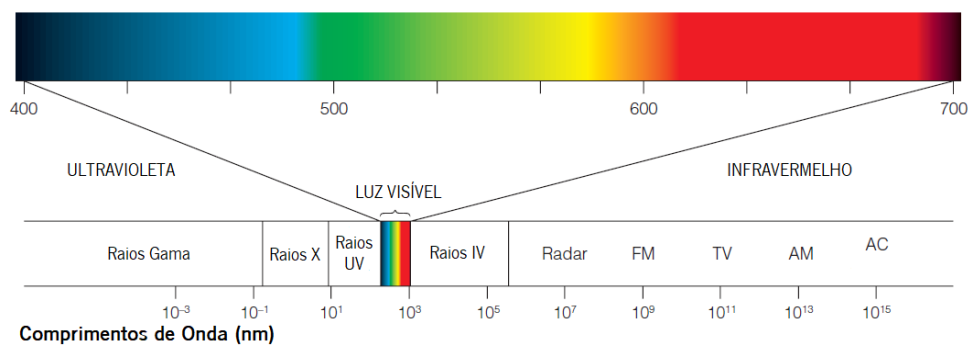


Figura 1.6: Espectro eletromagnético completo, com o intervalo do espectro visível ao olho humano. (Unidades: nanómetro). (Adaptado de Goldstein, 2010²¹).

A luz branca, visível aos nossos olhos, é composta pela integração de todas as cores da zona do visível, do espectro eletromagnético⁷.

1.2.2 Sensibilidade Cones

A sensibilidade dos cones e dos bastonetes também depende da luz ambiente e das condições de adaptação. Em condições de visão escotópica, ou seja, em condições de baixa iluminação – luz do luar e das estrelas – os bastonetes são os mais sensíveis^{7,21}. Por essa razão, durante a noite os únicos fotorreceptores funcionais são os bastonetes²². Em condições de visão mesópica, ambos os fotorreceptores são estimulados⁷. Os cones funcionam em visão fotópica, ou seja, em condições de boa iluminação – luz do dia ou luzes artificiais⁷.

O pico de sensibilidade à luz dos bastonetes é em comprimentos de onda mais curtos que o pico de sensibilidade dos cones, deste modo, para pequenos comprimentos de onda, a sensibilidade média dos cones é inferior à sensibilidade dos bastonetes (Figura 1.7)^{7,21}. Um dos tipos de cones, por si só, é mais sensível a comprimentos de onda mais curtos (azuis) quando comparados com os bastonetes, no entanto precisam de uma maior intensidade de luz, assim sendo, com pouca luz passam a funcionar os bastonetes. Este desfasamento explica o facto de que com a diminuição da quantidade de luz ambiental e a adaptação ao escuro, haver uma alteração da percepção de cor – efeito de *Purkinje*^{7,21,25}.

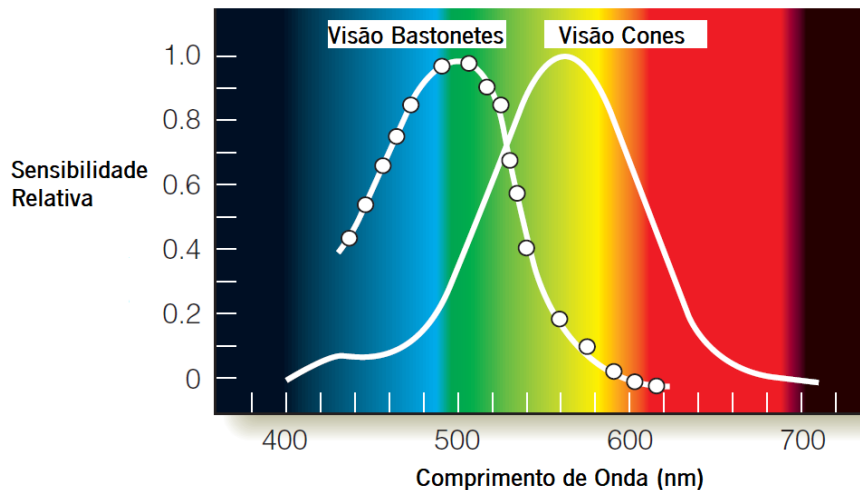


Figura 1.7: Curvas de sensibilidade espectral dos cones (linha contínua à direita) e dos bastonetes (linha com pontos à esquerda). (Adaptado de Goldstein, 2010²¹)

Esta diferença nas curvas de sensibilidade espectral entre os cones e bastonetes é causada pelas diferenças no seu espectro de absorção – que representa a quantidade de luz que é absorvida em função do comprimento de onda (Figura 1.9)²¹.

1.2.3 Mistura de cores

Ao misturar cores luminosas não se alcança o mesmo resultado como quando se misturam cores de tintas. Misturando luzes de todas as cores obtém-se branco, porém, se misturarmos tintas de todas as cores obtém-se a cor preta. Assim sendo, a mistura de luzes é denominada de mistura de cores aditiva, pois de cada vez que se adiciona uma cor, os recetores são cada vez mais estimulados até atingirem todos o mesmo grau de resposta²¹. As cores primárias aditivas são o vermelho, o verde e o azul e as cores secundárias o amarelo, magenta e azul ciano - Figura 1.8 (A)^{22,23}. Por outro lado, a mistura de tintas é designada de mistura de cores subtrativa pois cada cor acrescentada absorve comprimentos de onda e diminui a luz que chega aos recetores²¹. Os primários subtrativos são o amarelo, magenta e azul ciano e as cores secundárias o azul, verde e vermelho – Figura 1.8 (B)²³.

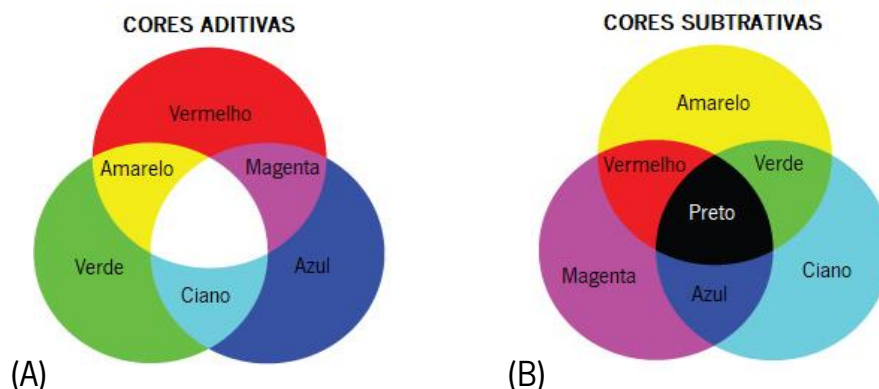


Figura 1.8: Esquema representativo da mistura de cores aditiva (A) – a sobreposição do vermelho, verde e azul resulta no branco - e da mistura de cores subtrativa (B) - a mistura do amarelo com majenta e azul ciano resulta no preto. (Adaptado de www.cvrl.org (Acedido a 04/12/17))

É possível que estímulos físicos diferentes sejam percebidos de maneira semelhante, ou seja, a mistura de comprimentos de onda diferentes resulta na mesma percepção de cor como consequência do mesmo padrão de resposta nos três cones²¹. A estes comprimentos de onda fisicamente diferentes, mas percentualmente iguais, chamamos de metâmeros²¹.

1.2.4 Teorias da Visão das Cores

❖ Teoria da Tricromacia

Esta teoria defende que a visão das cores depende da atividade de três fotoreceptores (cones), cada um com uma sensibilidade espectral diferente^{7,21,23}. Defende que a luz com um determinado comprimento de onda vai estimular os três fotoreceptores de um modo específico e que o padrão obtido devido à sua atividade em conjunto leva à percepção daquela cor²¹.

Nos bastonetes o pico de absorção é na zona do azul e verde do espectro visível²¹. Os cones estão divididos em três curvas correspondentes aos três pigmentos dos cones, cada um com o seu fotoreceptor, e têm o seu máximo de absorção em comprimentos de onda curtos (S), intermédios (M) e longos (L) - Figura 1.9²¹⁻²³.

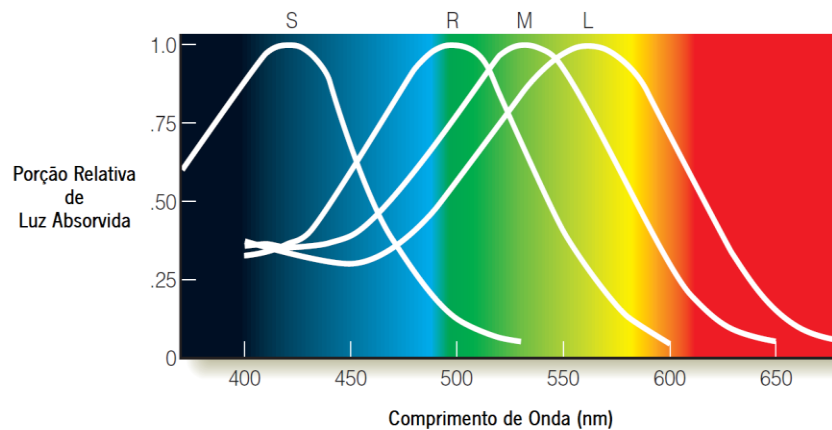


Figura 1.9: Espectro de absorção dos bastonetes (R), e dos cones com comprimento de onda curto (S), intermédio (M) e largo (L). (Adaptado de Goldstein, 2010²¹)

Sabendo isto, é possível determinar a relação que existe entre as respostas dos três fotorreceptores e a percepção cromática resultante²¹. Se os três fotorreceptores forem estimulados de igual forma, a cor percebida será o branco, já que essa cor tem igual distribuição em todos os comprimentos de onda do espectro do visível²¹.

Porém, é possível percebermos cor com apenas dois tipos de fotorreceptores embora com menos variedade²¹, condição conhecida como a deficiência da visão das cores. Já com fotorreceptores de um só tipo não se distingue cor, isto é, um só pigmento não fornece informação suficiente para distinguir um comprimento de onda de outro, porque o efeito será sempre o mesmo independentemente do comprimento de onda²¹.

❖ Teoria da Cor-Oponente

Esta teoria sugere que a visão das cores é causada por três mecanismos de respostas oponentes, isto é, existem determinadas cores que não são vistas em simultâneo tais como o preto e branco, verde e vermelho e azul e amarelo, entre as quais o preto, verde e azul são estímulos negativos e as cores branco, vermelho e amarelos são estímulos positivos (Figura 1.10)^{21,24}. A teoria sugere que um dos sentidos da resposta seja em direção ao branco, amarelo e vermelho e que o sentido contrário será em direção às cores preto, azul e verde^{21,23}. As células oponentes são responsáveis pelo contraste simultâneo e pelas pós-imagens, assim sendo, um estímulo vermelho tem uma pós-imagem verde e um estímulo amarelo tem uma pós-imagem azul^{21,24}.

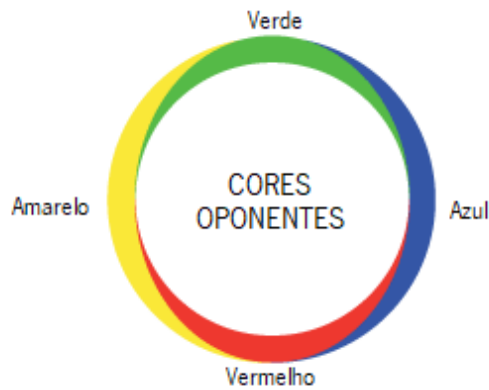


Figura 1.10: Diagrama de cores oponentes. (Adaptado de www.cvrl.org (Acedido a 04/12/17))

A base da visão das cores é uma combinação da teoria tricromata e da teoria da oponência que descrevem o mecanismo de funcionamento da percepção cromática, mas em diferentes pontos do sistema visual (Figura 1.11): a tricromacia explica o que acontece no início do percurso ao nível dos fotorreceptores e o processo oponente explica o que se passa posteriormente^{21,23}.

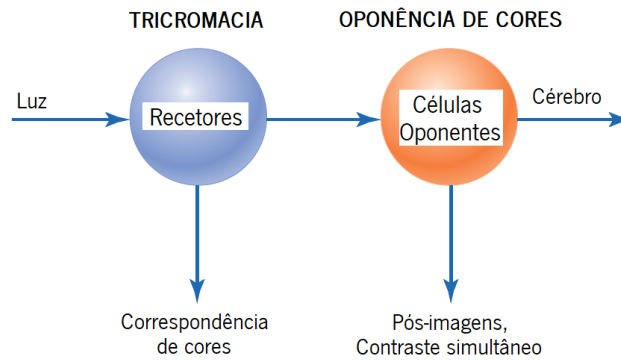


Figura 1.11: A visão cromática depende dos mecanismos baseados nos três tipos de fotorreceptores e nas células oponentes. (Adaptado de Goldstein, 2010²¹)

1.2.5 Espaços de Cor

❖ Triestímulos

Triestímulo é a quantidade necessária de um determinado conjunto de três primários para coincidir com a cor de um dado comprimento de onda do espectro visível^{7,23,24}. As funções de correspondência cromática (*colour-matching-functions*: CMF) representam os triestímulos ao longo do espectro visível^{7,23}.

A Figura 1.12 representa as CMF \bar{r} , \bar{g} e \bar{b} para cada comprimento de onda, utilizando com referência três cores primárias reais, R , G e B , respetivamente. Na figura verifica-se que, no intervalo de 400 a 550 nanómetros, as curvas têm valores negativos. Isto significa que essas cores primárias foram adicionadas ao comprimento de onda para haver correspondência entre elas²²⁻²⁴, não sendo possível uma correspondência com apenas os três primários.

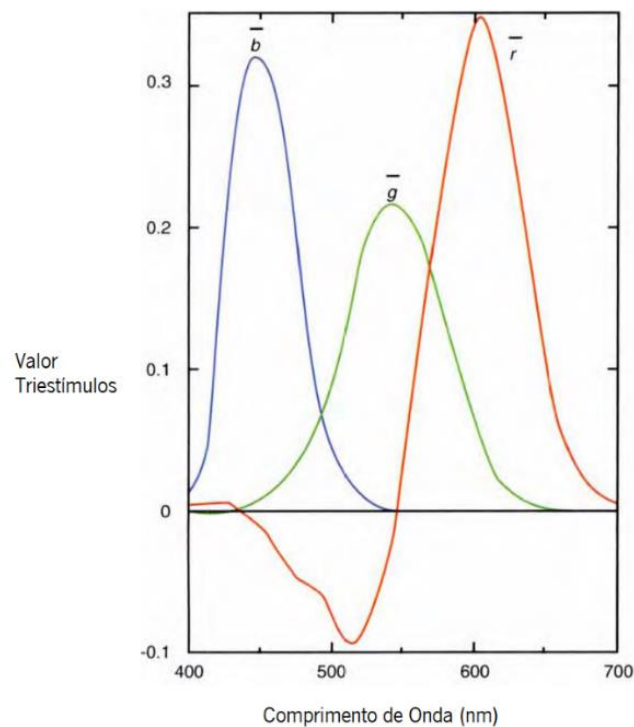


Figura 1.12: Funções de correspondência cromática (CMF) triestímulos \bar{r} , \bar{g} e \bar{b} . (Adaptado de Benjamin, 2006²³)

A *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) propôs alterações para converter matematicamente as curvas de modo a não existirem valores negativos, utilizando para o facto

três primários imaginários X , Y e Z ^{22-24,26}. Para converter os primários reais em primários imaginários, utilizam-se as seguintes fórmulas, dadas pela CIE⁷:

$$X=0,49R+0,31G+0,20B$$

$$Y=0,17697R+0,81240G+0,01063B$$

$$Z=0,00R+0,01G+0,99B$$

Utilizando as mesmas fórmulas é possível converter as CMF reais (\bar{r} , \bar{g} , \bar{b}) nas CMF transformadas (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}). A Figura 1.13 representa as CMF \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} .

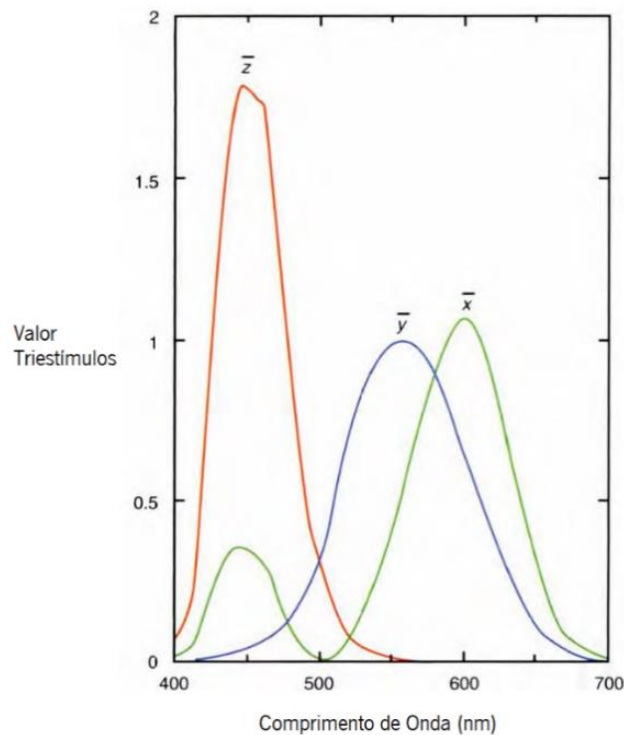


Figura 1.13: Funções de correspondência cromática (CMF) dos triestímulos \bar{x} , \bar{y} e \bar{z} segundo a CIE. (Adaptado de Benjamin,2006²³)

Para um observador com visão das cores normal, os triestímulos recomendados pela CIE podem ser obtidos através das fórmulas²⁷:

$$X=k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Y=k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Z=k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

Em que $\phi_{\lambda}(\lambda)$ representa a função relativa do estímulo de cor, X , Y e Z os triestímulos e $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ as CMF.

❖ Diagrama Cromático CIE 1931 (x, y)

É baseado na teoria tricromata, em que uma cor pode ser obtida através da mistura dos três primários aditivos²⁴.

O Diagrama Cromático da CIE reproduz as quantidades relativas dos primários imaginários (X , Y e Z) obtidas a partir dos primários reais (R , G e B)^{7,24}, quando convertidos em coordenadas cromáticas. Deve ter-se em atenção que os primários utilizados pelo CIE são imaginários para evitar primário com valores negativos²⁴. Esses primários imaginários são, então, convertidos em coordenadas cromáticas (x , y e z) através das seguintes equações^{7,23,24,26,27}:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

em que $x+y+z=1$.

Sabendo que a soma das coordenadas cromáticas é igual a 1, basta saber duas delas para conseguir calcular a terceira, como o diagrama apenas demonstra as coordenadas de x e y , para sabermos o valor de z temos de subtrair o valor de x e y a 1^{7,23,24}.

Na Figura 1.14 está representado o diagrama da CIE de 1931, que contém todas as cores obtidas a partir das cores monocromáticas. As cores monocromáticas estão posicionadas ao longo

do limite do diagrama, representadas em nanómetros, também denominado de *locus* espectral, e no seu interior está o branco²⁴.

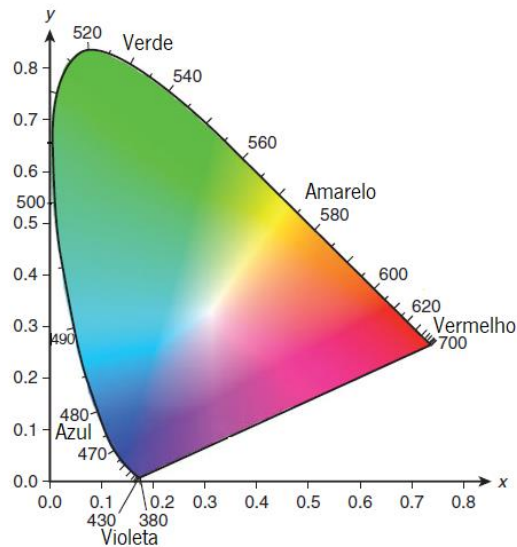


Figura 1.14: Diagrama da CIE de 1931 (x,y): os comprimentos de onda monocromáticos estão representados à volta da fronteira e o branco está no seu interior. (Adaptado de Schwartz,2010²⁴)

O branco tem variantes, dependendo do tipo de iluminante utilizado, tal como os iluminantes *standard* A, C e D (Figura 1.15), que formam um arco denominado de *Planckian locus* no diagrama²⁴.

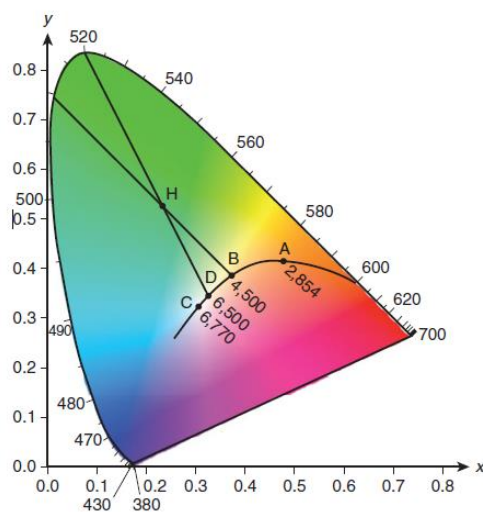


Figura 1.15: Diagrama CIE de 1931 e representação da curva de *Planckian* e dos iluminantes *standard*. A coordenada cromática H pode ser obtida através da combinação: do iluminante B com o comprimento de onda monocromático 510nm ou do iluminante D com o comprimento de onda monocromático 520nm. (Adaptado de Schwartz,2010²⁴)

Quando se aquece um corpo negro a determinada temperatura, este emite uma determinada cor e a partir daí é possível relacionar a sua cor com a temperatura. A CIE definiu algumas iluminações *standard* – A, B, C e D -, cada um com uma temperatura correlacionada de cor^{22,23}. A iluminação *standard* A é uma fonte de luz incandescente com uma temperatura de cor de 2854K, a B imita a luz média ao meio dia e tem uma temperatura de cor de 4870K, C simula a luminosidade de um céu completamente nublado e a sua temperatura de cor é de 6740K, e a D reproduz várias faixas da luz do dia em diversas temperaturas de cor, sendo que a luz média do dia possui a temperatura de cor de 6500K^{22,23}.

Apesar de o diagrama de cor da CIE de 1931 ser o sistema cromático mais utilizado, apresenta algumas limitações. Uma das limitações é o facto de o espaço assumir a representação de um observador *standard* considerando apenas 2° de campo visual, representando apenas estímulos foveais, sendo apenas recomendado o seu uso em estímulos de tamanho inferior a 4° de ângulo visual^{7,23,26}. Outra limitação tem a ver com o facto de este diagrama cromático não representar corretamente a distância entre cores uma vez que a distribuição de cores não é uniforme^{7,23}. Para resolver estas limitações houve necessidade de criar outros espaços de cor, apresentados pela CIE²⁷.

❖ Diagrama Cromático CIE 1964 (x_{10}, y_{10})

Para ultrapassar algumas das limitações do CIE 1931, a CIE apresentou o CIE 1964. Este diagrama cromático possuiu as mesmas características colorimétricas que o anterior, à exceção do campo visual do observador *standard*. No CIE 1964, o observador *standard* assume um campo visual de 10°, que representa um diâmetro de 90 milímetros a uma distância de 0,5 metros²⁶, deixando de ser apenas foveal, podendo ser utilizado um estímulo com um ângulo visual superior a 4°.

Consequentemente, tanto as CMF (Figura 1.16) como o diagrama cromático (Figura 1.17) da CIE sofrem ligeiras alterações passando a denominar-se X_{10} , Y_{10} e Z_{10} ²⁷.

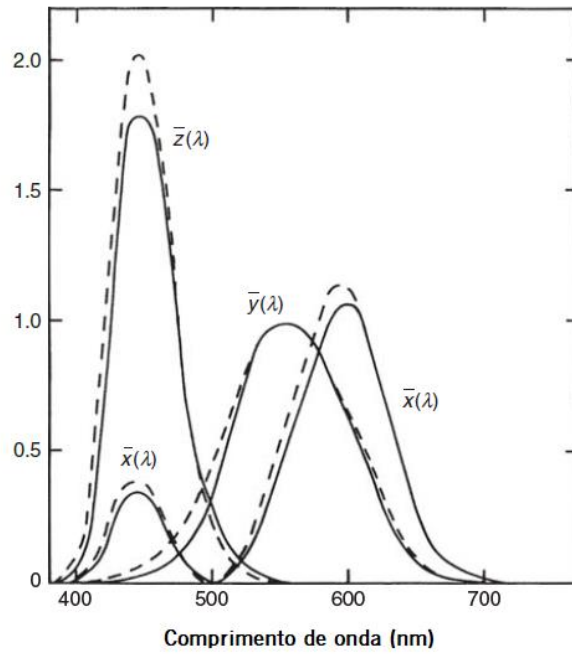


Figura 1.16: CMF da CIE para um observador *standard* de: 1931 (linha contínua) e 1964 (linha tracejado). (Adaptado de Hunt,2011⁷)

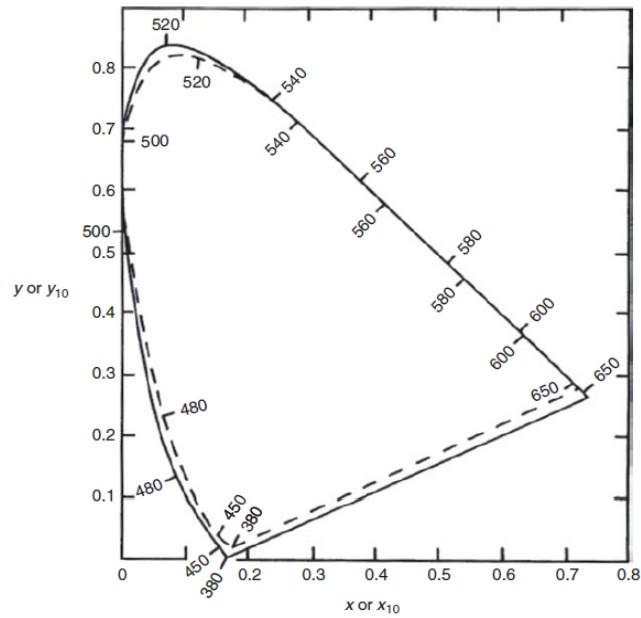


Figura 1.17: Diagrama cromático da CIE x,y de 1931 (linha contínua) e diagrama cromático da CIE x_{10}, y_{10} de 1964 (linha a tracejado). (Adaptado de Hunt,2011⁷)

❖ Diagrama Cromático Uniforme CIE 1976 (u' , v')

O diagrama da CIE de 1976 (u' , v') representa de uma forma mais uniforme a diferença de cores no espaço cromático^{27,28} (Figura 1.18), desde que os objetos em análise não possuam luminâncias significativamente diferentes²⁷. Foi criado com o objetivo de comparar as diferenças entre as cores de objetos com a mesma forma e tamanho, nas mesmas condições de observação^{26,27}.

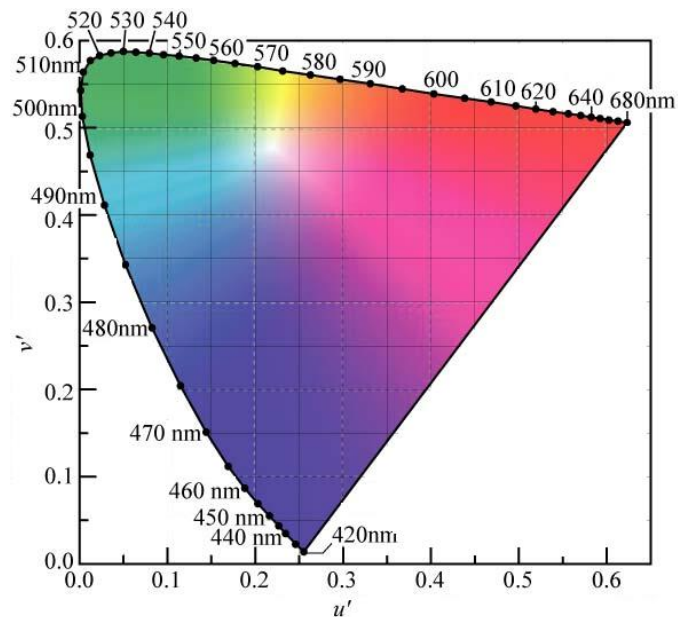


Figura 1.18: Diagrama cromático da CIE de 1976 (u' , v') e a representação física das suas diferentes tonalidades. (Adaptado de [29])

O diagrama u' , v' é construído através da transformação das coordenadas cromáticas x , y do diagrama da CIE de 1931, a partir das seguintes fórmulas^{7,26,27}:

$$u' = \frac{4x}{(-2x+12y+3)}$$

$$v' = \frac{9y}{(-2x+12y+3)}$$

Em que u' representa o eixo das abcissas (x) e v' representa o eixo das ordenadas (y)²⁷.

Ao contrário do diagrama da CIE de 1931 (Figura 1.19), onde a representação de diferenças de cor com percepções equivalentes é assimétrica, no espaço CIE de 1964 a representação da diferença cromática é mais uniforme ao todo o diagrama (Figura 1.20)^{7,26}.

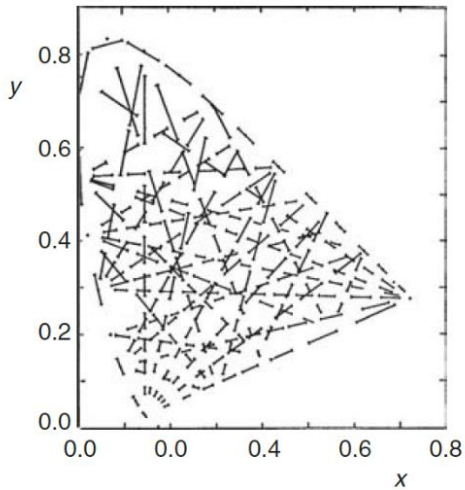


Figura 1.19: Diagrama cromático da CIE de 1931 (x, y)
- As linhas têm três vezes o tamanho da distância que representa a diferença que é detetável a 2° sob iluminação constante. (Adaptado de Hunt,2011⁷)

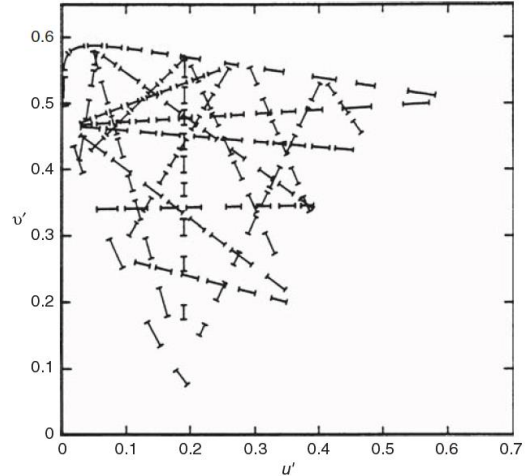


Figura 1.20: Diagrama cromático da CIE de 1976 (u', v')
- as linhas são idênticas às da Figura 1.19. (Adaptado de Hunt,2011⁷)

❖ Diagrama Cromático Tridimensional CIE 1976 ($L^*a^*b^*$)

O diagrama cromático da CIE de 1976 é um diagrama cromático tridimensional de coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* (ou L^* , u^* e v^*)^{7,22,26,27}. Tem em conta a dimensão cromática (a^*, b^* ou u^*, v^*) mas também a quantidade de luminância (L^*). Comparam as diferenças de cor entre objetos com a mesma forma e tamanho observados num ambiente idêntico com a mesma iluminação, semelhante à luz média do dia^{26,27}.

➤ CIELAB

No diagrama CIELAB existem as coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* ²². O parâmetro L^* representa o grau de luminosidade, a^* e b^* representam a cor e a tonalidade (Figura 1.21). Valores positivos de a^* refletem estímulos de cor vermelha e negativos de cor verde; valores positivos de b^* representam estímulos de cor amarela e negativos de cor azul²⁶. Estas são obtidas através de uma transformação não linear a partir das coordenadas cromáticas do diagrama da CIE de 1931²².

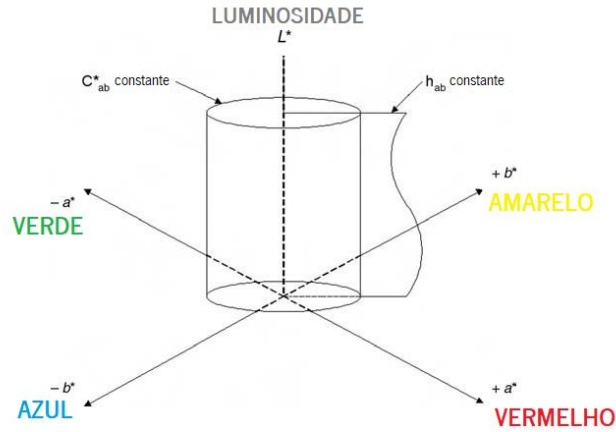


Figura 1.21: Diagrama representativo do espaço cromático tridimensional CIE LAB: cilindro de cor (C_{ab}^*) constante e secção com tonalidades (h_{ab}) constante. (Adaptado de Schanda, 2007²⁶)

As coordenadas $L^*a^*b^*$ são definidas pelas seguintes equações^{7,27}:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

em que

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} \text{ se } \left(\frac{X}{X_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{X}{X_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \text{ e}$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \text{ se } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \text{ e}$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \text{ se } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

onde X, Y, Z são os valores dos triestímulos do objeto de teste e X_n, Y_n, Z_n são os valores dos triestímulos de um objeto específico.

O objeto específico em consideração, na maioria dos casos, deve ser luz refletida a partir de um difusor refletor perfeito e iluminado pela mesma fonte luminosa que o objeto de teste²⁷. Assim sendo, X_n, Y_n, Z_n são os valores dos triestímulos da fonte de luz em que $Y_n=100$ ²⁷.

➤ CIELUV

Existe, também, o diagrama cromático da CIE de 1976 com as coordenadas cromáticas L^*, u^* e v^* (CIELUV)²². Muito semelhante ao CIELAB, é um sistema de representação cromático tridimensional e aproximadamente uniforme (Figura 1.22)²⁷. Este tipo de sistema de representação é menos utilizado quando comparado com o CIELAB²². As coordenadas cromáticas L^*, u^* e v^* são definidas pelas seguintes equações^{7,26,27}:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_n)$$

onde Y, u', v' descrevem o estímulo cromático objeto em consideração e Y_n, u'_n, v'_n correspondem aos valores de um estímulo vindo de um objeto branco específico.

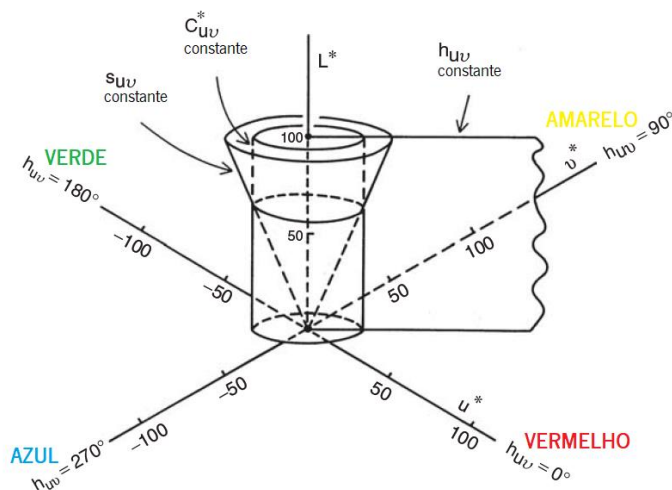


Figura 1.22: Diagrama tridimensional representativo do espaço cromático CIE LUV - não representa a saturação, ao contrário do CIELAB. (Adaptado de Schanda,2007²⁶)

1.2.6 Visão das Cores

❖ Tricromatas

Indivíduos com visão das cores considerada normal, também designados de tricromatas por terem três tipos de fotorreceptores funcionais. Possuem quatro tipos de fotorreceptores com sensibilidades médias equivalentes às representadas na Figura 1.9²¹⁻²⁴.

❖ Deficiências na Visão das Cores

Não são fisicamente debilitantes, mas as deficiências na visão das cores podem ter um grande impacto na vida e cotidiano de um observador^{23,24}. A percepção e processamento cromático em indivíduos com deficiências na visão das cores é diferente, assim como a sensibilidade espectral, a discriminação dos comprimentos de onda, as linhas de confusão e a percepção de saturação²⁴. Ter deficiência na visão das cores é sinónimo de ter uma perda parcial da percepção cromática, uma vez que há alteração ou falta de um ou mais pigmentos nos fotorreceptores²¹.

As deficiências na visão das cores podem surgir de duas formas^{7,23,24}:

- **Hereditária**: é o tipo de deficiência de visão das cores mais frequente, geneticamente hereditária, congénita, não progressiva e simétrica em ambos os olhos, não estando associada a outras condições sistémicas. São facilmente diagnosticadas com os testes de visão das cores comuns, não afeta significativamente os resultados se as condições de teste forem alteradas. É mais habitual surgir em indivíduos do sexo masculino (cerca de 8% dos homens) e as anomalias no verde-vermelho são as mais frequentes. No entanto, os objetos familiares são classificados corretamente.
- **Adquirida**: surge por fatores externos – traumatismos, patologias, drogas, químicos, fármacos e até a própria idade. Pode ser instável e evolutiva (progressiva ou regressiva), normalmente são assimétricas pelo que os testes de visão das cores devem ser realizados monocularmente. Ao serem alteradas as condições de teste, os resultados são afetados. Afeta tanto homens como mulheres e manifesta anomalias no verde-vermelho e no azul-amarelo. Objetos conhecidos podem parecer de cor diferente. Podem ser dos primeiros sinais a surgir devido a alguma condição patológica. Assim, dá uma ideia da efetividade de uma determinada terapia visual, sendo útil para diagnósticos e monitorização de um paciente. Se a causa for,

por exemplo, medicação, é possível tratar ou estabilizar, a deficiência da visão das cores. As restantes tendem a ser permanentes.

➤ Tipos de Deficiências da Visão das Cores

As deficiências da visão das cores podem ser divididas em categorias.

○ Tricromata Anómalo

Este tipo de deficiência da visão das cores pode ser classificada como tricromata anómalo^{21,23}. Têm os três tipos de fotorreceptores (cones), porém a sua sensibilidade não corresponde àquela que é esperada quando comparada com um indivíduo tricromata normal. Consequentemente, consegue associar as cores primárias da mistura de cores aditiva com todas as cores, mas de maneira diferente quando comparado com um tricromata normal, uma vez que o espectro está deslocado em relação ao normal²²⁻²⁴. Na prática, existe deslocação do pico de sensibilidade para posições não esperadas^{30,31}. Podem ser distinguidos três tipos de tricromatas anómalos^{7,23,24}:

- **Protanómalo:** Possui alterações de sensibilidade no cone sensível ao comprimento de onda longo (*long*: L). Afeta aproximadamente 1% dos homens e 0,02% das mulheres.
- **Deuteranómalo:** Possui alterações de sensibilidade no cone sensível ao comprimento de onda médio (*médium*: M). Afeta 4,9% dos homens e 0,38% das mulheres.
- **Tritanómalo:** Possui alterações de sensibilidade no cone sensível ao comprimento de onda curto (*small*: S). Este tipo é raro, e difícil de diagnosticar pois pode confundir-se com alterações à sensibilidade normal.

○ Dicromata

Possui dois dos três tipos de cones em funcionamento tendo a capacidade de discriminar cores, embora esta seja menor que nos tricromatas normais^{21,22,24}. Mesmo usando só dois primários, conseguem distinguir as cores, no entanto vêem-nas de maneira diferente, mais pálidas e menos saturadas, podendo usar pistas como o brilho para as identificarem^{23,24,32}. Existem três tipos de dicromatas^{7,21-24}:

- **Protanope:** ausência do cone de pigmento sensível ao comprimento de onda longo (vermelho), reduzindo a sensibilidade escotópica nessa cor. Tal como se pode verificar através da Figura 1.23 (A), um protanope consegue ver os tons de azul e amarelo do espectro de luz visível. Afeta cerca de 1% dos sujeitos do sexo masculino e 0.02% do sexo feminino.
- **Deuteranope:** ausência do cone de pigmento sensível ao comprimento de onda intermédio (verde). Tal como o protanope, o seu espectro (Figura 1.23 (B)) apresenta tons de azul em comprimentos de onda reduzidos e amarelo nos mais largos. Surge em 1% dos indivíduos do sexo masculino e em 0.01% do sexo feminino, aproximadamente.
- **Tritanope:** É a condição menos comum e apenas afeta 0.002% dos homens e 0.001% das mulheres. Por ser muito pouco frequente ainda não se sabe ao certo qual é o pigmento em falta, mas pensa-se que falte o cone sensível ao pigmento de comprimento de onda curto (azul). O espectro de um tritanope (Figura 1.23 (C)) tem azul em comprimentos de onda menores, vermelho em comprimentos de onda maiores. Afeta cerca de 0,002% dos homens e 0,001% das mulheres.

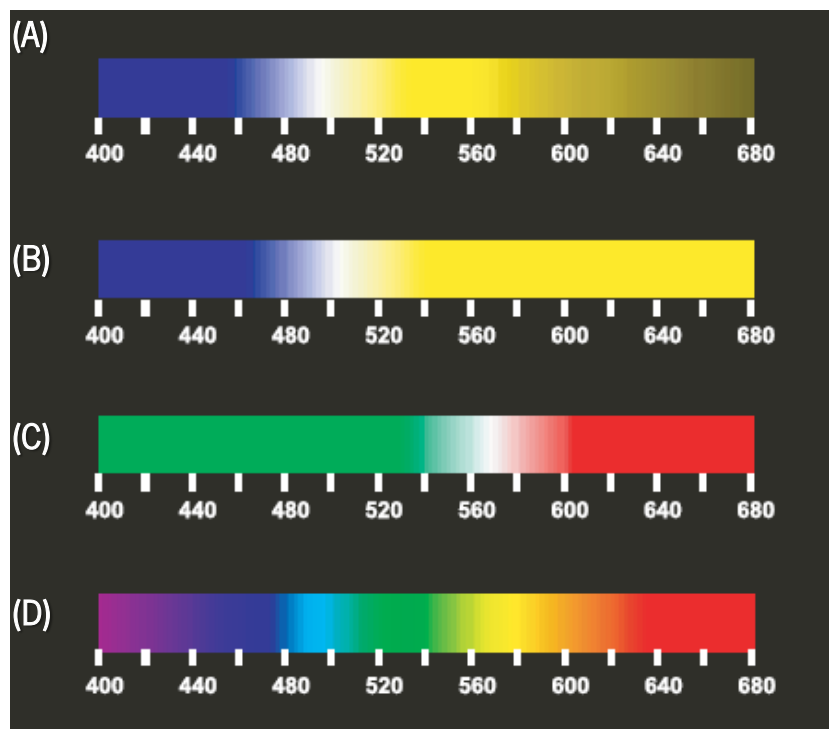


Figura 1.23: Aspeto do espectro visível para o caso de um: (A) protanope, (B) deuteranope, (C) tritanope e (D) tricromata normal - o ponto neutro tem um aspeto esbranquiçado e separa as regiões azul e amarela nos prota e deuteranopes, e a região verde da vermelha no caso dos tritanopes. (Adaptado de Schwartz,2010²⁴)

A protanopia e a deuteranopia são as condições mais frequentes e são hereditárias devido a um gene no cromossoma X, deste modo, indivíduos do sexo masculino têm maior probabilidade de adquirir este tipo de anomalia cromática pois apenas têm um cromossoma X e basta um estar afetado para que resulte numa deficiência cromática²¹.

- **Monocromata**

Uma condição rara, normalmente hereditária e bastante limitadora. A sua visão é assegurada pelos bastonetes e baseia-se nas variações de luminosidade^{21,23}. Logo os monocromatas, também denominados de acromatas, apenas distinguem diferentes graus de brilho da tonalidade que varia conforme o fotorreceptor funcional, não tendo capacidade de distinguir ou ver cores²¹⁻²⁴. No entanto, podem aprender a reconhecer as cores através do seu brilho ou outras pistas tais como a forma²⁴. Fotofobia, nistagmos e baixa acuidade visual são outros sinais e sintomas que podem ser encontrados neste tipo de deficiência cromática^{23,24}.

Este tipo de anomalia por pode ser dividida em duas categorias^{7,21,23,24*}:

- **Monocromata de Bastonetes:** Condição mais comum, em que não existe nenhum tipo de cone funcional. Afeta cerca de 0,003% dos indivíduos do sexo masculino e 0,002% do sexo feminino. Elevada sensibilidade à luz, sendo possível apenas visão escotópica.
- **Monocromata de Cones:** Existem cones mas sendo que dois deles poderão estar não funcionais e/ou defeituosos. Categoria extremamente rara.

- **Deficiências Cromáticas Adquiridas**

Esta classe de anomalias da visão das cores pode ser catalogada em três tipos (Benjamin,2006):

- **Verde-vermelho tipo I:** caracterizado pela confusão cromática no eixo verde-vermelho, redução da acuidade visual e alterações na luminosidade.
- **Verde-vermelho tipo II:** ocorre um grande déficit da discriminação de cores no eixo verde-vermelho e outro mais suave no eixo azul-amarelo.
- **Azul-amarelo tipo III:** perda de discriminação cromática no eixo azul-amarelo e alterações na acuidade visual. Está relacionado com alterações derivadas do envelhecimento.

1.2.7. Linhas de Confusão Cromáticas

As linhas de confusão são traçadas no diagrama cromático da CIE e todas as cores que calhem ao longo dessas linhas são indistinguíveis umas das outras²⁴. Para cada tipo de deficiência da visão das cores existem linhas de confusão distintas vindas de pontos de convergência distintos²⁴.

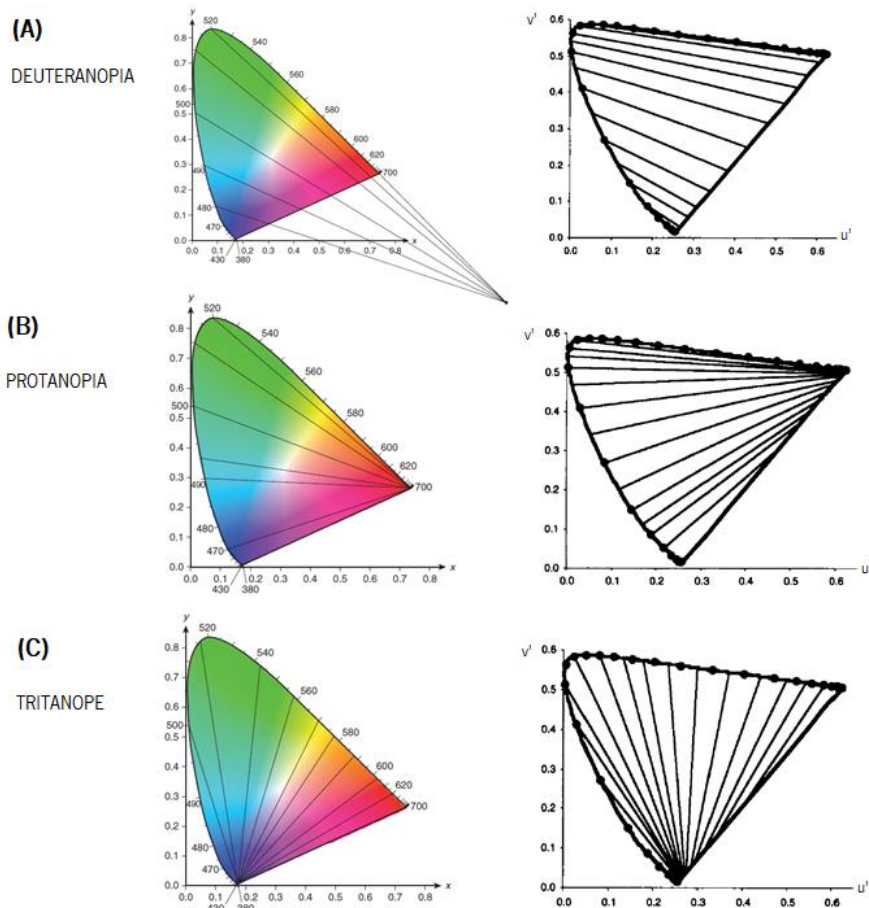


Figura 1.24: Linhas de confusão de um protanope (B), deuteranope (A) e tritanope (C) num diagrama da CIE de 1931 (x, y) – à esquerda – e num diagrama da CIE de 1976 (u', v') – à direita: é de notar que as linhas alteram a sua orientação e ponto de convergência conforme o tipo de deficiência da visão das cores. (Adaptado de Dain, 2004²⁸; Schwartz, 2010²⁹)

1.2.8. Testes de Avaliação da Visão das Cores

Avaliar a qualidade da visão das cores é importante para uma avaliação completa da visão³³. Essa avaliação pode ser dividida em várias categorias²⁸:

- ✓ Rastreio – Detecção da presença, ou não, de alguma anomalia cromática.
- ✓ Diagnóstico – Reconhecimento do tipo e do nível de severidade da deficiência cromática.
- ✓ Avaliação – Análise do impacto do problema cromático na vida da pessoa afetada

Existe uma grande variedade de testes de avaliação da visão das cores^{22,23,28}. Abaixo, estão descritos alguns dos testes disponíveis e que são realizados com mais frequência. Podem ser classificados por:

(A) Placas de teste Pseudoisocromáticas

São os testes mais conhecidos e usados com mais frequência por serem fáceis e rápidos de utilizar^{23,24,28,33}. São placas organizadas em forma de livro, ou apresentadas num monitor específico, baseadas na confusão de cores, em que o objetivo consiste em identificar um símbolo ou uma figura por detrás de um fundo, isocromático para uma pessoa com visão das cores afetada^{23,24,28,33}. A figura e o fundo têm a mesma refletância luminosa e apenas diferem na cor para evitar outras pistas de percepção²⁸. Existem quatro padrões de placas possíveis^{23,24,28,33}:

–Transformação/Alteração: indivíduo afetado vê um símbolo diferente comparando com um indivíduo normal;

–Desaparecimento: sujeito com visão das cores anormal não consegue detetar nenhum símbolo que é facilmente percebido por uma pessoa normal;

–Ocultas: observadores afetados conseguem perceber algum símbolo enquanto que um observador normal não vê nada;

–Diagnóstico: figura isocromática para um determinado tipo de anomalia cromática, mas distinguível para os outros tipos. Um indivíduo com visão das cores normal consegue distinguir a figura sem problema através das diferenças cromáticas, já alguém com visão das cores anormal tem dificuldades. Isto acontece porque as cores do fundo e da figura coincidem com as linhas de confusão e, conseqüentemente, não conseguem distinguir as imagens.

A classificação e diagnóstico são feitos conforme as placas que os observadores acertarem²³. A desvantagem deste teste é que não consegue detetar diferenças entre os dicromatas e tricromatas anómalos²⁴. Há uma grande variedade deste tipo de teste²⁸.

❖ Teste de Ishihara

O teste de Ishihara é dos testes mais conhecidos e mais utilizados na atualidade^{23,28}. Pode conter 16, 24 ou 38 placas de testes incluindo todos os diferentes tipos de padrões, em que as cores do fundo e das figuras podem alterar²³ (Figura 1.25). Serve para despistagem de protanopes ou protanómalos e deuteranopes e deuteranómalos²³. Tem a desvantagem de não detetar deficiências no azul-amarelo, nem avaliar o nível de gravidade da deficiência cromática^{24,28}. A primeira placa é reconhecida por todos, inclusive aqueles com deficiências na visão das cores²³.

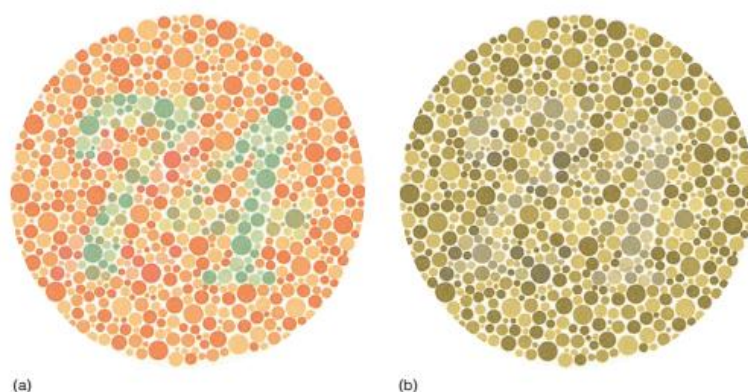


Figura 1.25: Placas do teste de visão das cores Ishihara – (a): placa observada através de um tricromata (observa-se o número 74); (b): simulação da visão das cores de um daltónico (anomalia no verde-vermelho) para a mesma placa. (Adaptado de Goldstein,2010²¹)

❖ Teste de Hardy-Rand-Rider (HRR)

Este teste funciona de um modo muito semelhante ao teste de Ishihara, no entanto existem diferenças: o fundo das placas deste teste é constituído por pontos cinzas de diferentes luminosidades e apenas os símbolos é que podem ter cores diferentes (Figura 1.26), este teste consegue distinguir prota, de deuteran e de tritana, e consegue avaliar o grau de severidade de uma determinada deficiência na visão das cores²³.

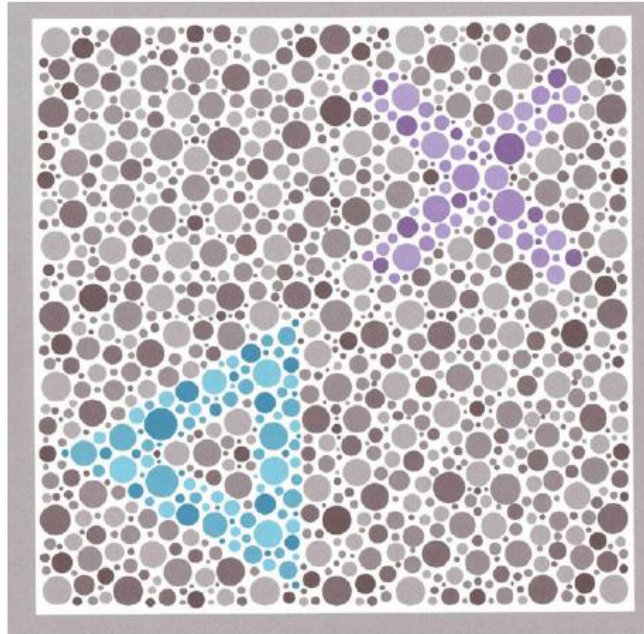


Figura 1.26: Placa de um teste de visão das cores AO-HRR. (Adaptado de Schwartz,2010³⁴)

❖ Cambridge Colour Test (CCT)

O CCT distingue bem os protas dos deuterias, assim como o nível de capacidade de discriminação de cores³⁴. Uma limitação deste teste é o facto de os tricromatas anómalos poderem passar despercebidos, sendo detetados apenas através do anomaloscópio³⁴. O princípio deste teste é o mesmo que o de Ishiara e o HRR – o objetivo é distinguir a figura do fundo em que se encontra³⁴ - a diferença é que o estímulo utilizado é um “C” que muda de cor e direção ao longo do teste sobre um fundo de cor cinza (Figura 1.27), tornando a tarefa mais exigente para o paciente, permitindo melhorar os resultados da análise.

Os resultados aparecem sob a forma de elipses, e consoante a sua posição, tamanho e orientação do seu braço maior é possível categorizar a anomalia cromática. No caso de um tricromata normal a elipse é de tamanho reduzido e mais arredondada (Figura 1.28 (A)), num protanope (Figura 1.28 (B)), deuteranope (Figura 1.28 (C)) e tritanope (Figura 1.28 (D)) as elipses surgem estendidas no mesmo sentido que as respetivas linhas de confusão e em direção ao ponto de convergência³⁴. Quanto mais grave for a condição, mais alongadas aparecem as elipses³⁴.

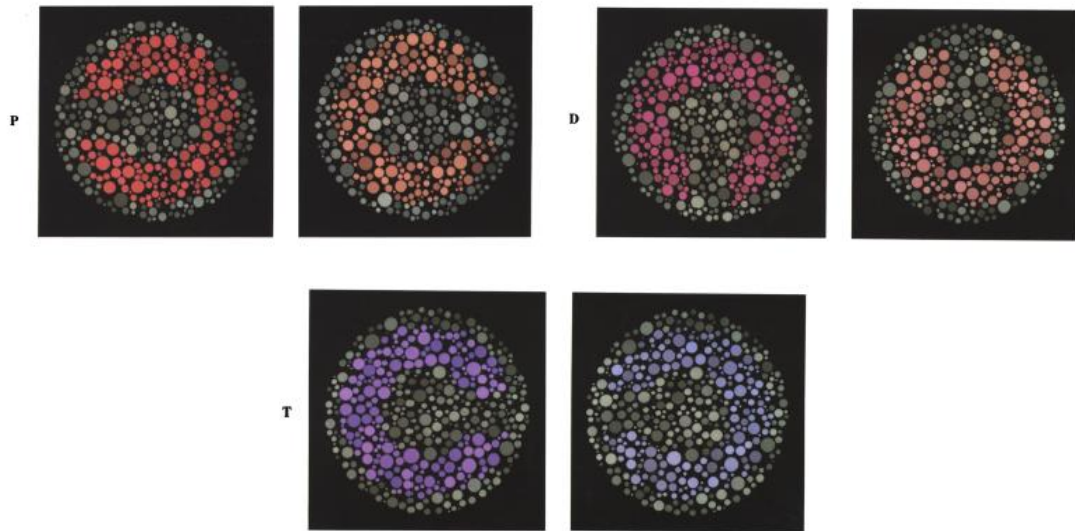


Figura 1.27: Estímulo do CCT – as imagens P, as D e as T representam o estímulo apresentado aos protas, deuterans e tritanas, respetivamente; a coluna da direita representa a mesma imagem com menos saturação o que aumenta o grau de dificuldade da discriminação cromática. (Adaptado de Regan, 1994³⁴)

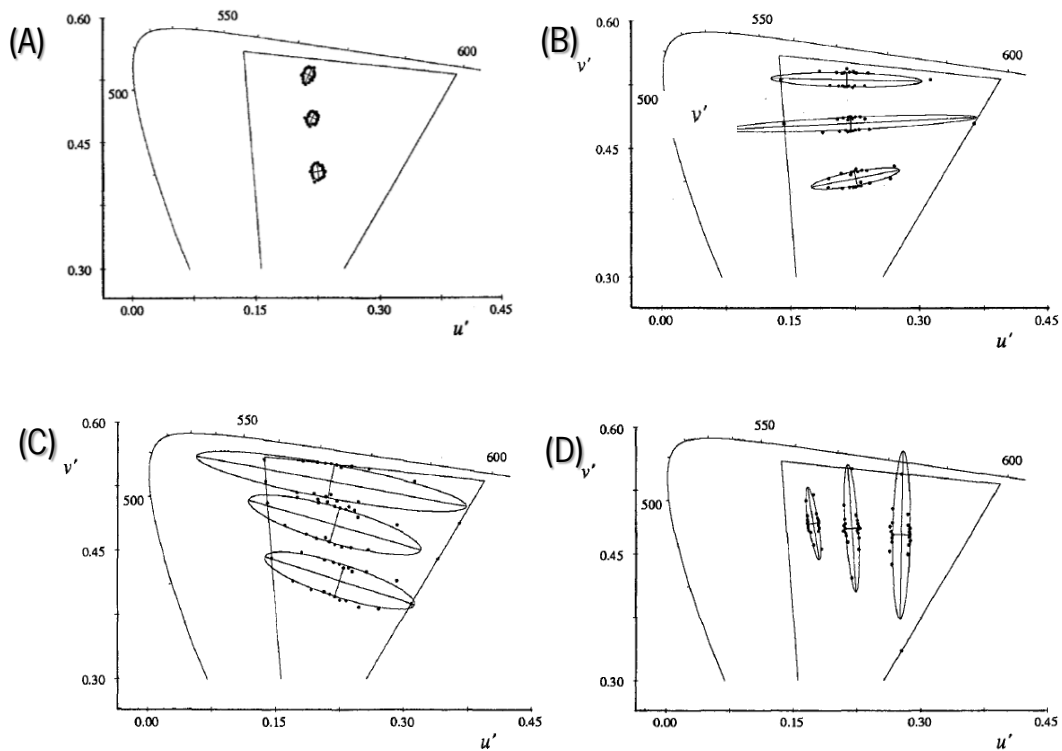


Figura 1.28: Folhas de resultados do CCT num diagrama CIE 1976 ($u'v'$) – exemplo de um indivíduo com visão das cores normal (A), um protanope (B), um deuteranope (C) e um tritanope (D). (Adaptado de Regan, 1994³⁴)

❖ *Colour Assessment and Diagnosis (CAD)*

Criado pela *City University*, o CAD é um teste dinâmico controlado computacionalmente, em que as figuras e respetivos fundos são apresentados em monitores, em vez de placas e imagens impressas³³. É um teste rápido e facilmente disponível³³. É considerado um teste de rastreio apropriado para identificar a presença de deficiências cromáticas do tipo verde-vermelho³³, sendo também capaz de testar as deficiências nos azuis-amarelos.

O estímulo consiste num quadrado cromaticamente variável, que se move sobre um fundo com ruído de luminância em tons de cinzento Figura 1.29 ^{33,35}. O observador realiza o teste binocularmente em frente ao monitor, a uma distância específica. A tarefa do observador consiste em selecionar o botão que representa o sentido da direção do quadrado colorido – em cima à direita, em cima à esquerda, em baixo à direita, em baixo à esquerda³⁵, enquanto fixa um ponto central. A saturação cromática só reduz quando acerta duas respostas consecutivas³⁵. Sabe-se que a perceção cromática do quadrado colorido é independente do ruído dinâmico não sendo influenciada pelas alterações na luminância existentes no fundo³⁵, assegurando que a perceção e deteção do sinal depende apenas da discriminação cromática³³.

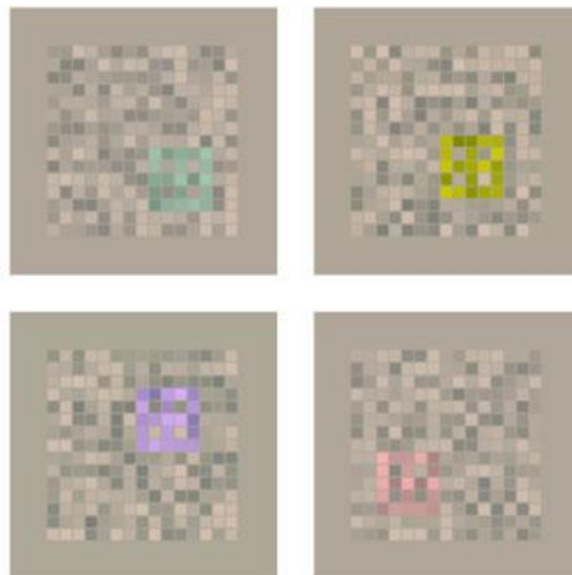


Figura 1.29: Aspeto do estímulo apresentado durante o CAD - quadrado colorido que se move ao longo de um fundo neutro com ruído. (Retirado de [36])

(B) Testes de Disposição ou Ordenação

Fáceis de utilizar, permitindo a diferenciação entre dicromatas e tricromatas anómalos e o seu grau de deficiência^{23,24}. Requerem que o observador coloque amostras, denominadas de cápsulas, de diferentes cores por ordem sequencial baseando-se na tonalidade, saturação e brilho^{23,24,28}. Devem ser realizados sob uma iluminação *standard* da CIE²³. Através da ordenação das cápsulas, realizada pelo examinando, consegue-se fazer o diagnóstico²⁴.

❖ F-M 100 (*Farnsworth-Munsell* – 100 tonalidades)

Permite avaliar o nível de gravidade num observador anómalo, mas também a capacidade de avaliar a discriminação cromática de um observador normal²⁸. É constituído por 85 cápsulas de cores diferentes, numeradas na parte posterior, divididas por quatro tabuleiros de diferentes tonalidades (Figura 1.30)^{23,24}. O examinando deve colocar as cápsulas por ordem sequencial com base na cápsula de referência, iluminado por um dos iluminantes *standard*^{23,24}. Este teste é menos usado que o *Farnsworth D-15*, uma vez que é mais demorado e cansativo para o paciente^{24,28}.



Figura 1.30: Teste de *Farnsworth-Munsell* de 100 tonalidades – as cápsulas estão divididas por quatro caixas. (Retirado de [37])

Os resultados são calculados a partir do total de erros na sequência, que indicam o nível de severidade do problema, e são apresentados em forma de gráficos circulares com padrões, em que a direção do eixo classifica cada deficiência cromática (Figura 1.31)^{23,24}.

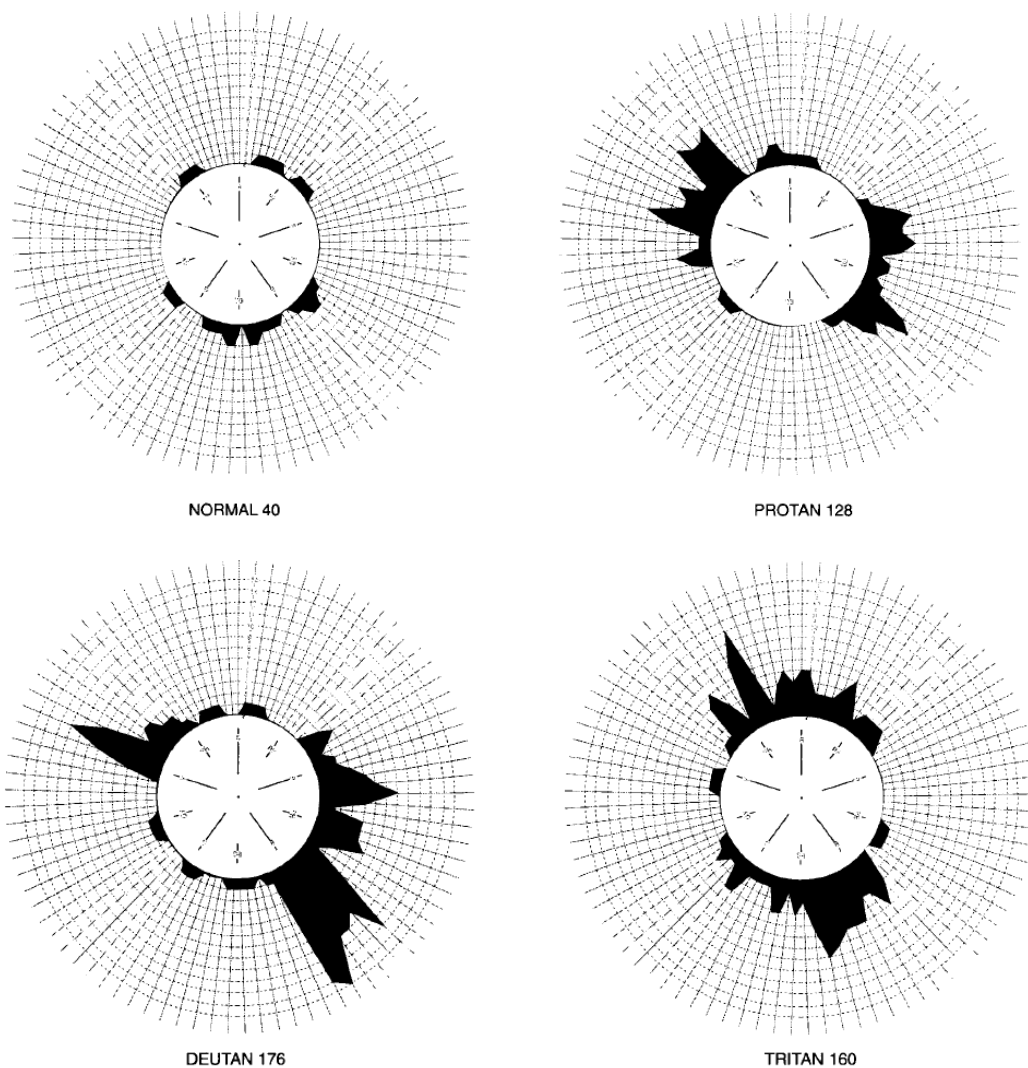


Figura 1.31: Folha de resultados do teste *Farnsworth-Munsell* de 100 tonalidades – representação dos padrões típicos de um indivíduo com visão das cores normal, e exemplos de prota, deutera e trita. (Adaptado de Benjamin 2006²³)

❖ D-15 (*Farnsworth D-15*)

Distingue um observador com visão das cores normal dos observadores com uma deficiência cromática moderada a severa²³. O teste é realizado de modo semelhante ao *Farnsworth-Munsell* de 100 tonalidades, porém são utilizadas apenas 15 cápsulas retiradas desse mesmo teste (Figura 1.32)^{23,28}.



Figura 1.32: Cápsulas utilizadas no teste de *Farnsworth D 15*. (Retirado de [38])

Essas cápsulas formam um círculo de tonalidades ao longo do diagrama da CIE (Figura 1.33)²⁴.

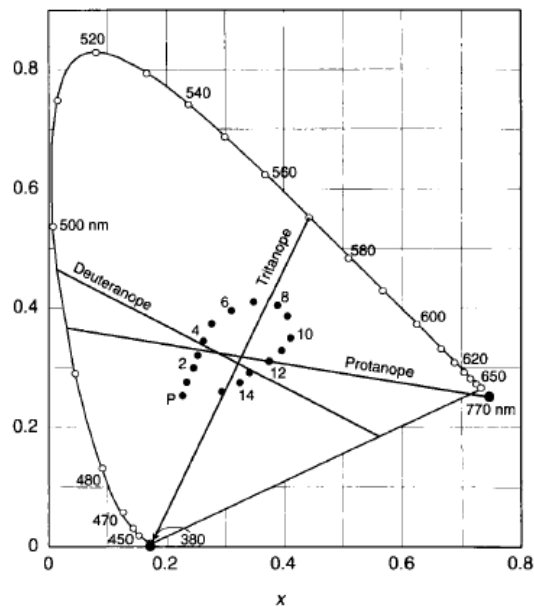


Figura 1.33: Localização, no diagrama da CIE de 1931 (x,y), das cápsulas usadas no teste D-15 – “P” é a cápsula de referência – e eixos da linhas de confusão de cada tipo de deficiência cromática. (Adaptado de Benjamin,2006²³)

A folha de registo é constituída por uma série de pontos posicionados em forma de círculo que correspondem às cápsulas e ao seu respetivo número²⁴. A anotação dos resultados faz-se conforme a sequência dos números das cápsulas ordenadas pelo observador, e a sua classificação baseia-se na direção das linhas de confusão de prota, deuteran e tritan (Figura 1.34)^{23,24}.

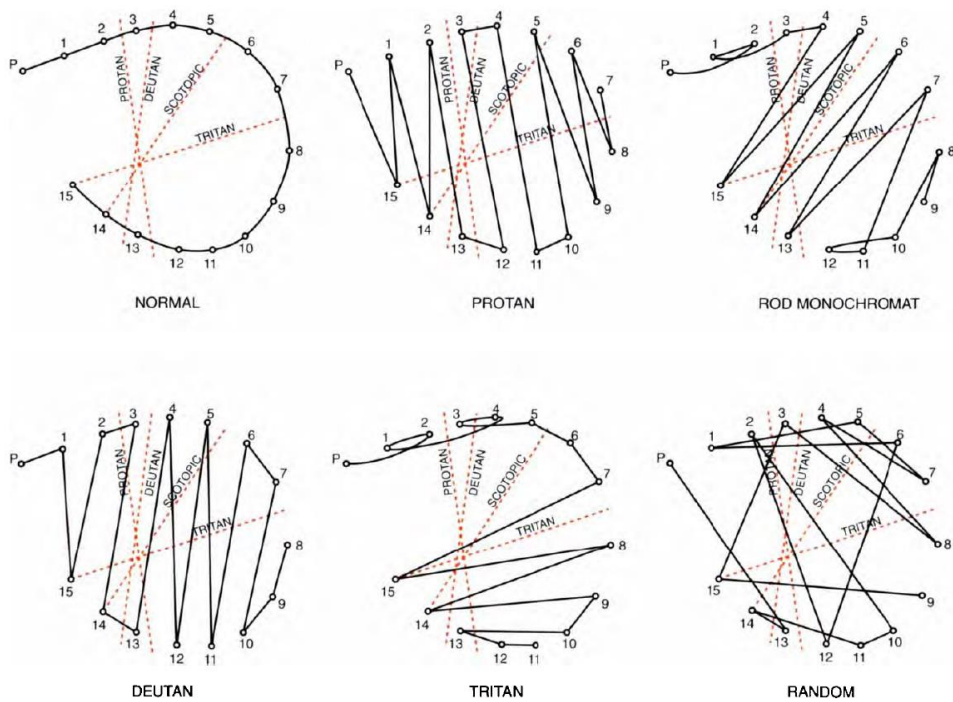


Figura 1.34: Folha de resultados do teste Fransworth D-15 - representação dos padrões típicos de um indivíduo com visão das cores normal (normal), e resultados tipo para observadores prota (protan), deuta (deutan), trita (tritan) e ainda monocromata (rod monochromat). (Adaptado de Benjamin,2006²³)

(C) Testes de correspondência

❖ Anomaloscópio

São considerados os testes mais fiáveis, o *gold-standard*, pois implica a utilização de várias propriedades da visão das cores, e fornecem um diagnóstico diferencial completo^{23,24,28}. A principal desvantagem é que exige que o avaliador tenha experiência e capacidade para explicar e realizar o teste, fazendo com que seja menos utilizado na prática clínica²³.

Avaliam a capacidade do observador de fazer uma combinação metamérica²³, ou seja, a tarefa do observador é igualar a soma de duas cores com combinações de comprimentos de onda diferentes com a cor de uma referência até parecem-lhe idênticas, com a ajuda de dois botões^{23,24,28}.

Avalia a visão das cores na zona do verde e vermelho e baseia-se na equação de *Rayleigh*

^{23,28,39}:

$$R + G = Y$$

A variável R está associada à cor vermelha (*red* - inglês) e corresponde ao comprimento de onda de 666 nanómetros, G à cor verde (*green* - inglês) e corresponde a 549 nanómetros e Y à cor amarela (*yellow* - inglês) e corresponde a 589 nanómetros.

Através da ocular do anomaloscópio, observa-se um círculo dividido em duas metades, uma de referência e outra de mistura (Figura 1.35)^{23,24}. Ao rodar um dos botões controla-se a quantidade de verde ou vermelho da metade de cima e com o outro botão regula-se a intensidade na metade de baixo, ou de referência²⁴.

É um teste monocular, e deve ser calibrado pelo utilizador rodando a ocular de modo a que o círculo fique o mais focado possível²³.

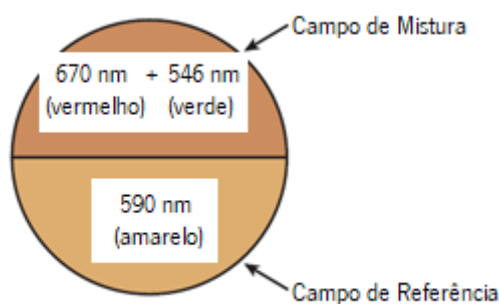


Figura 1.35: Círculo segmentado observado através da ocular do anomaloscópio. Campo de mistura: metade de cima; Campo de referência: a metade de baixo. (Adaptado de Schwartz,2010²⁴)

A metade de cima (campo de mistura) corresponde à combinação das cores verde e vermelho que em quantidades iguais, origina a cor amarela. A metade de baixo pode ter mais ou menos intensidade, por isso também é possível ajustar só a intensidade da metade de baixo (campo de referência). Assim sendo, um tricromata, ou seja, um observador com visão das cores normal, ajusta a metade de cima de modo a que pareça amarelo e igual à metade de baixo de modo que as intensidades coincidam podendo existir pequenas diferenças, mas essas não são significativas. Embora exista uma certa variabilidade de resposta entre indivíduos essa variação não é considerável²⁴. Para um dicromata, mesmo que a metade de cima varie entre o verde ou o vermelho em proporções diversas, ambas as metades podem parecer idênticas²⁴.

O anomoscópio é capaz de distinguir o tipo – prota, deuteria, trita ou monocromático – e o grau – nope ou anómalo – de deficiência da visão das cores (Figura 1.36).

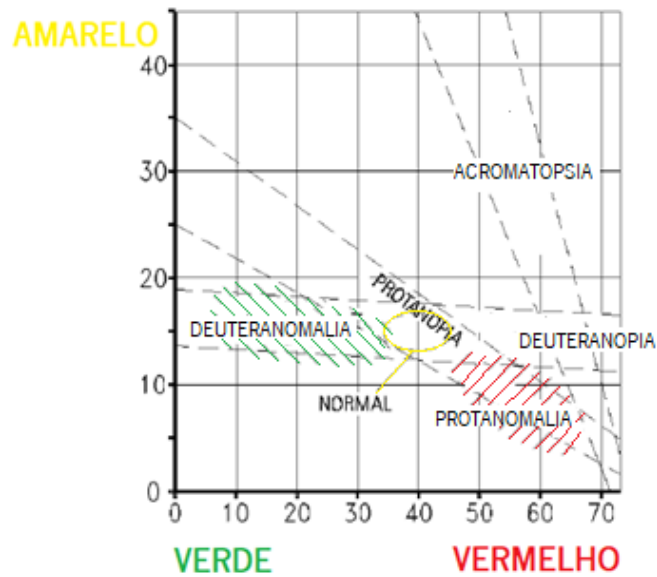


Figura 1.36: Folha de resultados de um teste num anomaloscópio. (Adaptado de OCULUS³⁹)

Este teste também avalia a visão das cores na zona dos azuis e verdes, através da equação de Moreland³⁹:

$$B + G = C + Y$$

O parâmetro B está associado à cor azul (*blue* - inglês) e corresponde ao comprimento de onda de 436 nanómetros, G à cor verde (*green* - inglês) e corresponde a 490 nanómetros, C à cor azul ciano (*cyan* - inglês) que corresponde a 480 nanómetros e Y à cor amarela (*yellow* - inglês) e corresponde a 589 nanómetros.

Para testar estas cores, o anomaloscópio deve fazer-se acompanhar de um adaptador, colocado na ocular do instrumento. Nesta avaliação o campo de mistura (metade de cima do círculo) consiste na mistura de cores verde e azul e o campo de referência de cor ciano com amarelo³⁹. Quantidades iguais de azul e verde dá uma mistura de ciano e amarelo também em quantidades iguais. O procedimento é semelhante ao verde-vermelho (descrito anteriormente).

1.2.9. Percepção Cromática

A percepção cromática depende de um grande número de parâmetros e condições²³. Existem três fatores que influenciam a nossa percepção de cor: o tipo de fonte de luz, o material do objeto iluminado pela luz e ainda a fisiologia e psicologia do observador⁷.

As cores dos objetos são o resultado do comprimento de onda da luz que é refletida por esse objeto e podem ser representados através de curvas de refletância²¹. Quando um objeto reflete muito num determinado comprimento de onda e absorve os restantes – reflexão seletiva -, essas cores são designadas de cores cromáticas (vermelho, azul, verde, ...), e nesses casos a curva de refletância tem um pico nesse comprimento de onda²¹. No caso de não haver flutuações na curva de refletância, ou seja, não há nenhuma cor que reflete mais do que outra, estamos na presença de cores acromáticas (preto, branco, ...)²¹.

A cor de um objeto não é apenas influenciada pelo comprimento de onda presente nela, mas também tem em conta os objetos adjacentes e outras partes do campo visual e por objetos que tenha visto anteriormente²³. Existem fatores externos que podem alterar a nossa percepção cromática como o fundo ou meio em que o objeto está a ser observado, a intensidade e o tipo de iluminação, entre outros²¹. Mesmo as pessoas com visão das cores normal também se podem enganar na discriminação de cores nomeadamente sob condições atmosféricas adversas em que a visualização é afetada²³. A nossa percepção também é afetada pela frequência espacial e temporal²³.

O brilho, saturação e tonalidade dependem do comprimento de onda²³. O nível de brilho depende da sensibilidade espectral e da luminância; a tonalidade depende do comprimento de onda dominante, do nível de luminância e ainda da pureza da cor; a saturação depende da pureza cromática baseada na luminância.

1.3. Memória de Cor

Sabe-se que a memória é bem diferente da percepção. Assim sendo, a maneira como nos lembramos das cores pode ser diferente da realidade. Segundo a literatura existem diferenças entre as cores memorizadas e as cores físicas⁴⁰⁻⁴³.

Essas variações são sistemáticas e em direção a um intervalo específico de tonalidade e luminância^{40,41,43}. A direção dessas variações depende da categoria e do contexto da imagem (céu,

plantas ou pele, por exemplo) no sentido daquela mais frequentemente associada ao objeto em causa⁴⁰⁻⁴³. Na maioria dos casos, existe uma tendência para o incremento de saturação e luminosidade, ou seja, é necessário mais cor e luminância para que as cores reais correspondam às cores memorizadas^{40,41,43}.

Este efeito depende mais do contexto em que se faz correspondência de cor, seja uma amostra de cor uniforme ou uma imagem complexa, como uma fotografia⁴³. Acrescentar apenas complexidade a uma imagem não é suficiente, pois ao acrescentar naturalidade (que altera a complexidade espacial e a textura) a uma imagem irá aumentar a correspondência entre as cores obtidas a partir da memória⁴⁴, isto é, a memória cromática tem maior precisão quando existem outras pistas para além das cromáticas. Quanto mais próxima, uma imagem complexa estiver da imagem original melhor será a *performance* do observador a identificar e discriminar cores como originais⁴⁵.

A memória cromática é o resultado da percepção, repetida ou não, de vários fatores de estimulação: quanto maior e mais frequente for determinado estímulo, mais memorizado fica⁴⁰. Bartleson *et al.*⁴¹ defende que as cores memorizadas são aquelas associadas a cores de objetos familiares com os quais se tem uma experiência visual frequente. Embora a memória seja algo específico de cada pessoa, para objetos altamente familiares, a nossa memória é mais estável por causa da frequência com que são visualizados e, conseqüentemente, as variações intra-observadores são menores⁴¹.

1.4. Cor em Cenários Naturais

Cenários naturais são cenários complexos e variados. Os cenários naturais são constituídos por várias cores vindas de diferentes elementos naturais presentes em ambientes rurais (montanhas, florestas, pedras, plantas, etc..) e objetos artificiais presentes em ambientes urbanos (edifícios, fábricas, etc..).

As cores da natureza têm valores de saturação baixos, o que significa que as coordenadas cromáticas se encontram mais afastadas dos limites do diagrama cromática e mais próximas do branco, logo parecem menos saturadas⁴⁶.

Pointer *et al.*⁴⁷ e Linhares *et al.*⁴⁸ estimaram o número de cores distinguíveis em cenários naturais complexos. O volume total de cores, representados no diagrama CIELAB na Figura 1.37,

estimado foi próximo (uma vez que são dois autores em dois trabalhos diferentes) e de cerca de 2 milhões de cores, que corresponde a cerca de 30% do valor teórico máximo^{47,48}.

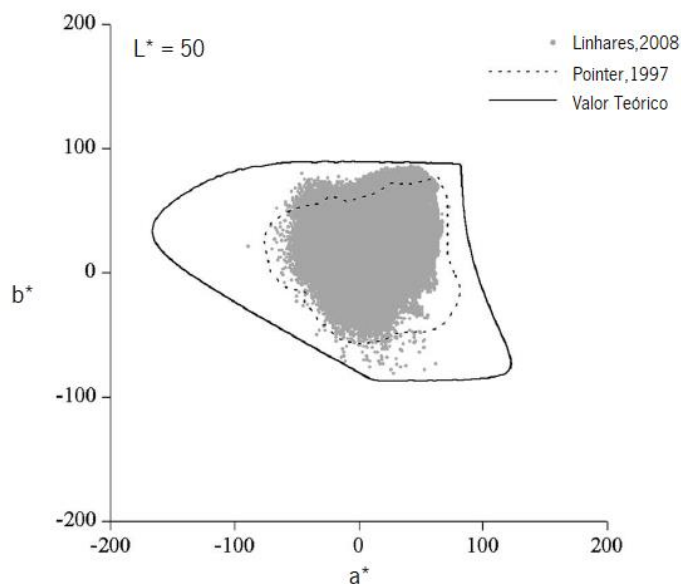


Figura 1.37: Volume de cores discriminadas em função das coordenadas cromáticas a^* e b^* do diagrama CIELAB, para um nível de luminosidade de 50, obtido a partir de 50 imagens hiperespetrais de cenários naturais. É possível comparar os resultados de Linhares,2008 (pontos cinza) e Pointer,1997 (linha a tracejado), com o valor teórico máximo (linha contínua), assumindo o iluminante *standard C*. (Adaptado de Linhares,2008⁴⁹)

Assim sendo, as cores oriundas na natureza são mais limitadas que as cores previstas pelos modelos teóricos, ou seja, o número de cores naturais distinguíveis é inferior às cores possíveis de obter com fontes monocromáticas, o que pode ter a ver com o facto de o espectro de refletância de cores naturais serem bem diferente daquele que é idealizado, sugerindo que uma porção de cores teóricas possíveis podem ser extremamente raros ou até inexistentes⁴⁸.

A luminosidade também altera o volume cromático de cenários naturais⁴⁸.

1.5. Visão na Atmosfera

A dispersão da luz surge quando existe interferência da luz com uma partícula, de índice de refração diferente do meio envolvente, que desvia o seu percurso total ou parcialmente^{25,50}. A absorção acontece quando uma determinada partícula ou objeto absorve parte da energia

luminosa que lhe chega, diminuindo a energia total do feixe de luz original²⁵. Tanto a dispersão como a absorção diminuem a quantidade total da luz que chega a um observador. A quantidade depende, assim, do tamanho e número de partículas, quanto maiores maior a dispersão e/ou absorção^{25,50,51}.

A luz proveniente de determinado objeto chega ao observador atenuada, devido ao seu percurso pela atmosfera e conseqüente interação com as partículas atmosféricas, sofrendo dispersão e absorção^{25,50-53}. Na atmosfera, as partículas responsáveis por este efeito vão desde as moléculas gasosas, passando pelas partículas de neblina, gotículas de nevoeiro ou de nuvens, até às gotas da chuva²⁵. Este é um efeito permanente e constante uma vez que existem sempre partículas suspensas na atmosfera, de vários tamanhos e feitios, distribuídas de formas variadas (Tabela 1.1)^{25,53}.

Tabela 1.1: Tipo, tamanho e quantidade das partículas atmosféricas para diferentes condições atmosféricas. (Adaptado de McCartney, 1976²⁵)

Condição Atmosférica	Tipo de Partícula	Dimensão (μm)	Concentração (cm^{-3})
Ar	Molécula	10^4	10^{19}
Nebelina	Aerossol	$10^2 - 1$	$10^3 - 10$
Nevoeiro	Gotícula de água	$1 - 10$	$100 - 10$
Nuvem	Gotícula de água	$1 - 10$	$300 - 10$
Chuva	Gota de água	$10^2 - 10^4$	$10^2 - 10^5$

As partículas presentes na atmosfera variam consoante as condições atmosféricas. Esta variedade de partículas afeta a visão de diferentes formas^{25,51}:

- Neblina: Composta por aerossóis, pequenas partículas suspensas no ar, a dispersão é superior à das moléculas de gás, mas inferior às gotículas do nevoeiro. Tende a acrescentar uma tonalidade azul ou cinza, afetando ligeiramente a visibilidade.
- Nevoeiro: As gotículas presentes nesta condição desenvolvem-se a partir da condensação das partículas da neblina, uma transição muito gradual, sendo maiores que os aerossóis

mas menores que as gotas da chuva. A visibilidade reduz significativamente em dias de nevoeiro.

- Nuvem: A única diferença quando comparado com nevoeiro é o facto de as nuvens se encontrarem a uma maior altitude.
- Chuva: Constituída por gotas de água que alteram a percepção dos objetos, espacial e temporalmente.

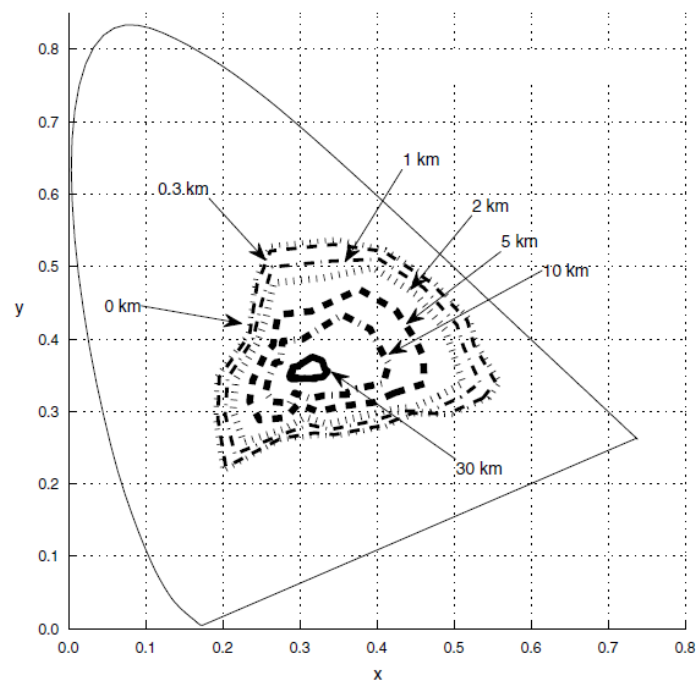


Figura 1.38: Representação da área cromática para várias distâncias de observação, no espaço cromática da CIE de 1931. (Adaptado de Romero,2011⁵⁴)

Esse efeito também aumenta com o incremento da distância entre o observador e o objeto ou cenário em questão. O efeito atmosférico influencia e altera percepção de cor de objetos segundo a distância^{25,46,50,51,54-57}, ou seja, a maneira como é percebida a cor é diferente quando o objeto em visualização está longe ou perto. Objetos ou cenários vistos ao longe parecem nublados⁵⁶, com menos saturação, de aspeto mais esbranquiçado e a tender para o tom azulado^{46,54,55,58}. A Figura 1.38 mostra a diminuição da cor de cenários ou objetos com a distância observacional num espaço cromático da CIE de 1931: As cores são mais saturadas à medida que nos aproximamos dos

limites do diagrama de cor e menos saturadas se nos aproximarmos do branco, próximo do centro do diagrama de cor.

Como os cenários naturais são, por defeito, menos saturados, os efeitos do incremento da distância de observação são notórios mesmo em dias limpos⁴⁶.

Verificou-se que a cor em função da distância altera exponencialmente^{54,55,59}, ou seja, as alterações são mais visíveis a curtas distâncias (Figura 1.39).

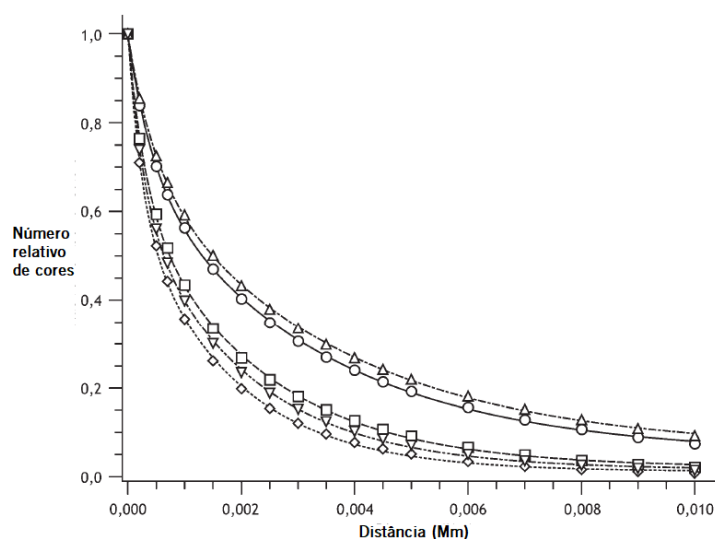


Figura 1.39: Quantidade relativa de cor em função da distância de observação - variação exponencial. (Adaptado de Luzón-González, 2013⁵⁵)

Para além disso, à medida que essa distância aumenta, a cor do objeto vai se aproximando da cor do horizonte até se tornar indistinguível do horizonte^{54,58}. Supõe-se que se a distância de observação for no infinito, a percepção do objeto é perdida. Este fenómeno foi verificado em cenários naturais, rurais e urbanos, e para várias condições atmosféricas⁵⁵.

O intervalo de visão clara, ou visibilidade, depende do coeficiente de extinção atmosférico (representado pela dispersão) e da distância²⁵. Na Tabela 1.2 é possível ver, para cada condição atmosférica, o intervalo de visibilidade (R), numa atmosfera com condições normais e à luz do dia, e o coeficiente de extinção (β).

Tabela 1.2: Intervalo de visibilidade (R) em metros e coeficiente de extinção (β) correspondentes a cada tipo de condição atmosférica. (Adaptado de McCartney, 1976²⁵)

Condição Atmosférica	R (m)	β (km ⁻¹)
Ar puro	277000	0,0141
Dia muito limpo	20000-50000	0,196-0,078
Dia limpo	10000-20000	0,391-0,196
Neblina leve	4000-10000	0,954-0,391
Neblina	2000-4000	1,96-0,954
Nevoeiro muito leve	1000-2000	3,91-1,96
Nevoeiro leve	500-1000	7,82-3,91
Nevoeiro moderado	200-500	19,6-7,82
Nevoeiro denso	50-200	78,2-19,6
Neveiro muito denso	<50	>78,2

Um exemplo visual quotidiano do efeito atmosférico, descrito neste tópico, devido à distância de observação, surge quando se observam, por exemplo, montanhas Figura 1.40. Se estas estiverem perto, é possível perceber melhor os elementos que a constituem e a cor que estes têm, caso contrário, se estiverem muito afastadas, não é possível distinguir o detalhe e perdendo cor, ficam mais esbranquiçadas e azuladas.



Figura 1.40: Efeito atmosférico na perceção visual de montanhas - são notórias as alterações na cor e na visibilidade com a distância a que estão os objetos. (Retirado de [60])

Embora o efeito atmosférico altere a percepção de cor com a variação da distância observacional, o sistema ótico humano consegue ver cores à distância compensando a tendência para o azul, de modo a manter uma tonalidade constante⁵⁹.

1.6. Imagiologia Hiperespectral

A maioria das câmaras fotográficas digitais capturam três bandas espectrais (verde, vermelho e azul - RGB), tentando corresponder à tricromacia do olho humano⁶¹. As imagens hiperespectrais têm uma resolução espectral superior às típicas imagens RGB, uma vez que uma câmara hiperespectral recolhe e processa informação espectral com uma resolução do espectro eletromagnético superior^{61,62}.

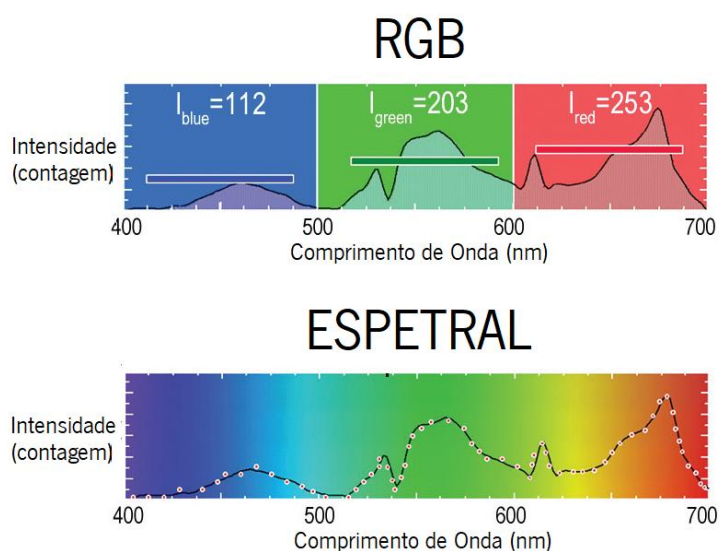


Figura 1.41: Representação da informação capturada utilizando um sistema de imagiologia RGB (em cima) e um sistema de imagiologia hiperespectral (em baixo). (Adaptado de Varispec,2013⁶³)

Através do Sistema convencional RGB, pode haver perda de informação, uma vez que esta está concentrada em apenas 3 valores – vermelho, verde e azul. Ou seja, considera apenas integrações espectrais das zonas vermelho, verde e azul, ao contrário do sistema hiperespectral que considera toda a informação espectral⁶³.

Apesar do olho humano absorver a energia luminosa ao longo de três bandas do espectro eletromagnético visível (*L, M, S*), a imagiologia hiperespectral permite o registro ao longo de um maior número de bandas espectrais ao longo do espectro visível (dos 400 aos 720 nanômetros)⁶².

Híper, na palavra hiperespectral, está relacionado com o elevado número de bandas de comprimentos de onda⁶⁴. Numa imagem hiperespectral, cada pixel contém um espectro contínuo incluindo muitos comprimentos de onda (Figura 1.42)^{61,62,65}. Este detalhe espectral permite identificar e distinguir espectralmente materiais e objetos de um cenário com elevada precisão e maior detalhe, quando a informação espacial não é suficiente para fazer a sua discriminação^{62,64,65}, proporcionando uma análise mais detalhada das imagens⁶⁴. Esta metodologia é vantajosa quando comparada com métodos alternativos, pois combina informação espectral e espacial, é relativamente rápido e tem uma resolução espacial semelhante à do olho humano⁶⁶.

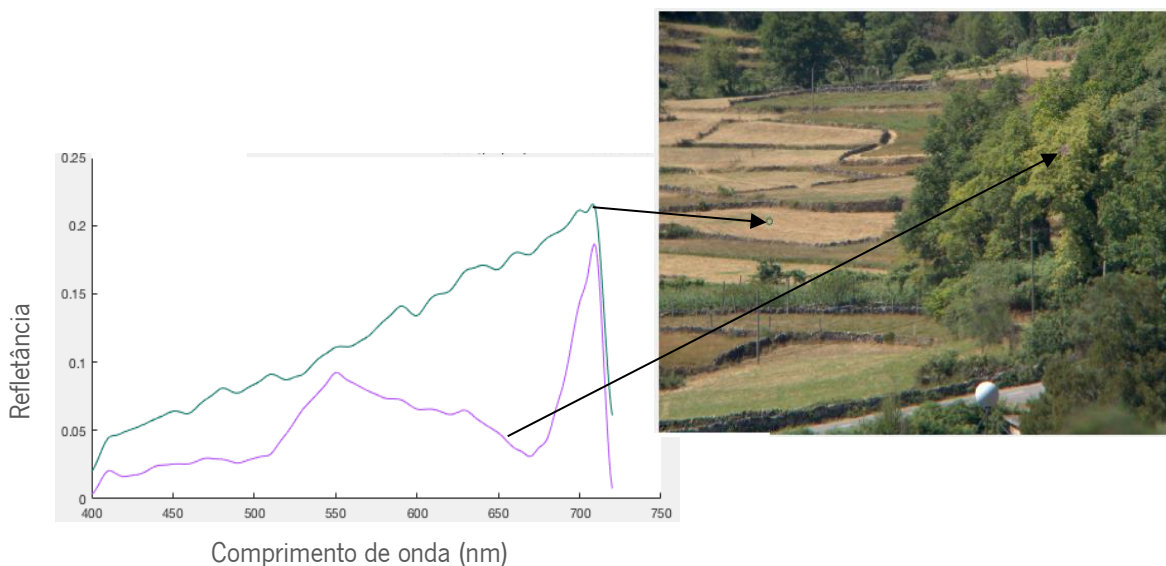


Figura 1.42: Nas imagens hiperespectrais, cada pixel tem em conta a todo o espectro eletromagnético (dos 400 aos 720 nm), utilizando a informação de 33 comprimentos de onda. (Adaptado de Foster,2006⁶⁷)

Tem várias aplicações, nomeadamente no mapeamento e identificação de materiais, sendo usada em várias áreas, tais como: geologia, mineralogia, agricultura, ambiente, astronomia, ciências, segurança e serviço militar^{62,64,65}.

2. HIPÓTESE E OBJETIVO DE ESTUDO

2.2. Formulação do Problema

Já é conhecido o efeito da atmosfera consoante a distância de observação na percepção e propriedades cromáticas de cenários naturais em observação: a dispersão ou absorção dos raios luminosos através da atmosfera vai aumentando com a distância a que se encontra o objeto/paisagem, havendo diminuição da sua visibilidade, assim como da sua diversidade cromática. No entanto, ainda está por descobrir que informação visual pode ser recuperada por observadores, a partir de imagens alteradas por perturbações atmosféricas, sem que haja conhecimento por parte destes do conteúdo das imagens em análise. Ou seja, desconhece-se em que medida as falhas cromáticas induzidas pela distância de observação afetam a capacidade de um observador restaurar o conteúdo cromático original de um cenário desconhecido através da memória de cores.

Neste estudo foi estimado o limiar de recuperação de informação cromática, de observadores com visão das cores normal, em imagens hiperespectrais de cenários naturais complexos alteradas para simular a percepção destes estímulos a várias distâncias de observação, ajudando a perceber qual o real impacto de diferentes composições da atmosfera na percepção de cores de cenários naturais complexos, principalmente na sua composição cromática. Permitted conhecer, ao nível da percepção visual, a capacidade de o olho humano recuperar a informação de cor original, mesmo em imagens desconhecidas, degradadas pelo efeito atmosférico.

2.3. Hipóteses

Este trabalho propõe-se a responder às seguintes hipóteses:

- Com o aumento da distância de observação, a quantidade de cores percebidas das imagens naturais utilizadas diminui e tende para a tonalidade azul;
- O olho humano é capaz de recuperar a informação cromática original, mesmo que a imagem seja desconhecida e esteja degradada pelo efeito atmosférico;
- As respostas dos observadores deverão permitir perceber se a imagem selecionada como original é de facto a imagem real com o conteúdo original e qual o erro associado a esta decisão.

2.4. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho foi estudar e analisar a aptidão de observadores com visão das cores normal em recuperar a informação de cor de imagens desconhecidas, cromaticamente degradadas pelo efeito da atmosfera. As imagens utilizadas foram cenários naturais complexos simulando várias distâncias observacionais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O protocolo experimental foi submetido, revisto e admitido pela Subcomissão de Ética para as Ciências da Vida e da Saúde da Universidade do Minho. A investigação decorreu no *Colour Science Lab* (CSL) na Universidade do Minho (Braga, Portugal). Os testes e experiências foram realizados no Departamento de Física da Universidade do Minho (Braga, Portugal) e todos os instrumentos utilizados nesta investigação encontravam-se disponíveis nessas instalações.

3.1. Tipo de estudo

Este trabalho consistiu em observar as respostas dadas pelos participantes, não havendo intervenção, por parte do investigador, no normal funcionamento do observador, nem comprometendo a saúde geral do mesmo. Durante todo o procedimento foram utilizadas técnicas não invasivas e que não exigiam o contacto direto entre o observador e o investigador. Com base nos aspetos mencionados anteriormente, trata-se de um estudo observacional com o objetivo de determinar a capacidade de recuperar o conteúdo de uma imagem transformada.

3.2. Observadores

Antes da realização de qualquer procedimento, cada participante assinou um Consentimento Informado (ANEXO 1) no qual eram esclarecidos os aspetos mais importantes da experiência e quais as tarefas a serem realizadas, autorizando a utilização dos resultados para fins científicos e não comerciais, de acordo com a Declaração de Helsínki⁸⁵. Os observadores participaram voluntariamente neste estudo e podiam optar por desistir em qualquer momento da experiência.

Foram utilizados indivíduos jovens e pertencentes à comunidade académica. Definiu-se que todos os observadores deveriam ter as estruturas oculares transparentes, sem nenhuma irregularidade ou alterações corneais que modificassem a *performance* visual, nenhuma anomalia visual ou patologia ocular e, ainda, uma visão das cores de acordo com os parâmetros normais. A existência de algum tipo de anomalia ótica, alteração de transparência ou irregularidades, ou ainda patologia ocular que alterasse a *performance* e qualidade ótica eram excluídos. Utilizadores de lentes de contacto também foram evitados, assim como observadores que tomavam, ou

tenham tomado, qualquer tipo de medicação ocular ou sistémica passível de influenciar o normal funcionamento ocular.

Nenhum dos observadores conhecia as imagens de cenários naturais complexos utilizadas durante a experiência nem qual o efeito a que estavam sujeitas as mesmas.

3.3. Procedimento experimental

Foram necessárias três visitas para recolher todos os dados essenciais ao prosseguimento deste estudo. Na primeira visita executou-se uma avaliação optométrica que englobava uma examinação às componentes do olho e avaliação da visão das cores. Esta avaliação validava a aptidão do observador para a tarefa. Na segunda e terceira visitas, que correspondem à primeira e segunda experiência, respetivamente, realizaram-se as experiências psicofísicas.

3.3.1. Avaliação Optométrica

Para apurar se podiam ou não ser incluídos no estudo, todos os observadores foram submetidos a uma avaliação optométrica geral composta pela anamnese e refração habitual, determinação da acuidade visual, realização de exames complementares, examinação das estruturas oculares e avaliação da visão das cores.

- **Anamnese:**

Ficou-se a conhecer-se o historial, antecedentes e estado atual, ocular e sistémico, do observador e familiares diretos, de modo a descartar perturbações ou medicação que pudesse afetar o sistema visual.

- **Refração Habitual:**

Determinou-se, medindo a compensação (de quem usava) através de um frontofocómetro (AutoLensMeter, SPVMED,Lda, Portugal) (Figura 3.1), a graduação habitual do observador. Passo essencial para saber qual a graduação habitual a colocar na armação de prova durante a realização da experiência psicofísica.



Figura 3.1: Frontofocómetro utilizado para determinar o poder refrativo da graduação habitual dos observadores (AutoLensMeter, SPVMED,Lda, Portugal).

- **Acuidade Visual:**

Determinou-se a acuidade visual corrigida (se necessário), para visão de longe através da tabela de acuidade visual de *Snellen* a cerca de 4 metros e para visão de perto um optótipo de visão de perto a cerca de 40 centímetros do observador. Mediu-se a acuidade visual máxima que o observador conseguia atingir monocularmente (ocludindo o olho esquerdo, testando o olho direito, e vice versa) e, de seguida, binocularmente. Descobrimo se o observador conseguia atingir a unidade ou não, desta forma garantia-se a uniformidade de parâmetros visuais entre os observadores.

- **Exames Complementares:**

Distância Interpupilar: Foi medida a distância interpupilar para visão de longe. Esta medição foi utilizada para ajustar a armação de prova às dimensões do observador.

Cover-test: Fez-se o *cover-test* unilateral e o *cover-test* alternado. Este exame foi executado com o objetivo de descartar qualquer tipo de desvio ocular que pudesse existir.

Motilidade Ocular: A motilidade ocular foi avaliada com a ajuda de uma lanterna a cerca de 40 centímetros do observador. Esta avaliação serviu para descartar qualquer anomalia ao nível dos movimentos oculares.

Reflexos pupilares: Foram analisadas as respostas direta e consensual a partir dos reflexos pupilares. Isto tudo para descobrir se existia alguma anomalia visual deste tipo.

À exceção da avaliação dos reflexos pupilares à luz, todos os testes complementares anteriores foram executados à luz ambiente.

- **Exploração Ocular:**

Foi feita a exploração clínica detalhada das estruturas oculares de cada olho utilizando-se para tal uma lâmpada de fenda comum (NIDEK SL980-Type 5X, CSO, Itália) (Figura 3.2).



Figura 3.2: Lâmpada de fenda NIDEK SL980-Type 5X (CSO, Itália). (Retirado de [69])

Começou-se por fazer uma análise às estruturas oculares mais externas. Avaliou-se a transparência da córnea. As pálpebras, superior e inferior, também foram exploradas. A biomicroscopia foi realizada em ambos os olhos e com o intuito de encontrar, e posteriormente excluir do estudo, qualquer tipo de alteração ou irregularidade ótica e/ou ocular, sobretudo a nível da córnea.

- **Visão das Cores:**

Para determinar se os observadores tinham visão das cores normal, todos eles foram submetidos a um teste de visão das cores utilizando o anomaloscópio (Oculus Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Alemanha - Figura 3.3).



Figura 3.3: Anomaloscópio Oculus (Oculus Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Alemanha). (Retirado de [70])

A classificação da visão das cores era retirada a partir da informação dada na folha de registo do anomaloscópio (exemplo em ANEXO 3).

Todos os exames complementares foram realizados em ambos os olhos, importante para descartar qualquer tipo de disfunção que leve ao mau funcionamento do sistema visual e influencie os resultados. Todos os parâmetros dos testes descritos anteriormente foram anotados numa folha de registo (ANEXO 2) para cada um dos observadores.

3.3.2. Experiência Psicofísica

A experiência psicofísica simulava, para uma determinada imagem, várias distâncias de observação e consequentes efeitos atmosféricos para cada uma das distâncias. Na primeira experiência o objetivo era encontrar a imagem original a partir de uma série de opções disponíveis. A segunda experiência consistia em estimar o limiar de respostas de cada observador, para cada imagem testada, ou seja, partindo da imagem original, quando era detetada alguma alteração.

❖ Imagens Hiperespectrais de Cenários Naturais

Nesta experiência foram utilizadas 11 imagens de cenários naturais, retiradas a partir de uma base de dados de 50 imagens hiperespectrais. Destes cenários naturais, sete (Figura 3.4: 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11) representavam ambientes urbanos e quatro (Figura 3.4: 1, 2, 6, 10) ambientes rurais. Eram considerados urbanos todos os cenários compostos por objetos fabricado pelo Homem e rurais aqueles que continham objetos naturais (esta classificação coincide com outros autores^{66,71}). Também continha imagens próximas (Figura 3.4: 2, 3, 9, 10) e distantes (Figura 3.4: 1, 4, 5, 6, 7, 8, 11).



Figura 3.4: Imagens hiperespectrais de cenários naturais utilizadas no estudo, numeradas, representadas em RGB.

A base de dados híperespectral foi retirada no exterior, sob luz do dia, na região do Minho, em Portugal. As imagens híperespectrais foram obtidas através de um sistema de imagiologia espectral (Figura 3.5) constituído por uma câmara digital de baixo ruído “*Peltier-cooled*” com uma resolução espacial de 1344 (H) por 1024 (V) pixéis (Hamamatsu, Model C4742-95-12ER, Hamamatsu Photonics K. K., Japão), e um filtro de cristais líquidos (Varispec, Model VS-VIS2-10-HC-35-SQ, Cambridge Research & Instrumentation, Inc., Massachusetts, Estados Unidos da América) colocado em frente da lente com um filtro bloqueador de infravermelhos. A lente atingia uma distância focal de 75 milímetros, com um ângulo visual de 6 graus, o que permitia que as imagens resultantes fossem muito próximas da resolução espacial do olho humano. Para cada pixel de cada imagem foi adquirida a informação de cerca de 33 comprimentos de onda, dos 400 aos 720 nanómetros em intervalos de 10 nanómetros. Bem diferente das imagens RGB (*Red-Green-Blue*) que tipicamente se utilizam e apenas têm em consideração a informação espectral condensada nas zonas espectrais do vermelho, verde e azul^{61,62}. Como a informação original dos dados obtidos era radiância, a refletância foi obtida indiretamente. Cada imagem continha uma referência (quadrado cinza) presente na cena durante a aquisição da imagem e com refletância conhecida, da qual se estimava a informação da refletância^{48,66,67,72-74}. Este processo de recuperação da refletância de uma imagem a partir de uma referência pode ser também utilizado em pinturas^{49,74-76}.



Figura 3.5: Sistema de imagiologia híperespectral, disponível no *Colour Science Lab* (CSL) da Universidade do Minho (Braga, Portugal).

As imagens continham uma grande diversidade de objetos e materiais. A única restrição imposta foi a necessidade de ter a maioria dos pixels da imagem dentro do *gamut* de cores do monitor durante toda a experiência. Entende-se por *gamut* do monitor a gama de cores possíveis de representar através de um ecrã de computador.

O *gamut* de cores foi verificado uma vez que é uma propriedade do monitor. O estímulo e sua cor era apresentado e controlado pelo sistema VISAGE, que também verificava se a cor conseguia ser representada corretamente. Se sim, estava dentro do *gamut* de cores, se não, obtinha-se erro e sabia-se que essa cor estava fora do *gamut*. O número de cores distinguíveis foi determinado ao segmentar este volume de cor, em CIELAB, em cubos unitários e contando os cubos não vazios que continham cor representativa de pelo menos um pixel^{47,48}. Foi assumindo que todos os pixels dentro de um mesmo cubo correspondiam à mesma cor percebida.

❖ Estímulo

As imagens hiperespectrais de cenários naturais complexos foram ajustadas do seu tamanho original para 400x400 pixels de tamanho para melhor se ajustarem às dimensões do ecrã de computador, simulando várias distâncias de observação, ou seja, várias distâncias entre o observador e o cenário em causa. Todas as estimativas cromáticas foram feitas no espaço de cor CIELAB. A simulação apenas alterou a influência da atmosfera na percepção das cores com a distância de observação deixando a estrutura espacial dos cenários intacta.

Para cada imagem, a informação cromática e o efeito atmosférico eram simulados assumindo distâncias de observação entre os 2000 e -200 metros em intervalos de 50 metros. À medida que a simulação de distância de observação aumentava, era evidente o efeito de azulamento induzido e conseqüente alteração das cores percebidas (Figura 3.6).

As distâncias com valores negativos representavam um incremento do volume original de cor no espaço cromático CIELAB (Figura 3.7: distância= -200m), por outras palavras, simulavam cores artificiais com incremento de cor em saturação e luminância face às cores originais. Na Figura 3.7 é possível visualizar as coordenadas cromáticas em CIELAB para a imagem 1 (em cima) e imagem 8 (em baixo), a quatro distâncias observacionais diferentes (-200, 0, 1000 e 2000 metros, assinaladas no canto superior direito de cada gráfico). É visível o decréscimo do volume ocupado pelas coordenadas cromáticas no espaço de cor CIELAB à medida que a distância entre o observador e o cenário aumenta.

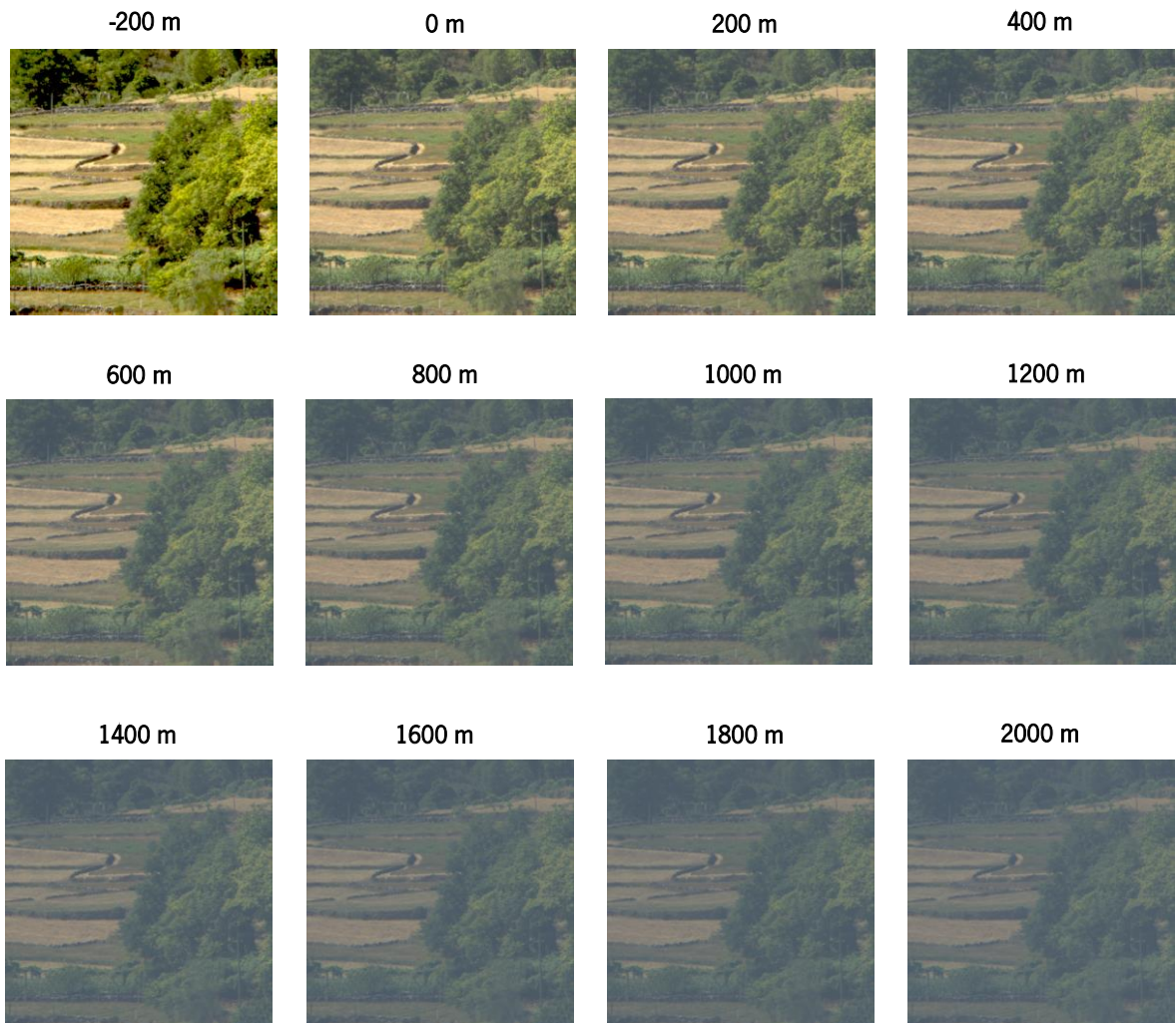


Figura 3.6: Simulação do efeito visual de diferentes distâncias de observação. As simulações correspondem à imagem 8, assumindo o iluminante CIE D65. Os números acima de cada imagem correspondem à distância observacional correspondente em metros.

Imagem 1

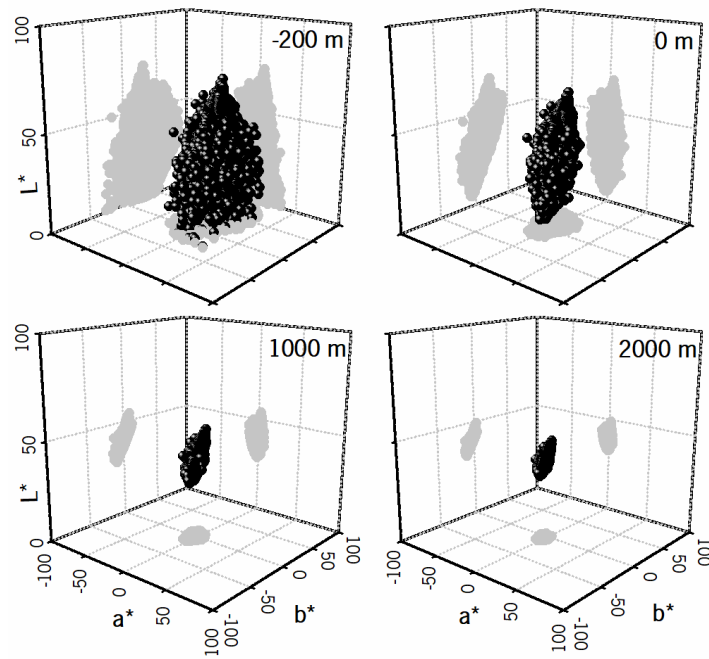


Imagem 8

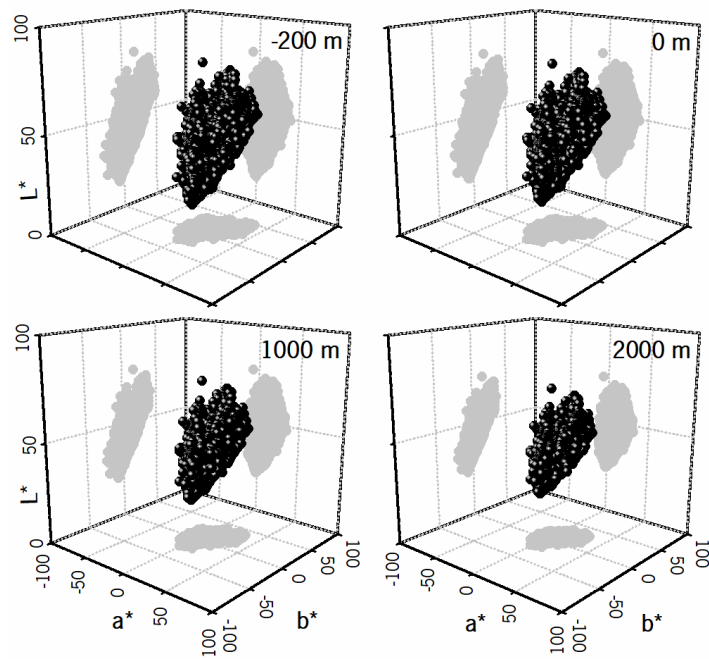


Figura 3.7: Volume cromático no diagrama de cor CIELAB para a Imagem 1 (cima) e 8 (baixo) a diferentes distâncias (representados com um número reduzido de pontos para uma melhor visualização). Os números no topo de cada representação gráfica (-200m, 0m, 1000m e 2000m) indicam a distância entre o observador e o cenário, em metros.

A simulação computacional dos dados espectrais em diversas distâncias foi baseada na seguinte fórmula matemática (Romero et al. 2011):

$$L(\lambda) = L_0 e^{(\beta(\lambda)d)} + L_\infty(\lambda) (1 - e^{(\beta(\lambda)d)}) \quad (1)$$

em que

$$\beta(\lambda) \propto 1/\lambda^u \quad (2)$$

onde L_0 representa a informação espectral do objeto à distância (d) no zero; $\beta(\lambda)$ é o coeficiente de extinção na atmosfera; $L_\infty(\lambda)$ a informação espectral na linha do horizonte; u está relacionado com a quantidade e o tipo de aerossóis presentes na atmosfera; λ é o comprimento de onda (Romero et al. 2011).

$\beta(\lambda)$ é considerado constante entre o objeto e o observador, uma vez que esta fórmula presume que a atmosfera é homogênea. Valores mais baixos do parâmetro u (0) estão relacionados com dias nublados e enevoados, por outro lado, um dia perfeitamente limpo está associado a valores de u mais elevados. Considerando os pressupostos de Romero *et al.*⁵⁴, assumiu-se que u seria igual a 2. Estes pressupostos poderão ser alterados para outras condições de observação^{54,55}. Nesta simulação apenas se alterou o valor da distância mantendo todos os outros parâmetros intactos.

Esta equação foi selecionada uma vez que apenas provoca alterações induzidas pela atmosfera na composição cromática das imagens apresentadas^{54,55}.

❖ Montagem

Esta experiência baseava-se num paradigma de estímulo contínuo, deste modo, no monitor aparecia sempre uma imagem cromaticamente ajustada para uma determinada distância, em metros, com a imagem inicial a aparecer ser selecionada de forma aleatória. As imagens seguintes eram selecionadas de forma a incrementar ou diminuir a distância de observação de forma contínua.

Os observadores podiam ler as instruções, em português e inglês, que lhes eram apresentadas no monitor momentos antes de surgirem as imagens. Assim, ficava garantida a uniformidade das instruções para todos os observadores participantes na experiência.

As imagens de cenários naturais complexos foram apresentadas num monitor CRT de 24'' (GDM-FW900 Trinitron Colour Graphic Display, Sony Corp., Japão) (Figura 3.8), calibrado em cor e luminância. Eram controladas a partir de uma placa gráfica de elevada resolução cromática, o sistema VISAGE (ViSaGe Visual Stimulus Generator, CRS-Cambridge Research System, Rochester, Reino-Unido) (Figura 3.9) com capacidade de reproduzir cores com elevada precisão controlado através do *software* desenvolvido para MatLab (The MathWorks, Inc., Massachusetts, Estados Unidos da América). A calibração da cor e da luminância foi executada usando um telespetroradiómetro (SpectraScanColorimeter, PR-650, PhotoResearch Inc., Chatsworth, California, Estados Unidos da América) medindo cada canal individualmente com a intenção de recriar as funções Gama (γ) necessárias para calibrar o instrumento.

Para representar a cor de cada pixel no ecrã do monitor, o espectro de refletância de cada pixel de cada imagem, após algumas correções óticas descritas noutros estudos^{66,67}, foi convertido em valores triestímulos, assumindo o observador padrão 1931, que por definição usa o espaço cromático CIE 1931 e 2° de campo visual, e o iluminante CIE D65²⁷.



Figura 3.8: Monitor GDM-FW900 Trinitron Colour Graphic Display (Sony Corp., Japão). (Retirado de [7])



Figura 3.9: Gerador de Estímulos Visuais VISAGE (CRS-Cambridge Research System, Rochester, Reino-Unido).

Todos os observadores foram sujeitos às mesmas condições experimentais e visuais, tal como mostra o esquema da Figura 3.10. A experiência foi executada numa sala completamente escura, fazendo com que a imagem apresentada no monitor fosse o único estímulo visível, com o observador parcialmente adaptado ao escuro. O observador ficava sentado a cerca de 1 metro do monitor em que a imagem subtendia um ângulo visual de 8,1 graus. Toda a experiência foi realizada em condições binoculares de maneira a replicar uma situação de observação real. Todos os observadores utilizaram uma armação de prova para garantir que todos eles tinham o mesmo campo visual. A armação de prova continha a refração habitual do observador para não alterar a percepção cromática relacionada com a graduação e/ou tipo de lente utilizada. Emétopes utilizavam lentes com -0,12 dioptrias de potência de modo a que todos os observadores visualizassem o estímulo através do mesmo meio (mesmo tipo e material de lentes). Estas condições experimentais foram as mesmas utilizadas na experiência 1 e na experiência 2, diferindo apenas na tarefa do observador e no modo como o estímulo era apresentado.

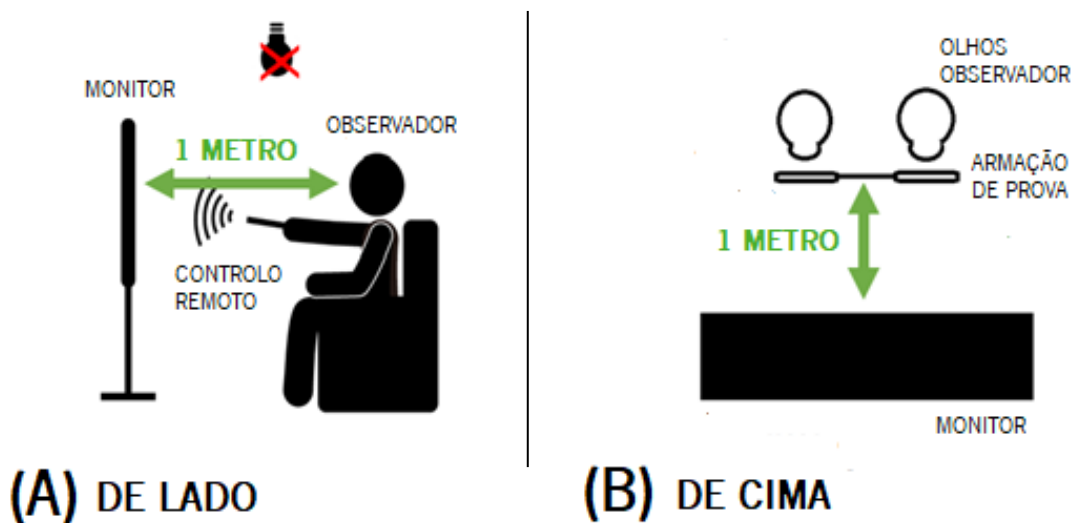


Figura 3.10: Esquema de montagem da experiência psicofísica. Montagem experimental numa perspetiva lateral (esquema (A)) e vista de cima (esquema (B)). (Nota: esquema não está à escala).

❖ Tarefa do Observador e Desenho Experimental

Nenhum dos observadores tinha conhecimento da imagem a utilizar, do efeito das simulações nem que tipo de modificações poderia encontrar, apenas conseguiam ver a composição cromática da imagem a alterar, sendo a sua única tarefa identificar as alterações e

selecionar a distância desejada, que deveria corresponder à imagem mais natural. Não foi estipulado limite de tempo em nenhuma das experiências. A experiência 2 era sempre executada posteriormente à experiência 1, para que o observador não fosse influenciado na sua resposta, já que a experiência 2 se iniciava com a imagem original.

➤ Experiência 1

Nesta primeira experiência o objetivo era avaliar a capacidade de os observadores encontrarem a imagem mais natural de um conjunto de imagens alteradas cromaticamente para diferentes distâncias e correspondente efeito atmosférico. A tarefa do observador passava por selecionar a imagem que lhe parecesse ser a mais natural, utilizando um controlo remoto que permitia a livre circulação sem restrições prévias, e sem se identificar o sentido para qual se dirigia a sequência de distâncias simuladas, incremento ou diminuição da distância de observação.

A primeira imagem que aparecia no ecrã correspondia a uma distância aleatória. Ou seja, o observador tinha um ponto de partida para seleção de cada imagem diferente. Apesar do início aleatório, as imagens que apareciam subsequentemente no ecrã, quer incrementando a distância simulada, quer diminuindo, mantinham sempre a mesma distância entre elas, sendo este intervalo mantido constante em todas as simulações. Assim, para o observador fazer a sua escolha, era necessário percorrer todas as 45 imagens simuladas para as diferentes imagens de observação da sequência, apresentadas num ciclo infinito para eliminar todas as pistas visuais que informavam onde se encontravam os limites do teste. Se o limite da distância simulada fosse atingido, a distância simulada mais próxima, conforme o sentido, seria apresentada no monitor. O varrimento era feito através de um controlo remoto, com o qual surgia uma nova simulação a cada clique. Cada imagem foi testada 3 vezes e a sua ordem de apresentação era aleatória. As imagens surgiam em distâncias simuladas aleatórias e a sua ordem de apresentação era também aleatória para limitar potências pistas que o observador pudesse utilizar para selecionar a imagem mais natural, que não fossem as pistas cromáticas. A própria seleção da distância simulada pelo mesmo botão possuía uma direção aleatória, ou seja, ao carregar num mesmo botão a direção da distância simulada da imagem apresentada, face à anterior, poderia ser de aumento ou diminuição da distância.

➤ Experiência 2

Na segunda experiência não foram dadas nenhuma restrições, o teste consistia em estimar, para cada imagem natural e para cada observador, o limiar de detecção de quaisquer alterações percebidas em relação à imagem original, ou seja, o intervalo no qual a imagem era considerada natural, ao iniciar com a imagem original. Neste caso a tarefa do observador passava por selecionar a imagem que deixava de lhe parecer natural, utilizando, também, um controle remoto.

Esta experiência iniciava-se sempre com a imagens natural real, correspondente à distância de simulação de 0 metros, o que significa que o primeiro estímulo apresentado era a imagem original com o conteúdo visual cromático original. O varrimento apenas poderia ser feito no sentido decrescente ou crescente, e o observador desconhecia qual direção estava a ser testada no momento. Como o teste era unidirecional o observador não poderia voltar à distância simulada anterior. Não foram impostos limites de distâncias simuladas existentes, como tal, não existia máximo nem mínimo para as distâncias simuladas. Cada imagem foi testada quatro vezes, no entanto, como as alterações eram unidirecionais, duas delas variavam no sentido decrescente e as outras duas no sentido crescente da distância. O mesmo botão de resposta no comando remoto tinha também uma direção aleatória, podendo aumentar ou diminuir a distância simulada.

3.3.3. Análise Estatística de Resultados

Os resultados foram analisados em intervalos de 100 metros e a sua frequência de seleção foi calculada. A análise estatística foi processada através do *software* “OriginPro” versão 9 (OriginLab, Northampton, Massachusetts, EUA).

Após a representação gráfica da frequência de resposta de todos os observadores, esses resultados foram ajustados usando a função *Pseudo-Voigt*. Esta função foi utilizada por ser a que melhor se ajustava aos resultados, considerando o coeficiente de correlação do ajuste da curva aos dados. A função *Pseudo-Voigt* resulta da combinação linear entre as funções *Guassiana* e *Lorentziana*, sendo expressa pela seguinte equação⁷⁸:

$$y = y_0 + A \left[m_u \frac{2}{\pi} \frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2} + (1-m_u) \frac{\sqrt{4 \ln 2}}{\sqrt{\pi} w} e^{-\frac{4 \ln 2}{w^2} (x-x_c)^2} \right] \quad (3)$$

Na função *Pseudo-Voigt* - y_0 representa os valores fora do limite normal (“offset”); x_c o centro da função; A a área; w a largura a meia altura e o m_u o fator forma.

Nos casos em que a função anterior não se adequava, utilizou-se a função *Gauss*. A função *Gauss* é uma versão da função *Gaussiana*, representada pela equação⁷⁹:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi}/2} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (4)$$

Na função *Gauss* - y_0 representa os valores fora do limite normal (“offset”); x_c o centro da função; A a área; w a largura a meia altura e o m_u o fator forma.

Para estimar o grau de correlação entre a distância de observação e as características cromáticas da imagem foi utilizado o coeficiente de correlação.

Para melhor avaliar qual as propriedades cromáticas para cada uma das distâncias simuladas ajustaram-se os dados a uma curva. A que melhor resultados de ajuste devolveu foi a curva não linear exponencial, com a seguinte fórmula⁸⁰:

$$y = y_0 + A e^{R_0 x} \quad (5)$$

Na função Exponencial - y_0 representa os valores fora do limite normal (“offset”); A o valor inicial; R_0 a taxa de crescimento.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização da Amostra de Observadores

Para este estudo foram recrutados 54 observadores, seguindo os critérios de seleção mencionados anteriormente. Destes, 41 observadores eram do género feminino (75,93%) e 13 observadores (24,07%) do género masculino (Figura 4.1). Os observadores tinham idades compreendidas entre os 19 e 35 anos (média de idade de 21,61 e desvio-padrão de $\pm 3,03$ anos) (Figura 4.2). No total, 26 observadores eram emetropes (48,15%) e utilizaram lentes de -0,12D na armação de prova, durante a realização de toda a experiência.

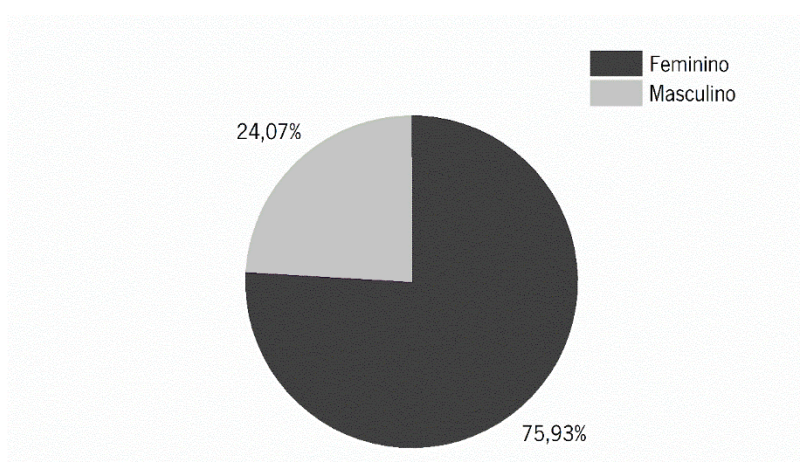


Figura 4.1: Percentagem dos gêneros feminino (cinza escuro) e masculino (cinza claro) da amostra de observadores que participaram neste estudo. (n=54)

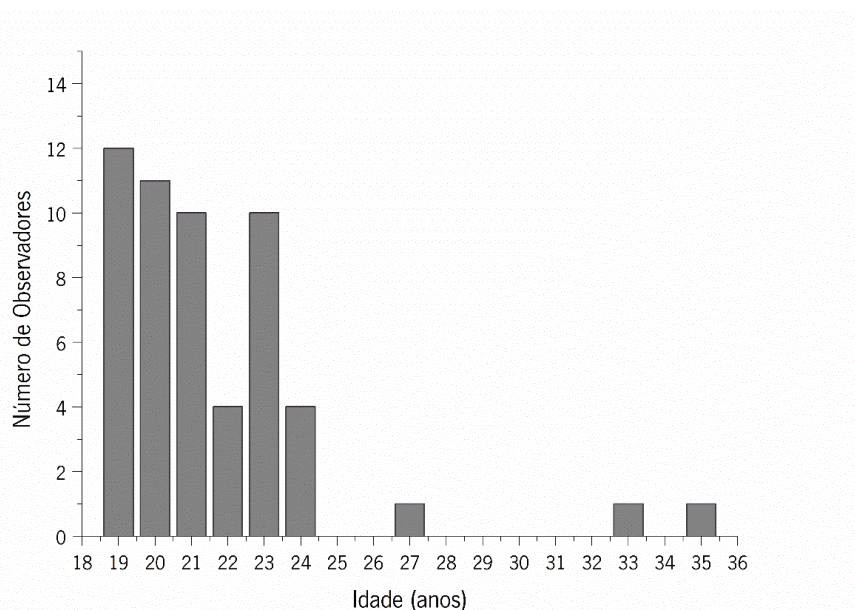


Figura 4.2: Frequência de idades dos observadores que participaram neste estudo. (n=54)

4.2. Análise de Imagens: Variações Cromáticas segundo a Distância de Observação

Para melhor caracterizar as propriedades cromáticas das imagens utilizadas, foi feita uma avaliação das alterações cromáticas de cada imagem de cenários naturais complexos usadas na experiência em função da distância de observação simulada. Os parâmetros avaliados foram a variação do volume ocupado pelas coordenadas cromáticas no espaço de cor CIELAB, o número de cores distinguíveis correspondente (Figura 4.3) e ainda as diferenças da média das coordenadas cromáticas em CIELAB entre as distâncias simuladas extremas, -200 e 2000 metros (Figura 4.4).

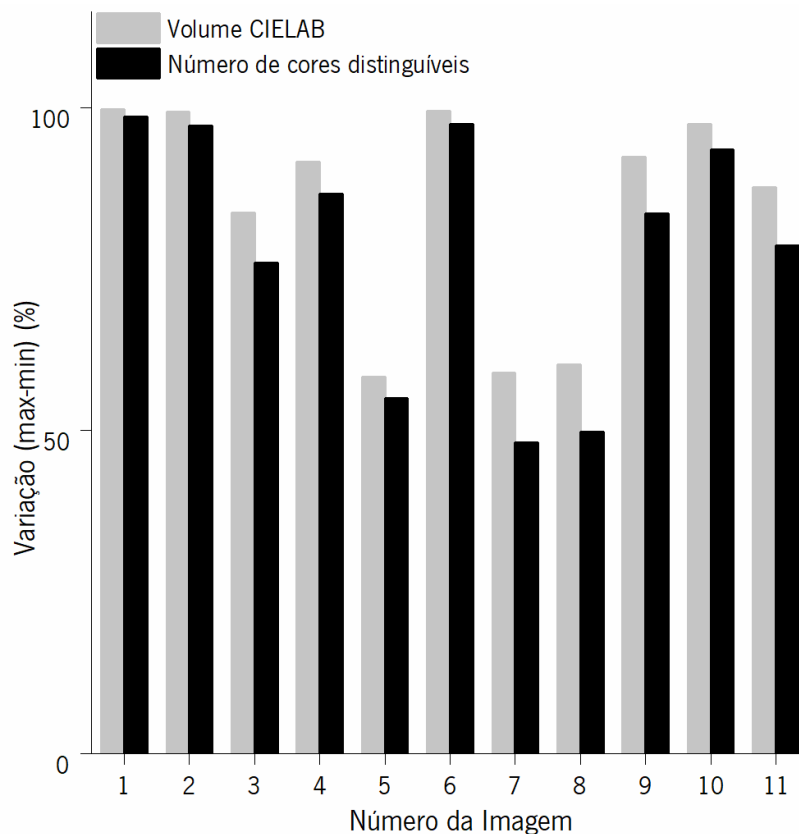


Figura 4.3: Variação entre os pontos extremos de distância de observação (-200 e 2000 metros) para o volume no espaço de cor CIELAB (barra cinza) e o número de cores distinguíveis correspondentes (barra preta).

A partir da Figura 4.3, que compara o número de cores distinguíveis e o volume de cores correspondente nas duas situações limite de visualização. Verifica-se que existem variações entre os extremos das várias distâncias simuladas de observação. Em todas as imagens, a variação do

volume ocupado no espaço cromático entre os dois extremos era superior a 50%, e superior a 75% na maioria das mesmas. Independentemente do facto de ambos os parâmetros seguirem o mesmo padrão em função da distância, em todos os casos, as variações eram maiores para o volume de coordenadas do espaço CIELAB quando comparadas com a porção de cores distinguíveis correspondentes. Tal pode ser explicado pelo facto de o volume de cores em análise ter sido estimado considerando todas as cores de cada imagem independentemente do facto de existirem volumes vazios entre as cores, provocados pelo aumento do volume causado pelo incremento da distância.

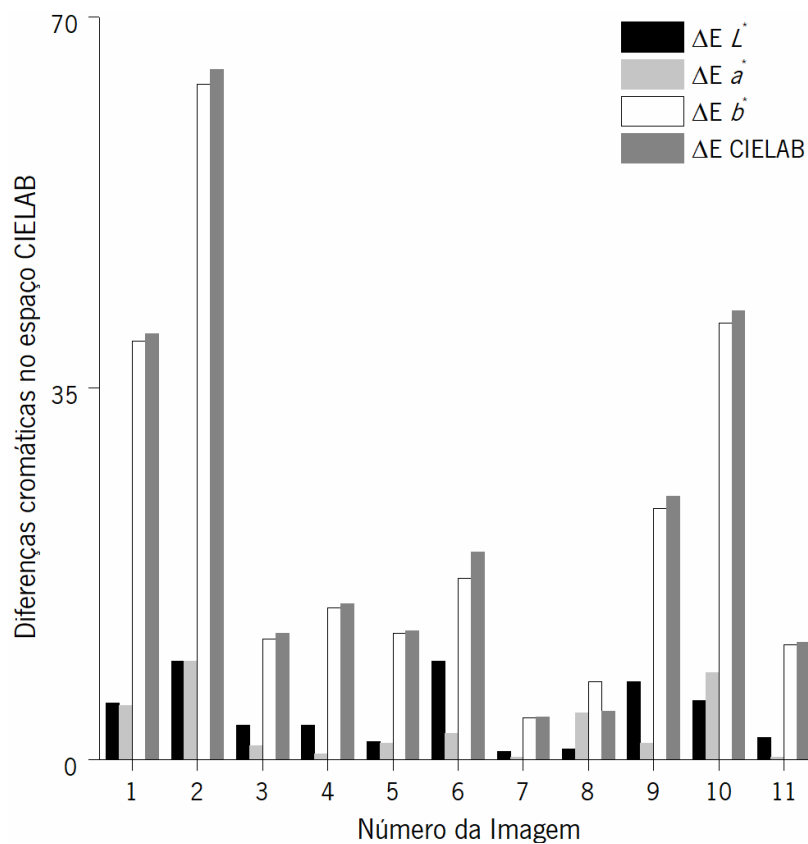


Figura 4.4: Diferenças de cor estimadas a partir da distância Euclidiana (ΔE) de todas as imagens em função da média das coordenadas cromáticas do espaço de cor CIELAB L^* (barra preta), a^* (barra cinza claro) e b^* (barra branca), assumindo o espaço de cor tridimensional CIELAB, simulando as distâncias de observação extremas (-200 e 2000 metros). A barra cinza escura representa a diferença no espaço tridimensional, enquanto que as outras barras representam as diferenças para cada uma das coordenadas individualmente.

As diferenças em CIELAB, estimadas através da distância Euclidiana (ΔE), entre os dois limites de distância observacional, da média das coordenadas L^* , a^* e b^* do total de coordenadas

cromáticas existentes, estão representadas na Figura 4.4. Mostra que existem diferenças cromáticas entre o volume médio, no espaço CIELAB com a distância. As três primeiras barras representam, respetivamente, a distância Euclidiana das coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* . Dessas, b^* parece sofrer mais variações, sendo a coordenada que tem maior impacto e influência na percepção cromática de todas as imagens. As barras de cor cinza mais escuro correspondem à diferença Euclidiana entre os dois volumes extremos, mostrando diferenças cromáticas superiores a cerca de 4 unidades CIELAB em todas as imagens, e no caso das imagens 1, 2 e 10 a variação é superior a 35 unidades. Entre as imagens, aquelas que exibem maior e menor diferença cromática média total (ΔE CIELAB) são as imagens 2 e 7, respetivamente.

4.2.1. Nível de Correlação e Curva de Ajustamento

Foi determinado o coeficiente de correlação e a respetiva curva de ajustamento exponencial (Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7), para a distância de observação e a variação média das características cromáticas de todas as imagens, de modo a avaliar o grau de relacionamento entre as variáveis. Nos diferentes gráficos, as escalas do eixo y não são idênticas.

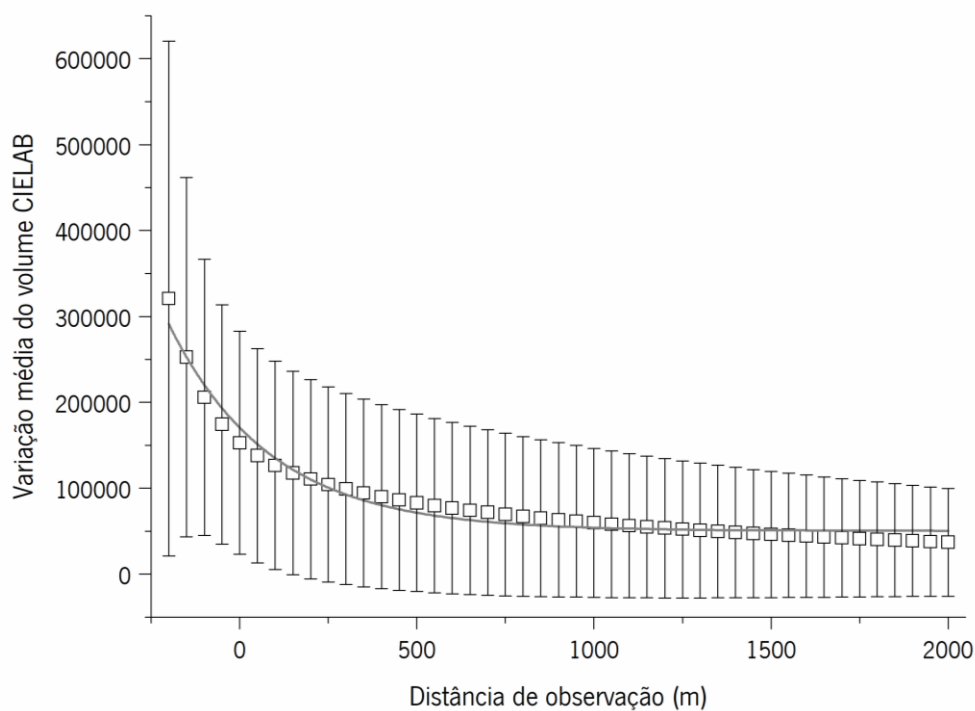


Figura 4.5: Variação média do volume, e desvio-padrão correspondente, em função da distância de observação (metros). A linha cinza corresponde à curva de ajustamento exponencial aos dados, cuja a equação é $y=50228,16+120202,64e^{-0,00347x}$ e o coeficiente de correlação (r^2) é 0,969.

A Figura 4.5 representa a variação média do volume de coordenadas cromáticas no espaço de cor CIELAB segundo a distância de observação, em metros. A linha a cinzento corresponde à curva de ajustamento não linear exponencial, traduzida pela equação $y=50228,16+120202,64e^{-0,00347x}$. O coeficiente de correlação que correspondente a esta relação é $r^2 = 0,969$.

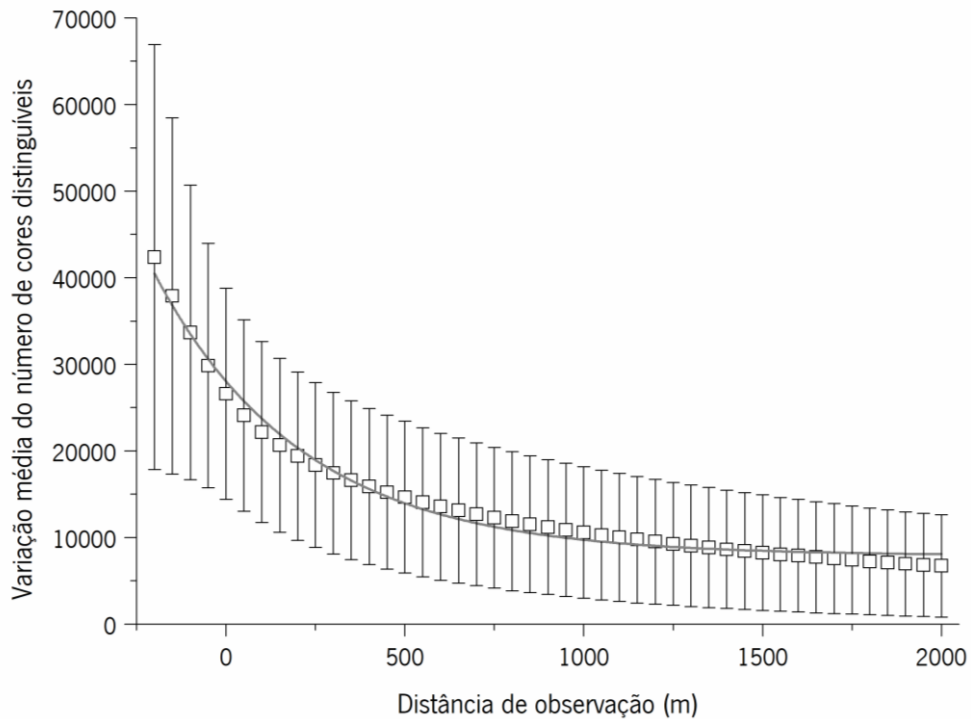


Figura 4.6 Variação média do número de cores distinguíveis, e desvio-padrão correspondente, em função da distância de observação (metros). A linha cinzenta corresponde à curva de ajustamento exponencial aos dados, cuja a equação é $y=7903,04+20134,59e^{-0,00241x}$ e o coeficiente de correlação (r^2) é 0,988.

A Figura 4.6 apresenta a variação média do número de cores distinguíveis de coordenadas cromáticas no espaço de cor CILEAB consoante a distância de observação, em metros. A curva de ajustamento não linear exponencial, representada pela linha a cinzento, tem como equação $y=7903,04+20134,59e^{-0,00241x}$. O coeficiente de correlação que reflete esta relação é de 0,988.

A Figura 4.7 reproduz graficamente a diferença média da média das coordenadas L^* , a^* e b^* no espaço cromático CIELAB conforme a distância de observação, em metros. As linhas preta, vermelha e verde representam as curvas de ajustamento não linear exponencial da média das

coordenadas L^* , a^* e b^* , respetivamente. As curvas de ajustamento exponencial são traduzidas pelas equações:

$$y = 36,97 + (-2,66)e^{-0,00205x} \text{ para } L^* ;$$

$$y = (-1,10) + (-1,55)e^{-0,0018x} \text{ para } a^* ;$$

$$y = (-1,02) + 13,14e^{-0,00197x} \text{ para } b^* .$$

O coeficiente de correlação que caracteriza a correlação com a distância de observação é de 0,992 para L^* , 0,993 para a^* e 0,986 para b^* .

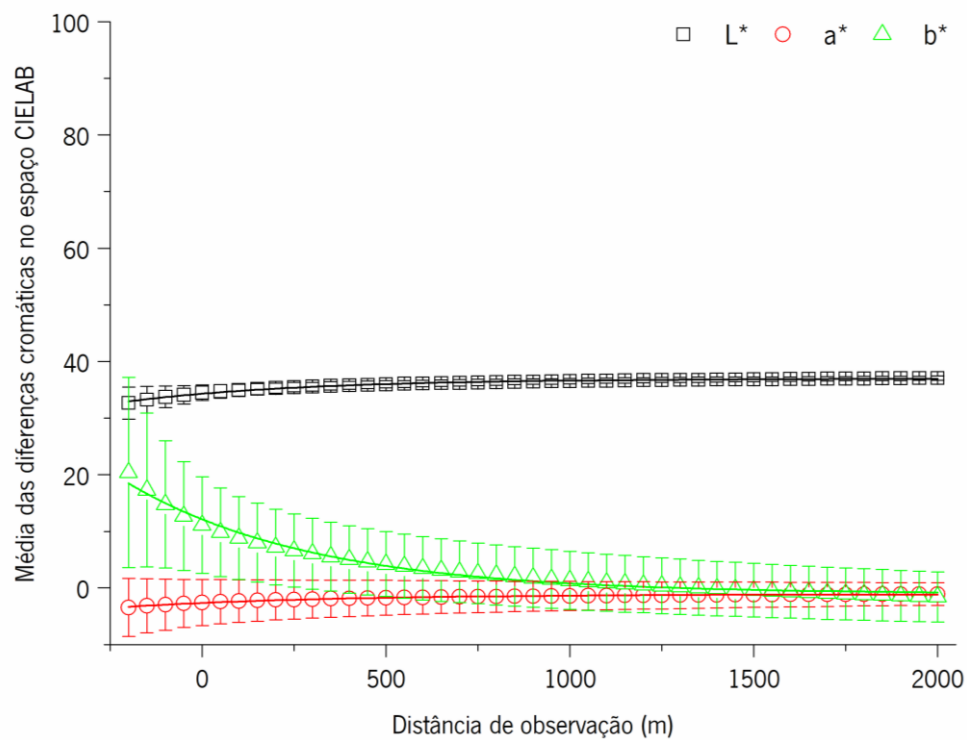


Figura 4.7: Diferenças no espaço de cor CIELAB segundo as coordenadas cromáticas L^* (quadrados pretos), a^* (círculos vermelhos) e b^* (triângulos verdes), e respetivo desvio padrão, em função da distância de observação (metros). A linha corresponde à curva de ajustamento exponencial às coordenadas cromáticas L^* (linha preta), a^* (linha vermelha) e b^* (linha verde), cujas as equações estão descritas no texto anterior e o coeficiente de correlação (r^2) é de 0,992, 0,993 e 0,986, respetivamente.

4.2.2. Erro Total Associado

Para cada imagem hiperespectral, utilizada nesta experiência psicofísica, poderia existir um erro associado à representação cromática entre a cor pretendida, aquela que se queria simular, e a cor obtida através do sistema VISAGE e representada no monitor. Caso a cor apresentada estivesse dentro do *gamut* de cores do monitor, esta era representada sem problemas. Caso contrário, a cor representável mais próxima dentro do *gamut* era utilizada para substituir a pretendida. Esse erro, derivado dessa diferença, foi estimado para todas as cores em que não foi possível representar exatamente a cor pretendida.

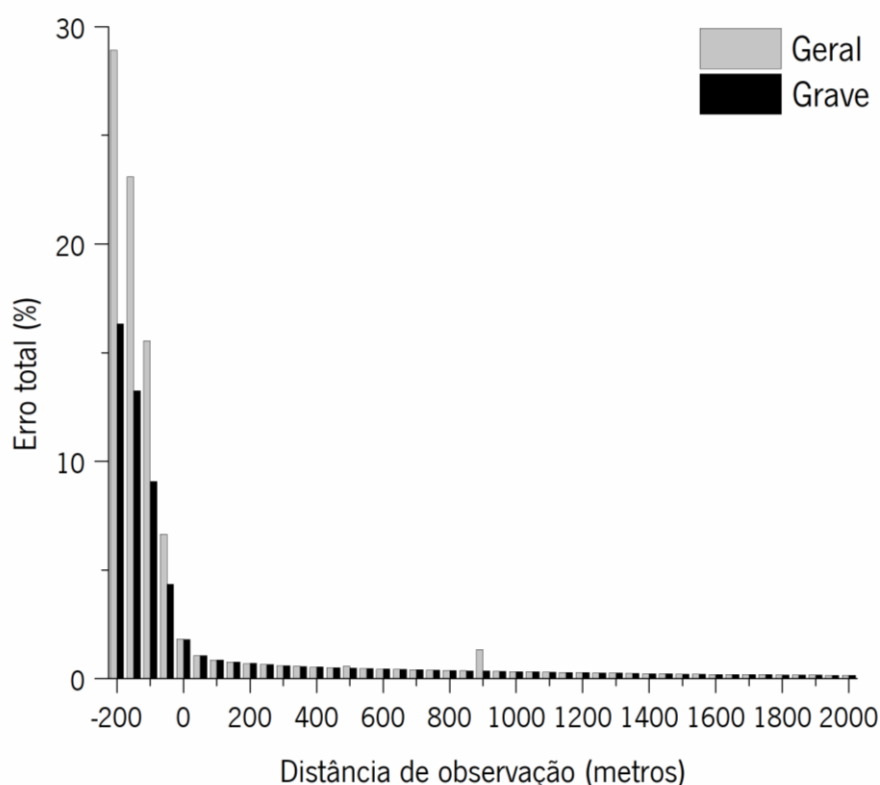


Figura 4.8: Erro total geral médio (%) de todos os pixels com algum erro (barras cinza) e erro total grave médio (%) de todas as imagens ignorando os pixels com $L < 2 \text{ cd/m}^2$ (barras pretas), em função da distância simulada de observação, em metros.

A Figura 4.8 representa graficamente a distribuição da percentagem de erro total médio, de todos os pixels de todas as onze imagens hiperespectrais, associado a cada distância de observação simulada, em metros. Quanto à distribuição, constata-se que a percentagem de erro

total aumenta com a diminuição da distância observacional e que considerando o incremento da distância simulada a partir da distância de zero metros, essa percentagem é muito baixa quando comparada com as distâncias negativas e tem tendência a reduzir. Também se verifica que a percentagem de erro geral (barras cinzas), que considera todos os pixéis de cada imagem que contenham algum erro, é superior à percentagem de erro grave (barras pretas), que abrange apenas os pixéis com luminosidade superior a 2 cd/m^2 , ignorando os restantes abaixo desse limite. Essa diferença aumenta significativamente para distâncias de observação abaixo dos 0 metros, dada a expansão do volume das cores para lá do possível de representar no gamut do ecrã do monitor. Esta estimativa foi tida em conta por se considerar que cores abaixo de 2 cd/m^2 seriam tão escuras quando comparadas com as restantes cores que percepção do erro associado seria desprezável.

4.3. Efeito Atmosférico na Composição Cromática de Imagens Complexas

Foram avaliadas as repostas dos observadores quando submetidos ao estímulo descrito anteriormente. A experiência psicofísica foi dividida em duas sub-experiências (Experiência 1 e Experiência 2), com tarefas, estímulos iniciais e desenhos experimentais diferentes.

4.3.1. Experiência 1

Na Experiência 1 a tarefa do observador era de escolher a imagem mais natural das 45 opções disponíveis. A imagem apresentada inicialmente era selecionada de forma aleatória. Foi determinada a frequência de resposta para todos os observadores e imagens, para cada distância de observação.

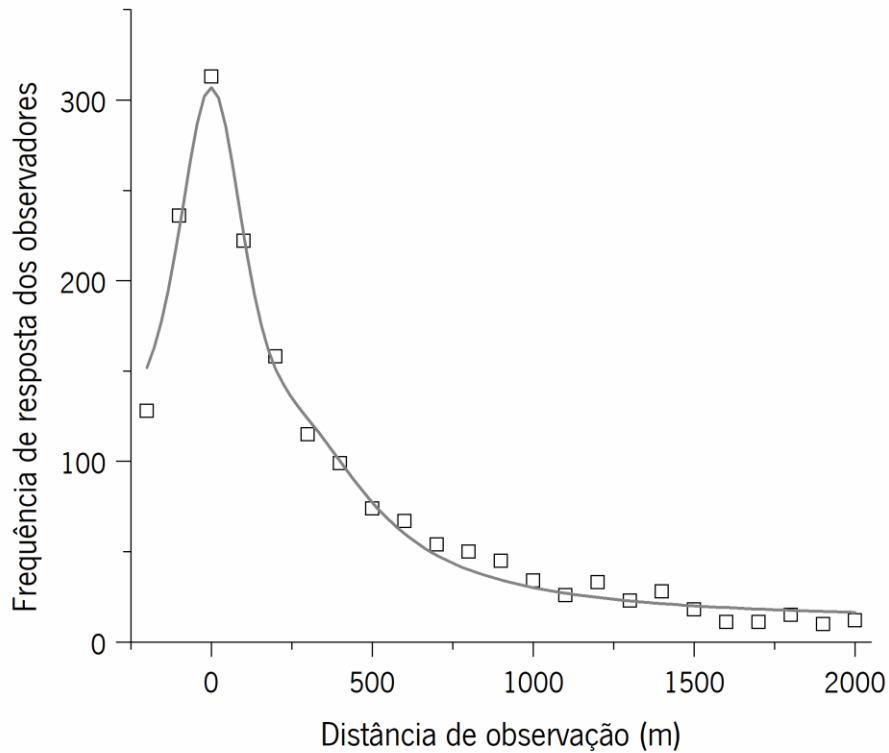


Figura 4.9: Frequência de resposta de todos os observadores em função da distância simulada de observação, em metros, para todas as imagens de cenários naturais (quadrados). A linha cinza representa a função *Pseudo-Voigt* ajustada aos resultados considerando todas as imagens, em que o seu máximo se encontra a $-0,90 \pm 5,39$ metros.

A Figura 4.9 representa a frequência determinada a partir das respostas de todos os observadores e imagens segundo as várias distâncias de observação, em intervalos de 100 metros (quadrados), para todas as imagens de cenários naturais utilizadas neste estudo. A linha cinza corresponde ao ajuste da função *Pseudo-Voigt* aos resultados. A partir dessa linha é possível descobrir a posição do seu pico máximo, considerando o eixo das abscissas. Determinou-se que a posição máxima deste ajuste está a uma distância de observação correspondente a $-0,90 \pm 5,39$ metros (Tabela 4.1). Esse máximo corresponde à maior frequência de respostas dadas pelos observadores, que está relativamente perto da imagem original sem alterações cromáticas.

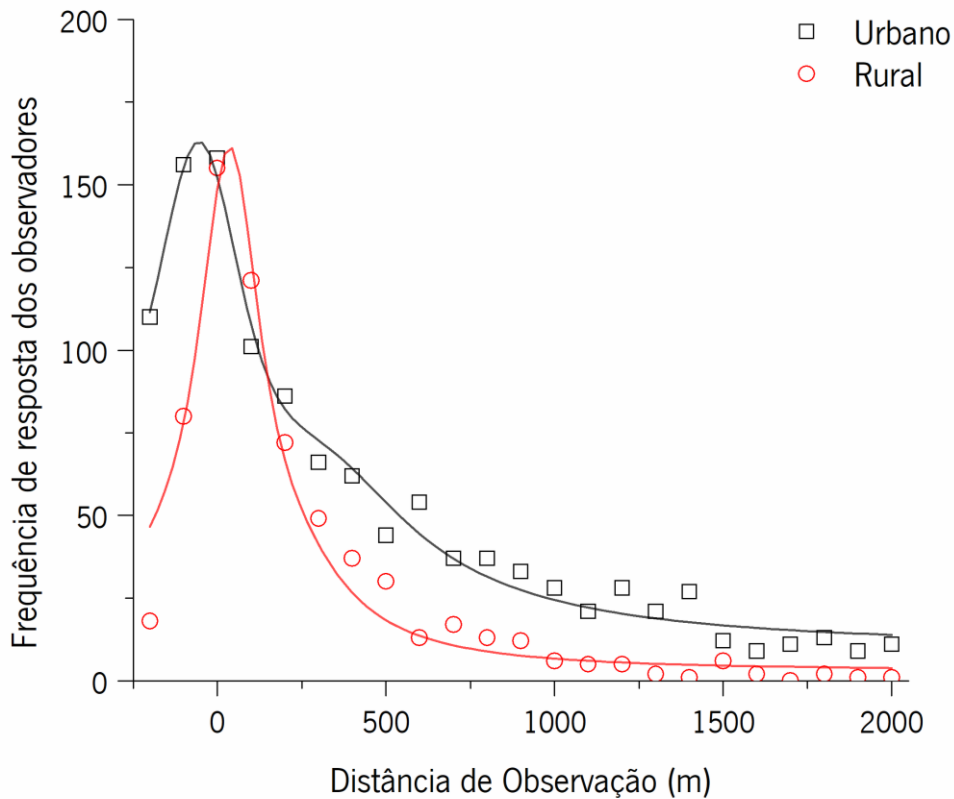


Figura 4.10: Frequência de resposta dos observadores em função da distância de observação simulada (metros) para as imagens de cenários urbanos (quadrados pretos) e rurais (círculos vermelhos). As linhas representam o ajuste da função *Pseudo-Voigt* aos resultados, considerando as imagens de cenários urbanos (linha preta) e rurais (linha vermelha). O máximo da função de ajuste *Pseudo-Voigt* é a $-54,38 \pm 8,16$ metros e $36,91 \pm 7,43$ metros, para cenários urbanos e rurais respectivamente.

Dividiram-se os dados obtidos e representados na figura anterior em cenários rurais (a vermelho) e urbanos (a preto). A Figura 4.10 representa, para as várias distâncias de observação simuladas, em intervalos de 100 metros, a frequência determinada com base nas respostas de todos os observadores para as imagens de cenários naturais urbanos (quadrados pretos) e cenários rurais (círculos vermelhos). As linhas representam o ajuste da função *Pseudo-Voigt* aos resultados das imagens representativas de cenários urbanos (linha preta) e cenários rurais (linha vermelha), têm os seus máximos, consoante o eixo horizontal, a uma distância de observação de $-54,38 \pm 8,16$ metros para cenários urbanos e de $36,91 \pm 7,43$ metros para cenários rurais (Tabela 4.1). Ao contrário das imagens de cenários rurais, as imagens de cenários urbanos mais vezes selecionadas são mais saturadas, correspondendo a distâncias mais próximas que a original.

Tabela 4.1: Máximo da função de ajuste (*Pseudo-Voigt* ou *Gauss*) e desvio-padrão associado para todas as imagens, imagens de cenários urbanos e rurais e para cada uma das imagens individualmente. Valores negativos significam frequências de seleção maiores para imagens mais próximas que o original.

Imagens	Naturalidade	
	Função de Ajustamento	Máximo \pm Desvio-Padrão (metros)
Todas as imagens	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-0,90 \pm 5,39
Cenários Urbanos	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-54,38 \pm 8,16
Cenários Rurais	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	36,91 \pm 7,43
Imagem 1	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	13,82 \pm 18,81
Imagem 2	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	106,99 \pm 12,58
Imagem 3	<i>Gauss</i>	-75,10 \pm 17,82
Imagem 4	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-141,64 \pm 8,32
Imagem 5	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	53,58 \pm 29,62
Imagem 6	<i>Gauss</i>	7,91 \pm 7,31
Imagem 7	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	16,20 \pm 42,54
Imagem 8	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-10,48 \pm 32,03
Imagem 9	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-7,91 \pm 14,40
Imagem 10	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	61,69 \pm 16,97
Imagem 11	<i>Pseudo-Voigt</i> 1	-87,74 \pm 20,92

No ANEXO 4: **Representação Gráfica dos Resultados Individuais de cada imagem utilizada durante a Experiência Psicofísica** encontram-se os gráficos de frequência de resposta segundo a distância de observação percebida para cada imagem individualmente.

4.3.2. Experiência 2

A tarefa do observador nesta experiência 2 consistia em selecionar a primeira imagem que lhe parecesse não natural, partindo da imagem original, à distância de 0 metros. Foi, novamente, calculada a frequência de resposta de todos os observadores para cada imagem e para as distâncias de observação simuladas crescentes e decrescentes.

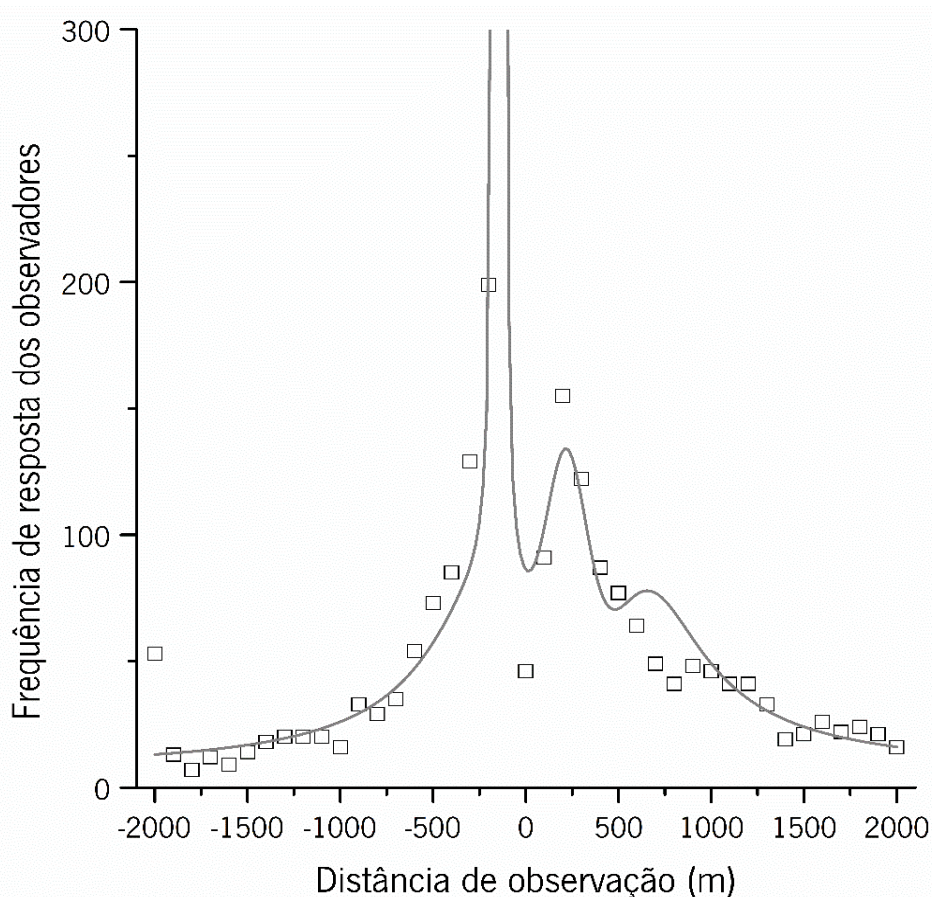


Figura 4.11: Frequência de resposta dos observadores como função dos limiares de distância de observação simulada (metros), para todas imagens. A linha representa a função *Pseudo-Voigt* adequada aos resultados das 11 imagens. Verificam-se dois picos máximos, aos $-145,77 \pm 77,13$ metros e aos $218,47 \pm 25,97$ metros de distância de observação. O pico máximo para a distância simulada decrescente não aparece representado dada a escala do gráfico, no entanto a posição do máximo foi registada.

A frequência de resposta dos observadores para os limiares de deteção de naturalidade das 11 imagens de cenários naturais em função da distância de observação simulada, em metros, está representada na Figura 4.11 (quadrados). Tal como esperado, na representação gráfica existem dois picos máximos de seleção, uma vez que os limiares foram testados no sentido positivo e negativo. Cada imagem foi testada duas vezes para cada sentido de distância simulada. A linha cinza representa o ajuste da função *Pseudo-Voigt* para os resultados de todas as imagens, com picos a $-145,77 \pm 77,13$ metros e a $218,47 \pm 25,97$ metros, no sentido decrescente e crescente, respetivamente.

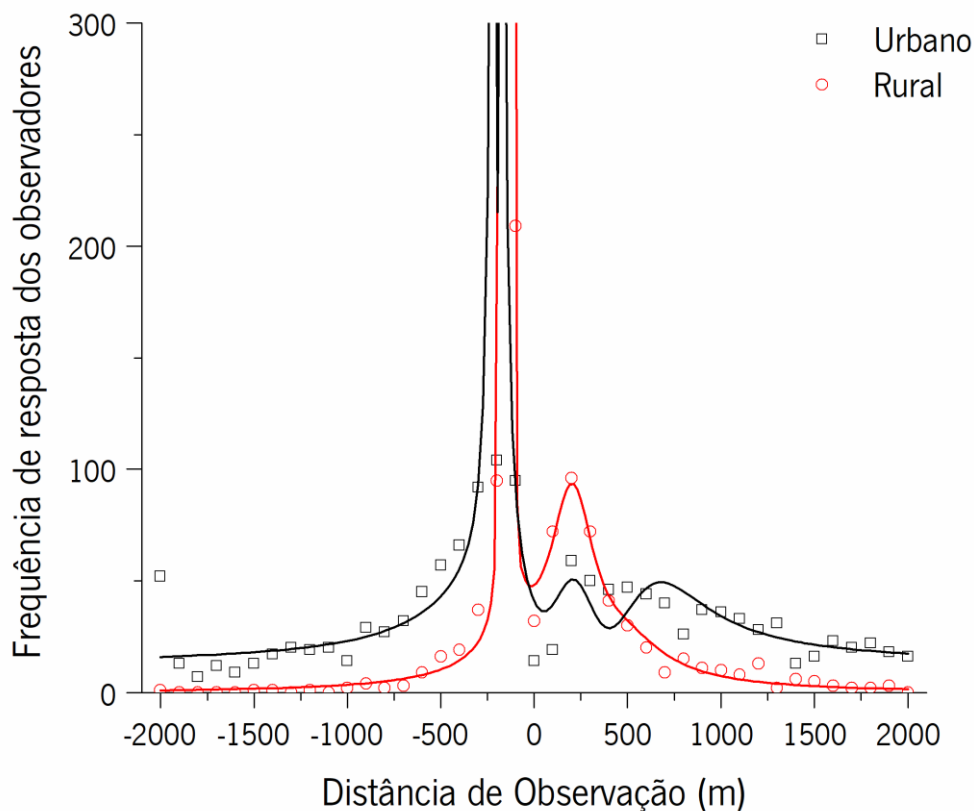


Figura 4.12: Frequência de resposta dos observadores em função dos limiares de distância de observação simulada (metros), para as imagens de cenários urbanos (quadrados pretos) e rurais (círculos vermelhos). A linha representa a função *Pseudo-Voigt* ajustada aos resultados das imagens de cenários urbanos (linha preta) e rurais (linha vermelha). Verificam-se dois picos máximos, para o limiar de distância de observação simulada, aos $-196,75 \pm 10,30$ metros e aos $211,26 \pm 41,65$ metros para cenários urbanos e aos $-146,74 \pm 48,17$ metros e aos $203,34 \pm 10,74$ metros para cenários rurais.

Separando todos os dados em cenários urbanos e rurais, estão representadas na Figura 4.12 as frequências de resposta em função do limiar de distância de observação simulada, para as imagens de cenários urbanos (quadrados pretos) e de cenários rurais (círculos vermelhos). A linha resulta do ajuste da função *Pseudo-Voigt* com os resultados das imagens de cenários urbanos (linha preta) e cenários rurais (linha vermelha). Uma vez que o limiar foi estimado para distância de observação no sentido positivo e negativo, existem dois picos de valor máximo, segundo o eixo das abscissas horizontal, para cenários urbanos aos $-196,75 \pm 10,30$ metros e aos $211,26 \pm 41,65$ metros e para os cenários rurais aos $-146,74 \pm 48,17$ metros e aos $203,34 \pm 10,74$ metros.

Os resultados obtidos na experiência 1 estão dentro do intervalo determinado pela experiência 2.

Tabela 4.2: Valor máximo, e desvio-padrão correspondente, da função de ajuste *Pseudo-Voigt*, no sentido decrescente e decrescente do limiar da distância de observação percebida, para todas as imagens e imagens de cenários urbanos e rurais.

	Limiar de Naturalidade	
	Sentido Decrescente (-)	Sentido Crescente (+)
Imagens	Máximo \pm Desvio- Padrão (metros)	Máximo \pm Desvio- Padrão (metros)
Todas as imagens	-145,77 \pm 77,13	218,418,47 \pm 25,97
Cenários Urbanos	-196,75 \pm 10,30	211,26 \pm 41,65
Cenários Rurais	-146,74 \pm 48,17	203,34 \pm 10,74

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste estudo procurou-se estimar a capacidade do olho humano, em condições normais, de recuperar informação visual cromática de imagens de cenários naturais complexos, degradadas pelo efeito atmosférico, assumindo diferentes distâncias de observação. Para isso, realizou-se uma experiência psicofísica, na qual se utilizaram uma série de imagens hiperespetrais de cenários naturais, rurais e urbanos, cromaticamente alteradas simulando o efeito atmosférico a várias distâncias de observação, sendo a tarefa dos observadores, com visão das cores normal, selecionar a opção que lhes parecesse mais natural. Analisando a frequência de resposta dos observadores em função da distância observacional percebida, verificou-se que a distância mais vezes selecionada estava muito próxima dos zero metros e dentro do intervalo de naturalidade estimado. Isto é, em média, os observadores selecionaram a imagem mais próxima do original, correspondendo à informação de cores real. Nenhum dos observadores conhecia as imagens utilizadas durante a experiência, logo nenhum deles sabia qual seria o conteúdo cromático original e considerado real.

O efeito atmosférico faz com que os objetos ou paisagens pareçam mais esbranquiçadas e azuladas, diminuindo a visibilidade e a informação cromática^{54,55}. Este efeito aumenta com o incremento da distância observacional^{25,54,81}. Como tal, a resposta do observador pode ser influenciada uma vez que a percepção de cores menos saturadas é uma pista valiosa da posição que deve ser selecionada. Isto acontece para distâncias de observação maiores, mas não ocorre em limites de visualização inferiores, perto da imagem original com a informação cromática original, onde existem maior parte das respostas dadas pelos observadores, abaixo dos limiares de naturalidade.

Durante o decorrer da experiência, mesmo não sabendo qual o efeito em questão, nem conhecendo a imagem apresentada no monitor, todos os observadores foram capazes de detetar diferenças e variações consoante clicavam no controlo remoto, demonstrando que mesmo apresentada uma imagem alterada ao observador, este consegue perceber se é original ou não.

A utilização de imagens hiperespetrais de cenários naturais, isto é, imagens com informações espetrais em cada pixel de cada uma das imagens, foi primordial neste estudo, uma vez que a metodologia usada necessita dessa informação de modo a fornecer simulações precisas e eficazes do efeito atmosférico com a distância de observação. Segundo a equação 1, o impacto do tamanho das partículas existentes na atmosfera na distância entre o observador e

o cenário depende do comprimento de onda. Simulações deste género não teriam sido tão precisas, se se tivessem utilizado imagens RGB comuns, mesmo que fosse atingida uma boa correlação⁸², já que a memória de cor adequada depende do iluminante utilizado, mesmo que um iluminante específico não seja capaz de oferecer saturação de cor suficiente para que as cores sejam recuperadas como cores naturais⁸³. A naturalidade terá um impacto limitado nas imagens de cenários naturais impressas em RGB⁴⁵, e não contribuirá para a *performance* da memória de identificação, o que parece mostrar a importância da informação do perfil espectral neste tipo experiência psicofísica.

5.1. Variação Cromática e Distância de Observação

Tal como era esperado, cada uma das 11 imagens sofreu alterações visuais consoante a distância de observação percebida a que estava associada (Figura 3.6), mantendo a sua composição estrutural inalterada. À medida que a distância ia mudando, alteravam-se as características cromáticas, tais como o volume ocupado (Figura 3.7) e a diversidade de cores correspondentes (Figura 4.3), bem como a posição do centro do volume médio das coordenadas L^* , a^* e b^* (Figura 4.4).

Com o aumento da distância, a quantidade de luz vai atenuando à medida que interage com as partículas da atmosfera, o que causa uma diminuição do volume e do número de cores distinguíveis, tornando as cores menos saturadas^{25,46,50-52,54,55,59}. As variações do volume e número de cores discerníveis neste trabalho coincidem com aquilo que é encontrado na literatura. Para além disso, parece que com o aumento do volume de cores também existe um aumento da diversidade de cores segundo a distância, mas não ao mesmo nível. Isto pode ser explicado pelo facto de a distribuição das coordenadas cromáticas não ser uniforme em todo o seu volume, isto é, não têm a mesma densidade em toda a sua constituição⁸⁴. Por isso mesmo, as alterações no volume de cor não são uniformes no seu todo, conseqüentemente, mudanças no volume de coordenadas cromáticas CIELAB podem não ser proporcionais às variações do número de cores distinguíveis correspondentes.

As coordenadas cromáticas L^* , a^* e b^* correspondem às variações de luminância entre claro-escuro, variações de tonalidade entre verde-vermelho e azul-amarelo, respetivamente. Em todas as imagens, essas coordenadas sofreram modificações com a distância de observação e a coordenada com maior diferença cromática foi a b^* . Este fenómeno está de acordo com aquilo

que é expectável acontecer na natureza, uma vez que o efeito atmosférico com o incremento da distância, as principais alterações cromáticas são o aumento do brilho e a tendência para os tons de azul (associado à coordenada b^*)^{54,55,59}.

Na natureza, a saturação cromática⁵⁹ e o número de cores relativas⁵⁵, assim como a média da distância euclidiana das coordenadas L^* , a^* e b^* ⁵⁴ ao centro do espaço CIELAB diminui exponencialmente com o aumento da profundidade ótica, também designada de distância de observação. Neste estudo, com o aumento da distância de observação, ocorre uma redução exponencial, tanto no volume de cores em CIELAB como no número de cores distinguíveis correspondentes (Figura 4.5 e Figura 4.6). Semelhante aos parâmetros volume e número de cores distinguíveis, com o incremento da distância observacional existe uma diminuição exponencial da média das coordenadas b^* (Figura 4.7). Estes resultados suportam o perfil de variação exponencial como relação entre cor e distância observacional, coincidindo com aquilo que se encontra na literatura^{54,55,59}. As alterações das restantes coordenadas, L^* e a^* , são menores quando comparadas com b^* , e por isso, embora tenham um comportamento inverso a b^* , as variações de L^* e a^* não são tão significantes.

Para avaliar o grau de relacionamento entre as variáveis distância de observação, em metros, e variações médias do volume CIELAB, ou variações médias do número de cores distinguíveis correspondentes e ou diferenças cromáticas da média das coordenadas L^* , a^* e b^* , foi determinado o coeficiente de correlação e traçada a curva de ajuste não linear exponencial, por ser aquela que melhor se ajustava à distribuição dos dados. Em todos os casos obteve-se um coeficiente de correlação (r^2) elevado e muito perto de 1, o que indica que as variáveis em questão estão relacionadas, existindo concordância entre elas.

Para distâncias de observação simuladas acima de zero metros, o número de pixéis fora do *gamut* de cores é de cerca de $0,46\% \pm 0,66\%$. Em distâncias abaixo de zero metros esse valor aumenta significativamente, uma vez que o nível de cor vai expandindo em direção aos limites do espaço cromático, representado pelo aumento do erro nessa direção (Figura 4.8). Em média, $18,6\% \pm 24,5\%$ dos pixéis está fora do *gamut* de cores, com uma distância à cor que se pretendia representar de 25 unidades de diferença euclidiana, no entanto a maioria destes pixéis pertencem a níveis de luminância abaixo de 2 cd/m^2 . O limite de distância de cores em cenário complexos é de 2,2 unidades em CIELAB⁸⁵, abaixo das 25 unidades de diferença Euclidiana obtido neste estudo. Se se considerar um nível de luminância acima das 2 cd/m^2 , a percentagem de pixéis no exterior

do *gamut* desce para cerca de 10% e a variação de cor passa a ser apenas de 9 unidades. Estes valores são superiores ao limite de discriminação cromática de 2,2. Apesar disso, devido ao facto de os pixéis afetados (correspondentes às cores que não se conseguem representar corretamente) não se agregarem espacialmente, espera-se que o impacto visual resultante seja reduzido, principalmente se se considerar o intervalo onde as imagens foram selecionadas como naturais se encontravam dentro dos limiares estimados, mesmo existindo erros desta magnitude.

O intervalo de opções de resposta disponíveis inclui 45 opções de resposta disponíveis que abrangiam distâncias de observação entre os -200 e 2000 metros, em intervalos de 50 metros, posto isto, o número de opções de resposta era 10 vezes superior para distâncias acima dos 0 metros (40 opções) e menor para distâncias de observação abaixo de 0 metros (4 opções). Este intervalo de opções teve de ser construído desta forma porque para distâncias negativas superiores, como as cores eram mais saturadas, afastavam-se do *gamut* de cores reais e, como os erros cometidos na representação de cor eram sempre superiores, o observador via uma imagem com demasiados erros, tornando as imagens muito artificiais a nível perceptual.

5.2. Experiência Psicofísica

Na experiência 1 estimou-se o valor da distância de observação percebida mais frequentemente selecionada pelos observadores através do valor do pico máximo da função de ajuste *Pseudo-Voigt*.

Os resultados obtidos estão limitados à faixa etária dos observadores em estudo, jovens e maioritariamente alunos do ensino superior.

A posição do máximo obtido através da curva de ajuste ($-0,90 \pm 5,39$ metros) (Figura 4.9), é muito próximo de zero, que corresponde à imagem original sem modificações cromáticas causadas pelo efeito atmosférico. Como o resultado geral, ao fazer a média de todas as imagens, é ligeiramente negativo, significa que os observadores selecionaram imagens ligeiramente mais saturadas do que a original, o que coincide com vários estudos anteriores sobre recuperação de cores partir da memória, tanto através de amostras individuais⁴⁰, como através de objetos familiares com cores familiares sob diferentes iluminantes^{86,87}. Estudos revelaram que a memória de cor é ligeiramente saturada, isto é, existe uma tendência para que as cores guardadas na memória sejam lembradas com maior saturação^{40,41,43}, o que vai de encontro aos resultados

encontrados. Porém, esse resultado não ultrapassa -1 metros, sendo esse ligeiro desvio diminuto perante o número de opções possíveis nesta experiência e ao intervalo de naturalidade definido na experiência 2.

Pode dizer-se que ao acrescentar complexidade às imagens, como é o caso de cenários naturais com formas, texturas e cores prováveis, há uma melhoria da capacidade de recuperação de cor correta através da memória⁴⁴, mas não até que se consiga uma correspondência cromática completa⁴⁵. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que, mesmo que a imagem esteja modificada cromaticamente pelo efeito da atmosfera, os observadores conseguem recuperar a informação cromática original com elevada precisão. Esta precisão e capacidade de recuperação de informação visual de cor pode ter sido potenciada pelo facto de terem sido utilizadas imagens de cenários naturais, com conteúdo familiar encontrado noutras situações e contextos tais como paisagens, plantas, estruturas e objetos comuns ao quotidiano da grande maioria da população, o que torna a tarefa menos difícil, uma vez que é mais fácil recordarem-se da cor, por estarem habituados a estímulos semelhantes pela sua frequência ^{40,41}.

Se se analisarem as imagens de cenários urbanos e cenários rurais separadamente, os resultados são ligeiramente diferentes. Quando comparadas com as imagens originais, as imagens em contexto urbano, requerem cores mais saturadas, uma vez que a posição do máximo da curva de ajuste é negativa ($-54,38 \pm 8,16$), enquanto que as imagens de cenários rurais requerem cores menos saturadas, pois a posição do valor máximo da curva de ajuste é positiva ($36,91 \pm 7,43$ metros), para serem seleccionadas como originais. O facto de a frequência com que surgem as cores naturais que nos rodeiam ser maior em cenários rurais, enquanto que em cenários urbanos, as cores artificiais criadas pelo Homem tendem a ser menos frequentes e, para além disso, mais saturadas, pode ser uma possível explicação para este fenómeno. Esta diferença entre os dois tipos de cenários terá impacto sempre que as cores forem recuperadas a partir da memória^{41,43}. Sabe-se que as imagens tendem a estabilizar na nossa memória quando vistas frequentemente e/ou quanto mais familiar for o seu conteúdo, o que é o caso das cores naturais e não das cores artificiais, que podem colorir os objetos de maneira aleatória, incluindo objetos de cores não naturais ^{43,87-89}. Este raciocínio pode ser intensificado, se considerarmos que com a variação da distância de observação a tonalidade de uma cor não se altera mas sim a sua saturação⁵⁹, indicando que é bem mais fácil classificar cores muito frequentes e familiares como cores naturais e não como cores artificiais, principalmente quando as cores locais têm maior impacto na fixação

e no desempenho da pesquisa visual de cores em cenários naturais^{90,91}. No entanto, considerando todas as opções disponíveis no teste, estes valores são muito próximos do valor original.

Ao observar as representações gráficas dos resultados e respectivas curvas de ajuste *Pseudo-Voigt*, de todas as imagens e para as imagens de cenários urbanos e rurais, é notória a diferença do comportamento dos dados entre o sentido positivo (à direita do pico) e negativo (à esquerda do pico): a queda, da curva de ajuste *Pseudo-Voigt*, é acentuada no sentido negativo (distâncias de observação percebidas negativas) e gradual no sentido positivo (distâncias de observação acima dos 0 metros).

Para complementar a primeira experiência, foi feita uma segunda experiência para estimar o limiar de naturalidade de cada imagem para cada observador, ou seja, determinar quais os limites de mudança cromática natural percebida. A posição dos valores máximos da função de ajuste, equivalem aos extremos do intervalo de naturalidade (de $-145,77 \pm 77,13$ a $218,47 \pm 25,97$ metros). Assim sendo, os valores da resposta com maior frequência, que corresponde à distância de observação percebida mais selecionada, dado pela experiência 1 encontram-se dentro do intervalo de naturalidade. Ao comparar o limiar das imagens de cenários urbanos com as imagens de cenários rurais, as diferenças entre eles não são significativas, tendo um comportamento semelhante ao de todas as imagens em geral, e os valores correspondentes da primeira experiência. Em suma, apesar do resultado não ser completamente coincidente com a imagem original (por não ser exatamente zero metros), está mesmo muito próximo do original e bem posicionado dentro dos limites de mudança cromática percebida para as mesmas imagens, sob as mesmas alterações cromáticas (pela simulação de várias distâncias de observação).

No entanto, todas as representações gráficas das curvas de ajuste apresentadas anteriormente mostram um pico com uma amplitude bem mais elevada para distâncias negativas quando comparado com distâncias positivas, em que o pico é bem mais baixo. Como explicar esta assimetria? Para distâncias negativas as imagens são artificiais, uma vez que existe um aumento do volume de coordenadas cromáticas e, conseqüentemente, as imagens parecem ser mais saturadas do que na realidade são. Com o aumento da saturação das cores, as coordenadas afastam-se do centro (branco) do espaço cromático CIE 1931 e aproximam-se do *locus* espectral, saindo para fora do *gamut* de cores normais e surgindo cores adulteradas, ou seja, menos naturais, devido ao maior número de erros cometidos na representação da imagem, já que não havia limite como na experiência 1, o número erros poderia ser muito elevado. Por conseguinte,

os observadores apresentam maior sensibilidade às variações nessas distâncias e, portanto, selecionavam as opções de distâncias negativas mais próximas do natural (distância observacional de partida), provocando um pico de maior amplitude. O contrário acontecia para as opções que simulavam distâncias de observação positivas, em que as respostas são mais variadas e mais afastadas da distância original, provocando uma maior dispersão de respostas, resultando num pico de menor amplitude e mais alargado. A diferença entre os picos dos limiares, maior para distâncias observacionais simuladas decrescentes e menor para crescentes, pode ser consequência dos erros que surgem com o aumento do erro total associado, causado pelo incremento do número de pixéis fora do *gamut* de cores devido ao à expansão de cores no espaço cromático.

5.3. Vantagens e Limitações

Esta experiência psicofísica, para além de analisar a resposta perante um determinado estímulo tem outras vantagens e, também, algumas limitações.

O procedimento deste estudo é baseado numa simulação computacional que, como vimos anteriormente, simula o efeito atmosférico na visão das cores consoante a distância visualização. Este método é de carácter observacional e não invasivo, sem envolver contacto físico entre o investigador e o observador, propriedades vantajosas uma vez que não põe em causa a integridade do observador e assemelha-se a uma situação real. Por ser uma experiência psicofísica computacional é fácil de alterar e manipular, no sentido em que se podem alterar ou acrescentar parâmetros facilmente, melhorar ou corrigir, na eventualidade de existirem erros e/ou imperfeições, e mais versátil, podendo variar o tipo de estímulo e/ou variações a testar.

Todo o procedimento deste estudo é rápido (demorando, em média e no máximo, cerca de uma hora ao todo), simples de executar e relativamente fácil de perceber e de responder, dado que todos os observadores entendiam qual era sua tarefa e percebiam o efeito ao qual as imagens estavam sujeitas.

Um dos pontos fortes mais importantes deste estudo é o resultado final que, para além de pertencer ao espaço de naturalidade estimado, está perto do valor do estímulo real.

A simulação computacional do efeito atmosférico, em imagens hiperespectrais de cenários naturais utilizada, nesta experiência psicofísica, apenas altera a variável distância de observação

(em metros), mantendo o tipo e a quantidade de partículas inalteradas e supondo que a atmosfera é homogênea no seu todo.

A intensidade do efeito atmosférico depende da quantidade, tamanho e composição das partículas existentes na atmosfera, conseqüentemente, a percepção visual altera em cor, contraste, estrutura, entre outros. Porém, neste trabalho apenas foram analisadas alterações a nível cromático, não avaliando as modificações noutras vertentes, sendo esta uma limitação da metodologia utilizada, mas que poderá ser complementada em trabalhos futuros.

Para realizar a experiência, cada observador tinha de usar uma armação de prova com lentes, com o propósito de eliminar todos os fatores de variabilidade, normalizando e igualando as condições de visualização do teste, para que as respostas fossem comparáveis entre si. Como uma parte deles era emetropes e não usava qualquer tipo de correção poderia sentir-se desconfortável ao usar a armação, podendo influenciar a sua resposta ao estímulo e ter um impacto negativo nos resultados. Mais uma vez, não se espera que esse possível problema tenha conseqüências significativas, dado que o resultado final é quase coincidente com o resultado original, em particular considerando que cada imagem foi testada 3 vezes.

Foram utilizados observadores originários da região do Minho, Portugal para avaliar imagens também na região minhota portuguesa, o que pode melhorar a *performance* a nível de memória de cor. Fica por demonstrar se a utilização de imagens de outras regiões, ou observadores de outras regiões para estas mesmas imagens poderão ter influência nos resultados.

Existem erros associados à representação de cores, no entanto apenas são significativos para distâncias entre 0 e -200 metros. Estes erros causados por pixéis com cores fora do *gamut* derivam da expansão de cores ao nível do espaço cromático, necessário para simular as imagens artificiais para distâncias de observação negativas. Estas distâncias foram acrescentadas à experiência para permitir mais opções de resposta aos observadores.

6. CONCLUSÕES

Existem, efetivamente, alterações das características cromáticas em função da distância entre o observador e o objeto e/ou paisagem. Ao longo das diversas distâncias simuladas de observação na experiência, há variação do volume cromático no espaço CIELAB e do número de cores distinguíveis correspondentes e diferenças na posição da média das coordenadas L^* , a^* e b^* no espaço CIELAB.

Essas variações seguem uma variação exponencial (à exceção das coordenadas L^* e a^* , cujas variações são pouco significativas), semelhante à que acontece na natureza e de acordo com a literatura. Foi encontrada, também, uma forte relação entre as variáveis distância simulada de observação e as características cromáticas em estudo.

Para além dos aspetos mencionados anteriormente, os observadores foram capazes de detetar estas variações e perceber alterações cromáticas nas imagens de teste, usando o controlo remoto.

Os observadores são capazes de selecionar a imagem real com as características cromáticas originais, uma vez que a distância de observação mais selecionada foi a de zero metros.

O resultado principal deste estudo sugere que, apesar da degradação da informação e diversidade cromática das imagens, com o incremento da distância de observação, causada pelo efeito atmosférico, os observadores conseguem recuperar o conteúdo cromático original.

Este resultado pode ser considerado sólido, tendo em conta o número considerável de opções de resposta disponíveis (45 opções: desde -200 a 2000 metros, em intervalos de 50 metros), e o facto de estar dentro do intervalo de naturalidade estimado (demonstrado com a realização da segunda experiência).

7. TRABALHO FUTURO

Para tentar perceber se ao modificar as condições experimentais o resultado fundamental encontrado neste estudo se mantém, é pertinente:

- Aumentar o valor da amostra, isto é, testar um maior número de observadores, alargar a faixa etária de observadores em estudo e avaliar populações diferentes da universitária.
- Ampliar a base de dados de imagens hiperespetrais, ao adicionar mais quantidade e tipo de cenários naturais complexos (rurais e urbanos): inserir imagens com outros objetos artificiais e naturais, diversos climas e ambientes. Tal como imagens com conteúdo desconhecido para aumentar o número de cenários não familiares e ultrapassar o facto de objetos familiares serem mais facilmente memorizados.
- Avaliar as respostas ajustando a simulação em função de outros parâmetros descritos na equação 1 tal como simulações que alterem também a quantidade, dimensão, tipo, composição e distribuição das partículas na atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Marieb, E. N. & Hoehn, K. *Human Anatomy & Physiology*. (Pearson Education, Inc, 2013). doi:10.1007/BF00845519
2. Rabbetts, R. B. *Clinical Visual Optics*. (Butterworth-Heinemann, 1998).
3. Snell, R. S. & Lemp, M. A. *Clinical Anatomy of The Eye*. (Blackwell Science, Inc., 1998). doi:10.1016/j.optha.2015.11.023
4. Willoughby, C. E. *et al.* Anatomy and physiology of the human eye: Effects of mucopolysaccharidoses disease on structure and function - a review. *Clin. Exp. Ophthalmol.* 38, 2–11 (2010).
5. Artal, P. Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial. *Adv. Opt. Photonics* 6, 340–367 (2014).
6. DelMonte, D. & Kim, T. The anatomy and physiology of cornea. *J Cataract Refract Surg* 37, 588–598 (2011).
7. Hunt, R. W. G. & Pointer, M. R. *Measuring Colour*. (John Wiley & Sons, Ltd, 2011). doi:10.1007/978-1-4419-1197-1
8. Malhotra, A., Minja, F. J., Crum, A. & Burrowes, D. Ocular Anatomy and Cross-Sectional Imaging of the Eye. *Semin. Ultrasound, CT MRI* 32, 2–13 (2011).
9. Cox, J. L., Farrell, R. A., Hart, R. W. & Langham, M. E. The Transparency of the Mammalian Cornea. *J. Physiol.* 210, 601–616 (1970).
10. Freund, D. E., McCally, R. L. & Farrell, R. A. Light-Scattering Tests of Structure in Normal and Swollen Rabbit Corneas. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 12, 137–143 (1991).
11. Meek, K. M., Dennis, S. & Khan, S. Changes in the refractive index of the stroma and its extrafibrillar matrix when the cornea swells. *Biophys. J.* 85, 2205–2212 (2003).
12. Grosvenor, T. *Primary Care Optometry*. (Butterworth-Heinemann, 2002).
13. Patel, S., Boyd, K. E. & Burns, J. Age, stability of the precorneal tear film and the refractive index of tears. *Cont. Lens Anterior Eye* 23, 44–47 (2000).
14. Edelhauser, H. F. The Balance between Corneal Transparency and Edema The Proctor Lecture. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 47, 1755–1766 (2006).

15. Dawson, D. G. & Edelhauser, H. F. *Corneal edema. Ocular Disease: Mechanisms and Management* (2010). doi:10.1016/B978-0-7020-2983-7.00009-7
16. Huang, Y. & Meek, K. M. Swelling studies on the cornea and sclera: The effects of pH and ionic strength. *Biophys. J.* 77, 1655–1665 (1999).
17. Maurice, B. Y. D. M. The Structure and Transparency of the cornea. *J. Physiol.* 136, 263–286 (1956).
18. Feuk, T. On the Transparency of the Stroma in the Mammalian Cornea. *IEEE Trans. BIO-MEDICAL Eng.* 17, 186–190 (1970).
19. Meek, K. M. *et al.* Synchrotron x-ray diffraction studies of the cornea, with implications for stromal hydration. *Biophys. J.* 60, 467–474 (1991).
20. Freund, D. E. *et al.* Ultrastructure in anterior and posterior stroma of perfused human and rabbit corneas: Relation to transparency. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 36, 1508–1523 (1995).
21. Goldstein, E. B. *Sensation and Perception.* (Wadsworth, Cengage Learning, 2010).
22. Brainard, D. H. & Stockman, A. Colorimetry. em *Handbook of Optics - Volume III: Vision and Vision Optics* 10.1-10.56 (McGraw-Hill Professional Publishing, 2000).
23. Benjamin, W. J. *Borish's Clinical Refraction.* (Butterworth Heinemann Elsevier, 2006). doi:10.1016/B978-1-4160-5009-4.50004-2
24. Schwartz, S. H. *Visual Perception - A Clinical Orientation.* (McGraw-Hill Companies, Inc., 2010).
25. McCartney, E. J. *Optics of the Atmosphere.* (Wiley-Interscience, 1976).
26. Schanda, J. *Colorimetry: Understanding the CIE System.* (Wiley Wiley & Sons, Inc., 2007).
27. Commission Internationale de l'Eclairage. *Colorimetry: Technical Report.* 15, (Commission Internationale de l'Eclairage, 2004).
28. Dain, S. J. Clinical colour vision tests. *Clin. Exp. Optom.* 87, 276–293 (2004).
29. Figura 1.18. Disponível em: [https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-06 U'V' Chromaticity diagram.jpg](https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap17/F17-06_U'V'_Chromaticity_diagram.jpg). (Acedido: 9.ª Dezembro 2017)
30. Merbs, S., & Nathans, J. Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for

- anomalous color vision. *Science (80-.)*. 258, 464–466 (1992).
31. DeMarco, P., Pokorny, J., & Smith, V. C. Full-spectrum cone sensitivity functions for X-chromosome-linked anomalous trichromats. *J. Opt. Soc. Am. A* 9, (1992).
 32. Livingstone, M. & Hubel, D. Segregation of Form, Color, Movement, and Depth : Anatomy , Physiology , and Perception. *Science (80-.)*. 240, 740–749 (1988).
 33. Seshadri, J., Christensen, J., Lakshminarayanan, V. & Bassi, C. J. Evaluation of the new web-based «Colour Assessment and Diagnosis» test. *Optom. Vis. Sci.* 82, 882–885 (2005).
 34. Regan, B. C., Reffin, J. P. & Mollon, J. D. Luminance Noise and the Rapid-Determination of Discrimination Ellipses in Color Deficiency. *Vision Res.* 34, 1279–1299 (1994).
 35. Barbur, J. L. «Double-blindsight» revealed through the processing of color and luminance contrast defined motion signals. *Prog. Brain Res.* 144, 243–259 (2004).
 36. Figura 1.30. (2018). Disponível em: <https://www.city.ac.uk/avot/individual-tests/colour-vision-assessment-including-cad>. (Acedido: 23.ª Fevereiro 2018)
 37. Figura 1.31. Disponível em: http://static.wixstatic.com/media/67b04b_7a365b10fdf44723b907c9aeaa71e641.jpg_srz_519_225_85_22_0.50_1.20_0.00_jpg_srz. (Acedido: 13.ª Junho 2017)
 38. Figura 1.33. Disponível em: http://optometry.com.hk/images/wpoc/Farnsworth_D15.jpg. (Acedido: 13.ª Junho 2017)
 39. OCULUS. *HMC Anomaloskop: Instruction Manual*.
 40. Newhall, S. M.; Burnham, R. W.; Clark, J. R. Comparison of Successive with Simultaneous Color Matching. *J. Opt. Soc. Am* 47, 216–227 (1957).
 41. Bartleson, C. J. Memory Colors of Familiar Objects*. *J. Opt. Soc. Am* 50, 73–77 (1960).
 42. Pérez-Carpinell, J.; Fez, M. D.; Baldoví, R.; Soriano, J. C. Familiar Objects and Memory Color. *John Wiley Sons, Inc. Col Res Appl* 23, 416–427, (1998).
 43. Bodrogi, P. Colour Memory for Various Sky , Skin and Plant Colours : Effect of the Image Context. *John Wiley Sons, Inc. Col Res Appl*, 26, 278–289 (2001).
 44. Vurro, M., Ling, Y. & Hurlbert, A. C. Memory color of natural familiar objects: Effects of surface texture and 3-D shape. *J. Vis.* 13, 20–20 (2013).

45. Amano, K., Uchikawa, K. & Kuriki, I. Characteristics of color memory for natural scenes. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 19, 1501–1514 (2002).
46. Hendley, C. D. & Hecht, S. The colors of natural objects and terrains, and their relation to visual color deficiency. *J. Opt. Soc. Am.* 39, 870–873 (1949).
47. Pointer, M. R. & Attridge, G. G. The number of discernible colours. *Color Res. Appl.* 23, 52–54 (1998).
48. Linhares, J. M. M., Pinto, P. D. & Nascimento, S. M. C. The number of discernible colors in natural scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* 25, 2918 (2008).
49. Pinto, P. D., Linhares, J. M. M. & Nascimento, S. M. C. Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* 25, 623–630 (2008).
50. Narasimhan, S. G. & Nayar, S. K. Chromatic framework for vision in bad weather. *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662)* 1, 598–605 (2000).
51. Narasimhan, S. G. & Nayar, S. K. Vision and the atmosphere. *Int. J. Comput. Vis.* 48, 233–254 (2002).
52. Middleton, W. E. K. *Visibility in Meteorology.* (1941).
53. Iqbal, M. *An Introduction to Solar Radiation.* (Academic Press, 1983).
54. Romero, J., Luzón-González, R., Nieves, J. L. & Hernández-Andrés, J. Color changes in objects in natural scenes as a function of observation distance and weather conditions. *Appl. Opt.* 50, F112 (2011).
55. Luzón-González, R., Nascimento, S. M. C., Masuda, O. & Romero, J. Chromatic losses in natural scenes with viewing distance. *Color Res. Appl.* 39, 341–346 (2013).
56. Willis, P. J. Visual Simulation of Atmospheric Haze. *Comput. Graph. Forum* 6, 35–41 (1987).
57. Hagedorn, J. & D’Zmura, M. Color appearance of surfaces viewed through fog. *Perception* 29, 1169–1184 (2000).
58. Burton, G. J. & Moorhead, I. R. Color and spatial structure in natural scenes. *Appl. Opt.* 26, 157 (1987).

59. Henry, R. C., Mahadev, S., Urquijo, S. & Chitwood, D. Color perception through atmospheric haze. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* 17, 831–835 (2000).
60. Figura 1.41. Disponível em: https://ung.edu/campuses/_uploads/images/updated-2015/blue-ridge-971x370.jpg. (Acedido: 19.ª Dezembro 2017)
61. Chakrabarti, A. & Zickler, T. Statistics of real-world hyperspectral images. *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* 193–200 (2011). doi:10.1109/CVPR.2011.5995660
62. Bagheri, S., Ahmadi, B., Nanekaran, Y. A. & Layazali, S. Review on Hyper-spectral Imaging System. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 4, 253–258 (2013).
63. PerkinElmer Inc. VariSpec. (2013).
64. Shippert, P. Introduction to Hyperspectral Image Analysis. *Online J. Sp. Commun.* (2003).
65. SpecTIR. Hyperspectral Imaging. *SpecTIR* (2012). Disponível em: <http://www.spectir.com/technology/hyperspectral-imaging/>. (Acedido: 11.ª Dezembro 2017)
66. Nascimento, S. M. C., Ferreira, F. P. & Foster, D. H. Statistics of spatial cone-excitation ratios in natural scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* 19, 1484 (2002).
67. Foster, D. H., Amano, K., Nascimento, S. M. C. & Foster, M. J. Frequency of metamerism in natural scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* 23, 2359 (2006).
68. World Medical Association. Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *Eur. J. Emerg. Med.* 8, 221–223 (2001).
69. Figura 3.2. Disponível em: http://www.csoitalia.it/app/public/files/foto/cso_14999365181291.jpg. (Acedido: 10.ª Novembro 2017)
70. Figura 3.3. Disponível em: http://www.oculus.de/fileadmin/images/produktbilder/hmc_anomaloskop/startseite_galerie/oculus_hmc_anomaloskop_mit_laptop.jpg. (Acedido: 10.ª Novembro 2017)
71. Ulrich, R. S. Human responses to vegetation and landscapes. *Landsc. Urban Plan.* 13, 29–44 (1986).
72. Foster, D. H., Nascimento, S. M. C. & Amano, K. Information limits on neural identification

- of colored surfaces in natural scenes. *Vis. Neurosci.* 21, 331–336 (2004).
73. Linhares, J. M. M. & Nascimento, S. M. C. A chromatic diversity index based on complex scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* 29, A174 (2012).
 74. Montagner, C. M., Linhares, J. M. M., Vilarigues, M. & Nascimento, S. M. C. Statistics of colors in paintings and natural scenes. *J. Opt. Soc. Am. A* 33, 170–177 (2016).
 75. Pinto, P. D., Felgueiras, P. E. R., Linhares, J. M. M. & Nascimento, S. M. C. Chromatic effects of metamers of D65 on art paintings. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 30, 632–637 (2010).
 76. Nascimento, S. M. C. *et al.* The colors of paintings and viewers' preferences. *Vision Res.* 130, 76–84 (2017).
 77. Figura 3.8. Disponível em: <http://i.ebayimg.com/images/i/322763913753-0-1/s-l1000.jpg>. (Acedido: 10.^a Novembro 2017)
 78. OriginLab Corporation. PsdVoigt1. (2018). Disponível em: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/PsdVoigt1-FitFunc>. (Acedido: 7.^a Dezembro 2017)
 79. OriginLab Corporation. Gauss. (2018). Disponível em: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gauss-FitFunc>. (Acedido: 24.^a Janeiro 2018)
 80. OriginLab Corporation. Exponential. (2018). Disponível em: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Exponential-FitFunc>. (Acedido: 28.^a Janeiro 2018)
 81. Minnaert, M. *The Nature of Light and Color in the Open Air.* (1954).
 82. Luzón-González, R., Nieves, J. L. & Romero, J. Recovering of weather degraded images based on RGB response ratio constancy. *Appl. Opt.* 54, B222 (2015).
 83. Smet, K. A. G. & Hanselaer, P. Memory and preferred colours and the colour rendition of white light sources. *Light. Res. Technol.* 48, 393–411 (2015).
 84. Linhares, J. M. M., Pinto, P. D. D. & Nascimento, S. M. C. M. C. Chromatic diversity index - An approach based on natural scenes. *CGIV 2010 - 5th Eur. Conf. Colour Graph. Imaging, Vision, MCS'10, 12th Int. Symp. Multispectral Colour Sci.* 58–61 (2010).
 85. Aldaba, M. A. *et al.* Visual sensitivity to color errors in images of natural scenes. *Vis. Neurosci.* 23, 555–559 (2006).

86. De Fez, M. D., Capilla, P., Luque, M. J., Pérez-Carpinell, J. & Del Pozo, J. C. Asymmetric colour matching: Memory matching versus simultaneous matching. *Color Res. Appl.* 26, 458–468 (2001).
87. Olkkonen, M., Hansen, T. & Gegenfurtner, K. R. Color appearance of familiar objects: effects of object shape, texture, and illumination changes. *J. Vis.* 8, 13, 1–16 (2008).
88. Wichmann, F. A., Sharpe, L. T. & Gegenfurtner, K. R. The Contributions of Color to Recognition Memory for Natural Scenes. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 28, 509–520 (2002).
89. Castelhano, M. S. & Henderson, J. M. The Influence of Color on the Perception of Scene Gist. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 34, 660–675 (2008).
90. Amano, K., Foster, D. H., Mould, M. S. & Oakley, J. P. Visual search in natural scenes explained by local color properties. *J. Opt. Soc. Am. A* 29, A194 (2012).
91. Amano, K. & Foster, D. H. Influence of local scene color on fixation position in visual search. *J. Opt. Soc. Am. A* 31, A254 (2014).

ANEXOS

ANEXO 1: Consentimento Informado aos Observadores



101 Escola de Ciências
Campus de Gualtar
4710-057 Braga -
Portugal

Universidade do Minho

Escola de Ciências

Departamento de Física

CONSENTIMENTO INFORMADO E INFORMAÇÃO AOS VOLUNTÁRIOS

Estudo: “Perturbações Atmosféricas na Percepção Cromática de Cenários Naturais Complexos”

Responsável: João Manuel Maciel Linhares
jlinhares@fisica.uminho.pt

Investigador: Andreia Esteves Gomes
andreia.gomes.ni@gmail.com

Este documento visa informar sobre a experiência psicofísica que irá ser realizada no contexto do projeto “Perturbações Atmosféricas na Percepção Cromática de Cenários Naturais Complexos”, e obter o seu consentimento informado. O documento presente e os procedimentos deste estudo estão de acordo com a “Declaração de Helsínquia” (1964, Associação Médica Mundial).

Este trabalho visa testar o efeito de perturbações atmosféricas na percepção cromática de observadores com visão das cores normal, de modo a estimar qual o impacto da atmosfera na visão das cores de cenários complexos. Esta experiência tem apenas objetivos científicos sem fins comerciais.

Para coletar todos os dados essenciais à continuação deste projeto, serão necessárias 3 visitas. Na primeira visita, os observadores serão sujeitos a uma análise e examinação do estado do olho e das estruturas oculares. Posteriormente serão necessárias mais duas visitas para realização da experiência psicofísica. Na segunda visita, realizarão a primeira parte da experiência e, para concluir, na terceira visita executarão a segunda parte da experiência.

A tarefa do observador passa ajustar e selecionar a melhor resposta, conforme a pergunta que lhe for feita. Nesta experiência são apresentadas várias imagens num monitor devidamente calibrado, e o observador controla a imagem através de um controlo remoto (semelhante ao de vídeo jogos).

Durante toda a avaliação serão utilizadas técnicas não invasivas, ou seja, não haverá invasão das barreiras naturais ou corpo do observador. Como é um estudo de natureza observacional não influencia o processo natural nem compromete a saúde geral do observador em estudo.

A recolha de dados e análise de resultados será efetuada no Laboratório da Cor do Departamento de Física da Universidade do Minho.

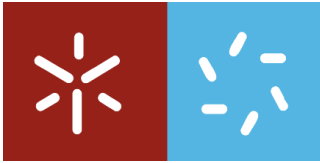
Eu, _____ declaro que:

- Tomei conhecimento dos objetivos, procedimentos e implicações do estudo acima indicado;
- Todos os aspetos relevantes sobre a experiência a ser realizada foram explicados;
- Foi-me dada oportunidade de colocar qualquer questão ao investigador, tendo sido respondido de forma satisfatória;
- Entendo que posso recusar, a qualquer momento, a continuidade da minha participação em estudo sem consequências no futuro;
- Fui informado(a) que todos os dados recolhidos serão mantidos em anonimato e autorizo que sejam utilizados exclusivamente para fins científicos e/ou académicos que a equipa investigadora considerar apropriados

Braga, _____ de _____ 2017

Observador: _____

Investigador: _____



101 Escola de Ciências
Campus de Gualtar
4710-057 Braga -
Portugal

Universidade do Minho

Escola de Ciências

Departamento de Física

FOLHA DE REGISTO RESULTADOS

Estudo: "Perturbações Atmosféricas na Perceção Cromática de Cenários Naturais Complexos"

Dados Pessoais

Nome: _____
Data nascimento: ____/____/____ Idade: _____ Sexo: _____
Contacto telefónico: _____
Endereço eletrónico: _____
Profissão: _____ Passatempos: _____

Anamnese

Antecedentes Oculares: _____

Antecedentes Saúde Geral: _____

Antecedentes Familiares: _____

Observações Gerais: _____

Refracção habitual: OD: esf _____ cil _____ x _____ °
OE: esf _____ cil _____ x _____ °

Tempo de uso: _____

Exames Preliminares

Acuidade Visual: VL OD ____ OE ____ AO ____
VP OD ____ OE ____ AO ____

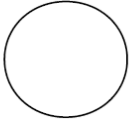

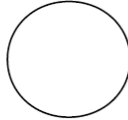

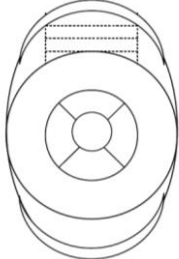
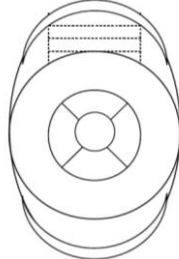
DIP: VL: _____ (mm) VP: _____ (mm)

Cover Test: _____

Motilidade Ocular: _____

Reflexos Pupilares: Resposta Direta _____ Resposta Consensual _____

Biomicroscopia

	OLHO DIREITO				OLHO ESQUERDO			
Hiperemia Conjuntiva Bulbar (0-4)	Nasal	Temporal	Superior	Inferior	Nasal	Temporal	Superior	Inferior
Hiperemia Conjuntiva Limbal (0-4)	Nasal	Temporal	Superior	Inferior	Nasal	Temporal	Superior	Inferior
Neo Vascularização (mm)	Nasal	Temporal	Superior	Inferior	Nasal	Temporal	Superior	Inferior
Córnea	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Vista frontal</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Vista secção</p>  </div> </div>				<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Vista frontal</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Vista secção</p>  </div> </div>			
Epitélio Corneal (n.º)	Microquistos	Vacúolos	Infiltração	Outros	Microquistos	Vacúolos	Infiltração	Outros
Estroma Corneal (n.º e orientação)	Estrias	Pregas		Outros	Estrias	Pregas		Outros
Endotélio Corneal		Poli-megatismo	Pleo-morfismo	<i>Blebs</i>		Poli-megatismo	Pleo-morfismo	<i>Blebs</i>
	Centro				Centro			
	Periferia				Periferia			
Pálpebra								
Conjuntiva Palpebral Superior	Área	Hiperemia (0-4)	Papilas/Foliculos/ Outro	Irregularidade (0-4)	Área	Hiperemia (0-4)	Papilas/Foliculos/ Outro	Irregularidade (0-4)
	1				1			
	2				2			
	3				3			
	4				4			
5				5				
Conjuntiva Palpebral Inferior	Hiperemia (0-4)		Papilas/Foliculos/ Outro	Irregularidade (0-4)	Hiperemia (0-4)		Papilas/Foliculos/ Outro	Irregularidade (0-4)

ANEXO 3: Exemplo Folha Resultados Anomaloscópio



HMC ANOMALOSKOP

Red/Green Color Vision

Name: _____

First name: _____

Date of birth: _____

Anomaly Quotient (absolute matching range)

R 1 - 0.96

L _____ - _____

Remarks: _____

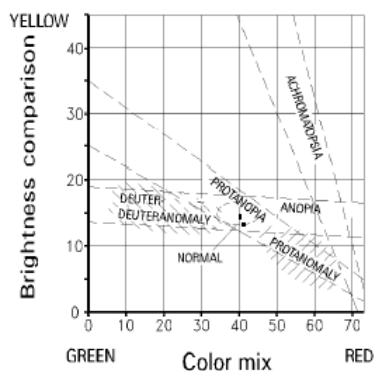
Matching range
(assumed equations from - to)

R 40.9 - 40.8

12.9 - 12.9

L _____ - _____

 _____ - _____



Norm 34 - 46 / 15
Normal match 40 / 15

Standard examination
 ABS = absolute matching range

Additional examination
 REL = relative matching range (especially for acquired color vision deficiencies)

City, date: _____

Stamp, signature: _____

OCULUS Optikgeräte GmbH Dutenhofen · 35582 Wetzlar · Tel. ++49/641/2005-0 · Fax ++49/641/2005-255

ANEXO 4: Representação Gráfica dos Resultados Individuais de cada imagem utilizada durante a Experiência Psicofísica

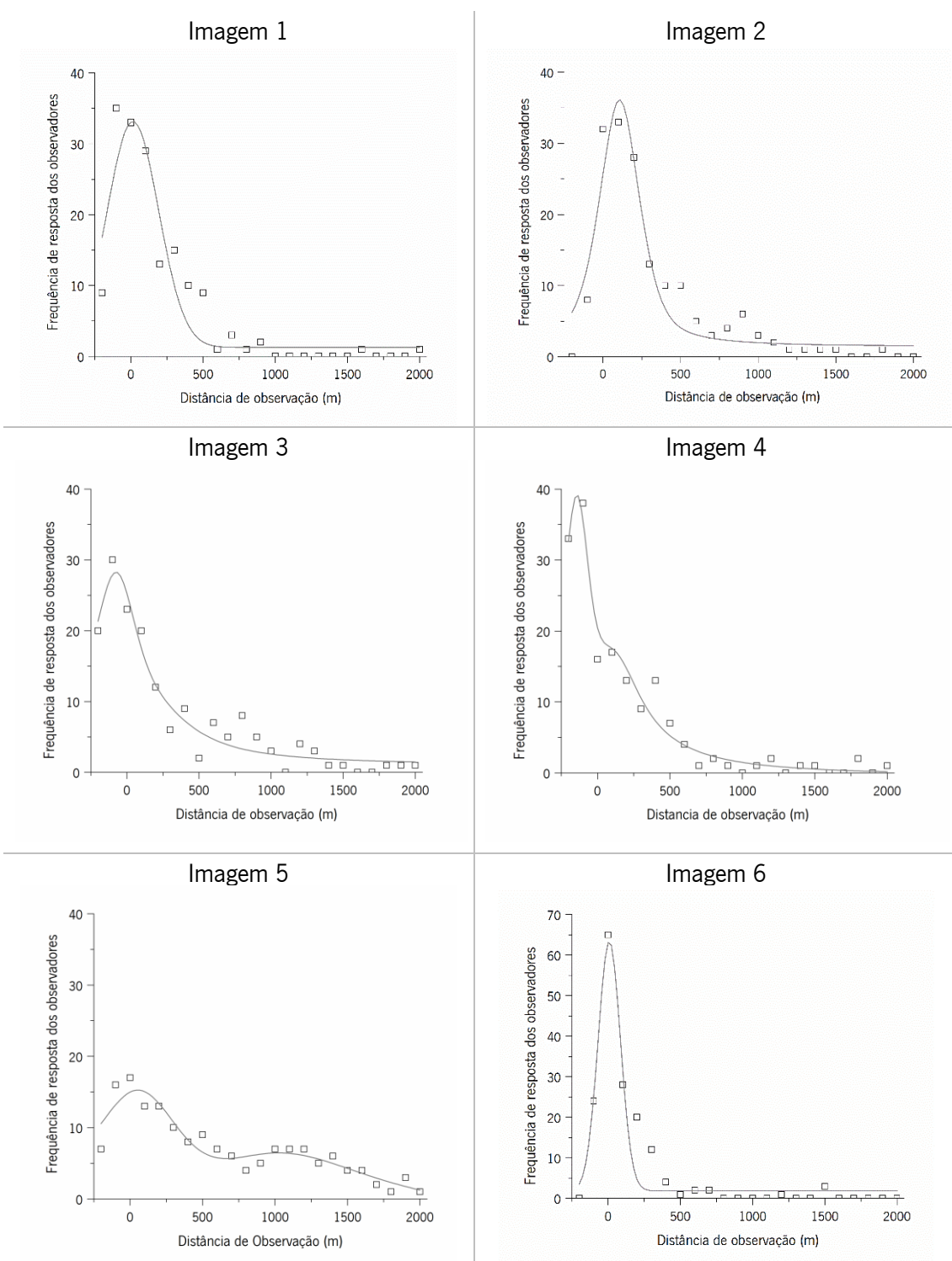


Imagem 7

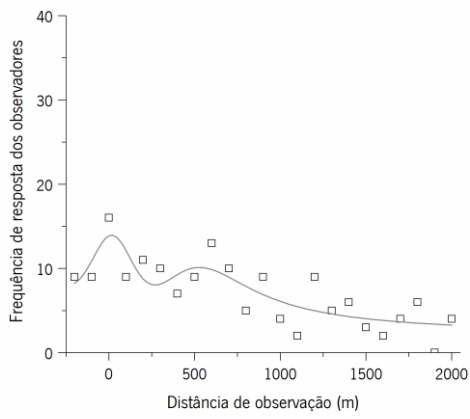


Imagem 8

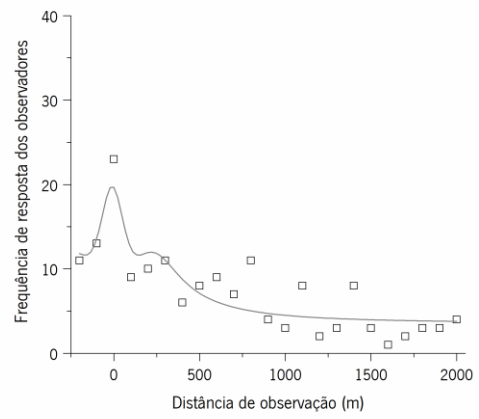


Imagem 9

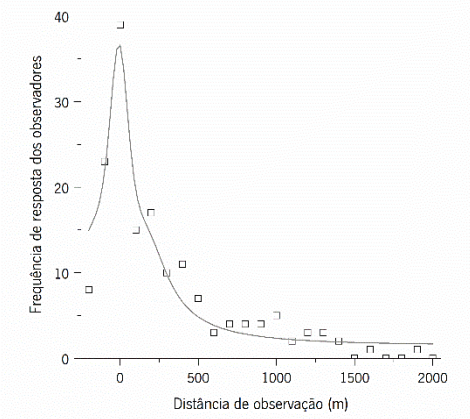


Imagem 10

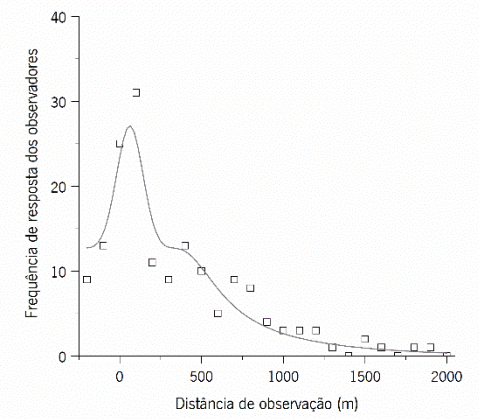


Imagem 11

