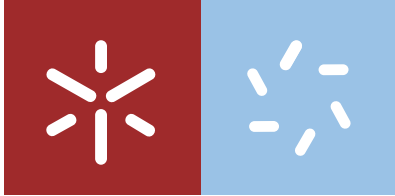


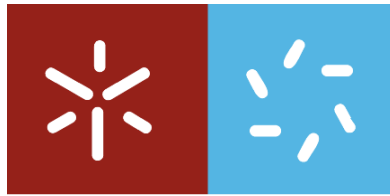


Análise Comparativa da Visão das Cores Periférica

Graciete da Silva Santos

Universidade do Minho
Escola de Ciências





Universidade do Minho

Escola de Ciências

Graciete da Silva Santos

Análise Comparativa da Visão das Cores Periférica

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares

Dezembro de 2021

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações

CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Todo e qualquer percurso na nossa vida é sempre feito com a ajuda de terceiros. Sem dúvida que sem os outros não seríamos metade do que realmente somos. Da mesma forma, nesta etapa de conclusão deste mestrado, muitas pessoas estiveram ao meu lado.

Em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador Professor Doutor João Linhares por ter sempre disponibilizado todo o seu conhecimento e o seu tempo para me ajudar neste percurso, o qual teria sido bem mais difícil sem o seu apoio.

Em seguida, a toda a minha família, com especial destaque para o meu companheiro de vida, que está sempre ao meu lado. Também aos meus pais, irmã, cunhado e sobrinhos, sem os quais nada disto teria sido possível nem faria qualquer sentido.

A toda a equipa da ótica onde trabalho que tornaram a minha vida mais fácil com ajustes de horários, para me permitir a frequência neste mestrado.

Por fim, a todos os meus amigos, desde sempre, pela força e pela paciência. Por estarem lá quando precisei.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Análise Comparativa da Visão das Cores Periférica

Resumo

A visão das cores está intimamente relacionada com a luz que chega aos olhos do observador. Dependendo do comprimento de onda da radiação eletromagnética que chega à retina, percebem-se cores diferentes. A visão das cores difere consoante o campo visual excitado pela radiação, seja a zona central ou uma zona mais periférica, na qual a visão das cores será diferente em relação à central. Existem vários métodos de determinação da visão das cores periférica como é o caso de: nomeação das cores, discriminação de diferentes comprimentos de onda, correspondência de cores assimétricas, sensibilidade para diferentes matizes e fotometria por *flicker*. É objetivo deste trabalho realizar uma revisão sistemática da literatura com o intuito de caracterizar a visão das cores na globalidade da retina, procurando enquadrar os diferentes métodos e técnicas de metodologia nos diferentes campos visuais em análise. O facto de existir uma enorme diversidade de métodos, com recurso a diferentes condições de experimentação, é uma limitação a este trabalho, na medida em que dificulta a comparação de informação. Encontrou-se, no decorrer desta revisão bibliográfica, que à medida que nos vamos afastando da fóvea ocorre uma diminuição na quantidade de cones M e L. A organização espacial e a distribuição dos fotorreceptores estão intimamente relacionadas com a variação a visão das cores na retina periférica. Encontrou-se, também, evidências de que a retina nasal tem uma maior sensibilidade cromática em relação à retina temporal, superior e inferior. Além disso, quando o estímulo colorido atinge um campo visual mais excêntrico há mudanças na visão da cor, nomeadamente no matiz e na saturação. No entanto, quando se aumenta o tamanho do estímulo ocorre uma discriminação semelhante à da fóvea.

Palavras chave: visão das cores periférica; excentricidade; discriminação cromática

Comparative Analysis of Peripheral Color Vision

Abstract

Color vision is related to the light that approaches the viewer's eyes. When different wavelength of electromagnetic radiation reaches the retina, different colors are perceived. It's perception depends on whether is being used a central area of the retina or a peripheral area, in which the color vision is different to the central area. There are several methods for determine peripheral color vision such as: color naming, discrimination of different wavelengths, asymmetric color matching, sensitivity to different hues and flicker photometry. In the peripheral retina color vision becomes dichromatic and there is a decrease in the number of M and L cones. The spatial organization and distribution of photoreceptors are closely related to the loss of color vision in the peripheral retina. When the colored stimulus is exposed to a more eccentric retinal area, there are changes in color perception, particularly in hue and saturation and when the size of stimulus is increased, occurs a similar discrimination of the fovea. The goal of this work was to create a systematic literature review to characterize color vision in the entirety retina to analyze the different methods and techniques in the different visual fields under analysis. There is a huge diversity of methods, using different experimental conditions which is a limitation to this work because it makes difficult to compare information. On this literature review it was found that moving away from the fovea towards periphery there was a decrease in the number of M and L cones. The spatial organization and distribution of photoreceptors were closely related to the loss of color vision in the peripheral retina. It was also found that the nasal retina has a greater chromatic sensitivity when compared to the temporal, superior and inferior retina.

Key Words: Peripheral color vision; eccentricity; chromatic discrimination

Índice

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de Integridade	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Abreviaturas e Acrónimos	ix
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiii
Capítulo 1. Revisão da Literatura	14
1.1. Sistema Visual.....	14
1.1.1. Mecanismo Visual	14
1.1.2. A retina	15
1.1.3. Os fotorreceptores.....	17
1.2. Visão das Cores.....	20
1.2.1. Teorias da Visão das Cores.....	21
1.2.1.1. Teoria da Tricomacia.....	21
1.2.1.2. Teoria dos Processos Oponentes	22
1.3. Colorimetria	23
1.3.1. Triestímulos	23
1.3.2. Sistema XYZ.....	24
1.3.3. Diagrama CIE.....	25
1.3.4. Espaço CIELAB	27
1.3.5. Espaço CIELUV	27
1.4. Deficiências na Visão das Cores.....	27
1.5. Metodologia de Pesquisa	32

1.6. Métodos de Determinação da Visão das Cores na Retina Periférica	33
1.7. Visão Periférica e a Visão das Cores.....	34
Capítulo 2. Discussão	41
Capítulo 3. Conclusão.....	56
Referências Bibliográficas	58
Anexos	72

Abreviaturas e Acrónimos

% - Percentagem

CCT – *Cambridge Colour Test*

cd/m² – Candela por Metro Quadrado

CIE – Comissão Internacional de Iluminação (do original - Commission Internationale de l'Éclairage)

D15 – *Desaturated Lanthony 15*

F-M100 – *Farnsworth-Munsell* 100

HHT - Hardy-Rand-Rider Teste

Hz – Hertz

*ip*RGC – Células Ganglionares Retinianas Intrinsecamente Fotossensíveis

LGN – Corpo Geniculado Lateral

mm - Milímetro

mRNA – RNA Mensageiro

ms - Milissegundos

nm – Nanómetros

PCR – Reação em Cadeia da Polimerase

RNA – Ácido Ribonucleico

s - Segundos

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema representativo da formação de uma imagem-objeto na retina, com especial pormenor para os diferentes constituintes da retina. Adaptado de (Goldstein, 2010a).....	15
Figura 2. Mosaicos de fotorreceptores na retina periférica. Os cones são os discos maiores e os bastonetes os menores. Adaptado de (Curcio et al., 1990).	16
Figura 3. Esquema da estrutura retiana. Adaptado de (Freed, 2017).	17
Figura 4. Distribuição dos fotorreceptores nas várias zonas da retina. Adaptado de (Goldstein, 2010a). 18	
Figura 5. Pico de sensibilidade espectral dos três tipos de cones (S, M e L), das ipRGCs (melanopsina) e dos bastonetes. Adaptado de (Blume et al., 2019).	19
Figura 6. Representação de mosaico de cones de um tricromata normal. As cores azul, verde e vermelho representam os cones S, M e L, respetivamente. A imagem a) corresponde à retina temporal e a imagem b) à retina nasal, respetivamente, ambas com 1° de excentricidade. Adaptado de (Roorda & Williams, 1999).....	20
Figura 7. Quantidade de cores perceptíveis por indivíduos monocromatas, dicromatas e tricromatas. Adaptado de (Neitz et al., 2001).	21
Figura 8. Ambas as teorias da visão das cores estão aceites e são complementares, explicando diferentes etapas do processo da visão das cores. Adaptado de (Goldstein, 2010b).....	23
Figura 9. Representação das funções de reprodução cromática obtidas a partir de três cores primárias R, G e B. Adaptado de (Fairchild, 2005b).	24
Figura 10. Representação das funções de reprodução cromática das três cores primárias imaginárias X, Y e Z. Adaptado de (Fairchild, 2005b).	25
Figura 11. Diagrama cromático CIE. Adaptado de (Schwartz, 2010).	26
Figura 12. Comparação de uma imagem vista por um observador normal e vista por observadores com deficiência na visão das cores. De cima para baixo: Observador Normal; Protanope; Deuteranope; Tritanope. Adaptado de (Fairchild, 2005c).....	30
Figura 13. Linhas de confusão da Deuteranopia, Protanopia e Tritanopia, da esquerda para a direita, respetivamente. Adaptado de (Schwartz, 2010).	31
Figura 14. Placas do Teste de Ishiara. Adaptado de (Goldstein, 2010b).....	73
Figura 15. Tabela de resultados do teste de visão das cores Ishiara. Adaptado de (Ishiara, 1972).....	74
Figura 16. Exemplo de teste placa do teste HRR. Adaptado de (Schwartz, 2010).	75
Figura 17. C de Landolt do Cambridge Colour Test. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).	75

Figura 18. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com visão das cores normal. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).....	76
Figura 19. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com protanopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).....	76
Figura 20. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com deuteranopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).....	77
Figura 21. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com tritanopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).	77
Figura 22. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo tricromata anômalo. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).....	78
Figura 23. Resultados do teste FM-100 para pacientes com visão das cores normal. Adaptado de (Cao, 2013).....	79
Figura 24. Resultados do teste FM-100 para pacientes deuteranopes, protanopes e tritanopes, da esquerda para a direita, respetivamente. Adaptado de (Cao, 2013).	79
Figura 25. Teste D15. Adaptado de (Schwartz, 2010).	80
Figura 26. Diagramas formados pelo teste D15 para identificação das diferentes deficiências da visão das cores. Adaptado de (Schwartz, 2010).	81
Figura 27. Comprimentos de onda utilizados no campo de teste e na mistura, que se encontram todos sobre a mesma linha de confusão. Adaptado de (Schwartz, 2010).	82
Figura 28. Campo de teste do anomaloscópio, no teste de Rayleigh, em que o objetivo é igualar as duas metades do círculo. Adaptado de (Schwartz, 2010).....	82
Figura 29. Visualização de um paciente com visão das cores normais das misturas feitas por um deuteranômalo (A) e protanômalo (B). Um deuteranômalo olha para uma combinação perfeita (C) e parece-lhe avermelhada, pelo que lhe adiciona verde. Por outro lado, a um protanômalo parece-lhe esverdeado, pelo que lhe adiciona vermelho. Adaptado de (Schwartz, 2010).	83
Figura 30. Apresentação de resultados do anomaloscópio, para o teste de Rayleigh. A linha verde indica que um paciente com deuteranopia aceita igualar as cores apenas com mudanças na luminosidade no campo de referência. A linha vermelha indica que um paciente com protanopia aceita igualar as cores, alterando a luminosidade. Em tricromatas anómalos, os deuteranómalos adicionam luz de comprimentos de onda baixos (546 nm) e os protanómalos adicionam luz de comprimentos de onda altos (670 nm). Além disso, o paciente protoanômalo tem de diminuir a luminosidade, enquanto que o deuteranômalo não o faz. Adaptado de (Schwartz, 2010).....	84

Figura 31. Estímulo do teste CAD da City University. Adaptado de (City, 2020b).....	85
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 1. Diferenças entre deficiências da visão da cor congénitas e deficiências da visão da cor adquiridas. Adaptado de (Schwartz, 2010).....	28
Tabela 2. Percentagem de cada uma das deficiências de visão das cores existentes. Adaptado de (Fairchild, 2005c).....	31
Tabela 3. Quadro-resumo de estudos realizados no âmbito da visão das cores periférica.	42

Capítulo 1. Revisão da Literatura

1.1. Sistema Visual

1.1.1. Mecanismo Visual

A visão surge da interação entre um estímulo e um recetor. Inicialmente, é necessário que um estímulo eletromagnético seja enviado ao seu recetor. Para que a visão ocorra é necessário que a luz que chega seja luz visível, pelo que deve estar compreendida entre os comprimentos de onda 400 nm e 700 nm (Palmer, 1999a).

Após a chegada ao olho, a luz que atravessa a córnea e, posteriormente, atinge a pupila é focada na retina. Assim, a luz que atravessa o sistema ótico forma uma imagem real, invertida e de tamanho reduzido em relação ao objeto (Freed, 2017). Caso a imagem de um objeto distante não se foque na retina, com o olho na potência mínima, há erros refrativos, miopia ou hipermetropia, quando a imagem se foca antes ou depois da retina, respetivamente. Em qualquer um dos casos a imagem será sempre desfocada (Wilson, 2017). É na retina que existem os recetores visuais, cuja função é reagir à luz e criar estímulos elétricos, permitindo a criação de imagens. Os recetores visuais existentes na retina são denominados de cones e bastonetes, sendo que estes têm como constituição essencial pigmentos fotossensíveis (Palmer, 1999a; Goldstein, 2010a).

Mais recentemente fizeram-se descobertas em relação a células ganglionares e a sua influência na visão. (Spitschan, 2019). As células ganglionares podem ser divididas em células magnocelulares (M), parvocelulares (P) e koniocelulares (K). Estas constituem o corpo geniculado lateral (LGN) e apresentam-se divididas por camadas, estando as células M nas primeiras duas camadas do LGN, as parvocelulares nas outras quatro camadas restantes e as células koniocelulares entre as várias camadas (Hendry & Clay Reid, 2000; Solomon & Lennie, 2007). Sabe-se que as células magnocelulares transportam a informação relativa ao movimento, transportando informação de elevada velocidade. No que diz respeito às células parvocelulares, estas transportam informação das cores verde-vermelho, enquanto as células koniocelulares desempenham o papel de transporte de informação das cores azul-amarelo, estando estas envolvidas na visão das cores (Cheong et al., 2011).

Algumas células ganglionares particulares, denominadas de células ganglionares retinianas intrinsecamente fotossensíveis (*ipRGC*), possuem na sua constituição um pigmento fotossensível denominado de melanopsina, sendo que estas apenas representam 1% das células ganglionares existentes na retina (Nasir-Ahmad et al., 2019). A melanopsina tem o seu pico espectral aos 480 nm

(Bailes & Lucas, 2013). Os corpos das células ganglionares que expressam a melanopsina são maiores em relação às demais, dando origem a maiores dendrites, apesar de serem pouco ramificadas (Melyan et al., 2005). Recentemente surgiram evidências psicofísicas de que este pigmento pode ser fulcral na visão das cores (Cao et al., 2018; Zele et al., 2018).

Os sinais luminosos atravessam todo o sistema ótico até atingirem a retina. Após este processo são gerados estímulos elétricos que formam a imagem percebida. Na Figura 1 apresenta-se um esquema representativo da formação de uma imagem-objeto desde a entrada do seu estímulo luminoso na pupila até à sua chegada à retina, para posterior formação de uma imagem percebida desse mesmo objeto (Goldstein, 2010a; Zhaoping, 2014).

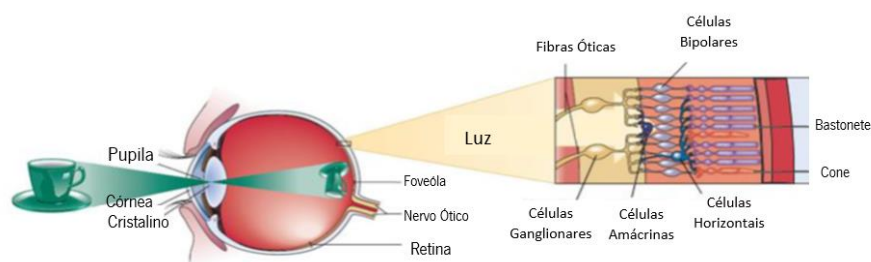


Figura 1. Esquema representativo da formação de uma imagem-objeto na retina, com especial pormenor para os diferentes constituintes da retina. Adaptado de (Goldstein, 2010a).

1.1.2. A retina

A retina pode ser distinguida em três partes: a retina central definida até aos 5° de excentricidade, na qual se encontra a fóvea; a retina intermédia entre os 5° e os 8° de excentricidade, onde se encontra a parafóvea; e a retina periférica, sendo esta última dividida também em três partes: dos 8° aos 30° de excentricidade, dos 30° aos 60° de excentricidade e acima dos 60° de excentricidade (Strasburger et al., 2011; Swanson & Fish, 1995). Além disso, outra classificação pode ser atribuída à retina: nasal, temporal, superior e inferior: a retina nasal é atribuída entre os 45° e os 135° em relação à cabeça do nervo ótico, enquanto a retina temporal classifica-se entre os 225° e os 315°. Relativamente às retinas superior e inferior estas classificam-se entre os 135° e os 225° e entre os 315° e os 45°, respetivamente. A mácula humana contém a depressão foveal de aproximadamente 1,5 mm em diâmetro (correspondendo aos 5° centrais) dentro da qual há 0,26 mm, cerca de 1°, sem bastonetes. É constituída por 2,5 mm (8°) de diâmetro que são a parafóvea e 5,5 mm (18°) de diâmetro que são a perifóvea. Sabe-se também que a densidade de cones e a resolução visual rapidamente diminuem do centro para a periferia (Cohen, 1992).

Tal como demonstrado na Figura 2, verifica-se que com o afastamento da fóvea o número de cones vai sendo menor (na imagem são os fotorreceptores maiores) e o número de bastonetes vai aumentando (na imagem são os fotorreceptores menores). Desta forma, com o aumento da excentricidade ocorre uma diminuição dos campos recetivos dos cones pelo que são necessários estímulos de maior tamanho para ser possível a discriminação cromática (Curcio et al., 1990).

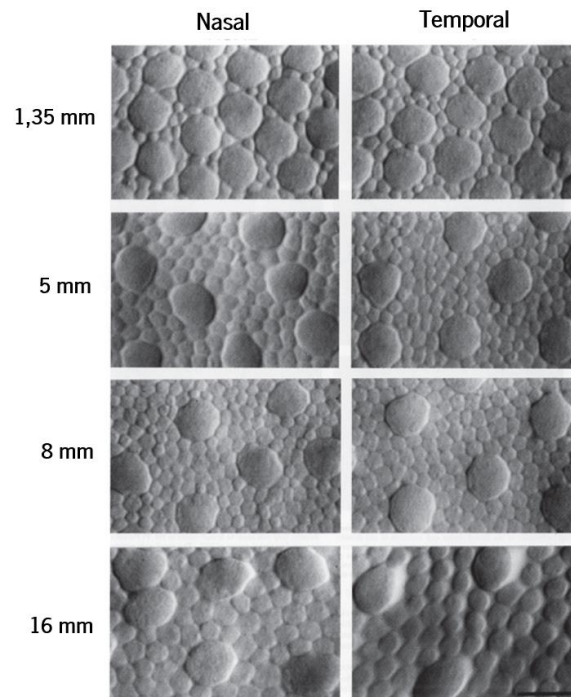


Figura 2. Mosaicos de fotorreceptores na retina periférica. Os cones são os discos maiores e os bastonetes os menores. Adaptado de (Curcio et al., 1990).

Além disso, a retina tem a sua estrutura organizada por camadas sendo que existem camadas nucleares onde se encontram os corpos celulares e as camadas plexiformes onde se realizam as ligações entre os vários neurónios ou entre várias conexões de células (Bowmaker & Dartnall, 1980). Na camada nuclear externa temos os corpos celulares dos fotorreceptores cones e bastonetes e na camada nuclear interna temos os corpos celulares das células amácrinas e células bipolares. Na camada plexiforme externa acontece a conexão dos fotorreceptores com as células bipolares e na camada plexiforme interna acontece a conexão das células bipolares com as células ganglionares (Goldstein, 2010a; Freed, 2017). Na Figura 3 encontra-se um esquema da estrutura retiniana, com as camadas retinianas discriminadas. É de ressaltar que toda a luz que não é absorvida pelos fotorreceptores é absorvida pelo epitélio pigmentar, não entrando em processo de formação de imagem (Kolb, 2011).

Aparentemente, esta disposição está associada ao processamento de imagem dado que existem organismos que apenas são sensíveis à luz e cuja disposição é muito mais simples, passando apenas por uma única camada de fotorreceptores e uma única camada de neurónios (Pu & Dowling, 1981; Zhaoping, 2014).

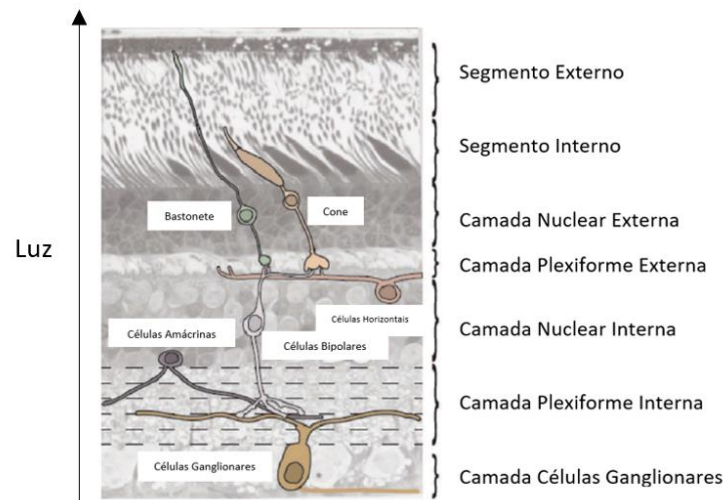


Figura 3. Esquema da estrutura retiana. Adaptado de (Freed, 2017).

Os circuitos retinianos podem ser descritos em duas vias, sendo elas a via vertical e a via lateral. A via vertical transmite sinais entre as camadas plexiformes externa e interna. Esta via inicia-se nos fotorreceptores, passam para as células bipolares e terminam nas células ganglionares (Palmer, 1999b; Freed, 2017). A via lateral é aquela que transmite sinais através das camadas plexiformes. Na camada plexiforme externa os sinais atravessam por junções comunicantes entre os fotorreceptores e as células horizontais. No que diz respeito à camada plexiforme interna, os sinais atravessam, não só por *gap junctions*, mas também por sinapses, entre as células amácrinas (Sung & Chuang, 2010). Os sinais da via lateral são antagónicos aos sinais da via vertical. Sabe-se que os sinais verticais são mais duradouros e mais rápidos em relação aos laterais (Freed, 2017).

1.1.3. Os fotorreceptores

Os fotorreceptores cones e bastonetes distinguem-se pela sua forma. Sendo que os bastonetes são compridos e finos enquanto que os cones têm, como o nome indica, uma forma cónica (Purnyn, 2013; Oppermann et al., 2016). No entanto, para além da forma, também há uma grande diferença na função visual de cada um dos fotorreceptores.

Os bastonetes estão preparados para condições de baixa iluminação, chamada iluminação escotópica, tipicamente abaixo de 1 cd/m². A acuidade visual nestas condições é baixa, não havendo

também discriminação de cor. Os cones estão preparados para situações de alta iluminação, chamada iluminação fotópica, tipicamente acima de 100 cd/m^2 . A acuidade visual nestas condições é elevada (Fairchild, 2005b). Nestas condições de alta iluminação os bastonetes encontram-se saturados e apenas os cones mantêm a sua função visual, havendo discriminação de cor. Numa visão de iluminação intermédia, chamada de iluminação mesópica, contribuem para a visão tanto bastonetes como cones.

A distribuição dos cones e dos bastonetes é um dos pontos fulcrais da organização retiniana. O rácio cones/bastonetes depende da zona que está a ser analisada. Na Figura 4 demonstra-se como ocorre a variação da quantidade de cones e bastonetes em relação ao afastamento da zona de visão central, que é especificamente a zona da fóvea. Nesta figura pode-se verificar que existe uma pequena zona da retina, a fóvea, onde apenas existe um tipo de fotorreceptores, os cones. Esta zona contém apenas um por cento dos seis milhões de cones existentes em toda a retina (Tyler, 1999). Quando se passa para a análise da retina intermédia e periférica, todo o campo visual exceto a fóvea, esta já apresenta os dois tipos de fotorreceptores: cones e bastonetes. Existe um valor muito superior de bastonetes em relação aos cones nesta zona devido ao facto de existir cerca de 120 milhões de bastonetes e apenas 6 milhões de cones (Masland, 2001; Goldstein, 2010a). Na figura apresenta-se ainda uma barra castanha onde não existem quaisquer fotorreceptores, denominado de ponto cego.

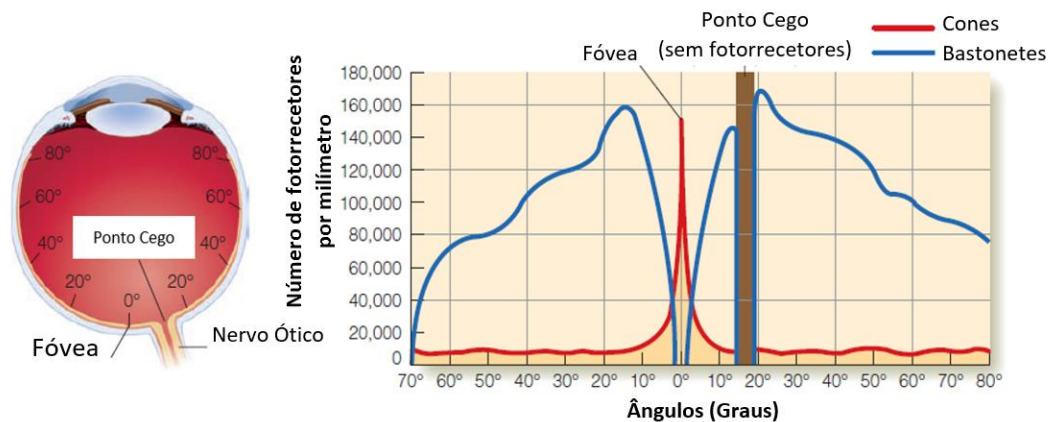


Figura 4. Distribuição dos fotorreceptores nas várias zonas da retina. Adaptado de (Goldstein, 2010a).

Os cones e os bastonetes também variam na sua sensibilidade espectral (Seilheimer et al., 2020). Assim, tal como demonstrado na Figura 5, é possível distinguir-se os vários tipos de fotorreceptores: os três tipos de cones, os bastonetes e as células ganglionares retinianas intrinsecamente fotossensíveis (*ipRGCs*), consoante o seu pico de sensibilidade espectral (Blume et al., 2019). Os cones são denominados de S, M ou L consoante os comprimentos de onda nos quais existe um pico de sensibilidade, sendo que os cones S se referem a comprimentos de onda curtos (*short* em inglês – 420

nm), os cones M referem-se a comprimentos de onda médios (*middle* em inglês – 534 nm) e os cones L referem-se a comprimentos de onda longos (*long* em inglês – 564 nm) (Bowmaker & Dartnall, 1980; Glass, 2016; Masland, 2001; Nerger et al., 2003). Além dos cones, os bastonetes têm o seu pico de sensibilidade aos 498 nm e as *ip*RGCs aos 480 nm (Blume et al., 2019; Bowmaker & Dartnall, 1980).

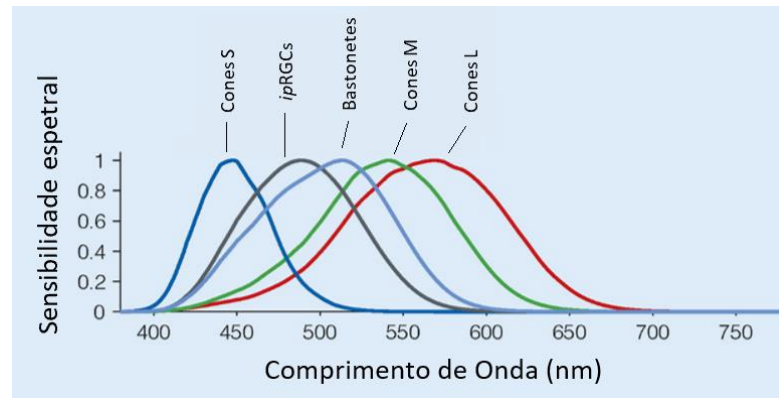


Figura 5. Pico de sensibilidade espectral dos três tipos de cones (S, M e L), das *ip*RGCs (melanopsina) e dos bastonetes. Adaptado de (Blume et al., 2019).

Relativamente à distribuição dos cones na retina os cones S são os mais escassos sendo que na foveola estão completamente ausentes. Os cones L e M são muito mais frequentes. A razão de cones L:M:S é de 40:20:1 (Fairchild, 2005b).

Em 1999, Roorda et al apresentaram imagens representativas de várias zonas da retina representando a quantidade de cones S, M e L numa retina temporal e numa retina nasal, a 1° de excentricidade. Na Figura 6 pode-se observar que a quantidade de cones L é bastante superior em relação aos restantes cones, seguindo-se, em quantidade, os cones M e os cones S, com a menor quantidade (Roorda & Williams, 1999).

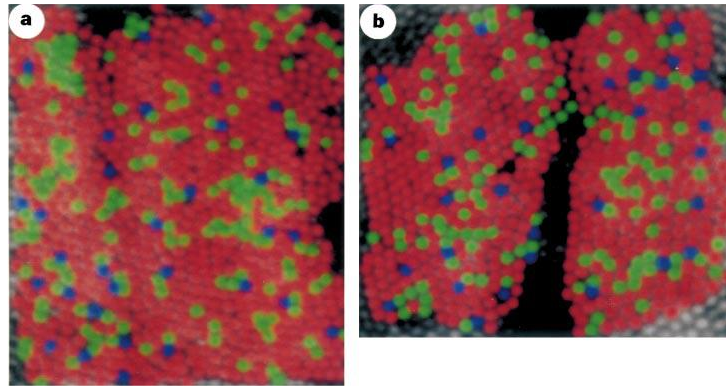


Figura 6. Representação de mosaico de cones de um tricromata normal. As cores azul, verde e vermelho representam os cones S, M e L, respetivamente. A imagem a) corresponde à retina temporal e a imagem b) à retina nasal, respetivamente, ambas com 1° de excentricidade. Adaptado de (Roorda & Williams, 1999).

1.2. Visão das Cores

A visão das cores tem desempenhado, ao longo da evolução humana, um papel importante na forma como a visão tem vindo a evoluir (Neitz et al., 2001).

Entre os mamíferos, apenas são tricromatas os humanos e um pequeno grupo de primatas, sendo que a maioria são dicromatas. Existem ainda alguns mamíferos, apesar de serem uma minoria, que são monocromatas e, por isso, não possuem visão das cores (Jacobs, 1993).

Acredita-se que os humanos tenham evoluído de um ancestral que apenas tinha um tipo de fotorreceptor (Oyster, 1999). Os três tipos de cones deverão ter aparecido por alterações genéticas de duplicação ou divergência. Assim, duplicados de genes dos cones terão sofrido mutações que permitiram diversificar os seus espetros de absorção e, consequente, permitiram a visão de cores. A mutação ter-se-á mantido devido à vantagem evolutiva que a visão das cores criou (Sharpe et al., 1999).

Na Figura 7 estão representadas a quantidade de cores percetíveis quando os indivíduos são monocromatas, dicromatas ou tricromatas, evidenciando que a quantidade de cores aumenta à medida que aumenta o número de cones disponíveis.

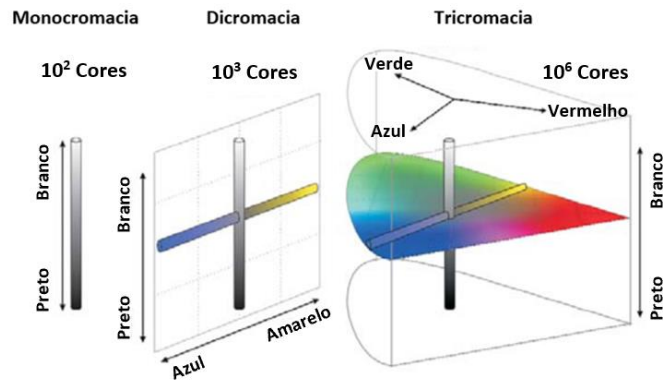


Figura 7. Quantidade de cores perceptíveis por indivíduos monocromatas, dicromatas e tricromatas. Adaptado de (Neitz et al., 2001).

A visão das cores está intimamente relacionada com a luz que chega aos olhos do observador. Consoante o comprimento de onda da radiação eletromagnética que chega à retina, percebem-se cores diferentes (Backhaus, 1998; Goldstein, 2010b). Assim, sempre que falamos de luz visível existe uma associação entre o comprimento de onda e a cor percebida. Desta forma, comprimentos de onda entre 400 e 450 nm são percebidos como cor violeta, entre os 450 nm e os 490 nm são percebidos como cor azul, entre os 500 nm e os 575 nm são amarelo, 590 nm até 620 nm é a cor laranja e dos 620 nm aos 700 nm o vermelho (Fairchild, 2005b; Goldstein, 2010b). A cor dos objetos que é vista é associada aos comprimentos de onda que estes refletem, quando os objetos são opacos, ou que estes transmitem, quando os objetos são transparentes (Jacobs & DeValois, 1968; Fairchild, 2005b; Clement, 2017; Goldstein, 2010b).

No que diz respeito ao espectro de cores existentes, os humanos são capazes de distinguir cerca de duzentos matizes diferentes, em todo o espectro visível (Gouras, 1991).

1.2.1. Teorias da Visão das Cores

1.2.1.1. Teoria da Tricromacia

A teoria tricromática foi proposta por *Thomas Young* e, mais tarde, aprimorada por *Hermann von Helmholtz*. Tem como pilar o fundamento de que a visão das cores depende da atividade de três recetores (Goldstein, 2010b; Clement, 2017).

Esta teoria baseou-se numa experiência de combinação de cores realizada por Helmholtz em que o objetivo era que os observadores iguallassem uma cor com a mistura de três primários distintos (Fairchild, 2005a; Goldstein, 2010b; Maxwell, 1890).

As conclusões desta teoria foram que ajustando as proporções dos três primários era possível igualar a coloração de testes. Quando eram usados apenas dois primários não era possível igualar todas as colorações dos testes, mesmo que o observador tivesse uma visão das cores normal (Goldstein, 2010b).

Quando Helmholtz melhorou a teoria anterior de Young e a chamou de Teoria da Visão das Cores de Young-Helmholtz este afirmou que a luz de um determinado comprimento de onda estimulava em diferentes graus os três recetores, sendo os três essenciais para a visão das cores (Helmholtz, 1852).

1.2.1.2. Teoria dos Processos Oponentes

A teoria dos processos oponentes, criada por Hering, afirma que a visão das cores é baseada em respostas opostas de estímulos. Assim sendo, esta teoria indica que há cores que não são vistas em simultâneo, sendo o caso de azul-amarelo, vermelho-verde e preto-branco (Jameson, 1955).

Hering também mencionou na sua teoria o facto de haverem mecanismos de resposta positivos para as cores branco, vermelho e amarelo. Por sua vez, os mecanismos de resposta das cores preto, verde e azul são negativas (Hurvich & Jameson, 1957; Buchsbaum & Gottschalk, 1983).

Mais tarde esta teoria veio ser complementada por artigos que encontraram o que chamaram de neurónios oponentes. Estes encontram-se na retina e no corpo geniculado lateral e enviam respostas excitatórias correspondentes a uma parte do espectro e respostas inibitórias à outra parte do espectro (Svaetichin, 1956; DeValois, 1960).

Estas duas teorias estão atualmente aceites, dado que se baseiam em mecanismos fisiológicos que ocorrem em partes diferentes do sistema visual. A teoria da tricromacia descreve a resposta dos recetores, neste caso, os cones. Por sua vez, a teoria dos processos oponentes descreve os eventos que ocorrem em zonas mais avançadas do sistema visual, nomeadamente na zona em que ocorre a percepção visual (Goldstein, 2010b). Na Figura 8 evidencia-se precisamente a complementaridade destas duas teorias.

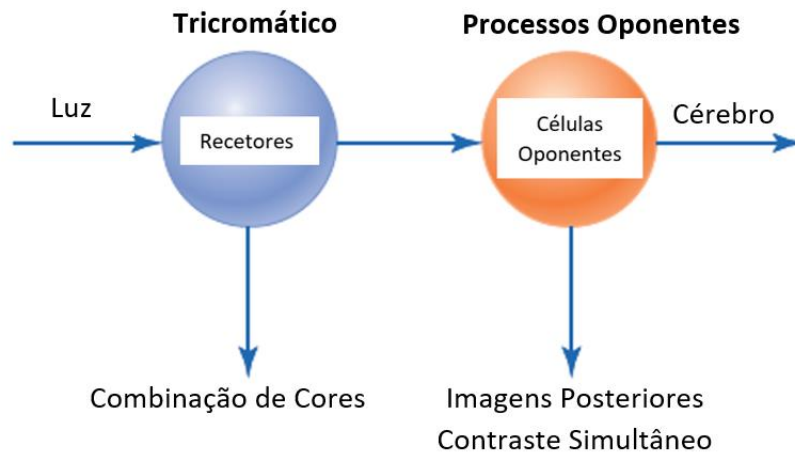


Figura 8. Ambas as teorias da visão das cores estão aceites e são complementares, explicando diferentes etapas do processo da visão das cores. Adaptado de (Goldstein, 2010b).

1.3. Colorimetria

A colorimetria utiliza equações numéricas de forma a poder descrever diferentes cores, com diferentes distribuições espectrais (Schanda, 2007). Procura-se obter uma previsão de como a junção de duas ou mais luzes de diferentes distribuições espectrais irão resultar, sob determinadas condições de observação (Fairchild, 2005b).

Nesta secção pretende-se fazer uma breve descrição dos espaços de cor existentes de modo a haver uma representação da cor visualizada.

1.3.1. Triestímulos

Neste sistema de classificação, a correspondência de cores pode ser especificada em termos de valores de três cores primárias aditivas. Assim sendo, a equação que é usada para classificar os triestímulos é a Equação 1:

$$C = \rho R + \gamma G + \beta B$$

Equação 1. Equação para determinação dos triestímulos.

Esta equação significa que uma cor (C) é formada pela soma das quantidades relativas (ρ , γ , β) de vermelho (R – *red*), verde (G – *green*) e azul (B – *blue*), respetivamente (Gegenfurtner & Kiper, 2003; Fairchild, 2005b). Desta forma, se os valores dos triestímulos de duas distribuições espectrais diferentes são idênticos haverá uma correspondência de cor e será observada da mesma forma por vários observadores (Fairchild, 2005b).

Na Figura 9 estão representados os triestímulos R, G e B para um conjunto de três primários. Esta figura indica que, para determinar os triestímulos de um espectro arbitrário teremos de alterar a quantidade relativa de três estímulos primários e misturá-los até obter a cor do espectro arbitrário desejada. Quando não conseguimos igualar, temos de misturar um dos primários, numa determinada quantidade ao espectro arbitrário, e igualar à cor obtida a mistura dos outros dois primários. O primário que é misturado com o espectro arbitrário é representado, então, com valor negativo (Schanda, 2007).

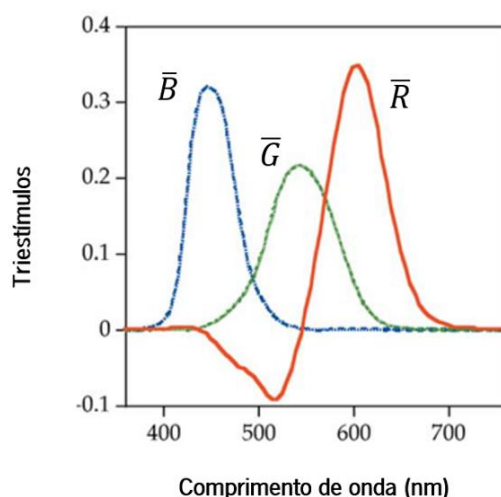


Figura 9. Representação das funções de reprodução cromática obtidas a partir de três cores primárias R, G e B. Adaptado de (Fairchild, 2005b).

13.2. Sistema XYZ

Como as cores que são representadas indicando os triestímulos (R , G , B) têm a necessidade de admitir valores negativos, a Comissão Internacional da Iluminação (CIE) criou um conjunto de primários imaginários de forma a que estes tenham sempre valores positivos. Estes são denominados de triestímulos e são apresentadas como X , Y e Z (Comission Internationale de l'Éclairage, 2004; Fairchild, 2005b). Na Figura 10 faz-se a representação destes triestímulos e das suas curvas de distribuição espectral, sendo que nenhuma admite valores negativos (Marcus, 1998). Assim sendo, os primários são considerados primários imaginários, dado que os seus valores são sempre positivos (Rigg, 1997). Neste sentido, o espaço RGB com triestímulos reais é substituído pelo espaço XYZ de triestímulos imaginários por ser mais fácil de trabalhar (Schanda, 2007).

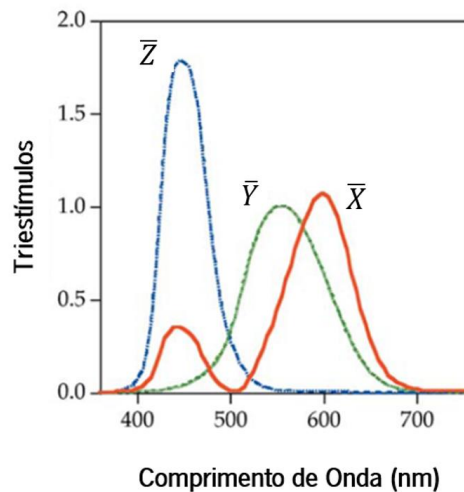


Figura 10. Representação das funções de reprodução cromática das três cores primárias imaginárias X, Y e Z. Adaptado de (Fairchild, 2005b).

1.3.3. Diagrama CIE

Este diagrama está construído com a base de que nos indica qual a quantidade de primários necessária para criar qualquer uma das cores. Este diagrama é construído convertendo o valor dos triestímulos em coordenadas cromáticas (Comission Internationale de l'Éclairage, 2004; Schwartz, 2010).

Na Figura 11 pode-se ver a representação esquemática deste diagrama. Verifica-se que todas as cores monocromáticas se distribuem pelo arco que forma o perímetro do diagrama, sendo chamado de locus espectral. Sempre que se queira descobrir qual a cor formada por uma mistura de quantidades iguais de dois comprimentos de onda, basta uni-los com uma linha reta. A cor formada estará no meio dessa linha (Fairchild, 2005b; Schanda, 2007). Todas as cores puras estão localizadas na região curva do contorno. Relativamente à linha reta deste contorno, esta é chamada linha púrpura, uma vez que ao longo desta se encontram as cores púrpuras saturadas (Marcus, 1998; Schwartz, 2010).

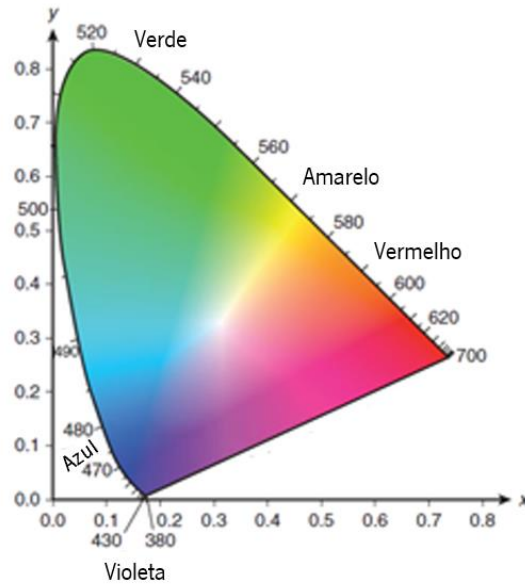


Figura 11. Diagrama cromático CIE. Adaptado de (Schwartz, 2010).

As funções de correspondência cromática usadas para calcular os valores dos triestímulos $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ e $z(\lambda)$ mostram a quantidade de cada um dos primários necessária para obter um dado comprimento de onda. Assim, é possível determinar, para cada comprimento de onda, qual o conjunto de triestímulos XYZ correspondente. As equações que representam as coordenadas cromáticas do diagrama cromático CIE representado acima, são as equações Equação 2, Equação 3 e Equação 4 apresentadas abaixo (Comissão Internationale de l'Éclairage, 2004):

$$x(\lambda) = \frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}$$

Equação 2. Equação da coordenada cromática $x(\lambda)$,

$$y(\lambda) = \frac{\bar{y}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}$$

Equação 3. Equação da coordenada cromática $y(\lambda)$.

$$z(\lambda) = \frac{\bar{z}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}$$

Equação 4. Equação da coordenada cromática $z(\lambda)$.

1.3.4. Espaço CIELAB

O espaço CIELAB é um espaço de cor recorrentemente utilizado na indústria têxtil. Este espaço tenta traduzir melhor a percepção visual de um observador (Fairchild, 2005b; Schwartz, 2010).

A grande vantagem deste espaço, em relação aos demais, é o facto de este espaço atribuir uma distância entre duas cores que é proporcional à diferença perceptual do observador. Além disso, é razoavelmente uniforme, sendo que diferença de cores é medida pela diferença entre dois vetores. Neste espaço, cores muito próximas, com diferença de menos de uma unidade, são indistinguíveis, sendo assim consideradas como só uma cor (Rigg, 1997; Gegenfurtner & Kiper, 2003).

1.3.5. Espaço CIELUV

Frequentemente utilizado em aparelhos eletrónicos, nomeadamente monitores. É um espaço em que os valores de U e de V dependem da luminância incidente e que é um sistema cromático tridimensional em todo semelhante ao espaço CIELAB (Fairchild, 2005b).

1.4. Deficiências na Visão das Cores

É sabido que deficiências de visão das cores podem ter impacto na qualidade de vida da pessoa afetada (Stoianov et al., 2018). A visão das cores é importante, por um lado, para o lado emocional tal como a disposição demonstrada numa experiência estética (Steward & Cole, 1989; Cumberland et al., 2004) e, por outro lado, para informações específicas de conveniência do dia-a-dia como mapas, semáforos ou até medicamentos (Chaparro & Chaparro, 2017).

O daltonismo pode ser um defeito genético que atinge maioritariamente a população masculina. Isto ocorre porque a falha genética está ligada ao cromossoma X. O traço genético que causa deficiência na visão das cores, associado ao cromossoma X, tem um carácter recessivo e codifica a formação dos cones sensíveis à cor verde e dos cones sensíveis à cor vermelho. Como o sexo masculino apenas possui um cromossoma X, se este for portador da deficiência de visão das cores, esta irá manifestar-se. Já no caso do sexo feminino, existem dois cromossomas X pelo que a probabilidade de receber dois cromossomas com deficiência em visão das cores é menor, o que diminui a incidência no sexo feminino. Esta é a única forma de um indivíduo do sexo feminino ter uma deficiência da visão das cores dado que, quando recebe apenas um cromossoma X alterado, a doença não se manifesta por ter um carácter recessivo. Desta forma, homens daltónicos vão transmitir o gene do daltonismo apenas para as filhas. Esta passagem genética aplica-se apenas para deficiências na visão das cores vermelho e verde. Já no

caso de deficiências na visão da cor azul, este está dependente do cromossoma 7, pelo que há igual probabilidade de homens ou mulheres terem esta deficiência, apesar de pouco frequente (Hunt, 1995; Fairchild, 2005a; Schwartz, 2010).

Noutro campo, as deficiências na visão das cores podem ser classificadas quanto à origem como sendo congénitas ou adquiridas (Shin et al., 2007). As suas principais diferenças estão resumidas na Tabela 1 (Schwartz, 2010).

Devem ser tidas com especial atenção todas as deficiências de visão das cores que são adquiridas dado que estas poderão estar associadas a patologias (Ishiara et al., 2001). Doenças como Cataratas, Parkinson, Esclerose Múltipla, Neuropatia Ótica de Leber ou Retinopatia Diabética têm como sinais iniciais o aparecimento de um daltonismo adquirido (Gualtieri et al., 2013; Langina-Jansone et al., 2020; Piro et al., 2017, 2018; Ventura et al., 2007). Além disso, existem ainda alguns medicamentos que poderão criar deficiências na visão das cores transitórias, enquanto se faz uso do medicamento, como é o caso de medicação bloqueadora de dopamina (Fernandes et al., 2019).

Tabela 1. Diferenças entre deficiências da visão da cor congénitas e deficiências da visão da cor adquiridas. Adaptado de (Schwartz, 2010).

Deficiências Congénitas	Deficiências Adquiridas
Presentes desde o nascimento	Aparecem durante a vida
Tipo e severidade mantém-se durante toda a vida	Tipo e severidade pode-se alterar durante a vida
Por norma, ambos os olhos são afetados	Por norma, apenas um olho é afetado
Acuidade visual e campos visuais não são afetados (exceto monocromatismo)	Acuidade visual e campos visuais são afetados
Maior incidência no sexo masculino	Igual incidência em ambos os sexos
Maioritariamente deficiências no verde-vermelho	Maioritariamente deficiências no azul

Além do motivo patológico, conhecer as deficiências na visão das cores ajudam também a compreender como se processa a visão normal e, além disso, ajuda a conhecer as limitações do dia-a-dia de um daltónico. É de ressaltar que, para algumas profissões, é mesmo feito o despiste de deficiências de visão das cores (Kaiser & Boynton, 1996; Chakrabarti, 2018).

Foi John Dalton, investigador do século XVIII, que descreveu a sua própria deficiência das cores como vendo “Todos os crisântemos parecem-me um matiz azul escuro: mas alguns parecem ter um matiz de castanho escuro. Eu tenho visto espécies de crisântemos, rosas e musgo e todos são muito

parecidos”. Daqui surgiu o termo daltonismo como alteração a uma visão das cores normais (Goldstein, 2010b).

Pacientes com deficiências na visão das cores podem ser agrupados em quatro grandes grupos: monocromatas, dicromatas, tricromatas anómalos ou tetracromatas (Viénot et al., 1995; Pasmanter & Munakomi, 2019). Segue-se uma breve descrição de cada um destes grupos.

Os monocromatas são um tipo raro de daltónicos sendo, na maioria das vezes, uma deficiência hereditária. Estes pacientes podem ter apenas um cone e este não ser funcional ou podem não ter nenhum cone presente, sendo este último chamado de monocromatas de bastonetes. Nestes casos, estes pacientes veem apenas com recurso aos bastonetes. Desta forma, a sua visão passa por uma discriminação entre luzes com diferentes comprimentos de onda mais limitada que o normal. A visão é apenas baseada numa escala de luminosidade em que distinguem as cores branco, cinzento e preto. Adicionalmente, estes pacientes têm baixas acuidades visuais e, no caso da monocromacia de bastonetes, têm ainda uma grande sensibilidade à luz (Goldstein, 2010b; Schwartz, 2010).

No que diz respeito aos dicromatas, estes apresentam a ausência de um dos tipos de cones existentes (S, M ou L). Assim, consoante o cone que se encontra em falta pode-se classificar as dicromacias em protanopia, deuteranopia e tritanopia (Alpern et al., 1983; Fairchild, 2005a; Schwartz, 2010):

- Protanopia: ausência de cones L, sensíveis nos comprimentos de onda longos, pelo que há uma dificuldade em distinguir a cor vermelha da cor verde.

- Deuteranopia: ausência de cones M, sensíveis nos comprimentos de onda médios, pelo que há uma dificuldade em distinguir a cor verde da cor vermelha.

- Tritanopia: ausência de cones S, sensíveis nos comprimentos de onda curtos, pelo que há uma dificuldade em distinguir a cor azul da cor amarela.

Na Figura 12 demonstra-se como uma imagem é vista por vários observadores com deficiências na visão das cores distintas, demonstrando as diferenças entre elas.

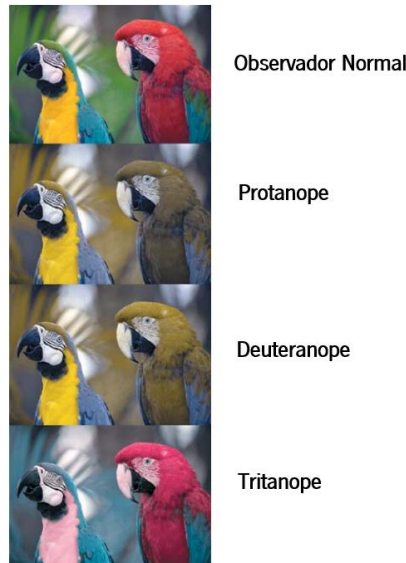


Figura 12. Comparação de uma imagem vista por um observador normal e vista por observadores com deficiência na visão das cores. De cima para baixo: Observador Normal; Protanope; Deuteranope; Tritanope. Adaptado de (Fairchild, 2005c).

Quando se refere a tricromatas anómalos refere-se pacientes que possuem os três tipos de cones mas que um deles é anômalo, não tendo a sua função equivalente a um normal (Brainard, 2003; Schwartz, 2010; Sato et al., 2019). Assim, um tricromatas anômalo tem os picos de sensibilidade dos vários cones mais próximos, em nanómetros, uns dos outros, pelo que veem menos cores (Widayati et al., 2019). Tal como os dicromatas, também os tricromatas anómalos podem ter três classificações, consoante o cone anômalo presente:

- Protanomalia: dificuldade de distinção de comprimentos de onda longos, com especial relevância para a cor vermelha.
- Deuteranomalia: dificuldade de distinção de comprimentos de onda médios, com especial relevância para a cor verde.
- Tritanomalia: dificuldade de distinção de comprimentos de onda curtos, com especial relevância para a cor azul.

Existe ainda, o caso particular dos tetracromatas. Não sendo esta considerada uma deficiência na visão das cores, ocorre quando os pacientes possuem quatro tipos de cones, um a mais relativamente ao normal, pelo que veem um maior espectro de cores (Goldstein, 2010b).

Estudos apontam para a prevalência de daltonismo ser cerca de 7% entre a população masculina em oposição aos cerca de 0,5% entre a população feminina (Wurm et al., 1993; Fairchild, 2005c; Birch, 2013). Na Tabela 2 encontram-se as percentagens de existência de deficiências na visão das cores.

Tabela 2. Percentagem de cada uma das deficiências de visão das cores existentes. Adaptado de (Fairchild, 2005c).

Tipo	Sexo Masculino (%)	Sexo Feminino (%)
Monocromatismo de Cones	~0	~0
Monocromatismo de Bastonetes	0,003	0,002
Protanopia	1,0	0,02
Deuteranopia	1,1	0,01
Tritanopia	0,002	0,001
Protanomalia	1,0	0,02
Deuteranomalia	4,9	0,38
Tritanomalia	~0	~0
Total	8,0	0,4

As linhas de confusão são linhas que demonstram quais as cores que os dicromatas não conseguem distinguir. Assim, todas as cores que estejam nessas linhas são sempre vistas como sendo iguais. Deve-se ter em atenção que estes diagramas apenas avaliam a cor percebida e não as diferenças de luminosidade entre as cores da mesma linha de confusão (Schwartz, 2010). Na Figura 13 representam-se várias linhas de confusão de cada uma das deficiências da visão da cor existentes na dicromacia.

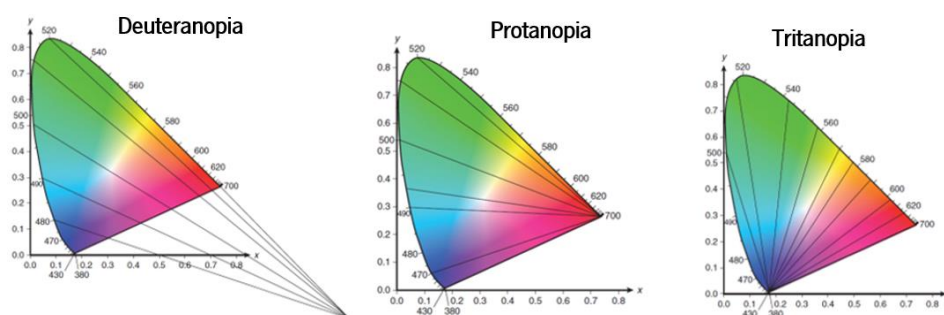


Figura 13. Linhas de confusão da Deuteranopia, Protanopia e Tritanopia, da esquerda para a direita, respetivamente. Adaptado de (Schwartz, 2010).

1.5. Metodologia de Pesquisa

Para a elaboração desta revisão bibliográfica foi necessário definir uma metodologia de pesquisa, tendo como objetivo selecionar a informação encontrada.

Para a pesquisa de artigos foram utilizadas várias bases de dados tais como *Pubmed*, *Science Direct*, *EDoc*, *Google Scholar* e *Scopus*. Nestas, foram efetuadas pesquisas com base na utilização de palavras-chave, segundo a lista abaixo:

- *Far peripheral color vision*
- *Peripheral color vision*
- *Photoreceptor variation with eccentricity*
- *Foveal cone density*
- *Peripheral retina cone density*
- *Edge of the visual field*
- *Small field tritanopia*
- *Chromatic discrimination*
- *Hemispheric asymmetry*

Além disso, foram definidos alguns critérios de inclusão e exclusão aquando da pesquisa bibliográfica, sendo esses os seguintes:

Crítérios de inclusão:

- Artigos oriundos de qualquer país
- Artigos de qualquer ano de publicação

Crítérios de Exclusão:

- Estudos que se refiram a qualquer espécie que não a humana
- Artigos de outros idiomas que não inglês

Como complemento, foram utilizados termos como AND, OR e NOT para refinar a pesquisa de artigos nas bases de dados, sendo que o termo AND foi utilizado para o efeito de uma combinação restritiva, o termo OR foi utilizado para uma combinação aditiva e o termo NOT foi utilizado para um efeito de exclusão.

1.6. Métodos de Determinação da Visão das Cores na Retina Periférica

Em seguida apresentam-se, de forma resumida, alguns métodos utilizados recorrentemente na determinação da visão das cores na retina periférica. A partir destes é possível conhecer como a visão das cores varia à medida que se vai aumentando a excentricidade, passando da retina central para a retina periférica. Desta forma, com recurso a estes métodos, é possível caracterizar a visão das cores em todo o campo visual.

Existem ainda outras formas de detetar alterações da visão das cores através de testes de visão das cores, comumente utilizados em ambiente clínico, os quais apenas são referenciados na secção Anexos deste documento.

Nomeação das Cores

Consiste na exposição de comprimentos de onda monocromáticos específicos de modo que o paciente identifique qual a cor que vê quando exposto aquele comprimento de onda.

É habitual a classificação em azul, amarelo e vermelho, mas também pode ser utilizado em experiências com o objetivo de dizer apenas, por exemplo, se é vermelho ou não vermelho, indicando se vê ou não a cor em estudo (Boynton et al., 1964a; Weitzman & Kinney, 1969). No entanto, o método da nomeação das cores depende da população e do léxico utilizado por essa mesma população, podendo ser utilizada com qualquer cor, monocromática ou não.

Discriminação de Diferentes Comprimentos de Onda

Pacientes ajustam os comprimentos de onda até igualarem a cor nos dois campos de teste. Para esse efeito é feita uma mistura de comprimentos de onda (Moreland & Cruz, 1959; Weale, 1951, 1953).

Correspondência de Cores Assimétricas

O paciente vê simultaneamente duas imagens, sendo cada uma delas apresentada apenas num olho. O fundo mantém-se, mas é variado o iluminante utilizado em cada uma das imagens. O objetivo é selecionar uma imagem entre várias que corresponda à mesma cor do objeto visto anteriormente. No final, as distribuições espectrais da cor do objeto de teste e do objeto escolhido são comparadas para verificar as suas correspondências (Weale, 1951, 1953).

Sensibilidade para Diferentes Matizes

Testa a sensibilidade para diferentes matizes consoante o tamanho do estímulo e a sua localização no campo visual. É apresentado um disco colorido formado por uma mistura de vermelho e verde e vai sendo variado o tamanho do disco. Se aumentar o disco este aparenta ser mais verde e se diminuir o disco este aparenta ser mais vermelho.

Este facto ocorre dado que os diferentes tipos de cones variam em densidade nos diferentes campos visuais, mostrando que os cones sensíveis ao vermelho estão mais presentes perto da fóvea e os sensíveis ao verde estão presentes na retina periférica (Connors & Kelsey, 1961; Connors & Kinney, 1962).

Fotometria por *Flicker*

É aplicado um *flash* de intensidade muito fraca, o qual permite ser perfeitamente distinguíveis dois comprimentos de onda. No decorrer da experiência, vai sendo variada a frequência do *flash*, aumentando-o. Desta forma, a discriminação das cores começa a ser fundida, deixando de serem duas cores distintas e passando a ser uma cor única, que advém da junção de dois comprimentos de onda. Quanto maior a frequência do *flash*, menos diferenças são percebidas entre as cores (Lee et al., 1988).

1.7. Visão Periférica e a Visão das Cores

A visão periférica é bastante usada no dia-a-dia. Se algo se mover na periferia do campo visual o olho irá mover-se para essa direção, de forma a criar uma imagem na retina desse objeto com recurso à visão central, que será uma imagem de melhor qualidade (Simpson, 2017). Esta visão, apesar de despercebida, é usada diariamente em situações tão simples como conduzir (Huisinigh et al., 2015) ou caminhar (Mcmanus et al., 2017).

Em vários estudos foram usados diferentes processos para estudar a visão das cores periférica. É o caso de nomeação de cores (Boynton et al., 1964a; Weitzman & Kinney, 1969), discriminação de diferentes comprimentos de onda (Weale, 1951, 1953; Moreland & Cruz, 1959), correspondência de cores assimétricas (Weale, 1951, 1953; Cruz & Moreland, 1955) e a sensibilidade para diferentes matizes (Connors & Kelsey, 1961; Connors & Kinney, 1962). Estes sugeriram que a dicromacia aumentava com a excentricidade (Nerger et al., 1995), havendo assim diferenças na visão das cores relativamente à visão central.

Existe uma maior perda de acuidade cromática relativamente à acuidade acromática à medida que a excentricidade vai aumentando (Anderson et al., 1991). Este facto sugere que a perda da visão

das cores é seletiva e implica que existem mecanismos cromáticos que são diferentes dos mecanismos acromáticos (Mullen & Kingdom, 1996). Existem algumas teorias de fontes de variação à sensibilidade cromática ao longo do campo visual. A primeira teoria aponta para a redução de células ganglionares com a excentricidade, em especial as células ganglionares do tipo P que são indicadas como sensíveis à cor. Por outro lado, a disposição dos cones que estão mais projetados para o centro da retina, em relação à periferia (Mullen & Kingdom, 1996).

A diminuição da performance da cor é muito provável ser devido à organização espacial da retina e não apenas da perda de sensibilidade (Abramov et al., 1991; Martin et al., 2001). Alguns estudos indicam que o ser humano torna-se dicromata, devido à falta de oposição dos cones L e M, na retina periférica, nomeadamente nas excentricidades entre os 25° e os 30°, ficando a visão das cores ausente acima dos 40° (Ferree & Rand, 1919; Moreland & Cruz, 1959). No entanto, estes dados não são unânimes entre toda a população científica (Hellpach, 1900; Wald, 1967; Weitzman & Kinney, 1969).

Existe ainda a teoria, comprovada por teorias psicofísicas, que indica a possibilidade de haverem zonas da retina com diferentes tipos de visão das cores, nomeadamente tricromacia na retina central, dicromacia na retina intermédia e monocromatismo na retina periférica, dada a inexistência de cones nesta zona (Ferree & Rand, 1919; Wald, 1967; Weitzman & Kinney, 1969).

A distribuição dos fotorreceptores na retina periférica é feita de uma forma muito particular. Na zona mais remota da retina, adjacente à ora serrata, há um anel de 1 mm de largura onde os cones predominam mais que os bastonetes (Mollon et al., 1998). Apesar de os bastonetes serem muito superiores em número do que os cones na maior parte da retina periférica, essa relação passa para 1:1 quando se analisa a área de 1,5 mm da ora serrata e de 1:10, a favor dos cones, quando se analisa a extremidade da retina. No total, estima-se que a área fina de cones mencionada anteriormente contenha cerca de 250 000 cones, comparativamente aos 75 000 presentes na fóvea (Williams, 1991). Dos cones presentes nesta área, cerca de 90% são cones do tipo L e M, enquanto apenas uma pequena minoria são cones do tipo S. Existe então a teoria, descrita por *Hellpach et al.*, de que área de cones pode estar relacionada com a visão das cores em zonas bastante periféricas da retina. Ele reportou que na retina periférica as luzes pareciam sem cor mas que em zonas de extrema excentricidade havia uma zona onde as cores eram percebidas (Hellpach, 1900).

A densidade de cones na retina nasal é sempre maior que na retina temporal correspondente (Curcio et al., 1987). Além disso, a assimetria também se nota no tipo de cone, sendo os cones do tipo S raros na fóvea central (Wald, 1967; Marc & Sperling, 1977) e mais abundantes na perifóvea nasal (Williams et al., 1981).

Quando o estímulo colorido é suficientemente grande, apesar da variação encontrada de cones e bastonetes, este atinge as várias zonas da retina e a visão da cor é uniforme (Volbrecht & Nerger, 2012). *Volbrecht et al.* concluíram que o efeito de estímulos pequenos é influenciado pela presença de bastonetes e pela localização retiniana. Neste estudo verificaram que a perda de discriminação do matiz era maior no meridiano vertical relativamente ao meridiano horizontal. Quando o tamanho do estímulo aumentava diminuía as diferenças entre as várias zonas da retina (Volbrecht & Nerger, 2012). Relativamente ao campo superior e inferior, dentro dos 10° de excentricidade retiniana, o campo superior tem uma maior densidade de bastonetes. Quando se passa para uma excentricidade de 20° é a zona superior nasal que tem a maior densidades desses fotorreceptores (Volbrecht et al., 2009). No que diz respeito aos cones, nos primeiros 3° há uma maior quantidade no meridiano horizontal relativamente ao vertical. Essa diferença é mantida até aproximadamente 20° de excentricidade retiniana, onde a densidade de cones é maior na região nasal (Hendrickson et al., 1990).

Num estudo de 1992, verificaram-se assimetrias entre a retina periférica nasal e temporal, sendo que na retina nasal as cores aparentam maior saturação. Além disso, verificaram que após os 20° de excentricidade torna-se impossível comparar a visão das cores da fóvea, independentemente do comprimento de onda em estudo (Abramov et al., 1992), o que mais tarde veio a ser comprovado como não sendo verdadeiro (Mullen & Kingdom, 2002).

Existem estudos que apontam para diferenças entre os hemisférios superior e inferior na discriminação da cor, em indivíduos com visão das cores normal. *Levine e McAnany* encontraram uma maior discriminação da cor no hemisfério inferior (Levine & McAnany, 2005). Mais recentemente, *Mollon e Danilova* não encontraram diferenças significativas entre a discriminação de cor do hemisfério superior e do hemisfério inferior (Danilova & Mollon, 2009). Estas diferenças podem ser explicadas pela densidade de fotorreceptores nos diferentes hemisférios (Curcio & Allen, 1990), mas também pelas diferenças nos protocolos experimentais, dado que as zonas avaliadas nos dois estudos foram diferentes, sendo que *Levine e McAnany* avaliaram os hemisférios superior e inferior a 12° de excentricidade, a partir da fóvea, enquanto que *Danilova e Mollon* avaliaram o hemisfério superior a 45° e a 315° de excentricidade a partir da cabeça do nervo ótico, e o hemisfério inferior a 135° e a 225° de excentricidade a partir da cabeça do nervo ótico.

Parry et al. descobriram que a perda de discriminação dos estímulos coloridos na retina periférica não é igual em todo o espectro de cores. Enquanto existem cores que são bastante afetadas na sua discriminação, outras permanecem praticamente invariáveis com o aumento da excentricidade (Parry et al., 2006). Na periferia, a cor verde aparece com saturação diminuída e há mudanças de matizes de

várias cores para um vasto número de observadores (Moreland & Cruz, 1959; Stabell & Stabell, 1984; Parry et al., 2006). Em geral, as mudanças de matiz que ocorrem na retina periférica podem ser classificadas como em direção ao azul ou em direção ao amarelo (Oppen et al., 2014). Os matizes rosa-roxo e verde-azul alteram-se na direção do azul, enquanto que os matizes verde-amarelo se alteram em direção ao amarelo (Parry et al., 2006). Para lá dos 30° de excentricidade, a visão das cores passa a dicromata, pelo que todos os matizes são percebidas como amareladas ou azuladas (Mullen & Kingdom, 2002). Por outro lado, as conclusões de um estudo realizado por *Nerger et al.* em 1995, o amarelo não é afetado pelo tamanho do estímulo de teste e pela excentricidade da retina e o azul é melhor percebido quanto maior o tamanho do estímulo apresentado na retina periférica, tal como acontece com a cor verde (Nerger et al., 1995).

A diminuição de sensibilidade cromática com o aumento da excentricidade em relação à retina central em comprimentos de onda correspondentes às cores vermelho e verde têm a particularidade de provocar a sensação de cor vermelha e verde, mas também a sensação de amarelo. No centro da retina, como os fotorreceptores são bastante sensíveis ao verde e ao vermelho, o amarelo não é percebido. No entanto, na periferia da retina, com a diminuição da sensibilidade ao verde e ao vermelho, há lugar para se perceber a cor amarela (Ferree & Rand, 1920).

Em 2010, *Webster et al.* analisaram como varia a visão das cores entre a fóvea e a retina periférica até aos 8° de excentricidade. Estes dois pontos de análise foram escolhidos por haver uma grande diferença de distribuição de fotorreceptores entre as duas zonas. Além disso, existe uma grande mudança de sensibilidade espectral entre estes dois pontos devido à variação da densidade de pigmento macular, que é máxima na fóvea e diminui rapidamente com a excentricidade, atingindo um valor estacionário quando se chega perto dos 5° de excentricidade (Snodderly et al., 1984; Werner et al., 1987; Wooten & Hammond, 2005). O pigmento macular tem o seu máximo de absorção perto dos 460 nm absorvendo, portanto, seletivamente os comprimentos de onda mais baixos (Bone & Sparrock, 1971). Os resultados encontrados neste estudo foram que a cor branca é sempre percebida como tal. Tal facto sugere que os três tipos de cones são recalibrados para alterações de sensibilidade espectral dado que o branco era percebido de igual forma na fóvea e num ponto mais afastado desta. Além disso, também foi concluído que não ocorre mudança na discriminação de matizes entre a fóvea e os 8° de excentricidade. Os resultados obtidos neste estudo apontam para a existência de processos distintos que provocam a constância da cor, apesar do afastamento da fóvea, quando analisada até aos 8° excentricidade (Webster et al., 2010).

A diminuição do matiz com o aumento da excentricidade da retina periférica também ocorre. Porém, não é igual para todos os matizes. Desta forma, surgiu o conceito de zonas de cor (Johnson, 1986). Estas estão circunscritas a zonas do campo visual em que em cada zona é percebida uma cor. Os limites destas zonas de cor podem variar consoante o estímulo de cor que recebe, nomeadamente em função da sua intensidade e da intensidade do fundo (background) (Kelsey & Schwartz, 1959).

Relativamente à comparação da visão das cores entre a região periférica da retina e a zona foveal, estas são expressamente diferentes. Neste sentido, sabe-se que quando um estímulo colorido é exposto a um campo visual mais excêntrico é percebido com diferenças de matiz e saturação (Ferree & Rand, 1919; Parry et al., 2006). Estas mudanças na visão das cores foram provadas estar relacionadas com as mudanças no tamanho do estímulo, com o aumento da excentricidade da retina, com a quantidade relativa de cones L e M e com a quantidade de bastonetes (Stabell & Stabell, 1984; McKeefry et al., 2007). Além disso, uma redução na luminância (Hartridge, 1945; Brown, 1951; Middleton & Mayo, 1952) e a duração do estímulo (Weitzman & Kinney, 1967, 1969) também influenciam a visão das cores periférica.

Em seguida faz-se uma descrição de estudos realizados no âmbito da visão das cores periféricas estudando os principais possíveis motivos da mudança da visão das cores: tamanho do estímulo, quantidade de cones L e M e a quantidade de bastonetes e cones.

Tamanho do Estímulo

Alguns estudos indicam que a diminuição da sensibilidade na periferia pode ser compensada com o aumento do tamanho do estímulo (Noorlander et al., 1983; Abramov et al., 1991; Vakrou et al., 2005; Murray et al., 2006). Vários autores mostraram que testes psicofísicos reportaram que cores muito saturadas podem ser observadas na retina periférica desde que seja ajustado o tamanho e a intensidade de um estímulo de forma adequada (Stabell & Stabell, 1982; Noorlander et al., 1983; Abramov et al., 1991; Hibino, 1992; Nerger et al., 1995).

Abramov et al. verificaram que a discriminação da cor se mantém semelhante à da fóvea até aproximadamente aos 20° de excentricidade, se o estímulo for grande o suficiente. Verificaram ainda que o estímulo da cor verde necessita de um estímulo de maior dimensão para ter uma aparência semelhante à da fóvea. Por fim, concluíram que após os 20° de excentricidade, mesmo com estímulos de tamanhos ajustados às excentricidades, as cores são sempre percebidas com um menor grau de saturação (Abramov et al., 1991). No entanto, outros estudos afirmam que o tamanho do estímulo é um parâmetro crítico e que a visão das cores existe até, pelo menos, 45° de excentricidade retiniana

(Abramov et al., 1991; Buck et al., 1998; Gordon & Abramov, 1977; Johnson, 1986; Noorlander et al., 1983; Van Esch et al., 1984).

Noorlander et al. mostraram que, com um estímulo específico, com um alvo de tamanho grande e baixa frequência temporal (1 Hz), diferentes matizes podem ser percebidos até 90° de excentricidade (Noorlander et al., 1983).

Por sua vez, *Nagy et al.* verificaram que os mecanismos de discriminação na retina periférica de verde-vermelho são semelhantes aos foveais, quando avaliada a 25° de excentricidade. Quando se aumenta o tamanho do estímulo ocorre uma discriminação semelhante à que é obtida com estímulos de menor tamanho na fóvea (Nagy & Doyal, 1993).

Quantidade de cones L e M

É muito estudada a quantidade de cones L e M presentes na retina humana, chamado de rácio de cones L/M. As técnicas mais frequentemente são a imagiologia, a análise de mRNA que se expressa na retina e a densiometria retiniana (Berenschot et al., 1996; Rushton & Baker, 1964). *Hagstrom et al.* estudaram vinte e três homens e encontraram um rácio entre 0,82 e 3,00. Quando expandiram a amostra para cem indivíduos do sexo masculino obtiveram variações entre 0,82 e 9,71 (Hagstrom et al., 1998). Estudos comprovaram que cones L são mais predominantes que M (Cicerone & Nerger, 1989; Cicerone, 1990; Nerger & Cicerone, 1992; Gowdy & Cicerone, 1998; Roorda & Williams, 1999).

A variação do rácio L/M pode ter influência nos resultados de testes como a fotometria por *flicker* (Vries, 1947; Rushton & Baker, 1964; Kremers et al., 2000). Existem ainda evidências de não haver relação entre a visão da cor amarela e o rácio de cones L e M (Pokorny & Smith, 1977; Mollon, 1982).

Hagstrom et al. reportaram que a quantidade de cones L e M diminui com a excentricidade da retina humana sendo que aos 40° de excentricidade é metade da medida na retina central (Hagstrom et al., 1998).

Brainard et al. criaram imagens mosaico de cones a 1° da retina nasal e 1° da retina temporal de dois indivíduos masculinos jovens adultos. A identificação de cada tipo de cones foi feita por comparação de imagens antes e depois de exposição de luz de 650 nm e 470 nm. Os dois observadores eram muito diferentes sendo que um tinha rácio de cones L/M de 3,79 e outro tinha rácio de 1,15 (Brainard et al., 2000). A eficiência a detetar luzes de diferentes composições espectrais (Cicerone & Nerger, 1989; Vimal et al., 1989; Wesner et al., 1991) e a distinguir *flashes* de luz (Krauskopf, 1964; Krauskopf & Srebro, 1965) também pode ser influenciado por este rácio.

Otake *et al.* mediram a quantidade de cones L e M em 28° de excentricidade no eixo naso-temporal e estes diminuía de forma consistente com as mudanças na estabilidade do sistema de otonência verde-vermelho (Otake & Cicerone, 2000).

Estudos mais recentes tentaram explicar o facto de haver uma mudança na discriminação das cores na retina periférica com base nos mecanismos de otonência dos cones L e M e dos cones S, em função da excentricidade retiniana. Os resultados destes estudos é que a visão das cores mediada pelos cones L e M na periferia retiniana é muito diminuta. Já a visão mediada pelos cones S não sofre um declínio tão grande com o aumento da excentricidade (Mullen & Kingdom, 2002; Mullen *et al.*, 2005; Vakrou *et al.*, 2005). No entanto, outros estudos dizem que a otonência dos cones L e M é ausente na visão periférica (Mullen *et al.*, 2005). No estudo de Hansen *et al.*, a sensibilidade dos cones L e M diminui para a periferia e tornou-se ausente cerca dos 25°, sugerindo que os neurónios da otonência L e M na retina periférica de primatas têm uma baixa probabilidade de contribuir para a deteção de contraste medida depois desse limite (Hansen *et al.*, 2009).

Quantidade de bastonetes e cones

Outro fator que interfere na visão das cores periférica é a influência dos bastonetes. Como estes partilham uma via com os cones S, o aumento do seu número na retina periférica faz com que haja uma maior interação com os cones (Stabell & Stabell, 1976, 1979; Stabell & Stabell, 1982, 1994). Em geral, a influência dos bastonetes parece levar à perda de saturação dos estímulos coloridos e à mudança na discriminação dos matizes (Stabell & Stabell, 1996).

Outra abordagem da alteração da visão das cores na periferia é baseada na diminuição da quantidade de cones. Assim, segundo esta teoria, se se compensar a diminuição de cones com os parâmetros intensidade e tamanho dos estímulos coloridos, a visão das cores em zonas mais excêntricas pode ser equivalente à visão das cores foveal (*Color Appearance in the Peripheral Retina: Effects of Stimulus Size*, n.d.; Noorlander *et al.*, 1983; Van Esch *et al.*, 1984). De facto, os resultados obtidos nestes estudos, levou Abramov *et al.*, em 1991, a criar o conceito de tamanho de campo perceptivo, estabelecendo um tamanho mínimo de estímulo necessário para que a visão das cores fosse comparável na retina periférica e na retina central (Abramov *et al.*, 1991), já mencionado anteriormente.

Gordon e Abramov sugeriram que o tamanho do estímulo deve ser maior quando há uma maior concentração de bastonetes (Gordon & Abramov, 1977). Esses resultados foram também comprovados em 2016 por Volbrecht (Volbrecht, 2016).

Capítulo 2. Discussão

Conforme descrito anteriormente, a visão das cores varia consoante a zona de visão utilizada. Assim sendo, a visão das cores periférica é diferente da visão das cores central.

Em seguida, apresenta-se um quadro-resumo, na Tabela 3, que compila os estudos realizados no âmbito da visão das cores periférica. Esta tabela contém estudos agrupados em diferentes grupos, consoante a temática abordada: razões de variação da sensibilidade cromática ao longo do campo visual, diferenças entre o campo visual superior e inferior na discriminação da cor, sensibilidade da retina periférica a diferentes estímulos coloridos, avaliação do efeito do tamanho do estímulo, quantidade de cones M e L e quantidade de cones e bastonetes.

Tabela 3. Quadro-resumo de estudos realizados no âmbito da visão das cores periférica.

Autores do Estudo	Objetivo do Estudo	Técnica de Medição	Conclusões do Estudo
Sensibilidade cromática ao longo do campo visual			
(Ferree & Rand, 1919)	Determinar a sensibilidade às cores vermelho, azul e amarelo ao longo do meridiano temporal e nasal da retina.	Utilizados comprimentos de onda de luz vermelha de 670 nm, de luz amarela de 581 nm e de luz azul de 468 nm. Os estímulos foram apresentados durante 3 segundos no hemisfério horizontal, no hemisfério vertical e a 45° de inclinação.	As zonas da retina possuem diferentes tipos de visão das cores, nomeadamente tricromacia na retina central, dicromacia na retina intermédia e monocromatismo na retina mais periférica.
(Moreland & Cruz, 1959)	Determinação quantitativa da visão das cores periférica em comparação com a visão foveal.	Utilizados comprimentos de onda de 650 nm, 530 nm e 460 nm para as cores vermelho, verde e azul, respetivamente. O estímulo foi apresentado durante 0,5 segundos, a cada 2 segundos. Avaliadas as excentricidades retinianas de 10°, 15°, 25° e 30° no meridiano inferior vertical e os 15°, 25°, 30°, 40° e 50° no meridiano nasal horizontal.	A visão das cores diminui com o afastamento da fóvea, tornando-se dicromata nas excentricidades entre os 25° e os 30°. Acima destas excentricidades, a visão das cores fica ausente. A visão das cores é bastante diferente entre os 20° e os 40° excentricidade. Há uma redução nas respostas à cor verde e à cor vermelha quando avaliados os 40° de excentricidade.

(Weitzman & Kinney, 1969)	Testar a hipótese de que a visão das cores normal é substituída por uma visão tritanópica em todas as zonas da retina, caso a energia luminosa seja reduzida.	Luz com comprimentos de onda entre os 480 nm e os 610 nm e a 575 nm. Estímulos a 5° e 10° de excentricidade com 15 a 20 segundos de intervalo.	A visão das cores é tritanope na fóvea quando o estímulo luminoso é reduzido. No entanto, a periferia retiniana aparenta ser deuteranope.
(Noorlander et al., 1983)	Determinar a sensibilidade cromática em várias localizações da retina.	<i>Flicker</i> de 30 Hz de frequência. Utilizados os comprimentos de onda de 650 nm, 573 nm e 463 nm para as cores vermelho, amarelo e azul, respetivamente. Avaliadas as excentricidades retinianas de 0°, 2°, 6°, 15°, 21° e 50° na retina temporal e de 15°, 21°, 40° e 90° na retina nasal.	A visão das cores é melhor na zona nasal onde a sensibilidade cromática é maior.
(Abramov et al., 1991)	Avaliar o mecanismo de deteção de cor em várias zonas da retina.	Paciente a 60 cm do estímulo, utilizando visão monocular. Estímulo aplicado na fóvea e a 5°, 10°, 20° e 40° nas retinas nasal e temporal. Luz entre os 440 nm e os 660 nm em passos de 10 nm, apresentada em <i>flashes</i> de 50 ms.	A diminuição da performance da cor é muito provável acontecer devido à organização espacial da retina e não apenas devido à perda de sensibilidade cromática, quando mantido a intensidade do estímulo.

(Sakurai et al., 2003)	Criação de uma base de dados das zonas coloridas da retina.	<p>Ecrã LCD com estímulo circular.</p> <p>Medições em oito posições, desde 10° a 80°, em passos de 10°.</p> <p>Medidas realizadas nos olhos direitos dos pacientes.</p>	<p>Verificaram que os tons de verde e vermelho, com o aumento da excentricidade, tornam-se em amarelos, enquanto os tons amarelo e azul permanecem inalterados.</p> <p>Há um maior decréscimo de mecanismos de oponência das cores vermelho-verde em relação aos mecanismos de oponência das cores amarelo-azul na retina periférica.</p> <p>A saturação do estímulo diminui sempre que se aumenta a excentricidade.</p>
Campo Visual Superior e Inferior			
(Levine & McAnany, 2005)	Determinar as diferentes capacidades de discriminação de cor entre os campos visuais superior e inferior.	<p>Estímulos de 30 segundos centrados na fóvea e aplicados a 4,4° no lado temporal e a 12° no campo visual inferior e superior.</p> <p>O objetivo era identificar se o estímulo era apresentado numa posição superior, inferior, esquerda ou direita.</p>	Há uma maior discriminação da cor no hemisfério inferior.

(Danilova & Mollon, 2009)	Determinar diferenças na visão das cores dos campos visuais superior e inferior.	Avaliação binocular a 57 cm de distância. Estímulos de 100 ms. Campo visual superior testado a 45° e 315° e campo visual inferior testado a 135° e 225°.	Não foram encontradas diferenças significativas entre a discriminação de cor do hemisfério superior e a do hemisfério inferior.
Sensibilidade da Retina Periférica a Diferentes Estímulos Coloridos			
(Kelsey & Schwartz, 1959)	Determinar o gradiente de cor detetado em diferentes posições do sistema visual.	Testado o olho direito de cada paciente. Estímulos apresentados a 1° de excentricidade durante 1 segundo. Passos de 2° ao longo do meridiano inferior. Filtros azul e amarelo usados e variação da intensidade da cor adicionando filtros de densidade neutra.	Existem zonas de cor e os limites destas zonas de cor podem variar consoante o estímulo de cor que recebe, nomeadamente em função da sua intensidade e da intensidade do fundo.

(Connors & Kinney, 1962)	Determinar a sensibilidade relativa da cor vermelha e da cor verde em diferentes partes do campo visual.	<p>Pacientes tinham de diferenciar entre vermelho e não vermelho ou entre verde e não verde.</p> <p>Foram utilizados os comprimentos de onda de 677 nm e 496,9 nm para as cores vermelho e verde, respetivamente.</p> <p>Estímulos aplicados na fóvea e a cada 2° de excentricidade, ao longo do meridiano vertical inferior até não ser possível identificar a cor.</p>	A sensibilidade cromática ao verde é elevada na retina periférica, entre os 2° de excentricidade até aos 10° de excentricidade.
(Weitzman & Kinney, 1967)	Determinar os nomes dados às cores com observadores normais e observadores deuteranopes com diferentes estímulos de luz.	<p>Comprimentos de onda de 565 nm, 570 nm, 572,5 nm, 575 nm, 577,5 nm, 580 nm, 585 nm e 590 nm aplicados nos olhos direitos dos pacientes.</p> <p>Estímulos com intervalos de 10 segundos.</p> <p>A nomeação de cores foi limitada a vermelho, verde, azul, amarelo e branco.</p>	A visão das cores é diferente na região periférica e na zona foveal e depende da duração do estímulo.

(Weitzman & Kinney, 1969)	Testar a hipótese de que a visão das cores normal é substituída por visão tritanope em todas as partes da retina se a energia luminosa não for suficiente.	Luz com comprimentos de onda entre os 480 nm e os 610 nm e a 575 nm. Estímulos a 5° e 10° de excentricidade com 15 a 20 segundos de intervalo entre eles.	A visão das cores é diferente na região periférica e na zona foveal e depende da duração do estímulo. A visão passa a tritanope devido a uma diminuição da sensibilidade ao azul quando se afasta da zona foveal.
(Stabell & Stabell, 1984)	Medir a discriminação de comprimentos de onda e a sensibilidade espectral na fóvea e a diferentes excentricidades da retina.	<i>Flashes</i> de 0,5 segundos. Luz monocromática entre os 460 nm e os 620 nm, em intervalos de 10 nm. <i>Flashes</i> aplicados a 7°, 25°, 40° e 65° no campo visual temporal e a 7°, 25°, 40° e 60° no campo visual nasal.	Na periferia, a cor verde aparece com saturação diminuída e há mudanças de matiz de várias cores para um vasto número de observadores. Estas mudanças na visão das cores poderão estar relacionadas com as mudanças no tamanho do estímulo, com o aumento da excentricidade da retina, com a quantidade de cones L e M e com a quantidade de bastonetes.
(Nerger et al., 1995)	Avaliar os processos oponentes de detecção de cor na retina periférica.	Estímulo apresentado na fóvea e a 20° na retina temporal, durante 1000 ms, a cada 7 segundos. Estímulos com diâmetros de 0,125, 0,25, 0,5, 1 apresentados nas excentricidades de 2°, 4° e 8° da fóvea.	O amarelo não é afetado pelo tamanho do teste e pela excentricidade da retina. O azul é percebido melhor quanto maior o seu tamanho, tal como acontece com a cor verde.

(Mullen & Kingdom, 2002)	Comparar como é que a sensibilidade cromática de verde-vermelho, azul-amarelo e mecanismos acromáticos variam no campo visual humano.	Estímulo apresentado no meridiano horizontal, no campo visual nasal entre os 0° e os 25° de excentricidade.	Após os 25° de excentricidade a visão das cores passa a dicromata, pelo que todos os matizes são percebidos como amareladas ou azuladas.
(Parry et al., 2006)	Relacionar a excentricidade retiniana com a visão das cores.	Avaliado o campo visual nasal nas excentricidades retinianas entre 2° e 24°, com diferentes matizes. Os estímulos eram apresentados durante 380 ms. A experiência foi realizada a 50 cm de distância, de forma monocular.	Os matizes rosa-roxo e verde-azul alteram-se na direção do azul, enquanto os matizes verde-amarelo alteram-se em direção ao amarelo. Quando o estímulo colorido é exposto a um campo visual mais excêntrico é percebido com diferenças de matiz e saturação.
(McKeefry et al., 2007)	Medição da visão das cores e das variações da saturação em função da localização e do tamanho do estímulo.	Pacientes a 50 cm do estímulo, sendo este apresentado durante 380 ms, na excentricidade de 1°. O tamanho do estímulo foi sendo aumentado ao longo da experiência.	As mudanças na visão das cores estão relacionadas com o aumento da excentricidade da retina e com a variação do tamanho do estímulo.

(Webster et al., 2010)	Estudar a variação da visão das cores entre a fóvea e periferia retiniana.	<p>Quadrados de 2° de diâmetro, apresentados a 114 cm de distância.</p> <p>Avaliada a fóvea e 8° de excentricidade com estímulos apresentados durante 0,5 segundos, a cada 3 segundos de intervalo.</p>	Existe uma grande mudança de sensibilidade espectral entre a fóvea e os 8° de excentricidade devido à variação da densidade de pigmento macular, que é máximo na fóvea e diminui rapidamente com a excentricidade. Este atinge um valor estacionário quando se chega perto dos 5° de excentricidade.
(Oppel et al., 2014)	Comparar a discriminação de saturação na fóvea e na retina periférica para estímulos monocromáticos de quatro matizes: azul, verde, amarelo e vermelho.	<p>Estímulos monocromáticos com diâmetro de 1° e 3° apresentados na fóvea e a 10° de excentricidade, no campo visual nasal, temporal, superior e inferior.</p> <p>Comprimentos de onda entre os 440 nm e os 660 nm, em passos de 10 nm.</p> <p>Apresentados durante 500 ms, com intervalos de 18 segundos.</p>	As mudanças de matiz que ocorrem na retina periférica podem ser definidas em direção ao azul ou em direção ao amarelo.

Avaliação do Efeito do Tamanho do Estímulo			
(Stabell & Stabell, 1982)	Estudar a contribuição dos cones na diminuição da visão das cores com o aumento da excentricidade.	<p><i>Flashes</i> de 0,5 segundos.</p> <p>Luz monocromática entre os 470 nm e os 600 nm, em intervalos de 10 nm e a 620 nm e a 650 nm.</p> <p>Flashes aplicados a 40° e a 70° no campo visual temporal e a 17°, 40° e 60° no campo visual nasal.</p>	Cores muito saturadas podem ser observadas na retina periférica desde que o teste providencie um estímulo apropriado ao nível do seu tamanho.
(Noorlander et al., 1983)	Determinar a sensibilidade cromática em várias localizações da retina.	<p><i>Flicker</i> de 30 Hz de frequência.</p> <p>Utilizados os comprimentos de onda de 650 nm, 573 nm e 463 nm para as cores vermelho, amarelo e azul, respetivamente.</p> <p>Avaliadas as excentricidades retinianas de 0°, 2°, 6°, 15°, 21° e 50° na retina temporal e de 15°, 21°, 40° e 90° na retina nasal</p>	<p>A diminuição da sensibilidade na periferia retiniana pode ser compensada com o aumento do tamanho do estímulo.</p> <p>Com um estímulo específico, com um alvo de tamanho grande, diferentes matizes podem ser percebidos até aos 90° de excentricidade.</p>
(Van Esch et al., 1984)	Estudar a sensibilidade espectral periférica e a discriminação de comprimentos de onda em zonas periféricas da retina.	<p>Estímulo monocromático entre os 440 nm e os 660 nm, em intervalos de 10 nm.</p> <p>Estudado o meridiano horizontal da retina nasal nas excentricidades de 0°, 8°, 25°, 40° e 80°.</p>	A retina periférica consegue discriminar comprimentos de onda até aos 80° de excentricidade, desde que o tamanho do estímulo seja adequado.

<p>(Abramov et al., 1991)</p>	<p>Avaliar o mecanismo de detecção de cor em várias zonas da retina.</p>	<p>Paciente a 60 cm do estímulo, com recurso a visão monocular.</p> <p>Estímulo aplicado na fóvea, 5°, 10°, 20° e 40° nas retinas nasal e temporal.</p> <p>Luz entre os 440 nm e os 660 nm em passos de 10 nm.</p> <p><i>Flashes</i> de 50 ms.</p>	<p>A visão das cores mantém-se semelhante à da fóvea até aproximadamente aos 20° de excentricidade, se o estímulo for grande o suficiente.</p> <p>O estímulo da cor verde necessita de um maior estímulo para ter uma aparência semelhante à da fóvea.</p> <p>Após os 20° de excentricidade, mesmo com estímulos de tamanhos adequados, as cores são sempre percebidas com um menor grau de saturação.</p>
--------------------------------------	--	--	--

(Nagy & Doyal, 1993)	Determinar a discriminação da cor verde-vermelho varia em função do tamanho do estímulo.	<p>Estímulos de 500 ms apresentados a cada 6 segundos de intervalo.</p> <p>Excentricidade de 10° avaliada com estímulos de diâmetros de 1°, 2°, 4°, 8° e 16°.</p> <p>Excentricidade de 25° avaliada com estímulos de diâmetros de 1°, 2°, 4°, 8° e 16°.</p> <p>Utilizadas as cores vermelho, laranja, amarelo e verde com comprimentos de onda de 546 nm, 573 nm, 591 nm e 608 nm, respetivamente.</p>	<p>Os mecanismos de discriminação na retina periférica de verde-vermelho são semelhantes aos foveais.</p> <p>Quando se aumenta o tamanho do estímulo ocorre uma discriminação semelhante à que é obtida com estímulos de menor tamanho na fóvea.</p>
(Vakrou et al., 2005)	Estabelecer diferenças entre a sensibilidade cromática ao longo do campo visual de forma quantitativa e qualitativa.	<p>Avaliação do campo visual nasal de forma monocular, apenas no olho dominante.</p> <p>Estímulos apresentados durante 380 ms.</p>	<p>Não existe perda de sensibilidade cromática qualitativa ao longo do campo visual.</p> <p>A sensibilidade cromática quantitativa depende do tamanho do estímulo.</p>

(Volbrecht & Nerger, 2012)	Investigar a visão das cores com vários tamanhos de estímulos, a 10° de excentricidade, nos meridianos horizontal e vertical.	Comprimentos de onda monocromáticos entre os 440 nm e os 660 nm, em passos de 10 nm. Avaliados 10° de excentricidade retiniana, nos meridianos horizontal e vertical. Estímulos de 500 ms com intervalos de 18 segundos. Os tamanhos dos estímulos variaram entre os 0,25° e os 5°.	Quando o estímulo colorido é suficientemente grande este atinge as várias zonas da retina e a visão das cores é uniforme. A perda de discriminação do matiz é maior no meridiano vertical relativamente ao meridiano horizontal.
Quantidade de Cones M e L			
(Hagstrom et al., 1998)	Estimar o rácio de cones L:M a diferentes excentricidades retinianas, em vinte e três retinas humanas.	Olhos humanos enucleados e dissecadas as retinas. Transcrição do RNA retiniano por método de PCR.	Encontraram um rácio de cones L:M entre 0,82 e 3,00. Reportaram que a quantidade de cones L e M diminui com a excentricidade da retina humana sendo que aos 40° de excentricidade a quantidade é metade da medida na retina central.
(Brainard et al., 2000)	Examinar as consequências da variação do rácio de cones L:M em dois indivíduos.	<i>Flashes</i> de 8 ms com intervalo de 8 ms entre <i>flashes</i> .	Os dois observadores eram muito diferentes sendo que um tinha rácio de cones L:M de 3,79 e outro tinha rácio de 1,15.

(Otake & Cicerone, 2000)	Avaliar se o número de cones L e M variam consoante a excentricidade retiniana.	<i>Flashes</i> de 50 ms no meridiano horizontal do olho direito dos pacientes, a 2°, 7°, 17° e 28° de excentricidade temporal e a 2°, 7° e 28° de excentricidade nasal.	A quantidade de cones L e M diminui com o aumento da excentricidade retiniana.
Quantidade de Cones e Bastonetes			
(Gordon & Abramov, 1977)	Examinar a visão das cores na retina periférica em níveis fotópicos.	Estímulos de 0,5 segundos com 14,5 segundos de escuridão entre <i>flashes</i> . Luzes monocromáticas entre os 450 nm e os 660 nm, em passos de 10 nm. Avaliada a fóvea e a excentricidade de 45° da retina nasal. Atribuir o estímulo a uma das categorias: vermelho, amarelo, verde ou azul.	Sugeriram que o tamanho do estímulo deve ser maior quando há uma maior concentração de bastonetes presente.
(Mullen & Kingdom, 1996).	Desenvolver um modelo de cálculo da perda seletiva de cor baseada na diminuição da quantidade de cones.	Testaram o modelo a partir dos 6° de excentricidade.	A perda da visão das cores é seletiva e indica que os mecanismos cromáticos são diferentes dos mecanismos acromáticos. A redução de células ganglionares com a excentricidade, em especial as células ganglionares do tipo P, pode ser motivo de redução da visão da cor, dado serem indicadas como sensíveis à cor.

(Stabell & Stabell, 1996)	Avaliar a contribuição dos bastonetes na visão das cores periférica.	Utilizados comprimentos de onda de 650 nm, 550 nm e 460 nm para as cores vermelho, verde e azul, respetivamente. Avaliado o campo visual temporal aos 8°, 30° e 65° de excentricidade.	A influência dos bastonetes parece levar à perda de saturação dos estímulos coloridos e à mudança na discriminação dos matizes.
--------------------------------------	--	---	---

De uma maneira geral, pode-se verificar que existe bastante informação sobre a visão das cores, a qual pode ser avaliada em toda a extensão da retina. No entanto, as conclusões obtidas em cada estudo apenas são uma parte da informação dado que todos os estudos têm condições de realização diferentes, observadores diferentes, avaliam campos visuais diferentes e sensibilidades cromáticas diferentes.

Neste sentido, seria importante haver trabalhos que reproduzissem as mesmas condições que trabalhos anteriores com mudanças apenas num dos fatores envolvidos. Seria um exemplo haver grupos de investigação a realizar exatamente a mesma investigação, mas variando apenas o tamanho do estímulo envolvido ou a excentricidade retiniana avaliada. Desta forma, a informação seria mais facilmente comparável de forma a poder-se estabelecer bases comparativas para estudos posteriores nos diversos âmbitos da visão.

Por este motivo, entendo que o facto de existir uma enorme diversidade de métodos, com recurso a diferentes condições de experimentação, limita as conclusões deste trabalho.

Capítulo 3. Conclusão

A visão das cores é um tema vasto e que tem bastantes áreas a serem exploradas. Apesar de parecer um processo simples, a visão das cores é um tema complexo e vasto em informação dado que tem várias componentes envolvidas.

A questão aumenta a sua complexidade quando nos afastamos da fóvea e deixamos de usar uma visão central otimizada em termos de acuidade visual e em termos de deteção de cor e passamos a utilizar a visão periférica.

As principais conclusões desta revisão bibliográfica são:

- À medida que nos vamos afastando da fóvea ocorre uma diminuição na quantidade de cones M e L.
- A retina pode ser dividida em três partes quando à visão das cores diz respeito: tricromata na retina central, dicromata na retina intermédia e monocromata na retina periférica.
- A zona nasal da retina tem uma maior sensibilidade cromática.
- Em relação aos hemisférios superior e inferior, não se consegue tirar grandes ilações dado os vários resultados contraditórios encontrados na literatura analisada.
- A organização espacial e a distribuição dos fotorreceptores estão intimamente relacionadas com a variação da visão das cores na retina periférica.

- A duração e o tamanho do estímulo apresentados são fundamentais para a visão das cores na retina periférica.

- Quando se aumenta o tamanho do estímulo ocorre uma discriminação semelhante à da fóvea mesmo quando o estímulo é menor. Desta forma, quando o estímulo colorido é suficientemente grande atinge várias zonas da retina e a visão da cor é uniforme.

- Quando o estímulo colorido é exposto a um campo visual mais excêntrico há mudanças na visão da cor, nomeadamente no matiz e na saturação, das cores vermelho e verde. O mesmo não acontece para as cores azul e amarelo.

Referências Bibliográficas

- Abramov, I., Gordon, J., & Chan, H. (1991). Color appearance in the peripheral retina: effect of stimulus size. *Journal of Optometry Society American*, 8, 404–414.
- Abramov, I., Gordon, J., & Chan, H. (1992). Color appearance across the retina: effects of a white surround. *Journal of the Optical Society of America A*, 9(2), 195.
- Alpern, M., Kitahara, K., & Krantz, D. (1983). Perception of colour in unilateral tritanopia. *The Journal of Physiology*, 335, 683–697.
- Anderson, S., Mullen, K., & Hess, R. (1991). Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: Limits imposed by optical and retinal factors. *Journal of Physiology*, 442, 47–64.
- Backhaus, W. G. K. (1998). Physiological and psychophysical simulations of color vision in humans and animals. In J. S. W. Werner G. K. Backhaus, Reinhold Kliegl (Ed.), *Color Vision: Perspectives from Different Disciplines* (pp. 45–77). Walter de Gruyter.
- Bailes, H., & Lucas, R. (2013). Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light supporting activation of Gq/11 and Gi/o signalling cascades. *Proceeding Biology Science*, 280.
- Barros, A., Neto, F., & Barros, J. (1992). Avaliação do locus de controlo e do locus de causalidade em crianças e adolescentes. *Revista Portuguesa de Educação*, 5(1), 55–64.
- Berenschot, T., Kraats, J., & Norren, D. (1996). Foveal cone mosaic and visual pigment density in dichromats. *The Journal of Physiology*, 492, 307–314.
- Birch, J. (2008). Failure of concordance of the Farnsworth D15 test and the Nagel anomaloscope matching range in anomalous trichromatism. *Vision Neuroscience*, 25(3), 451–453.
- Birch, J. (2013). Colour Vision Deficiency Part 1 - An Introduction. *Optometry Today*, 53(24), 48–53.
- Blume, C., Garbazza, C., & Spitschan, M. (2019). Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. *Somnologie*, 23(3), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>
- Bone, R., & Sparrock, J. (1971). Comparison of macular pigment densities in human eyes. *Vision Research*, 11, 1057–1064.
- Bowmaker, J., & Dartnall, H. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal*

- of Physiology*, 298(1), 501–511.
- Boynton, R., Schafer, W., & Neun, M. (1964a). Hue–wavelength relation measured by color-naming method for three retina locations. *Science*, 146, 666–668.
- Boynton, R., Schafer, W., & Neun, M. (1964b). Hue–wavelength relationship measured by color-naming method for three retina locations. *Science*, 146(666–668).
- Brainard, D. (2003). Color appearance and color difference specification. In *The Science of Color* (pp. 191–216). Elsevier Ltd.
- Brainard, D., Roorda, A., Yamauchi, Y., Calderone, J., Metha, A., Neitz, M., Neitz, J., Williams, D., & Jacobs, G. (2000). Functional consequences of the relative numbers of L and M cones. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(9), 1684.
- Brown, W. (1951). The influence of luminance level on visual sensitivity to color differences. *Journal of Optometry Society American*, 41, 684–688.
- Buchsbaum, G., & Gottschalk, A. (1983). Trichromacy, opponent colours coding, and optimum colour information transmission in the retina. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 220, 89–113.
- Buck, S., Knight, R., Fowlwer, G., & Hunt, B. (1998). Rod influence on hue-scaling functions. *Vision Research*, 38, 3259–3263.
- Cao, D. (2013). Color Vision and Night Vision. In W. P. Ryan S., Wilkinson C., Schachat A., Hinton D. (Ed.), *Retina*. Srinivas Sadda.
- Cao, D., Chang, A., & Gai, S. (2018). Evidence for an impact of melanopsin activation on unique white perception. *Journal of Optometry Society American A*, 35, B287–B291.
- Chakrabarti, S. (2018). Psychosocial aspects of colour vision deficiency: Implications for a career in medicine. *The National Medical Journal Of India*, 31(2), 86–96.
- Chaparro, A., & Chaparro, M. (2017). Applications of color in design for color-deficient users. *Ergonomics in Design*, 25(1), 23–30.
- Cheong, S. K., Tailby, C., Martin, P. R., Levitte, J. B., & Solomona, S. G. (2011). Slow intrinsic rhythm in the koniocellular visual pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(35), 14659–14663.

- Cicerone, C. (1990). Color appearance and the cone mosaic in trichromacy and dichromacy. *Color Vision Deficiencies*, 1–2.
- Cicerone, C., & Nerger, J. (1989). The relative numbers of long-wavelength-sensitive to middle-wavelength-sensitive cones in the human fovea centralis. *Vision Research*, 26, 115–128.
- City. (2020a). *A new web-based colour vision test*. University Of London. <https://researchcentres.city.ac.uk/applied-vision/a-new-web-based-colour-vision-test>
- City. (2020b). *Colour Vision Assessment (including CAD and additional tests)*. University of London. <https://researchcentres.city.ac.uk/applied-vision/avot/individual-tests/colour-vision-assessment-including-cad>
- Clement, R. A. (Ed.). (2017). Colour Coding. In *Introduction to Vision Science* (pp. 95–111). Routledge.
- Cohen, A. (1992). The Retina. In W. Hart (Ed.), *Physiology of the Eye* (pp. 579–615). *Color appearance in the peripheral retina: effects of stimulus size*. (n.d.).
- Comission Internationale de l'Éclairage. (2004). *CIE Technical Report - Colorimetry*.
- Connors, M., & Kelsey, P. (1961). Shape of the red and green color zone gradients. *Journal of Optometry Society American*, 51, 874–877.
- Connors, M., & Kinney, J. (1962). Relative red–green sensitivity as a function of retinal position. *Journal of Optometry Society American*, 52, 81–84.
- Cruz, A., & Moreland, J. (1955). Small field tritanomaly in peripheral vision. *Farbe*, 4, 241–245.
- Cumberland, P., Rahi, J., & Peckham, C. (2004). Impact of congenital colour vision deficiency on education and unintentional injuries: Findings from the 1958 British birth cohort. *BMJ Journals*, 329(7474), 1074–1075.
- Curcio, C., & Allen, K. (1990). Topography of ganglion cells in human retina. *Journal of Comparative Neurology*, 300, 5–25.
- Curcio, C., Sloan, K., Kalina, R., & Hendrickson, A. (1990). Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology*, 292, 497–523.
- Curcio, C., Sloan, K., Packer, O., Hendrickson, A., & Kalina, R. (1987). Distribution of cones in human and monkey retina: individual variability and radial asymmetry. *Science*, 236, 579–582.

- Dain, S., Atchison, D., & Hovis, J. (2019). Limitations and Precautions in the Use of the Farnsworth-Munsell Dichotomous D-15 Test. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 96(9), 695–705.
- Danilova, M. V., & Mollon, J. D. (2009). The symmetry of visual fields in chromatic discrimination. *Brain and Cognition*, 69(1), 39–46.
- DeValois, R. (1960). Color vision mechanisms in monkey. *Journal of General Physiology*, 43, 115–128.
- Fairchild, M. (2005a). Color Appearance Phenomena. In M. Kriss (Ed.), *Color Appearance Models* (Second Edi, pp. 135–157). John Wiley & Sons, Ltd.
- Fairchild, M. (2005b). Colorimetry. In M. Kriss (Ed.), *Color Appearance Models* (Second Edi, pp. 53–106). John Wiley & Sons, Ltd.
- Fairchild, M. (2005c). Human Color Vision. In M. Kriss (Ed.), *Color Appearance Models* (Second Edi, pp. 25–58). John Wiley & Sons, Ltd.
- Fernandes, T. M. P., Silverstein, S. M., Butler, P. D., Kéri, S., Santos, L. G., Nogueira, R. L., & Santos, N. A. (2019). Color vision impairments in schizophrenia and the role of antipsychotic medication type. *Schizophrenia Research*, 204, 162–170.
- Ferree, C., & Rand, G. (1919). Chromatic thresholds of sensation from center to periphery of the retina and their bearing on color theory. *Psychological Review*, 26, 16–41.
- Ferree, C., & Rand, G. (1920). Factors which influence the color sensitivity of the peripheral retina. *Transactions of the American Ophthalmological Society*, 18, 244–271.
- Freed, M. A. (2017). The Retina. In P. Artal (Ed.), *Handbook of Visual - Fundamentals and Eye Optics Volume I* (pp. 141–158). CRC Press.
- Gegenfurtner, K., & Kiper, D. (2003). Color Vision. *Annual Review of Neuroscience*, 26(1), 181–206.
- Glass, A. L. (2016). Vision. In *Cognition* (pp. 122–159). Cambridge University Press.
- Goldstein, E. B. (2010a). Introduction to Vision. In *Sensation and Perception* (Eight Edit, pp. 43–72). Wadsworth.
- Goldstein, E. B. (2010b). Perceiving Color. In *Sensation and Perception2* (Eight Edit, pp. 201–227). Wadsworth.

- Gordon, J., & Abramov, I. (1977). Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation. *Journal of Optometry Society American*, 67, 202–207.
- Gouras, P. (1991). *Color vision* (E. Kandel, J. Schwartz, & T. Jessell (Eds.); Third Edit).
- Gowdy, P., & Cicerone, C. (1998). The spatial arrangement of L and M cones in the central fovea of the living human eye. *Vision Research*, 38, 2575–2589.
- Gualtieri, M., Feitosa-Santana, C., Lago, M., Nishi, M., & Ventura, D. (2013). Early visual changes in diabetic patients with no retinopathy measured by color discrimination and electroretinography. *Psychology & Neuroscience*, 6(2), 227–234.
- Hagstrom, S., Neitz, J., & Neitz, M. (1998). Variations in cone populations for red–green color vision examined by analysis of mRNA. *NeuroReport*, 9, 1963–1967.
- Hansen, T., Pracejus, L., & Gegenfurtner, K. R. (2009). Color perception in the intermediate periphery of the visual field. *Journal of Vision*, 9(4), 1–12.
- Hartridge, H. (1945). The change from trichromatic to dichromatic vision in the human retina. *Nature*, 155, 657–662.
- Hellpach, D. (1900). Farbenwahrnehmung im indirecten Sehen. *Philosophische Studien*, 15, 524–554.
- Helmholtz, H. von. (1852). On the theory of compound colors. *Philosophical Magazine*, 4, 519–534.
- Hendrickson, C., Curcio, K., Sloan, R., & Kalina, R. (1990). Human photoreceptor topography. *The Journal of Comparative Neurology*, 292(4), 497–523.
- Hendry, S. H. C., & Clay Reid, R. (2000). The koniocellular pathway in primate vision. *Annual Review of Neuroscience*, 23, 127–153.
- Hibino, H. (1992). Red–green and yellow–blue opponent-color responses as a function of retinal eccentricity. *Vision Research*, 32, 1955–1964.
- Huisingh, C., Wood, J., & Owsley, C. (2015). The driving visual field and a history of motor vehicle collision involvement in older drivers: A population based examination. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 56, 132–138.
- Hunt, R. (1995). *The Reproduction of Color* (R. Hunt (Ed.); Fifth Edit). Fountain Press.
- Hurvich, L., & Jameson, D. (1957). An opponent process theory of color vision. *Psychological Review*,

64, 384–404.

- Ishihara, K., Ishihara, S., Nagamachi, M., & Hiramatsu, S. (2001). Age-related decline in color perception and difficulties with daily activities—Measurement, questionnaire, optical and computer-graphics simulation studies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 28(3–4), 153–163.
- Ishihara, S. (1972). *Tests for colour-blindness*. Kanehara Shuppan.
- Jacobs, G. (1993). The distribution and nature of colour vision among the mammals. *Biological Reviews*, 68, 413–471.
- Jacobs, G., & DeValois, R. (1968). Primate Color Vision. *Science*, 162, 553–540.
- Jameson, D. H. L. M. (1955). Some quantitative aspects of an opponent-colors theory: I. Chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, 45, 546–552.
- Johnson, M. (1986). Color vision in the peripheral retina. *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 63(2), 97–103.
- Kaiser, P., & Boynton, R. (1996). *Human Color Vision* (Second Edi). Optical Society of America, Washington.
- Kelsey, P., & Schwartz, I. (1959). Nature of the limit of the color zone in perimetry. *Journal of Optometry Society American*, 49, 764–769.
- Kolb, H. (2011). *WEBVISION - The Organization of the Retina and Visual System*. <https://webvision.med.utah.edu/book/part-i-foundations/simple-anatomy-of-the-retina/>
- Krauskopf, J. (1964). Color appearance of small stimuli and the spatial distribution of color receptors. *Journal of Optometry Society American*, 54, 1171.
- Krauskopf, J., & Srebro, R. (1965). Spectral sensitivity of color mechanisms: derivation from fluctuations of color appearance near threshold. *Science*, 150, 1477–1479.
- Kremers, J., Scholl, H., Knau, H., Berendschot, T., Usui, T., & Sharpe, L. (2000). L/M cone ratios in human trichromats assessed by psychophysics, electroretinography, and retinal densitometry. *Journal of Optometry Society American*, 17, 517–526.
- Langina-Jansone, Z., Truksa, R., & Ozolinsh, M. (2020). Visual acuity and color discrimination in patients with cataracts. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*,

374), A212–A216. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.382397>

- Lee, B. B., Martin, P. R., & Valberg, A. (1988). The physiological basis of heterochromatic flicker photometry demonstrated in the ganglion cells of the macaque retina. *The Journal of Physiology*, 404(1), 323–347.
- Levine, M., & McAnany, J. (2005). The relative capabilities of the upper and lower visual hemifields. *Vision Research*, 45, 2820–2830.
- Liem, S. C. (2018). Can the Farnsworth D15 Color Vision Test Be Defeated through Practice? *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 95(5), 452–456.
- Lugo, M., & Tiedeman, J. (1986). Computerized scoring and graphing of the Farnsworth-Munsell 100-hue color vision test. *American Journal of Ophthalmology*, 101(4), 469–474.
- Marc, R., & Sperling, H. (1977). Chromatic organization of primate cones. *Science*, 196, 454–456.
- Marcus, R. T. (1998). The Measurement of Color. In K. Nassau (Ed.), *Color for Science, Art and Technology* (pp. 31–96). Elsevier Ltd.
- Marechal, M., Delbarre, M., Tesson, J., Lacambre, C., Lefebvre, H., & Froussart-Maille, F. (2018). Color Vision Tests in Pilots' Medical Assessments. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 89(8), 737–743.
- Martin, P., Lee, B., White, A., Solomon, S., & Rüttiger, L. (2001). Chromatic sensitivity of ganglion cells in the peripheral primate retina. *Nature*, 410, 933–936.
- Masland, R. H. (2001). The fundamental plan of the retina. *Nature Neuroscience*, 4(9), 877–886.
- Maxwell, J. C. (1890). On the theory of three primary colors. *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, 3(1858–1862), 370–375.
- McAlpine, E., Maritz, R., & Williams, S. (2018). Hue discrimination among pathologists using a computer-based Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Histopathology*, 73(5), 869–871.
- McKeefry, D. J., Murray, I. J., & Parry, N. R. A. (2007). Perceived shifts in saturation and hue of chromatic stimuli in the near peripheral retina. *Journal of the Optical Society of America A*, 24(10), 3168.
- Mcmanus, M., Amour, S., & Harris, L. (2017). Using optic flow in the far peripheral field. *Journal of Vision*, 17(8), 1–11.

- Melyan, Z., Tarttelin, E., Bellingham, J., Lucas, R., & Hankins, M. (2005). Addition of human melanopsin renders mammalian cells photoresponsive. *Nature*, 433(7027), 741–745.
- Middleton, W., & Mayo, E. (1952). The appearance of colors in twilight. *Journal of Optometry Society American*, 42, 116–121.
- Miquilini, L., Ratis, M., Lima, M., Bento-Torres, N., Lacerda, E., Cortes, M., Rodrigues, A., Silveira, L., & Souza, G. (2019). A proposed correction in the weighted method to score the Ishihara test. *BMC Research Notes*, 12(1), 295.
- Mollon, J. (1982). Color vision. *Annual Review of Psychology*, 22, 41–85.
- Mollon, J., & Regan, B. (2000). *Cambridge Colour Test*. Cambridge Research Systems Ltd.
- Mollon, J., Regan, B., & Bowmaker, J. (1998). What is the function of the cone-rich rim of the retina? *Eye (Basingstoke)*, 12(3), 548–552.
- Moreland, J., & Cruz, A. (1959). Colour perception with the peripheral retina. *Optica Acta*, 6, 117–151.
- Mullen, K., & Kingdom, F. (1996). Losses in Peripheral Colour Sensitivity Predicted from “Hit and Miss” Post-receptoral Cone Connections. *Vision Research*, 36(13), 1995–2000.
- Mullen, K., & Kingdom, F. (2002). Differential distributions of red–green and blue–yellow cone opponency across the visual field. *Visual Neuroscience*, 19(109–118).
- Mullen, K., Sakurai, M., & Chu, W. (2005). Does L/M cone opponency disappear in the human periphery? *Progress in Aerospace Sciences*, 34(951–959).
- Murray, I., Parry, N., & McKeefry, D. (2006). Cone opponency in the near peripheral retina. *Visual Neuroscience*, 23, 503–507.
- Nagy, A. L., & Doyal, J. A. (1993). Red–green color discrimination as a function of stimulus field size in peripheral vision. *Journal of the Optical Society of America A*, 10(6), 1147.
- Nasir-Ahmad, S., Lee, S., Martin, P., & Grunert, U. (2019). Melanopsin-expressing ganglion cells in human retina: morphology, distribution, and synaptic connections. *J Comp Neurol* 2019, 527: *Journal of Comparative Neurology*, 527, 312–327.
- Neitz, J., Carroll, J., & Neitz, M. (2001). Almost Reason Enough for Having Eyes. *Optics & Photonics News*, January, 26–33.

- Nerger, J., & Cicerone, C. (1992). The ratio of L to M cones in the human parafoveal retina. *Vision Research*, 32, 879–888.
- Nerger, J., Volbrecht, V., & Ayde, C. (1995). Unique hue judgments as a function of test size in the fovea and at 20-deg temporal eccentricity. *Journal of the Optical Society of America A*, 12(6), 1225.
- Nerger, J., Volbrecht, V., & Kristin, A. (2003). The Influence of Rods on Colour Naming During Dark Adaptation. In K. Mollon, John, Pokorny, Joel, Knoblauch (Ed.), *Normal and Defective Colour Vision* (pp. 174–176). University of Cambridge.
- Noorlander, C., Koenderink, J., DenOuden, R., & Edens, B. (1983). Sensitivity to spatiotemporal colour contrast in the peripheral visual field. *Vision Research*, 23, 1–11.
- Oculus. (2015). *Anomaloscope User's Manual*.
- Opper, J. K., Douda, N. D., Volbrecht, V. J., & Nerger, J. L. (2014). Supersaturation in the peripheral retina. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4), A148.
- Oppermann, D., Schramme, J., & Neumeyer, C. (2016). Rod-cone based color vision in seals under photopic conditions. *Vision Research*, 125, 30–40.
- Otake, S., & Cicerone, C. M. (2000). L and M cone relative numerosity and red–green opponency from fovea to midperiphery in the human retina. *Journal of the Optical Society of America A*, 17(3), 615.
- Oyster, C. W. (1999). *The Human Eye: Structure and Function*. Sinauer Associates, Inc.
- Palmer, S. E. (1999a). An Introduction to Vision Science. In T. M. Press (Ed.), *Vision Science: Photons to Phenomenology* (pp. 3–44).
- Palmer, S. E. (1999b). Processing Image Structure. In T. Press (Ed.), *Vision Science: Photons to Phenomenology* (pp. 145–198).
- Parry, N., McKeefry, D., & Murray, I. (2006). Variant and invariant color perception in the near peripheral retina. *Journal of the Optical Society of America A*, 23(7), 1586.
- Pasmanter, N., & Munakomi, S. (2019). *Physiology, Color Perception*. StatPearls Publishing.
- Pinckers, A. (1999). Anomaloscope examination: scotopization (the luminance fall). *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 77(5), 552–554.
- Piro, A., Tagarelli, A., Nicoletti, G., Chiriaco, C., Novellino, F., & Quattrone, A. (2017). Color vision as a

- biological marker able to differentiate two phenotypically similar neurological diseases. *Neurological Sciences*, 5(39), 951–952.
- Piro, A., Tagarelli, A., Nicoletti, G., Scannapieco, S., Polidoro, S., & Valentino, P. (2018). Impairment of acquired color vision in multiple sclerosis: An early diagnostic sign linked to the greatness of disease. *International Ophthalmology*, 1–6.
- Pokorny, J., & Smith, V. (1977). Evaluation of single pigment shift model of anomalous trichromacy. *Journal of Optometry Society American*, 67, 1196–1209.
- Pu, G., & Dowling, J. (1981). Anatomical and physiological characteristics of pineal photoreceptor cell in the larval lamprey, *Petromyzon marinus*. *Journal of Neurophysiology*, 46(5), 1018–1038.
- Purnyn, H. (2013). The mammalian retina: Structure and blood supply. *Neurophysiology*, 45(3), 266–276.
- Rigg, B. (1997). Colorimetry and the CIE System. In R. McDonald (Ed.), *Colour Physics for Industry* (Second Edi, pp. 81–120). Society of Dyers and Colourists.
- Roorda, A., & Williams, D. (1999). The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Nature*, 397, 520–522.
- Rushton, W., & Baker, H. (1964). Red/green sensitivity in normal vision. *Vision Research*, 4, 75–85.
- Sakurai, M., Ayama, M., & Kumagai, T. (2003). Color appearance in the entire visual field: color zone map based on the unique hue component. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(11), 1997–2009.
- Sato, K., Inoue, T., Tamura, S., & Takimoto, H. (2019). Discrimination of colors by red-green color vision-deficient observers through digitally generated red filter. *Visual Neuroscience*, 36.
- Schanda, J. (2007). CIE Colorimetry. In J. Schanda (Ed.), *Colorimetry: Understanding the CIE System* (pp. 25–76). John Wiley & Sons, Inc.
- Schwartz, S. (2010). Color Vision. In S. Schwartz (Ed.), *Visual Perception - A Clinical Orientation* (Fourth Edi, pp. 110–129). MC Graw Hill Medical.
- Seilheimer, R. L., Sabharwal, J., & Wu, S. M. (2020). Genetic dissection of rod and cone pathways mediating light responses and receptive fields of ganglion cells in the mouse retina. *Vision Research*, 167(November 2019), 15–23.

- Seshadri, J., Christensen, J. Lakshminarayanan, V., & Bassi, C. (2005). Evaluation of the new web-based "Colour Assessment and Diagnosis" test. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 82(10), 882–885.
- Sharpe, L., Stockman, A., Jagle, H., & Nathans, J. (1999). *Color Vision: From Genes to Perception*. Gegenfurtner and L.T. Sharpe.
- Shin, Y., Park, K., Hwang, J., Wee, W., & Lee, J. (2007). A new color vision test to differentiate congenital and acquired color vision defects. *Ophthalmology*, 114(7), 1341–1347.
- Simpson, M. J. (2017). Mini-review: Far peripheral vision. *Vision Research*, 140, 96–105.
- Snodderly, D., Auran, D., & Delori, F. (1984). The macular pigment. II. Spatial distribution in primate retinas. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 25, 674–685.
- Solomon, S. G., & Lennie, P. (2007). The machinery of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(4), 276–286.
- Spitschan, M. (2019). Melanopsin contributions to non-visual and visual function. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30(Figure 1), 67–72.
- Stabell, B., & Stabell, U. (1976). Rod and cone contributions to peripheral colour vision. *Vision Research*, 16(1099–1104).
- Stabell, B., & Stabell, U. (1979). Rod and cone contributions to change in hue with eccentricity. *Vision Research*, 19, 1121–1125.
- Stabell, B., & Stabell, U. (1982). Color vision in the peripheral retina under photopic conditions. *Vision Research*, 22, 839–844.
- Stabell, B., & Stabell, U. (1984). Color-vision mechanisms of the extra-foveal retina. *Vision Research*, 24(1969–1975).
- Stabell, B., & Stabell, U. (1994). Mechanisms of chromatic rod vision in scotopic illumination. *Vision Research*, 34, 1019–1027.
- Stabell, B., & Stabell, U. (1996). Peripheral colour vision: effects of rod intrusion at different retinal eccentricities. *Vision Research*, 36, 3407–3414.
- Steward, J., & Cole, B. (1989). What do color vision defectives say about everyday tasks? *Optometry and*

- Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 66(5), 288–295.
- Stoianov, M., Oliveira, M., Silva, M., Ferreira, M., Marques, I., & Gualtieira, M. (2018). The impacts of abnormal color vision on people's life: an integrative review. *Quality of Life Research*, 28, 855–862.
- Strasburger, H., Rentschler, I., & Jüttner, M. (2011). Peripheral vision and pattern recognition: A review. *Journal of Vision*, 11(5), 1–82.
- Sung, C., & Chuang, J. (2010). The cell biology of vision. *Journal of Cell Biology*, 190(6), 953–963.
- Svaetichin, G. (1956). Spectral response curves from single cones. *Acta Physiologica Scandinavica Supplementum*, 134, 17–46.
- Swanson, W. (2003). Color vision. *Ophthalmology Clinics of North America*, 16(2), 179–203.
- Swanson, W., & Fish, G. (1995). Color matches in diseased eyes with good acuity: detection of deficits in cone optical density and in chromatic discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, 12(10), 2230.
- Tyler, C. W. (1999). Analysis of human receptor density. In V. Lakshminarayanan (Ed.), *Basic and clinical applications of vision science* (pp. 63–71). MA: Kluwer Academic.
- Vakrou, C., Whitaker, D., McGraw, V., & McKeefry, D. (2005). Functional evidence for cone-selective connectivity in the human retina. *The Journal of Physiology*, 566(93–102).
- Van Esch, J., Koldenhoff, E., Van Doom, A., & Koenderink, J. (1984). Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the human peripheral visual field. *Journal of Optometry Society American*, 1, 443–450.
- Ventura, D., Gualtieri, M., Oliveira, A., Costa, M., Quiros, P., & Sadun, F. (2007). Male prevalence of acquired color vision defects in asymptomatic carriers of Leber's hereditary optic neuropathy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 48(5), 2362–2370.
- Viénot, F., Brettet, H., Ott, L., Ben M' Barek, A., & Mollon, J. (1995). What do colour-blind people see? *Nature*, 376, 127–128.
- Vimal, R., Pokorny, J., Smith, V., & Shevell, S. (1989). Foveal cone thresholds. *Vision Research*, 29, 61–78.
- Volbrecht, V. J. (2016). Small field tritanopia in the peripheral retina. *Journal of the Optical Society of*

- America A*, 33(7), 1226.
- Volbrecht, V. J., Clark, C. L., Nerger, J. L., & Randell, C. E. (2009). Chromatic perceptive field sizes measured at 10° eccentricity along the horizontal and vertical meridians. *Journal of the Optical Society of America A*, 26(5), 1167.
- Volbrecht, V. J., & Nerger, J. L. (2012). Color appearance at $\pm 10^\circ$ along the vertical and horizontal meridians. *Journal of the Optical Society of America A*, 29(2), A44.
- Vries, H. (1947). The heredity of the relative numbers of red and green receptors in the human eye. *Genetica (TheHague)*, 24, 199–212.
- Wald, G. (1967). Blue-blindness in the normal fovea. *Journal of Optometry Society American*, 57, 1289–1301.
- Weale, R. (1951). Hue-discrimination in para-central parts of the human retina measured at different luminance levels. *The Journal of Physiology*, 113, 115–122.
- Weale, R. (1953). Spectral sensitivity and wave-length discrimination of the peripheral retina. *The Journal of Physiology*, 119, 170–190.
- Webster, M., Halen, K., Meyers, A., Winkler, P., & Werner, J. (2010). Colour appearance and compensation in the near periphery. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 277, 1817–1825.
- Weitzman, D., & Kinney, J. (1967). Appearance of color for small, brief, spectral stimuli, in the central fovea. *Journal of Optometry Society American*, 57, 665–670.
- Weitzman, D., & Kinney, J. (1969). Effect of stimulus size, duration, and retinal location upon the appearance of color. *Journal of Optometry Society American*, 59, 640–643.
- Werner, J., Donnelly, S., & Kliegl, R. (1987). Aging and human macular pigment density. Appended with translations from the work of Max Schultze and Ewald Hering. *Vision Research*, 27, 257–268.
- Wesner, M., Pokorny, J., Shevell, S., & Smith, V. (1991). Foveal cone detection statistics in color-normals and dichromats. *Vision Research*, 31, 1021–1037.
- Widayati, K., Saito, A., Suryobroto, B., Mikami, A., & Koida, K. (2019). Color Perception in Protanomalous Female *Macaca fascicularis*. *I-Perception*, 10(2), 1–16.

- William, B. (2006). *Borish's Clinical Refraction*. Butterworth-Heinemann.
- Williams, D., MacLeod, D., & Hayhoe, M. (1981). Punctate sensitivity of the blue-sensitive mechanism. *Vision Research*, 21, 1357–1375.
- Williams, R. (1991). The human retina has a cone-enriched rim. *Vision Neuroscience*, 6, 403–406.
- Wilson, D. (2017). Refractive Errors. In P. Artal (Ed.), *Handbook Of Visual Optics - Fundamental and Eye Optics* (pp. 277–290). CRC Press.
- Wooten, B., & Hammond, B. (2005). Spectral absorbance and spatial distribution of macular pigment using heterochromatic flicker photometry. *Optometry and Vision Science*, 82, 378–386.
- Wurm, L., Legge, G., Isenberg, L., & Luebker, A. (1993). Color improves object recognition in normal and low vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(4), 899–911.
- Zele, A., Feigl, B., Adhikari, P., Maynard, M., & Cao, D. (2018). Melanopsin photoreception contributes to human visual detection, temporal and colour processing. *Scientific Reports*, 8, 3842.
- Zhaoping, L. (2014). A very brief introduction of what is known about vision experimentally. In *Understanding Vision - Theory, Models and Data* (pp. 16–65). Oxford University Press.

Anexos

Testes de Diagnóstico de Deficiências na Visão das Cores

Com a descoberta da deficiência na visão das cores e com a consciência do seu impacto no dia-a-dia dos seus portadores, houve uma grande necessidade de criar testes para saber o tipo de deficiência em causa. Neste campo, existem testes de despistagem, testes de classificação, testes de gradação e testes de diagnóstico (Swanson, 2003; Schwartz, 2010; Marechal et al., 2018).

Os testes de despistagem apenas têm como objetivo distinguir indivíduos com visão das cores normal de indivíduos com visão das cores deficientes. O teste mais comum é o teste de placas pseudoisocromáticas, teste de Ishiara.

Por outro lado, os testes de classificação conseguem indicar qual a anomalia presente no indivíduo com deficiência na visão das cores. É o caso do teste *Cambridge Colour Test* (CCT).

No que diz respeito a testes de gradação, estes indicam qual a severidade da anomalia presente sendo os mais comumente usados com este objetivo os testes de discriminação de matiz, teste *Farnsworth-Munsell 100* (FM-100) e o teste *Desaturated Lanthony 15* (D15). Estes testes apenas nos indicam se o paciente possui uma anomalia nos cones S, M ou L, podendo classifica-la como moderada ou severa.

Por fim, os testes de diagnóstico indicam especificamente qual a anomalia presente sendo que permitem a grande vantagem sob os testes de gradação é que permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos. O teste mais utilizado para este efeito é o anomaloscópio (Swanson, 2003).

Em seguida, faz-se uma breve descrição dos testes existentes para avaliar a deficiência da visão das cores:

- Teste de Ishiara

Estas placas consistem em figuras que devem ser distinguidas do fundo, estando as cores que constituem a figura e as cores do fundo sobre uma linha de confusão dicromática comum. Pacientes com visão das cores normal podem facilmente distinguir a figura do fundo, baseadas nas diferenças cromáticas. Contudo, pacientes com anomalias na visão das cores têm dificuldades em fazer essa distinção ou simplesmente não o conseguem fazer. Estes testes são úteis para detetar anomalias na

visão das cores do vermelho/verde, tendo como desvantagem o facto de não ser eficaz a despistar tritanopes ou tritanómalos dado que não possuem placas que avaliem a cor azul (Schwartz, 2010).

Na Figura 14 encontra-se um exemplo das placas do Teste de Ishiara.

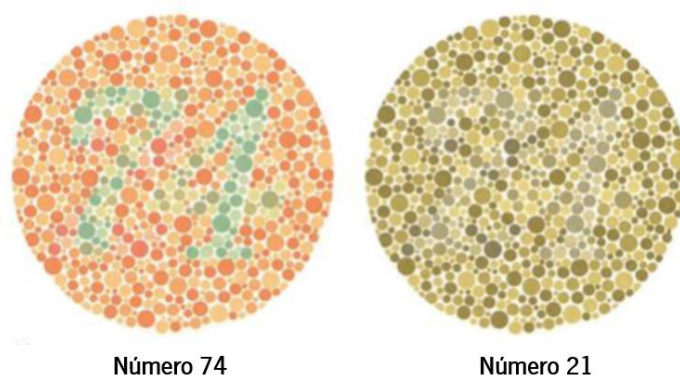


Figura 14. Placas do Teste de Ishiara. Adaptado de (Goldstein, 2010b).

No caso particular do teste de Ishiara, o teste comumente utilizado é constituído por duas partes: um parte com números (placas 1 a 25) e outra parte com caminhos (placas 26 a 38), sendo estas últimas destinadas a pessoas que não conheçam os números (Miquilini et al., 2019). Existem ainda algumas edições em que é apenas constituído por uma parte com placas com números. Na Figura 15 apresenta-se uma imagem original do livro escrito por *Shinobu Ishiara* em que apresentava o seu teste, no ano de 1972.

Placa	Pessoa Normal	Pessoa com Deficiência Verde-Vermelho				Pessoa com Deficiência Total Visão das Cores
1	12	12				12
2	8	3				×
3	29	70				×
4	5	2				×
5	3	5				×
6	15	17				×
7	74	21				×
8	6	×				×
9	45	×				×
10	5	×				×
11	7	×				×
12	16	×				×
13	73	×				×
14	×	5				×
15	×	45				×
		Protanope		Deuteranope		
		Severo	Leve	Severo	Leve	
16	26	6	(2) 6	2	2 (6)	
17	42	2	(4) 2	4	4 (2)	

Figura 15. Tabela de resultados do teste de visão das cores Ishiara. Adaptado de (Ishiara, 1972).

- Teste de Hardy-Rand-Rider (HRR)

Este teste é em tudo semelhante ao anteriormente apresentado, Teste de Ishiara. A distinção faz-se no facto de o fundo ser sempre cinzento e haverem símbolos coloridos, em vez de números.

Tem a vantagem de distinguir deficiências da visão das cores e avaliar o seu grau de severidade (William, 2006)

Na Figura 16 existe um círculo roxo e um triângulo rosa, ambos com o mesmo fundo cinzento. Um paciente com protanopia ou protoanomalo não consegue ver o triângulo porque no teste é utilizada a linha de confusão da protanopia que passa na cor de teste (triângulo) e na cor de confusão (fundo de cor neutra), mas vê o círculo dado que a cor de teste não se confunde com o fundo. Por outro lado, utilizando a linha de confusão da deuteranopia que passa na cor de teste (círculo) e na cor de confusão (fundo de cor neutra), um deuteranope ou um deuteuranómalo não consegue ver o círculo, mas consegue ver o triângulo.

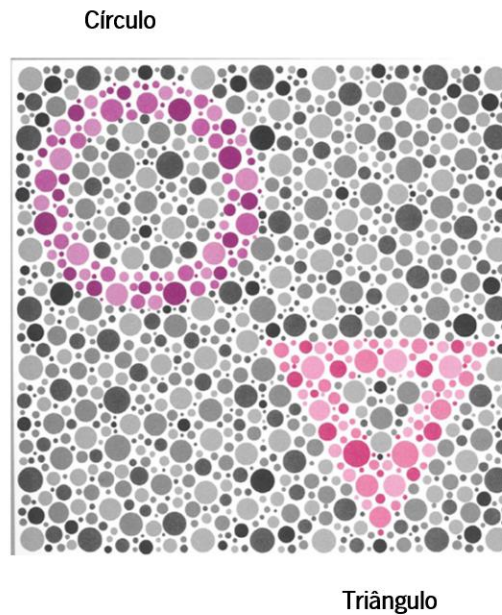


Figura 16. Exemplo de teste placa do teste HRR. Adaptado de (Schwartz, 2010).

- *Cambridge Colour Test (CCT)*

Este teste baseia-se na observação de um alvo que é um optotipo C de *Landolt* (Figura 17) cuja tarefa do observador é indicar para que lado se encontra a sua abertura (cima, baixo, direita ou esquerda).

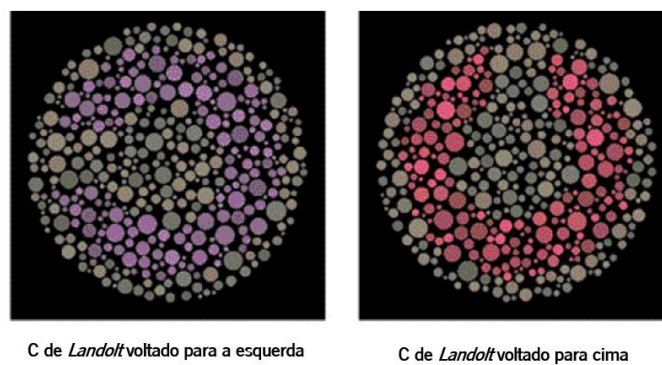


Figura 17. C de Landolt do Cambridge Colour Test. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

O alvo tem uma saturação elevada no início do teste e esta vai diminuindo ao longo do teste, de modo a que o seu grau de dificuldade aumente.

Os resultados deste teste são elipses que, pela sua inclinação, nos indicam o tipo de deficiência na visão das cores, dado que estas se encontram nas várias linhas de confusão existentes. Surgem sempre nos resultados três elipses dado o teste avaliar a visão das cores em três zonas do espaço. Por

este motivo, não permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos, já que no caso de ser um dicromata o que teria de se obter eram duas linhas paralelas, mas o programa por defeito, vai sempre ajustar a uma elipse (Mollon & Regan, 2000). Caso o resultado sejam três pequenas elipses o paciente apresenta visão das cores normal. Nas Figura 18 até Figura 22 apresentam-se os resultados possíveis deste teste.

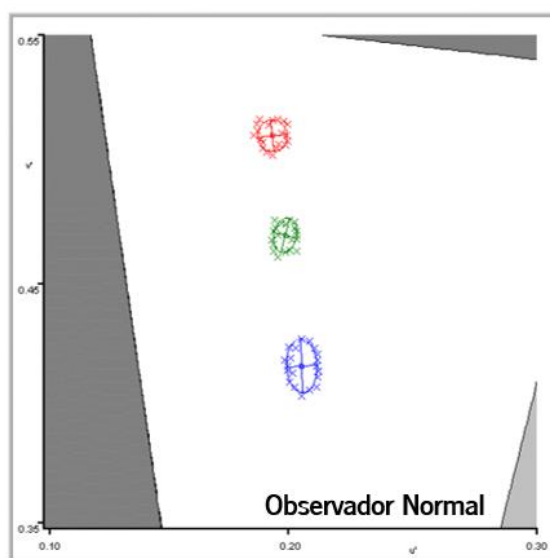


Figura 18. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com visão das cores normal. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

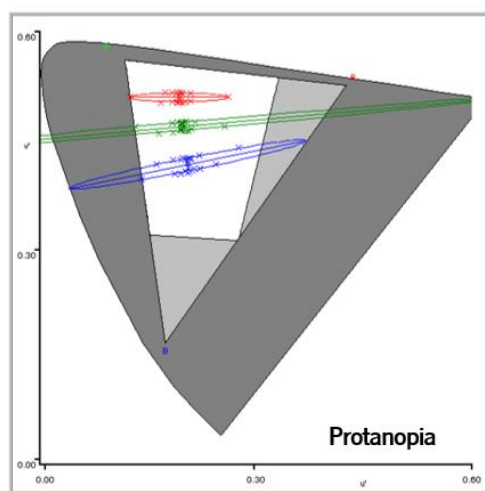


Figura 19. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com protanopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

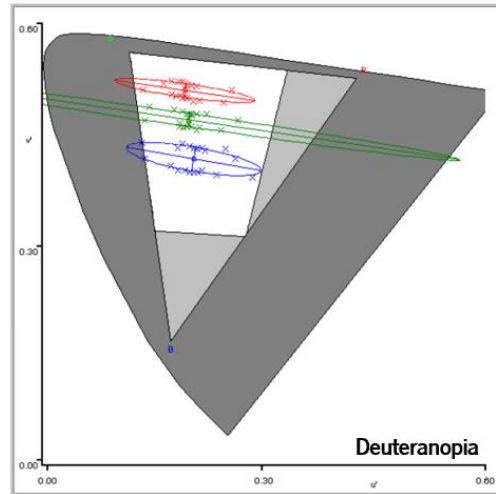


Figura 20. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com deuteranopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

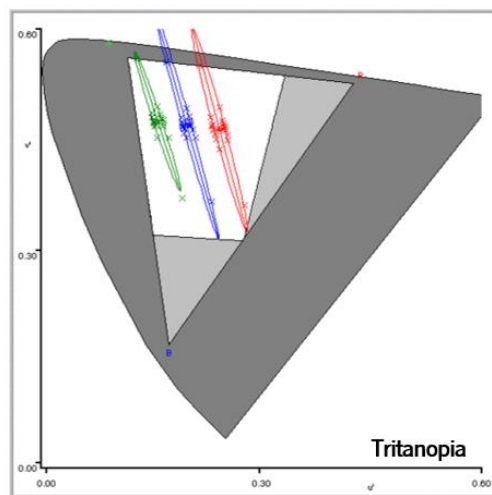


Figura 21. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo com tritanopia. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

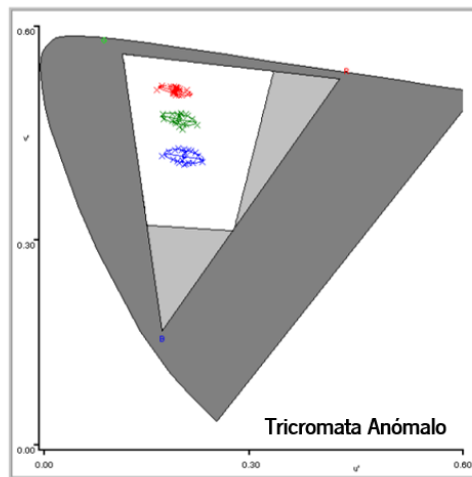


Figura 22. Resultados do Cambridge Colour Test num indivíduo tricromata anômalo. Adaptado de (Mollon & Regan, 2000).

Um pormenor importante é que não é possível distinguir um anômalo severo de um dicromata porque são necessárias serem distinguidas cores até ao limite do diagrama cromático, mas o monitor só consegue reproduzir parte das cores (as que estão dentro do triângulo). Por esta razão, o teste CCT não pode ser um teste de diagnóstico.

Comparativamente ao teste de Ishiara, este teste é muito mais completo porque testa várias direções no espaço cromático. Além disso, ao ser controlado por computador impede o indivíduo de decorar as placas quando realiza várias vezes o teste (Mollon & Regan, 2000).

- *Farnsworth-Munsell 100 (FM-100)*

O teste FM-100 é um teste de discriminação de matiz bastante completo. Este permite uma análise mais detalhada da anomalia em relação ao seu grau de severidade, podendo classifica-lo, quanto à sua severidade em anomalia leve, moderada ou severo (Schwartz, 2010).

Este teste é constituído por oitenta e cinco peças (apesar de o nome conter o número cem), de diferentes cores, que têm que ser devidamente organizadas consoante o seu matiz. A organização tem por base ordenar as peças das mais escuras para as mais claras, sem haver saltos bruscos de matiz, para as quatro caixas de matizes existentes.

Os matizes escolhidos estão representados no diagrama cromático formando uma elipse. Esta elipse possui cores que são tangentes às linhas de confusão de diferentes deficiências de visão das cores. Um paciente com uma determinada anomalia vai confundir as cores que são tangentes às linhas de confusão correspondentes (Lugo & Tiedeman, 1986).

O teste deve ser executado sob o iluminante D65, iluminante que simula a luz média do dia, dado que este é o recomendado pelo fabricante para se poder fazer as devidas distinções dos matizes. Os resultados devem ser registados e colocados num programa informático específico, o qual traça um gráfico que permite identificar a anomalia. Os gráficos obtidos são bastante detalhados e revelam o tipo de anomalia que o indivíduo apresenta e o grau de severidade desta (McAlpine et al., 2018). Estes gráficos podem ser visualizados na Figura 23 e na Figura 24.

Apesar de este teste indicar a severidade, não é capaz de distinguir dicromatas de tricromatas anómalos, pelo que esta é uma desvantagem. Além disso, este teste é bastante demorado, sendo por isso, por norma, substituído pelo teste mais simples que se apresenta em seguida, teste D15.

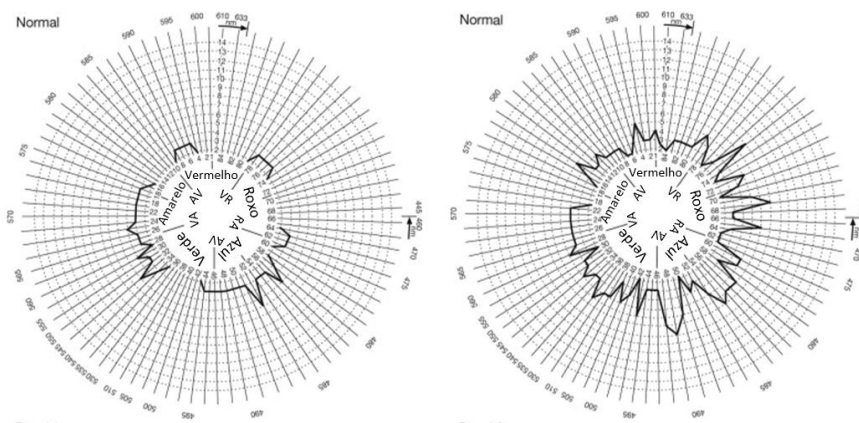


Figura 23. Resultados do teste FM-100 para pacientes com visão das cores normal. Adaptado de (Cao, 2013).

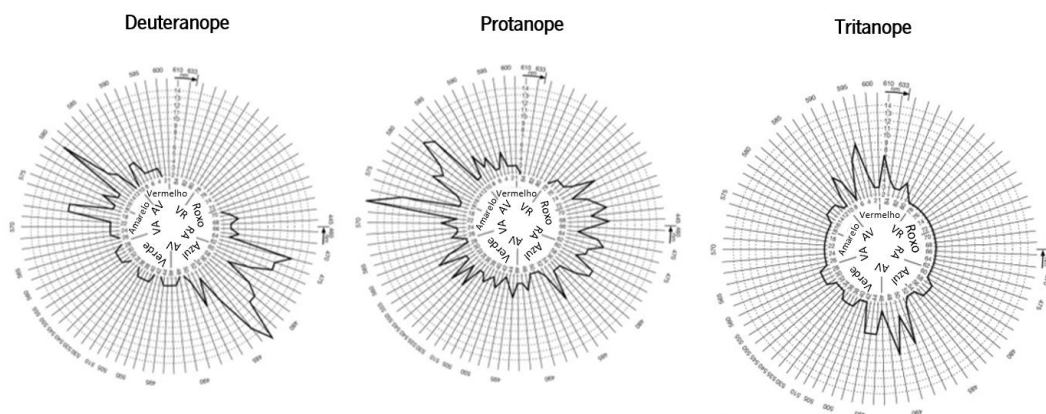


Figura 24. Resultados do teste FM-100 para pacientes deuteranopes, protanopes e tritanopes, da esquerda para a direita, respetivamente. Adaptado de (Cao, 2013).

- *Desaturated Lanthony 15 (D15)*

O teste D15 é uma versão mais rápida do teste apresentado anteriormente, FM-100. As suas principais vantagens são o facto ser de fácil execução e rápido, pois existem apenas quinze placas de diferentes matizes, que formam uma elipse no diagrama cromático. No entanto, tem como desvantagem o facto de ser menos preciso, em relação ao teste FM-100. Além disso, como o teste D15 é um teste com baixa sensibilidade, sendo por isso possível que alguns pacientes tricromatas anómalos consigam passar no teste sem levantar dúvidas (Schwartz, 2010).

A primeira cor é fixa e as outras têm que ser organizadas pelo paciente de modo a organizar as cores (Figura 25). As cores escolhidas cruzam-se com as linhas de confusão dos diferentes tipos de deficiência. Consoante as cores trocadas estejam nas linhas de confusão de uma determinada anomalia, a deficiência é a correspondente a essas linhas de confusão. Desta forma, se um paciente tiver uma determinada deficiência na visão das cores, então, no gráfico, as linhas de ligação das cores ficarão com a mesma inclinação das linhas de confusão de determinada anomalia (Dain et al., 2019). Na Figura 26 demonstram-se os diagramas formados após a análise dos resultados deste teste e a respetiva deficiência na visão das cores associada.

É de ressaltar que este teste permite graduar as deficiências de visão das cores consoante a sua severidade, mas apenas em moderado ou severo (Liem, 2018).



Teste D15

Figura 25. Teste D15. Adaptado de (Schwartz, 2010).

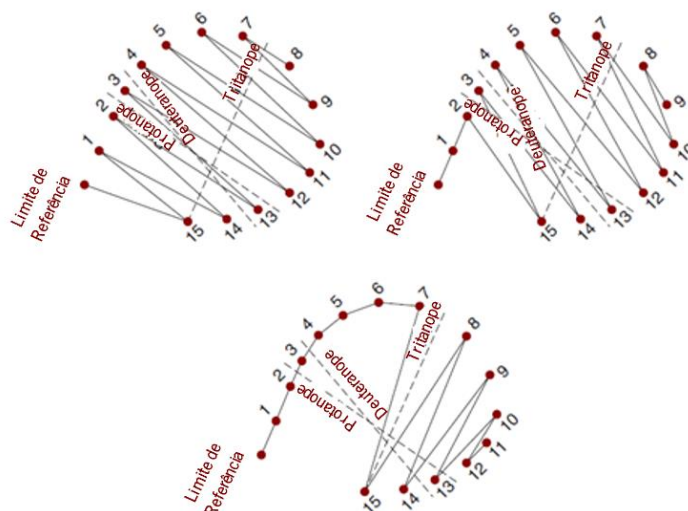


Figura 26. Diagramas formados pelo teste D15 para identificação das diferentes deficiências da visão das cores. Adaptado de (Schwartz, 2010).

- Anomaloscópio

O aparelho anomaloscópio permite fazer diagnósticos precisos das anomalias de visão das cores. A sua grande vantagem é que permite distinguir dicromatas de tricromatas anómalos.

Neste aparelho é possível testar a visão das cores na zona verde-vermelho e, também, na zona azul, ultrapassando a limitação de muitos outros testes. Para este efeito utilizam-se dois testes: Teste de Rayleigh e Teste de Moreland (Pinckers, 1999).

Para os dois testes o princípio de funcionamento é semelhante: aparece um círculo com duas metades de cores reguláveis. Esta regulação pode ser feita através da mistura de duas cores ou de um ajuste de brilho. O objetivo é que o paciente ajuste as duas metadas até que lhe pareçam da mesma cor. Após esse ajuste devemos analisar a posição do resultado no gráfico (Birch, 2008).

Teste de Rayleigh (zona do vermelho/verde)

Este teste baseia-se na equação $Y(590\text{ nm}) = R(670\text{ nm}) + G(546\text{ nm})$, em que Y significa *Yellow* e representa a cor amarela, R significa *Red* e representa a cor vermelha e G significa *Green* e representa a cor verde.

Em termos de comprimentos de onda, o anomaloscópio utiliza luzes monocromáticas de 670 nm (vermelho) e de 546 nm (verde). Essa mistura de cores espectrais resulta no amarelo de comprimento de onda 589 nm (Oculus, 2015). Ao aumentar a porção de vermelho, vai diminuir a porção de verde,

mas as somas destes é sempre constante se não existirem alterações de brilho da metade superior do teste.

Este teste utiliza estes comprimentos de onda específicos porque se encontram na mesma linha de confusão, tal como demonstrado na Figura 27.

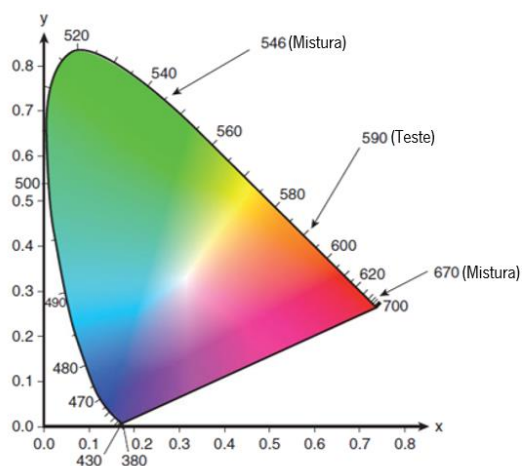


Figura 27. Comprimentos de onda utilizados no campo de teste e na mistura, que se encontram todos sobre a mesma linha de confusão. Adaptado de (Schwartz, 2010).

Na Figura 28 pode ver-se um campo de teste utilizado para a realização do Teste de Rayleigh, o qual tem como objetivo igualar as duas metades do círculo.

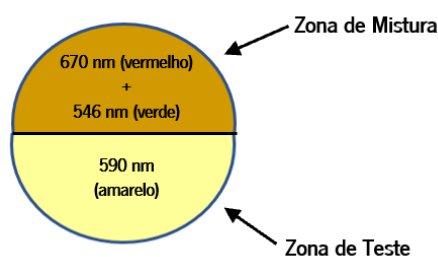


Figura 28. Campo de teste do anomaloscópio, no teste de Rayleigh, em que o objetivo é igualar as duas metades do círculo. Adaptado de (Schwartz, 2010).

A distinção entre um dicromata e um tricromata anómalo é feita neste teste dado que um dicromata só vai necessitar de ajustar o brilho uma vez que tem falta de um dos cones, não realizando ajustes nas duas zonas do teste de Rayleigh. Desta forma, os dicromatas apenas usam como pista a

luminosidade. Se estivermos perante um protanope, este vai colocar bastante brilho na parte de baixo para igualar as cores (Schwartz, 2010). Além disso, é de notar que um deuteranómalo precisa de mais verde para obter amarelo enquanto que o protanómalo precisa de mais vermelho para obter o mesmo amarelo. Essa demonstração encontra-se na figura abaixo, Figura 29.

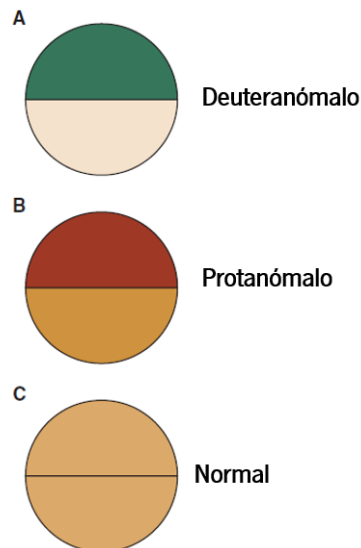


Figura 29. Visualização de um paciente com visão das cores normais das misturas feitas por um deuteranómalo (A) e protanómalo (B). Um deuteranómalo olha para uma combinação perfeita (C) e parece-lhe avermelhada, pelo que lhe adiciona verde. Por outro lado, a um protanómalo parece-lhe esverdeado, pelo que lhe adiciona vermelho. Adaptado de (Schwartz, 2010).

Na Figura 30 encontra-se um esquema de resultados do anomaloscópio para o teste de Rayleigh em que indica quais os comprimentos de onda utilizados em cada uma das deficiências da visão das cores e se necessitam de variar a luminosidade ou não.

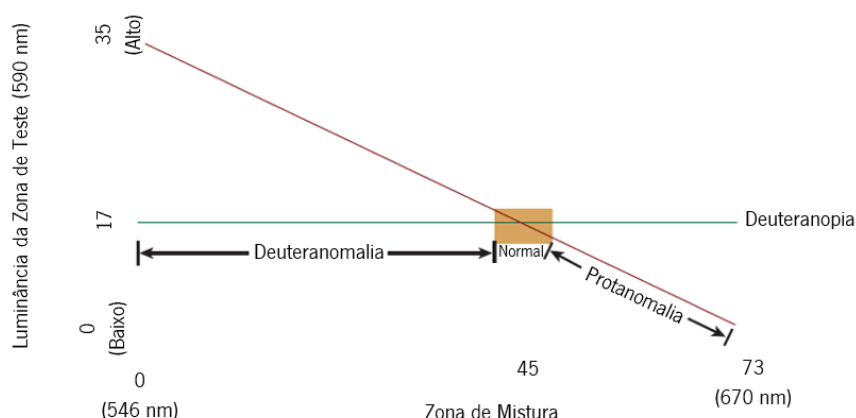


Figura 30. Apresentação de resultados do anomaloscópio, para o teste de Rayleigh. A linha verde indica que um paciente com deuteranopia aceita igualar as cores apenas com mudanças na luminosidade no campo de referência. A linha vermelha indica que um paciente com protanopia aceita igualar as cores, alterando a luminosidade. Em tricromatas anómalos, os deuteranómalos adicionam luz de comprimentos de onda baixos (546 nm) e os protanómalos adicionam luz de comprimentos de onda altos (670 nm). Além disso, o paciente protoanômalo tem de diminuir a luminosidade, enquanto que o deuteranômalo não o faz. Adaptado de (Schwartz, 2010).

Teste de Moreland (zona do azul)

Este teste baseia-se na equação $B(436\text{ nm}) + G(490\text{ nm}) = C(480\text{ nm}) + Y(589\text{ nm})$, em que B significa *Blue* e representa a cor azul, G significa *Green* e representa a cor verde, C significa *Cyan* e representa a cor ciano e Y significa *Yellow* e representa a cor amarelo.

Este tipo de teste não é tão fácil de realizar quanto o anterior. Na zona do azul no espaço CIE não possui todas as cores numa linha de confusão única, mas sim uma curva. Por esta razão, as cores de mistura não vão ser todas monocromáticas, motivo pelo qual tem de haver dois pares de cores, sendo um par ajustado no botão de cima e outro no de baixo. Neste teste faz-se um ajuste da cor e do brilho ao mesmo tempo (Oculus, 2015).

- CAD Teste (City University)

O CAD Teste da *City University* é um teste que é capaz de detetar todos os tipos de deficiência na visão das cores. Além disso, como este teste é bastante sensível tem a particularidade de ser capaz de detetar deficiências muito leves que são frequentemente ignoradas noutros testes (City, 2020b).

Na Figura 31 encontra-se o estímulo que aparece no teste CAD. Este consiste num quadrado colorido, em movimento, sobre um num fundo com contraste reduzido. Este quadrado muda de cor durante o exame (Seshadri et al., 2005). O observador indica, com recurso a um comando, em que posição se encontra o quadrado de teste (canto superior direito, canto superior esquerdo, canto inferior direito e canto inferior esquerdo). Todo o exame é realizado enquanto o paciente fixa um ponto central na imagem (City, 2020a).

As grandes vantagens deste exame é que é rápido e de fácil acesso.

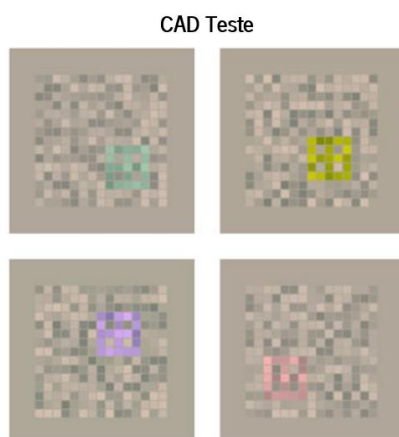


Figura 31. Estímulo do teste CAD da City University. Adaptado de (City, 2020b).