



Psicologia USP
ISSN: 0103-6564
revpsico@usp.br
Instituto de Psicologia
Brasil

Gomes Lima, Monica; Duarte Gomes, Bruno; Fix Ventura, Dora; de Lima Silveira, Luiz Carlos
Métodos utilizados na avaliação psicofísica da visão de cores humana
Psicologia USP, vol. 22, núm. 1, 2011, pp. 197-222
Instituto de Psicologia
São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305123739004>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

MÉTODOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO PSICOFÍSICA DA VISÃO DE CORES HUMANA

Monica Gomes Lima
Bruno Duarte Gomes
Dora Fix Ventura
Luiz Carlos de Lima Silveira

Resumo: A cor é um atributo perceptual que nos permite identificar e localizar padrões ambientais de mesmo brilho e constitui uma dimensão adicional na identificação de objetos, além da detecção de inúmeros outros atributos dos objetos em sua relação com a cena visual, como luminância, contraste, forma, movimento, textura, profundidade. Decorre daí a sua importância fundamental nas atividades desempenhadas pelos animais e pelos seres humanos em sua interação com o ambiente. A psicofísica visual preocupa-se com o estudo quantitativo da relação entre eventos físicos de estimulação sensorial e a resposta comportamental resultante desta estimulação, fornecendo dessa maneira meios de avaliar aspectos da visão humana, como a visão de cores. Este artigo tem o objetivo de mostrar diversas técnicas eficientes na avaliação da visão cromática humana através de métodos psicofísicos adaptativos.

Palavras-chave: Visão de cores. Psicofísica visual humana. Métodos adaptativos. Testes de avaliação da visão de cores.

Introdução

A visão de cores é um atributo perceptual que corresponde a uma resposta produzida pelo cérebro à captação de luz do ambiente pelos fotorreceptores da retina. Baseado nos trabalhos de Ewald Hering (Kaiser & Boyton, 1996) propôs-se um modelo que definiu a percepção visual de cores como sendo formada a partir de três eixos cardinais da visão de cores com seis cores elementares: verde-vermelho, azul-amarelo, branco-preto (a percepção do branco resulta da combinação de todas as cores elementares, e o preto não deixa de ser uma percepção de cor, já que a ausência de percepção não possui significado neural ou psicológico). Porém, esse modelo não é o mais próximo da realidade, pois as cores oponentes utilizadas não condizem exatamente com os mesmos comprimentos de onda absorvidos pelos fotorreceptores da retina. O modelo de cor mais conhecido, por pares de cores oponentes, é originário da teoria de processos oponentes formulada por Hurvich e Jameson (Kaiser & Boyton, 1996), que elaboraram um método experimental de cancelamento de cores na intenção de avaliar a natureza dos processos oponentes da visão de cores (Feynman et al., 1967).

Uma boa estratégia para se estudar a percepção visual é através da Psicofísica, uma subárea da Psicologia preocupada com o estudo quantitativo da relação entre características físicas da estimulação sensorial (comprimento de onda, frequência, energia) e a resposta comportamental resultante desta estimulação (sua transformação em sinais que levam a informação até o cérebro e geram a experiência consciente de visão). A psicofísica é fortemente baseada em aportes matemáticos, nos quais (como em toda a Psicologia Experimental) as investigações envolvem a relação entre variáveis independentes (luz, som, pressão mecânica) e variáveis dependentes (respostas comportamentais relacionadas com sensação e percepção) (Coren, 2003). A psicofísica visual deve ser entendida como um cenário com atores principais: 1) o estímulo visual presente para o sujeito; 2) pessoas que detectam, discriminam, identificam, classificam ou descrevem os estímulos visuais; 3) a resposta do sujeito perante o estímulo apresentado. Nesse contexto é necessário não confundirmos os processos mentais de sensação e percepção: a sensação é o processo que envolve a detecção do estímulo no meio, e a percepção é o processo de interpretação, pelo sujeito, das informações adquiridas e processadas pelos sentidos; dessa maneira, a percepção é dependente da sensação (Coren, 2003; Levine, 2000; Ehrenstein & Ehrenstein, 1999).

As pesquisas que estudam a percepção se depararam com algumas dificuldades, principalmente no que diz respeito a quão precisa é esta percepção e na sua representação da realidade externa. Na tentativa de solucionar estas dificuldades, Ernst Weber, Gustav Fechner e Wilhelm

Wundt deram início aos fundamentos teóricos sobre métodos psicofísicos, a partir da segunda metade do século XIX. E, dentro desta proposta do estudo da percepção visual, os métodos psicofísicos podem ser entendidos como o procedimento, a técnica, pelo qual o pesquisador conseguirá obter uma medida concreta da percepção do sujeito avaliado. O emprego de métodos psicofísicos de análise fornece meios não invasivos de caracterização da resposta visual, com relação à decomposição da função visual, possibilitando o estudo isolado de suas propriedades (detecção de bordas, movimento, cor, forma, textura, visão estereoscópica). Tão importante quanto escolher o estímulo ideal a ser utilizado no estudo de uma característica da visão é a escolha do método psicofísico que mais se enquadre à pergunta experimental a ser respondida. Para realizar essa avaliação são utilizados métodos psicofísicos adaptativos e não adaptativos, porém neste artigo nos deteremos apenas nos métodos adaptativos, já que são os mais fáceis de ser empregados e também os mais utilizados nos estudos científicos.

Um procedimento psicofísico é considerado adaptativo se ao longo de cada tentativa a ordem do estímulo é determinada pelos resultados de uma ou mais tentativas anteriores (Leek, 2001). Fechner descreveu três métodos clássicos utilizados, até hoje, em medidas do limiar absoluto (quanto de um estímulo é necessário para que um sistema o detecte) e do limiar de diferença (quanto um estímulo deve mudar para que seja detectada essa mudança): método dos limites, método do ajuste e método dos estímulos constantes. No método dos limites a tarefa durante o teste consiste apenas em responder se o padrão visual é visto ou não, com o estímulo sendo modulado em passos iguais de intensidade. São apresentadas séries de estimulação ascendentes e descendentes, as quais são interrompidas quando o sujeito passa a detectar o estímulo (limite ascendente) ou quando ele deixa de detectar o estímulo (limite descendente). O limiar é considerado como a média aritmética dos vários limites ascendentes e descendentes medidos em sequência. Se as medidas alternadas dos limites ascendentes e descendentes são realizadas em uma **mesma** tentativa, o método dos limites passa a ser chamado de método em escada (*staircase method*) – o limiar será a média aritmética dos pontos de reversão registrados entre os aumentos e decrementos progressivos da intensidade do estímulo (Leek, 2001; Rodrigues, 2003; Treutwein, 1995). Neste método a alternância entre a série ascendente e descendente pode ser programada para que seja aleatória. No método do ajuste o sujeito testado detém controle direto sobre a variação da intensidade de estimulação, e o teste pode ser iniciado em condição sublimiar – aumentando a intensidade até que o estímulo seja percebido (série ascendente) –, ou supralimiar – diminuindo a intensidade até que o estímulo deixe de ser percebido (limite descendente) (Ehrenstein & Ehrenstein, 1999; Leek, 2001; Levine, 2000; Treutwein, 1995). No método

dos estímulos constantes, as intensidades do estímulo não são apresentadas em ordem sequencial, mas sim em ordem aleatória. Os valores de intensidade a serem apresentados são previamente determinados utilizando-se o método dos limites para identificar a faixa de intensidades que contém o limiar. Esta faixa é subdividida em no mínimo 7 valores, cada um dos quais apresentado no mínimo 10 vezes, o que resulta num total de 70 apresentações, cuja sequência de apresentação é aleatória. O limiar é representado por um conceito estatístico, a detecção do sinal é relacionada à intensidade do estímulo e esta medida de desempenho psicofísico é denominada de função psicométrica. Na função psicométrica verifica-se que há uma maior probabilidade de acerto na detecção do sinal físico em pontos de maior intensidade de estimulação e uma menor probabilidade em pontos de menor intensidade – o limiar é definido como a intensidade de estimulação que produz resposta correta em 50% das tentativas (Bi & Ennis, 1998; Ehrenstein & Ehrenstein, 1999; Levine, 2000).

Um ponto importante na investigação da percepção de cores humana está relacionado com os estímulos apresentados aos indivíduos. A construção de qualquer estímulo deve considerar um aspecto fundamental: o espaço de cores utilizado para a sua confecção. Um dos espaços de cores perceptuais mais utilizados para a criação de estímulos modulados em cores foi proposto pela "*Comission Internationale de l'Eclairage*" (CIE) em 1931 (chamado então de CIE 1931). Nele a determinação das cores é feita ao se relacionar proporções de três cores primárias (vermelho, verde e azul) necessárias para a composição de qualquer cor. Esta proporção de cor é fornecida por funções de equiparação de cores (*Colour Matching Functions*) obtidas por experimentos psicofísicos aplicados em pessoas com visão de cores tricomática normal (em um campo bipartido era apresentada luz de um determinado comprimento de onda em um dos lados e a partir da mistura de luzes de três cores primárias era possível igualar o comprimento de onda do lado oposto ao primeiro) (Wyszecki & Stiles, 1982).

O diagrama de cromaticidade CIE 1931 deriva do sistema de cores RGB: utilizando as três luzes primárias, através de funções de equiparação de cores, foi possível definir um valor tri-estímulo para as coordenadas RGB, assim foi possível gerar o diagrama da CIE RGB. Quando trabalhamos com a criação de estímulos em monitores de computador as três cores primárias emitidas (de acordo com o diagrama RGB) por cada um dos tubos de raios catódicos não condizem com as cores detectadas pelo sistema visual humano, dessa maneira é necessário modificar as proporções de intensidade de cor aplicadas a cada uma dos componentes primários emitidos, e assim temos valores de tri-estímulos negativos em alguns comprimentos de onda. Isso quer dizer que um monitor não é capaz de produzir todas as cores do espectro visível pela combinação das cores vermelho, verde e azul. Para conseguir representar esses valores negati-

vos no diagrama, a CIE resolveu adotar um modelo padrão X, Y, Z (CIE XYZ), cujas cores primárias não correspondem a cores visíveis, porém suas componentes são positivas, e dessa maneira é possível reproduzir no monitor todos os comprimentos de onda da luz visível (expressos no diagrama CIE XYZ), após converter CIE XYZ no diagrama RGB (os monitores de vídeo representam sua estimulação cromática através deste diagrama) (Wright, 1941; Wyszecki & Stiles, 1982).

Em um experimento que investiga características da visão de cores humana, no qual as variáveis, a pergunta experimental e os pontos explorados acima (método psicofísico e a construção do estímulo) estão bem definidos, é possível responder à pergunta experimental de maneira elegante usando testes psicofísicos visuais como os descritos abaixo.

Avaliação da visão de cores humana

1 O ordenamento de cores pelo teste de Farnsworth-Munsell (FM 100)

O teste dos 100 Matizes de Farnsworth-Munsell tem como objetivo identificar e diferenciar deficiências congênitas ou adquiridas de discriminação cores, usando o ordenamento de cores para medir a capacidade do indivíduo em discriminá-las (Birch, 1993). Esse teste é baseado no sistema de cores desenvolvido por Albert H. Munsell na primeira década do século XX. O sistema Munsell classifica as cores de forma uniforme perceptualmente, baseando-se na diferença apenas perceptível entre uma cor e a seguinte. É representado em um arranjo cilíndrico tridimensional no qual a especificação de cada cor é dada através de três dimensões. O eixo vertical representa o brilho entre o branco (no extremo superior com brilho máximo) e o preto (no extremo inferior com brilho mínimo). No plano horizontal o matiz é representado pelo ângulo polar e a saturação pela distância da cor em relação ao centro (quanto mais afastada do eixo vertical, mais saturada é a cor).

Na década de 1940 o teste de FM 100 foi desenvolvido por Dean Farnsworth. Com 100 pequenos cubos de madeira, cada um com um estímulo colorido – com valores de saturação e brilho constantes, diferindo apenas quanto ao matiz –, dispostos em quatro séries com base no sistema de Munsell, para ordenação pelo sujeito com base apenas na diferença do matiz entre eles (Birch, 2001; Brainard, 2003; Dain, 2004; Farnsworth, 1957). Em 1957, Dean Farnsworth mostrou que usando certos 85 dos 100 estímulos era possível chegar ao mesmo resultado obtido com o FM 100, com a vantagem de diminuição do tempo para a realização do teste. Cada peça é identificada por um número, que permite marcar er-

ros ocorridos na ordenação feita pelo sujeito. Os resultados do teste são comumente apresentados em gráficos polares que mostram a magnitude dos erros cometidos nas diversas regiões do espaço de cor (quanto maior a distância a partir do centro, maior o erro cometido durante a realização do teste). Os resultados também são mostrados numericamente pela soma total dos erros no teste: a magnitude do erro no posicionamento de uma peça é obtida pela soma das diferenças entre o número da peça e os números das peças adjacentes a ela (Figura 1) (Farnsworth, 1943, 1957).

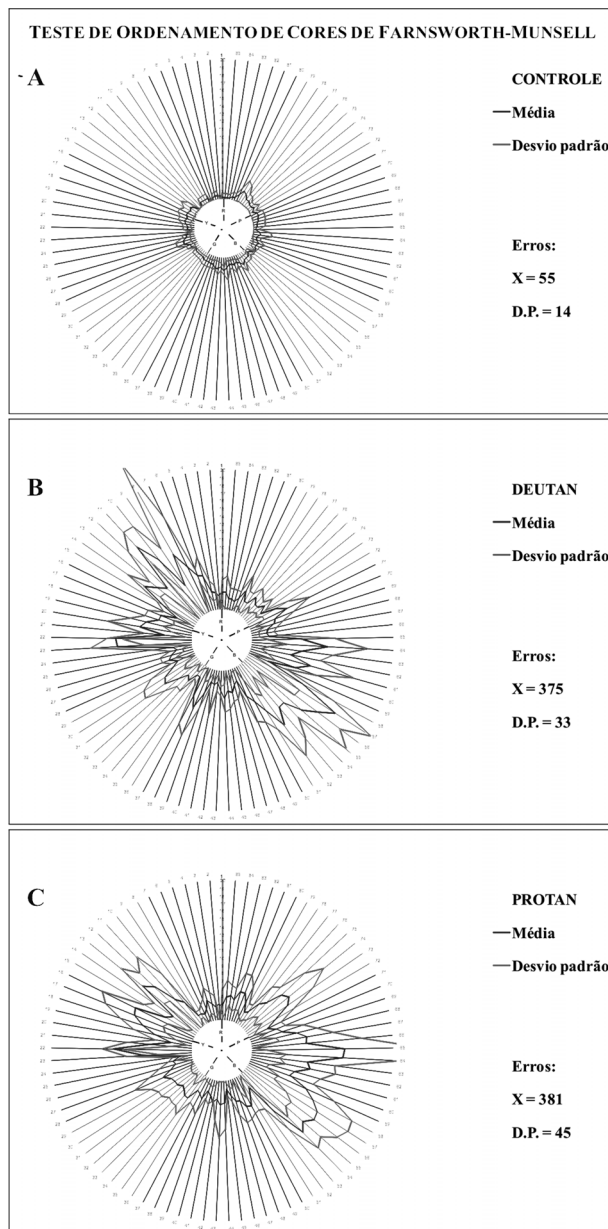


Figura 1. Comparação do teste de FM 100 entre um indivíduo tricromata normal (A) e com discromatopsias hereditárias do tipo deutan (B) e protan (C). Quanto mais próxima a média de erros do círculo central, melhor é a discriminação de cores do sujeito. É importante observar que há uma diferença da polaridade dos erros entre deutan e protan que são característicos de cada uma das deficiências para visão de cores. Os valores ao lado dos gráficos indicam: "X", a média de erro; "D.P.", o desvio-padrão com relação X. Os três indivíduos acima são do sexo masculino. Dados coletados pelos autores no Laboratório de Neurologia Tropical, UFPA.

O FM 100 é o teste de discriminação mais utilizado na prática clínica e nos estudos científicos por ser uma forma simples de avaliação da discriminação de cores, porém ele deixa a desejar no que diz respeito à distinção dos graus de variação da discriminação de cores e em detectar graus leves de perdas de discriminação de cores (Farnsworth, 1957). Além disso, há diferenças no desempenho entre os indivíduos com relação ao tamanho da pupila, grau de pigmentação da mácula (Dain, 2004; Kinnear & Sahraie, 2002), influência da aprendizagem daqueles que já realizaram o teste (Dain, 2004) e o fato de que asiáticos possuem maior erro que a população caucasiana (Knoblauch et al., 1987).

Cada vez mais o FM 100 está sendo utilizado para avaliar a habilidade de discriminação de cores, porém ele não possui tanta eficiência, já que é comum encontrar resultados alterados entre pessoas que comprovadamente não apresentem nenhum tipo de deficiência para a visão de cores, e entre aquelas que apresentam alterações ele não consegue fornecer o grau de discriminação de cores, classificando todos os indivíduos (grupos com alta, média e baixa discriminação de cores) como alterados. Já as pessoas com alteração hereditária, moderada ou severa, apresentam um padrão de deficiência caracterizado pela disposição bipolar dos gráficos e pela posição dos erros, os quais definem os eixos de confusão (Birch, 2001). Dentro desta proposta de avaliação, versões manuais e computadorizadas do teste são utilizadas nas pesquisas científicas para avaliar diversas patologias visuais, neurológicas e neurotóxicas (Castro et al., 2009; Pacheco-Cutillas, Sahraie & Edgar, 1999; Rodrigues et al., 2007; Ventura et al., 2003c, 2005).

2 As medidas dos limiares de discriminação no teste de cores computadorizado de Mollon-Reffin (MR) ou em sua versão comercial Cambridge Colour Test (CCT)

Em 1994, Regan, Reffin e Mollon publicaram um trabalho que mostrava uma técnica de avaliação da capacidade de humanos em distinguir variações de cromaticidade (combinações de matiz e saturação), usando um ruído de luminância e um ruído espacial para tornar o estímulo mais próximo de um estímulo visual natural. A mesma ideia é usada no conhecido teste de Pranchas de Ishihara. Esse teste foi criado pelo grupo de John Mollon anos antes (Mollon & Reffin, 1989) e foi considerado pelos autores de alta especificidade e alta sensibilidade por permitir a avaliação detalhada das alterações da discriminação de cores decorrentes de condições hereditárias ou adquiridas, fornecendo medidas quantitativas da habilidade de discriminação de cores do indivíduo (Regan et al., 1994; Mollon & Reffin, 1989). Esta avaliação confirmou-se na utilização do teste

em inúmeros trabalhos em que foi medida a visão de cores em diferentes patologias (ver descrição detalhada adiante).

O teste de MR baseia-se nas medidas de discriminação de cores fornecidas pelas elipses de MacAdam (1942). Essas elipses são construídas a partir de um eixo de discriminação cromático, ligando dois matizes que apresentam uma dada distância espectral, porém com mesma luminância. Essa distância entre os matizes pode ser localizada no diagrama de cromaticidade CIE 1931 ou no diagrama modificado, CIE 1976. Através de um experimento psicofísico de funções de equiparação de cores, MacAdam conseguiu criar as elipses de discriminação de cores da seguinte maneira: em presença de um estímulo cromático fixo em um dos lados de um campo bipartido, um sujeito acertava a cor do outro hemicampo até que igualasse à do primeiro. Quando as metades do campo bipartido eram julgadas pelo sujeito como tendo a mesma cromaticidade, a diferença nas coordenadas do estímulo alterado com relação ao estímulo fixo era registrada. A cromaticidade de muitos campos foi comparada a um único estímulo fixo e o resultado mostrou que os pontos registrados se ajustavam a uma elipse em torno do estímulo de cromaticidade fixa (MacAdam, 1942; Regan et al., 1994; Silberstein & MacAdam, 1945). Estas elipses delimitam áreas dentro das quais as cores não podem ser discriminadas. Quanto menores as elipses tanto mais precisa a discriminação cromática. Alterações na visão de cores podem ser registradas no CIE 1931 como linhas que unirão dois pontos no diagrama, mas que parecem ter a mesma cor para esses indivíduos. Essas linhas são chamadas de linhas de confusão de cores (Wyszecki & Stiles, 1982).

De posse desses conhecimentos associados a conhecimentos computacionais, Mollon e colaboradores criaram um teste para microcomputadores, cujo estímulo consistia de um mosaico de regiões pequenas que apresentava um alvo em forma da letra "C" cuja cromaticidade se diferenciava da cromaticidade do fundo deste estímulo. O indivíduo testado informava para que lado estava a abertura da letra "C" e, conforme fosse acertando, a cromaticidade do alvo era programada para um valor mais próximo da cromaticidade do fundo, e ao errar a resposta a cromaticidade do alvo era afastada da do fundo. O teste prosseguia até que houvesse um número determinado de reversões entre acertos e erros, considerando-se o limiar de discriminação o valor médio de cromaticidade do alvo nessas reversões. Quanto maior a distância entre essa cromaticidade e a do fundo, pior a capacidade de discriminar cores do sujeito testado.

A introdução de ruídos de luminância e espacial resolviam as desvantagens das telas de computadores (como a geração de bordas nos estímulos): cada uma das regiões, alvo e fundo, possuem seus próprios contornos e variam aleatoriamente em luminância, resolvendo assim os problemas de borda dos estímulos que poderiam funcionar como pistas para o sujeito. Assim, eles desenvolveram um teste de discriminação de

cores altamente sensível e específico para avaliar os sujeitos nas linhas de confusão de cores (protan, deutan ou tritan) e que pode abranger um número maior de direções no espaço de cores (MacAdam, 1942; Wyszecki & Stiles, 1982; Regan et al., 1994). Geralmente utilizam-se vinte direções no espaço de cor que são avaliadas aos pares, escolhidos ao acaso, alternando-se a exibição dos estímulos em uma ou outra direção desse espaço.

Depois da publicação deste trabalho, este teste começou a ser comercializado como *Cambridge Colour Test* (CCT) (pela empresa Cambridge Research Systems, Ltd., Cambridge, UK). Usando o CCT, Ventura e colaboradores (2003c) reproduziram os resultados dos criadores do teste, mostrando que o formato das elipses revela o tipo de deficiência de visão de cores que determinado indivíduo possui e descreveram valores normativos preliminares baseados em dados de sujeitos em São Paulo e em Belém. As elipses 2 ($u'v'$: 0,219; 0,481), 4 ($u'v'$: 0,175; 0,485) e 5 ($u'v'$: 0,278; 0,472) se dispõem horizontalmente, seguindo a direção verde-vermelho do espaço de cor CIE 1976 e representam um conjunto de dados para verificação de perdas do tipo tritan. Sua orientação não coincide com o eixo protan ou deutan, mas ela se situa em uma região intermediária entre esses eixos. Já as elipses 1 ($u'v'$: 0,215; 0,531), 2 e 3 ($u'v'$: 0,225; 0,415) se dispõem verticalmente, estando alinhadas com o eixo azul-amarelo e representam um conjunto de dados para verificação de perdas nos eixos protan ou deutan. Pessoas que apresentam uma perda difusa da visão de cores aumentam essas elipses em todas as direções.

O teste de MR tem sido utilizado em adultos com diversas patologias, como glaucoma (Castelo-Branco et al., 2004; Pacheco-Cutillas, Sahraie, & Edgar, 1999), catarata (Delahunt et al., 2004), parkinsonianos (Regan et al., 1998), sujeitos expostos ao consumo de álcool (Castro et al., 2009), usuários de cloroquina (Ventura et al., 2003c), neuropatia óptica hereditária de Leber (Ventura et al., 2005, 2007a), pacientes com esclerose múltipla (Moura et al., 2008), com a distrofia muscular de Duchenne (Costa et al., 2007), intoxicados por mercúrio (Canto-Pereira et al., 2005; Feitosa-Santana et al., 2008; Rodrigues et al., 2007; Ventura et al., 2005). Também tem sido utilizado em pesquisas em ciência básica, como a avaliação da ausência de somação binocular, olho dominante e efeito da aprendizagem na discriminação de cores (Costa et al., 2006), aparência de cores para dicromatas (Brettel, Viénot, & Mollon, 1997), variações na mistura e discriminação de cores entre tricromatas e deuteranômalos, além de inspirar a criação de sistemas que usam o mesmo tipo de disposição do estímulo em mosaico para o estudo da discriminação do sistema visual humano (Figura 2) (Knoblauch, Vital-Durand, & Barbur, 2001; Rodrigues et al., 2007). De modo geral, esses trabalhos consideram o teste de MR sensível e um ótimo indicador para alterações na visão de cores.

Uma modificação do teste foi produzida para ser utilizada na avaliação de bebês e crianças, o CCT Kids, em que ao invés de apresentar a letra "C" de Landolt, o estímulo cromático é uma região que ocupa uma área quadrada correspondente à abertura do "C". O quadrado colorido aparece nas mesmas posições ocupadas antes pelo "C" e a criança é treinada para indicar sua presença apontando ou cobrindo-o com a mão. No caso de bebês, o quadrado colorido aparece apenas em duas posições – esquerda ou direita – e o experimentador observa a direção do olhar do bebê. Em ambos os casos, a cada acerto a cor aproxima-se da cor do fundo, e a cada erro se afasta, como no teste original. Os resultados mostraram que crianças e bebês discriminam cores de forma semelhante ou igual à dos adultos (Goulart et al., 2008).

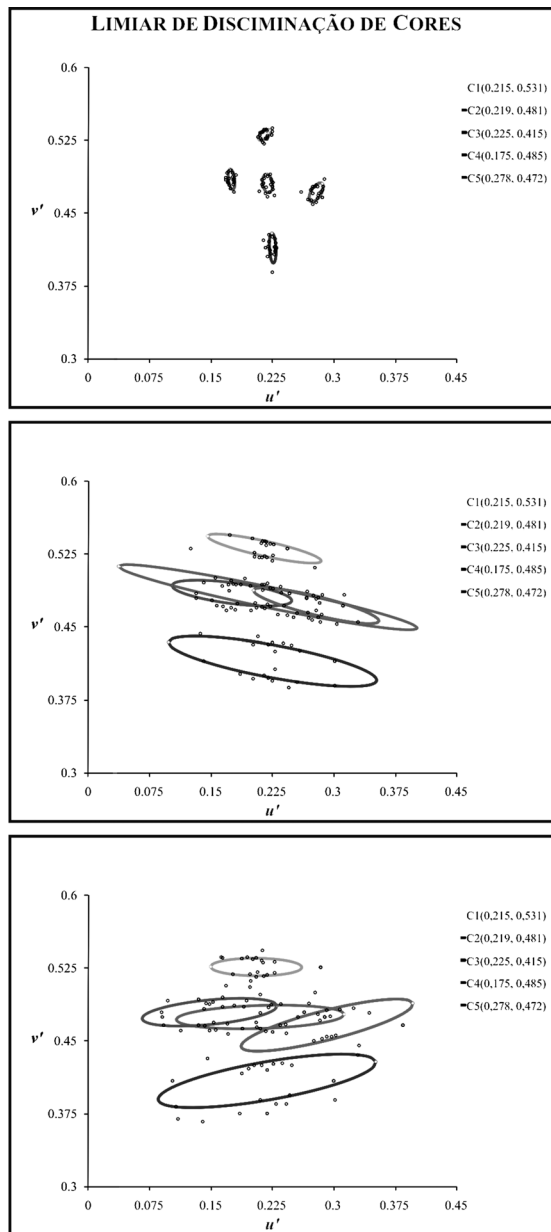


Figura 2. Comparação dos Limiares de Discriminação de Cores pelo teste de MR entre um indivíduo tricromata normal (A) e indivíduos com discromatopsia hereditária do tipo deutan (B) e protan (C). Quanto menor for o diâmetro das elipses, melhor é a discriminação de cores do indivíduo. A orientação das elipses (seguindo as coordenadas do diagrama CIE) revela o tipo de deficiência de visão de cores (B) e (C). C1, C2, C3, C4 e C5 correspondem às coordenadas avaliadas no teste. Os três indivíduos acima são do sexo masculino com idades entre 20 e 22 anos. Dados coletados pelos autores no Laboratório de Neurologia Tropical, UFPA.

3 A identificação de anormalidades na visão de cores pela técnica de anomaloscopia

A anomaloscopia é uma técnica que permite a identificação de anormalias na visão das cores, baseada na reprodução de uma determinada cor com dois conjuntos de luzes diferentes (semelhante ao princípio de equalização de cores descrito na introdução deste artigo). É considerado como um teste de equalização de cores. O teste é aplicado com o auxílio de um equipamento em que o sujeito vê um campo dividido em duas partes, uma das quais é iluminada por uma luz amarela, enquanto a outra é iluminada por uma mistura de luzes monocromáticas vermelha e verde. O sujeito testado deve igualar os dois campos, podendo para isso alterar a razão entre a intensidade das luzes vermelha e verde, bem como reduzir ou aumentar a intensidade da luz amarela.

O anomaloscópio de Nagel é o mais conhecido e foi desenvolvido em 1907 com o objetivo de diferenciar deficiências de cores do tipo deutan de protan, e é considerado o teste-padrão ouro para esta finalidade. Ele se baseia na equação de Rayleigh, que usa uma mistura de luzes espectrais de lítio e tório para mimetizar o espectro do sódio (vermelho + verde = amarelo) e a igualização de luzes é obtida por dois controles: um controle que permite a igualização de matiz e outro que permite a igualização de brilho (Moreland & Kerr, 1979; Rayleigh, 1881). Uma amostra da sua eficiência está na avaliação de pacientes com discromatopsias hereditárias, que, ao realizarem as igualizações, os indivíduos deutan e protan convergem seus pontos para suas respectivas linhas de confusão de cores. Hoje em dia esse anomaloscópio não é mais comercializado, tendo sido substituído principalmente pelos anomaloscópios de Neitz e de Oculus Heidelberg, mais modernos e baseados apenas nas misturas de luzes espectrais [vermelho (670,8 nm) + verde (546 nm) = amarelo (589,3 nm)] (Bruni & Cruz, 2006; Dain, 2004). Esses anomaloscópios permitem uma classificação fidedigna das deficiências congênitas, conseguindo diferenciar indivíduos com tricromatismo anômalo de normais, e dicromatas de tricromatas anômalos, além de identificar tricromatismo anômalo severo (Moreland & Kerr, 1979) e identificar alterações em patologia, por exemplo, na distrofia muscular de Duchenne (Costa et al., 2007).

A equação de Rayleigh se aplica muito bem à avaliação da sensibilidade dos cones para comprimentos de onda longos ou médios, porém não se aplica à avaliação da função dos cones para comprimentos de onda curtos. Com o objetivo de resolver esta questão, J. D. Moreland desenvolveu uma equação, no fim da década de 1970, que permitisse que o anomaloscópio de Nagel (e consequentemente outros anomaloscópios) avaliasse a função do cone para comprimentos de onda curtos, assistin-

do indivíduos que possuem deficiências congênitas ou adquiridas no eixo tritan. Essa equação é semelhante à de Rayleigh, porém com luzes espectrais verdes e azuis, e hoje está presente no anomaloscópio de Oculus Heidelberg [azul (436 nm) + verde (490 nm) = ciano (480 nm) + amarelo (589 nm)] (Moreland & Kerr, 1979). A partir disso foi possível realizar diversas avaliações em pacientes que, por conta de sua patologia, tinham alguma perda de discriminação de cores no eixo tritan, como é o caso de pacientes com glaucoma (Pacheco-Cutillas, Sahraie, & Edgar, 1999).

4 Avaliação da sensibilidade ao contraste espacial de cores (SCEC)

Este teste tem como objetivo determinar a sensibilidade de um sujeito para padrões cromáticos que variam espacialmente, e nesse sentido tem se mostrado como o método quantitativo mais sensível e eficaz para a avaliação desses padrões. Antes de falarmos sobre este teste é necessário ter em mente alguns conceitos que ajudarão entender esta forma de avaliação. Começamos com a definição de luminância, que é uma medida fotométrica da radiação eletromagnética visível. A luminância leva em consideração o efeito do estímulo físico sobre o sistema visual. O contraste de luminância, por sua vez, é definido como a relação entre a luminância de uma área mais clara e a de uma área mais escura próxima (De Valois, 1988; Campbell & Maffei, 1974; Kaplan & Shapley, 1986).

Para estudar sensibilidade ao contraste, o estímulo mais comumente usado é uma rede senoidal (Figura 3). Existem quatro parâmetros que descrevem completamente as propriedades espaciais das redes senoidais: frequência espacial, contraste (amplitude), orientação e fase espacial (Campbell & Robson, 1968). A frequência espacial de uma rede refere-se à variação de luminância no decorrer do espaço e é dada em ciclos por grau de ângulo visual (cpg). A utilização de redes senoidais na pesquisa visual está intimamente ligada com o início dos estudos de sensibilidade ao contraste espacial de luminância, que é a capacidade de um observador em discriminar padrões que variam espacialmente, e este conceito está relacionado com os conceitos de contraste (visto acima) e de frequência espacial – número de vezes que um padrão espacial é repetido por grau de ângulo visual (quanto menor forem as distâncias entre áreas de contrastes diferentes, maior será a frequência espacial) (Campbell & Maffei, 1974; Kaplan & Shapley, 1986).

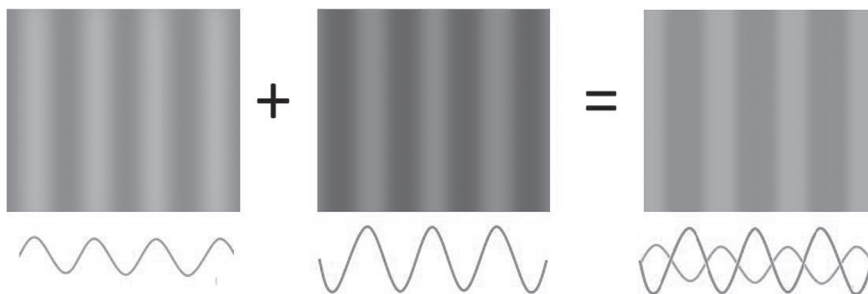


Figura 3. União de redes senoidais monocromáticas. Os estímulos monocromáticos verde e vermelho se somam (as redes senoidais estão em oposição de 180° de fase) formando um único padrão senoidal verde-vermelho.

O início dos trabalhos sobre a sensibilidade ao contraste espacial de cores foi muito difícil, devido ao problema de não haver uma definição adequada de contraste de cor disponível que pudesse ser utilizada para todas as combinações de cores, e que não dependesse de suposições teóricas sobre as interações pós-receptorais de cones, o que dificultava estudos que tentassem fazer uma comparação entre a sensibilidade ao contraste de cor e a de luminância. Foram poucos os pesquisadores que se preocuparam com essa fase inicial dos estudos da sensibilidade ao contraste de cores, seja ele utilizando redes senoidais isoluminantes vermelho-verde (Granger & Heurtley, 1973; Kelly, 1983; Schade, 1958; Van Der Horst & Bouman, 1969) ou azul-amarelo (Van Der Horst & Bouman, 1969). Havia ainda outras dificuldades associadas com essas investigações, como as aberrações cromáticas longitudinal (a distância focal do olho é efetivamente alterada em função do comprimento de onda) e transversal (os raios não estão exclusivamente focados no eixo óptico) do olho que produzem artefatos de luminância nas redes coloridas em frequências espaciais médias e altas (Mullen, 1985). Nesse sentido, o primeiro estudo que corrigiu as aberrações cromáticas foi feito por Kathy T. Mullen (1985).

A construção do estímulo no domínio espacial das redes cromáticas pode ser representada pela superposição de duas redes senoidais cromáticas (com comprimentos de onda diferentes) com uma diferença de fase de 180° (Figura 3). O contraste cromático isoluminante entre duas cores predeterminadas pode ser representado no diagrama da CIE 1931. Dessa maneira, convencionou-se que 100% de contraste é a distância mais longa possível entre as duas coordenadas que representam as cores escolhidas, os contrastes de cores intermediários repousam em uma semirreta formada por esses dois pontos e a ausência de contraste ocorre quando as duas coordenadas são iguais. Porém, o sistema visual deixa de perceber a diferença entre as duas cores bem antes de alcançar a situação de contraste 0%. O contraste limiar cromático pode ser obtido

através do método psicofísico de ajuste e representa a situação em que dois estímulos cromáticos diferentes são perceptualmente idênticos (Boyton, 1979).

Existem duas maneiras para se determinar a SCEC, em comparação com a sensibilidade ao contraste de luminância, que são utilizadas nos trabalhos científicos: 1) através da equalização pela fotometria de piscamento (*flicker*) em uma frequência temporal e espacial (Granger & Heurtley, 1973; Van Der Horst & Bouman, 1969; Ventura et al, 2005c), com a suposição de que essa igualização seja apropriada para todas as outras frequências espaciais utilizadas. Entretanto, as igualizações de brilho vermelho-verde poderiam se alterar com a frequência temporal (Börnstein & Marks, 1972), e tais mudanças dependentes da frequência espacial da equalização de brilho poderiam produzir artefatos nos estudos (Mullen, 1985). 2) avaliar a sensibilidade ao contraste de luminância (através de uma rede senoidal monocromática – vermelho e preto, por exemplo) e avaliar a sensibilidade usando duas redes senoidais monocromáticas em oposição de 180° de fase (verde-vermelho, por exemplo) em diversas proporções de contraste (1º momento: 30% de vermelho e 70% de verde; 2º momento: 50% de vermelho e 50% de verde; 3º momento: 70% de vermelho e 30% verde) e a proporção que apresentar maior sensibilidade em comparação à sensibilidade ao contraste de luminância será definida como a SCEC (Mullen, 1985; Rodrigues et al., 2007).

A SCEC difere da sensibilidade ao contraste de luminância em dois aspectos importantes: a curva de SCEC cai mais rapidamente em frequências espaciais médias e altas e há uma atenuação baixa da sensibilidade para frequências espaciais baixas (a SCEC é maior para frequências espaciais baixas e decai em frequências espaciais a partir de 1,0 cpg), enquanto a sensibilidade ao contraste de luminância possui maior sensibilidade em frequências médias que em frequências baixas ou altas (Granger, 1973; Granger & Heurtley, 1973; Mullen, 1985; Rodrigues et al., 2007; Van Der Horst & Bouman, 1969; Ventura et al., 2005c). Além disso, a SCEC para redes vermelho-verde é maior que para redes azul-amarelo (Mullen, 1985).

A avaliação da SCEC é um método quantitativo extremamente sensível para a detecção de contrastes de cores que variam espacialmente, por isso ele chama atenção para mostrar a patologia quando déficits visuais globais não tenham ainda se manifestado (Figura 4). Testes em pacientes parkinsonianos, em pacientes contaminados por metil mercúrio e em pacientes intoxicados por solventes orgânicos podem detectar uma perda sutil na habilidade em detectar contraste de cores (Côrtes, 2008, Haug et al., 1995; Ventura et al., 2005). O declínio na habilidade em detectar contraste de cor pode ser sugerido como um breve sinal na degeneração macular.

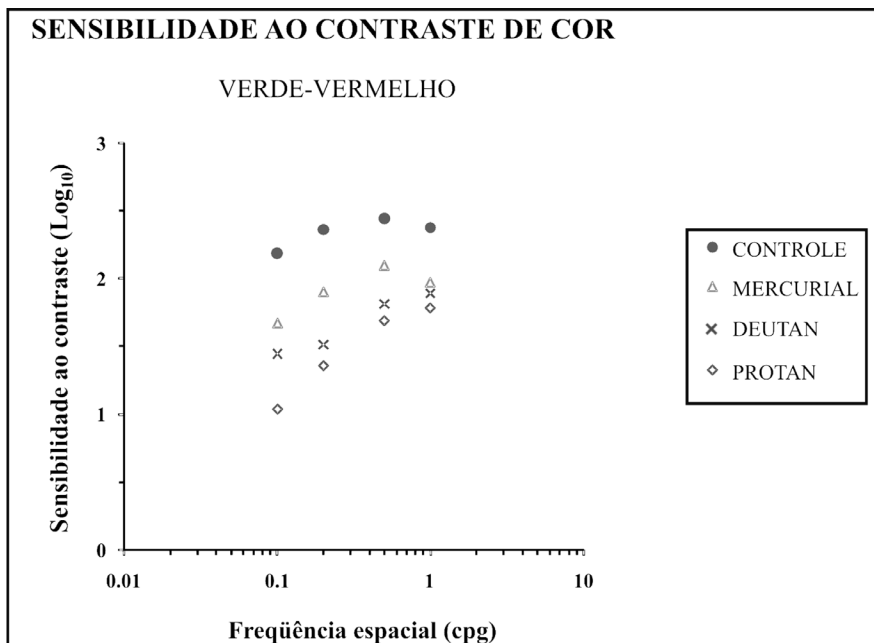


Figura 4. Comparação da SCEC entre um indivíduo normal e com diversas deficiências de discriminação de cores, para frequências espaciais baixas (0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 cpg). A sensibilidade para o indivíduo tricromata normal (círculo) é maior em comparação aos indivíduos: contaminado por metil mercúrio (triângulo), portadores de discromatopsia hereditária do tipo deutan (cruz) e protan (losango). Os quatro sujeitos em questão são do sexo masculino com idades entre 31 e 33 anos. Dados coletados pelos autores no Laboratório de Neurologia Tropical, UFPA.

A SCEC sofre ação direta da senilidade, pois envelhecimento tem um impacto global na função sensorial dos indivíduos idosos, mas isso é principalmente observado em frequências espaciais altas. O declínio na visão pode ocorrer em qualquer momento, ao longo do processo entre estímulo e percepção e as causas potenciais para isto se estendem desde a catarata, glaucoma, perdas na visão central com a degeneração macular (relacionada à idade), até mesmo apenas o próprio envelhecimento dos meios dióptricos do olho (Nusbaum, 1999), e estas diferenças só ficam significantes na comparação entre indivíduos idosos e crianças e/ou adolescentes (Ambramov, 1984; Hardy et al., 2005; Knoblauch, 2001).

Um trabalho proposto, previamente, por Lima (2007, 2010) mostra como ocorre a diminuição da SCEC na vida adulta, em frequências espaciais baixas (abaixo de 1 cpg, em que somos mais sensíveis), utilizando um sistema computadorizado para a exibição dos estímulos. Os achados prévios são bem interessantes, pois mostra que para a SCEC com redes senoidais vermelho-verde, azul-verde (verde amarelado) e azul-vermelho são diferentes entre os três grupos avaliados (16 a 30 anos, 31 a 45

anos e 46 a 60 anos), os quais não possuíam nenhuma patologia, em pelo menos três das quatro frequências espaciais avaliadas (0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 cp/g). Este trabalho pode ser uma prova de que este modo de avaliação é o principal teste quantitativo de avaliação da visão de cores.

Considerações finais

Esta revisão sobre avaliação da visão de cores apresentou testes que utilizam tarefas de ordenamento e de discriminação. Nos métodos de ordenamento, como o FM 100, o conjunto de cores a serem ordenadas ocupa uma linha aproximadamente circular no diagrama de cromaticidade CIE, em torno de um estímulo acromático. Os julgamentos são de matizes, e os estímulos têm a mesma saturação e brilho. São todos supralimiares. Por outro lado, no teste desenvolvido pelo grupo de Mollon, comercialmente conhecido como Cambridge Colour Test, CCT, a tarefa é completamente diferente. O que se busca é a distância limiar entre o estímulo de fundo e o de teste, cuja cromaticidade varia ao longo de um vetor no diagrama de cromaticidade CIE. Esta é uma tarefa de discriminação de pequenas diferenças cromáticas, visando determinar um limiar discriminativo. Enquanto no RRM os estímulos cromáticos variam, na medição da sensibilidade ao contraste espacial de cores, SCEC, o objetivo é obter um limiar de contraste nos sistemas verde-vermelho e azul-amarelo considerando-se pares de estímulos cujas cromaticidades não variam.

Os testes descritos não medem as mesmas funções e seus resultados não são diretamente comparáveis. Os mecanismos neurais dos quais dependem diferem. Ao serem usados para avaliar perdas na visão de cores, o desempenho poderá estar dentro de padrões de normalidade em um teste e fora desses padrões em outro. Estas diferenças poderão esclarecer diferenças no comprometimento dos mecanismos subjacentes às tarefas envolvidas em cada um dos testes. Mas esses mecanismos ainda não estão completamente elucidados. De qualquer forma, é importante considerar que a avaliação adequada de uma função sensorial complexa como a visão de cores se beneficiará pelo uso de baterias de diversos testes.

Methods used in the psychophysical assessment of human color vision

Abstract: Color is a perceptual attribute that allows organisms to identify and to locate environmental patterns of equal brightnesses and constitutes an additional dimension in object identification, in addition to the detection of several other object dimensions in relation with the visual scene. Color therefore serves an important role in animal and human interaction with the environment. By supplying ways to evaluate aspects of human vision, including color vision, visual psychophysics focusses on the quantitative study of the relation between physical events of sensory stimulation and the resulting behavioral response. The objective of this paper is to demonstrate several efficient techniques in the evaluation of the chromatic human vision through adaptive psychophysical methods.

Keywords: Color vision. Human visual psychophysics. Adaptive methods. Color vision Evaluation tests.

Méthodes utilisées dans l'évaluation psychophysique de la vision humaine des couleurs

Résumé: Une couleur est un attribut perceptuel qui permet aux organismes d'identifier et de localiser des normes ambiantes de même luminosité. Les couleurs servant d'identification dimensionnelle des objets, celles-ci sont très importantes dans l'activité quotidienne des animaux, et en particulier les humains. La psychophysique visuelle se concentre sur l'étude quantitative de la relation entre les événements physiques de stimulation sensorielle et la réponse comportementale résultant de cette stimulation pour évaluer certains aspects de la vision humaine, comme la perception chromatique. L'objectif de ce texte est de démontrer les diverses techniques efficaces pour l'évaluation de la vision chromatique humaine en utilisant des méthodes psychophysiques adaptatives.

Mots-clés: Vision couleur. Psychophysique visuelle humaine. Méthodes adaptatives. Techniques évaluation vision couleur.

Métodos usados en la evaluación psicofísica de la visión de colores humana

Resumen: El color es una cualidad perceptual que nos permite identificar y localizar estándares ambientales de mismo brillo y constituye una dimensión adicional en la identificación de los objetos, además de la detección de inúmeras otras cualidades de los objetos en su relación con la escena visual, como luminancia, contraste, forma, movimiento, textura, profundidad. Ahí está su importancia básica en las actividades hechas por los animales y por los seres humanos en su interacción con el ambiente. La psicofísica visual está preocupada del estudio cuantitativo de la relación entre los acontecimientos físicos de estimulación sensorial y la respuesta de comportamiento resultante de esta estimulación, suministrando de esta forma medios de evaluar aspectos de la visión humana, como la visión de colores. Este manuscrito tiene como objetivo demostrar diversas técnicas eficientes en la evaluación de la visión cromática humana a través de métodos psicofísicos adaptativos.

Palabras clave: Visión de colores. Psicofísica visual humana. Métodos adaptativos. Pruebas de evaluación de la visión de colores.

Referências

- Abramov, I., Hainline, L., Turkel, J., Lemerise, E., Smith, H., Gordon, J. et al. (1984). Rocket-ship psychophysics: Assessing visual functioning in young children. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 25, 1307-1315.
- Bi, J., & Ennis, D. M. (1998). Sensory thresholds: Concepts and methods. *Journal of Sensory Studies*, 13, 133-148.
- Birch, J. (1993). *Diagnosis of defective colour vision*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Birch, J. (2001). *Diagnosis of defective colour vision* (2nd ed.). Woburn, MA: Butterworth Heinemann.
- Börnstein, M. H., & Marks, L. E. (1972). Photopic luminosity measured by the method of critical frequency. *Vision Research*, 12, 2023-2033.
- Boyton, R. M. (1979). *Human color vision*. New York: Rinehart & Winston.
- Brainard, D. H., Pelli, D. G., & Robson, T. (2003). Display characterization. In J. Hornay (Ed.), *The encyclopedia of imaging science and technology* (pp. 172-188). New York: Wiley.

- Brettel, H., Viénot, F., & Mollon, J. D. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal Optical Society American A*, 14(10), 2647-2655.
- Bruni, L. F., & Cruz, A. A. V. (2006). Sentido cromático: tipos de defeitos e testes de avaliação clínica. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 5, 766-775.
- Campbell, F. W., & Maffei, L. (1974). Contrast and spatial frequency. *Scientific America*, 231, 106-114.
- Campbell, F. W., & Robson, J. G. (1968). Application of fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 187, 551-566.
- Castelo-Branco, M., Faria, P., Forjaz, V., Kozak, L. R., & Azevedo, H. (2004). Simultaneous comparison of relative damage to chromatic pathways in ocular hypertension and glaucoma: Correlation with clinical measures. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 45, 499-505.
- Castro, A. J. O., Rodrigues, A. R., Côrtes, M. I. T., & Silveira, L. C. L. (2009). Impairment of color spatial vision in chronic alcoholism measured by psychophysical methods. *Psychology & Neuroscience*, 2, 179-187.
- Coren, S. (2003). Sensation and perception. In D. K. Freedhein & I. B. Weiner (Eds.), *Handbook of psychology: History of psychology* (chap. 5, pp. 85-108). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Côrtes, M. I. T. (2008). *Avaliação psicofísica do sistema visual em habitantes de duas comunidades ribeirinhas da amazônia expostas ao mercúrio: comparação com normas estatísticas*. Tese de Doutorado em Ciências, Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Costa, M. F., Ventura, D. F., Perazzolo, F., Murakoshi, M., & Silveira, L. C. L. (2006). Absence of binocular summation, eye dominance, and learning effects in color discrimination. *Visual Neuroscience*, 23, 461-469.
- Costa, M. F., Oliveira, A. G. F., Feitosa-Santana, C., Zatz, M., & Ventura, D. F. (2007). Red-green color vision impairment in duchenne muscular dystrophy. *American Journal of Human Genetics*, 80, 1064-1075.
- Dain, S. J., Cassimaty, V. T., & Psarakis, D. T. (2004). Differences in FM 100-Hue test performance related to iris colour may be due to pupil size as well as presumed amounts of macular pigmentation. *Clinical and Experimental Optometry*, 87, 322-325.

- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1988). *Spatial vision*. New York: Oxford University Press.
- Delahunt, P. B., Hardy, J. L., Okajima, K., & Werner, J. S. (2005). Senescence of spatial chromatic contrast sensitivity. II. Matching under natural viewing conditions. *Journal of the Optical Society of America A*, 22, 60-67.
- Ehrenstein, W. H., & Ehrenstein, A. (1999). Psychophysical methods. In U. Windhorst & H. Johansson (Eds.), *Modern techniques in neuroscience research*. Berlin: Springer.
- Farnsworth, D. (1943). The farnsworth-munsell 100-hue dichotomus test for color vision. *Journal Optical Society American*, 33, 568-576.
- Farnsworth, D. (1957). *The farnsworth-munsell 100-hue test for the examination of color discrimination (Manual)*. Baltimore: Munsell Color, MacBeth, a division of Kollmorgen Corporation.
- Feitosa-Santana, C., Ventura, D. F., Barboni, M. T. S., Oiwa, N. N., Paramei, G. V., Simões, A. L. A. C. et al. (2008). Irreversible color vision losses in patients with chronic mercury vapor intoxication. *Visual Neuroscience*, 25, 487-491.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1967). *The feynman lectures on physics mainly mechanics, radiations and heat*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Goulart, P. R. K., Ventura, D. F., Bandeira, M. L., Tsubota, D., Oiwa, N. N., & Costa, M. F. F. (2008). A computer-controlled color vision test for children based on the Cambridge Colour Test. *Visual Neuroscience*, 25, 445-450.
- Granger, E. M., & Heurtley, J. C. (1973). Visual chromaticity-modulation transfer function. *Journal of the Optical Society of America*, 63, 1173-1174.
- Granger, E. M. (1973). *Specification of color image quality*. Doctoral dissertation, University of Rochester, Rochester, New York.
- Hardy, J. L., Delahunt, P. B., Okajima, K., & Werner, J. S. (2005). Senescence of spatial chromatic contrast sensitivity. I. Detection under conditions controlling for optical factors. *Journal of the Optical Society of America A*, 22, 49-59.
- Kaiser, P. K., & Boynton, R. M. (1996). *Human color vision*. Washington, DC: Optical Society of America.
- Kaplan, E., & Shapley, R. M. (1986). The primate retina contains two types of ganglion cells, with high and low contrast sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 83, 2755-2757.

- Kelly, D. H. (1983). Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds. *Journal of the Optical Society of America*, 73, 742-750.
- Kinney, P. R., & Sahraie, A. (2002). New farnsworth-munsell 100 hue test norms of normal observers for each year of age 5-22 and for age decades 30-70. *British Journal of Ophthalmology*, 86, 1408-1411.
- Knoblauch, K., Saunders, F., Kusuda, M., Hynes, R., Podgor, M., Higgins, K. E. et al. (1987). Age and illuminance effects in the farnsworth-munsell 100-hue test. *Applied Optics*, 26(8), 1441-1448.
- Knoblauch, K., Vital-Durand, F., & Barbur, J. L. (2001). Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision Research*, 41, 23-36.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1279-1292.
- Levine, M. E. (2000). *Fundamentals of sensation and perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Lima, M. G. (2007). *Determinação de dados normativos etários em testes de avaliação da sensibilidade ao contraste espacial cromático*. Trabalho de Conclusão do Curso de Biomedicina, Faculdade de Biomedicina Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Lima, M. G. (2010). *Avaliação da sensibilidade ao contraste cromático espacial em humanos*. Dissertação de Mestrado em Neurociências, Programa de Pós-graduação em Neurociências e Biologia Celular, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará. Belém, PA.
- Macadam, D. L. (1942). Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 32, 247-27.
- Mollon, J. D., & Reffin, J. P. (1989). A computer-controlled colour vision test that combines the principles of Chibret and of Stilling. Proceedings of the Physiological Society. *Journal of Physiology (London)*, 414, 5.
- Moreland, J. D., & Kerr, J. (1979). Optimisation of a rayleigh-type equation for the detection of tritanomaly. *Vision Research*, 19, 1369-1375.
- Moura, A. L. A., Ventura, D. F., Teixeira, R. A. A., Oiwa, N. N., Costa, M. F., Feitosa-Santana, C. et al. (2008). Chromatic discrimination losses in multiple sclerosis patients with and without optic neuritis using the Cambridge Colour Test. *Visual Neuroscience*, 25, 463-468.

- Mullen, K. T. (1985). The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue yellow chromatic gratings. *Journal Physiology*, 359, 381-400.
- Nusbaum, N. (1999). Aging and sensory senescence. *Southern Medical Journal*, 92, 267-275.
- Pacheco-Cutillas, M., Sahraie, A., & Edgar, D. F. (1999). Acquired colour vision defects in glaucoma – their detection and clinical significance. *British Journal of Ophthalmology*, 83, 1396-1402.
- Rayleigh, L. (1881). Experiments on colour. *Nature*, 25, 64-66.
- Regan, B. C., Reffin, J. P., & Mollon, J. D. (1994). Luminance noise and the rapid determination of discrimination ellipses on colour deficiency. *Vision Research*, 34, 1279-1299.
- Regan, B. C., Freudlander, N., Kolle, R., Mollon, J. D., & Paulus, W. (1998). Colour discrimination thresholds in Parkinson's disease: Results obtained with a rapid computer-controlled colour vision test. *Vision Research*, 38, 3427-3431.
- Rodrigues, A. R., Botelho de Souza, C. R., Braga, A. M., Rodrigues, P. S. S., Silveira, A. T., Damin, E. T. B. et al. (2007). Mercury toxicity in the Amazon: Contrast sensitivity and color discrimination of subjects exposed to mercury. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 40, 415-424.
- Rodrigues, A. R. (2003). *Desenvolvimento de aplicativos de avaliação psicofísica visual em estações de trabalho IBM RISC 6000*. Dissertação de Mestrado em Ciências, Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Siberstein, L., & Macadam, D. L. (1945). The distribution of colour matchings around a color center. *Journal of Optical Society of America*, 35, 32.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive psychophysical procedures. *Vision Research*, 35, 2503-2522.
- Van der Horst, G. J. C., & Bouman, M. A. (1969). Spatiotemporal chromaticity discrimination. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 1482-1488.
- Ventura, D. F., Simões, A. L. A. C., Do Canto Pereira, L. H. M., Tomaz, S., Lago, M., Costa, M. T. V. et al. (2005c). Colour vision and contrast sensitivity losses of mercury contaminated industry workers in Brazil. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 19, 523-529.

- Ventura, D. F., Silveira, L. C. L., Nishi, M., Costa, M. F., Gualtieri, M., Santos, R. M. A. et al. (2003). Color vision loss in patients treated with chloroquine. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 66,9-15.
- Ventura, D. F., Gualtieri, M., Oliveira, A. G. F., Costa, M. F., Quiros, P., Salomão, S. R. et al. (2007). Male prevalence for color vision defects in Leber's hereditary optic neuropathy asymptomatic carriers of the 11778/ND4 mutation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 48(5), 2362-2370.
- Wright, W. D. (1941). The sensitivity of the eye to small colour differences. *Procedures of Physical Society (London)*, 53.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*. New York : John Wiley & Sons.

Monica Gomes Lima, Doutoranda em Neurociências, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará. Endereço para correspondência: Av. Generalíssimo Deodoro, 92, Umarizal. CEP: 66055-240, Belém, Pará. Endereço eletrônico: monica.lima@ufpa.br

Bruno Duarte Gomes, Docente da Faculdade de Biotecnologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará. Endereço para correspondência: Av. Generalíssimo Deodoro, 92, Umarizal. CEP: 66055-240, Belém, Pará. Endereço eletrônico: brunodgomes@ufpa.br

Dora Fix Ventura, Docente do Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo. Endereço para correspondência: Av. Professor Mello Moraes, 1721, Cidade Universitária. CEP: 00508-030, São Paulo, SP. Endereço eletrônico: dventura@usp.br

Luiz Carlos de Lima Silveira, Docente do Núcleo de Medicina Tropical e do Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará. Endereço para correspondência: Av. Generalíssimo Deodoro, 92, Umarizal. CEP: 66055-240, Belém, Pará. Endereço eletrônico: luiz@ufpa.br

Recebido: 21/10/2010

Aceito: 29/11/2010