

Psicologia em Pesquisa

<https://periodicos.ufjf.br/index.php/psicologiaempesquisa>

Estatística das cores em obras de arte e a hipótese da naturalidade

Statistics of colors in artworks and the hypothesis of naturalness

**Estadísticas de los colores en las obras de arte y la hipótesis de la
naturalidad**

Carlo Martins Gaddi¹ & Marcelo Fernandes da Costa²

¹ Universidade de São Paulo. *E-mail:* carlogaddi@usp.br *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-2389-7386>

² Universidade de São Paulo. *E-mail:* costamf@usp.br *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3944-8457>

Informações do Artigo:

Carlo Martins Gaddi

carlogaddi@usp.br

Recebido em: 27/04/2022

Aceito em: 15/11/2022

RESUMO

Avanços matemáticos permitiram análises estatísticas das características colorimétricas de cenas visuais complexas, incluindo fotografias e pinturas. Resultados indicam que os artistas utilizam composições similares com a dos ambientes naturais. Estudos quantitativos de preferência estética para diferentes composições colorimétricas parecem estar de acordo com a hipótese da codificação eficiente, que supõe uma relação entre preferência e naturalidade. Esta revisão fornece subsídios sobre as teorias da visão de cores, metodologias psicofísicas e métodos recentes de medida de cor, como as medidas hiperespectrais, para futuros estudos que busquem analisar relações entre preferências e composições cromáticas.

PALAVRAS-CHAVE:

Visão de cor; Estatística das cores; Preferência estética; Naturalidade; Artes visuais.

ABSTRACT

Mathematical advances allowed statistical analyzes of the colorimetric characteristics of complex visual scenes, including photographs and paintings. Results indicate that artists use compositions similar to natural environments. Quantitative studies of aesthetic preference for different colorimetric compositions seem to be in line with the efficient coding hypothesis, which assumes a relationship between preference and naturalness. This review provides subsidies on color vision theories, psychophysical methodologies, and recent color measurement methods, such as hyperspectral measurements, for future studies that seek to analyze relationships between preferences and chromatic compositions.

KEYWORDS:

Color vision; Color statistics; Aesthetic preference; Naturalness; Visual arts.

RESUMEN

Avances matemáticos permitieron análisis estadísticos de las características colorimétricas de escenas visuales complejas, incluidas fotografías y pinturas. Los resultados indican que los artistas utilizan composiciones similares a los entornos naturales. Estudios cuantitativos de preferencia estética por diferentes composiciones colorimétricas parecen estar en línea con la hipótesis de la codificación eficiente, que asume una relación entre preferencia y naturalidad. Esta revisión proporciona subsidios sobre las teorías de la visión del color, las metodologías psicofísicas y los métodos recientes de medición del color, como las mediciones hiperespectrales, para futuros estudios que busquen analizar las relaciones entre las preferencias y las composiciones cromáticas.

PALABRAS CLAVE:

Visión del color; Estadísticas de los colores; Preferencia estética; Naturalidad; Artes visuales.

A psicologia sensorial busca entender como o cérebro representa a informação do mundo exterior, tornando necessários estudos sobre a maneira através da qual os neurônios sensoriais codificam a informação visual para gerar uma percepção consciente. A principal hipótese que norteia esses estudos veio do renomado cientista da visão Horace Barlow (1921-2020), que propôs um modelo teórico de codificação neuronal no qual os sistemas sensoriais devam estar adaptados em escala de tempo evolutiva para processar mais eficientemente os estímulos que

aparecem com maior frequência em ambientes naturais. Esse modelo teórico ficou conhecido como hipótese da codificação eficiente. Fred Attneave (1919-1991), um importante psicólogo da percepção visual, já havia proposto que os neurônios sensoriais devem estar adaptados às propriedades dos sinais as quais são expostos com maior frequência. Sua hipótese era sustentada pela Teoria da Informação, que forneceu as bases matemáticas para analisar sistemas complexos de comunicação, definindo conceitos como: sinal, ruído, canal e redundância (Simoncelli & Olshausen, 2001).

No que diz respeito ao sistema visual, os receptores da retina são capazes de capturar uma grande quantidade de informação, porém como ela deve ser convergida para o nervo óptico, uma série de reduções são realizadas. O cérebro usa uma estratégia eficiente para transmitir apenas as informações mais necessárias e da forma mais rápida possível para gerar a percepção consciente. Tecnologias modernas vêm explorando essas redundâncias da informação visual para transmitir e armazenar arquivos digitais de filmes e imagens (Artusi et al., 2019), ao passo que tópicos fundamentais da Teoria da Informação e da fisiologia da visão têm sido usados para auxiliar no desenvolvimento de algoritmos de compactação cada vez mais eficientes.

Embora o modelo de Barlow tenha mais de 50 anos, até o final da década de 1990 havia pouca informação das características que compunham as cenas naturais, dada complexidade de quantificar seus elementos. Os estudos das ciências da visão eram caracterizados pelo uso de estímulos simples como barras, gradientes, pontos e manchas. Esses estímulos não só eram fáceis de serem controlados e parametrizados, como eram capazes de elicitar respostas neuronais bastante fortes. Porém, não havia garantias de que essas respostas pudessem ser generalizadas para cenas complexas, com as quais o sistema visual lida no mundo real. Investigações mais sofisticadas a respeito das propriedades visuais que compõem as cenas naturais somente puderam ser realizadas com os avanços computacionais das últimas duas décadas (Geisler, 2008).

Tabela 1

Resumo dos Estudos e Principais Achados sobre a Distribuição Colorimétrica de Pinturas e Fotografias.

Distribuição Colorimétrica			
Delineamento	Resultados Observados	Pontos Principais	Calibração Colorimétrica
50 fotografias de cenas naturais (rurais e urbanas) (Linhares et al., 2008)	Número de cores discriminável: 26×10^3 Razão dos eixos a* b*: 0,51 Ângulo de orientação: 92°	Média de cor muito menor do que valor teórico de 2.3 milhões. O sistema visual lida, na maior parte do tempo, com um número bastante reduzido de cores.	Uso de câmera com lente que simulasse a visão humana e sensor hiperspectral.
44 pinturas abstratas e figurativas dos museus Centro de Arte Moderna, Lisboa-PT e Museu Nogueira da Silva, Braga-PT. (Montagner et al., 2016)	Área do <i>gamut</i> : $3,4 \times 10^3$ Razão dos eixos a* b*: 0,58 Ângulo de orientação: 66°	Similaridade no uso das cores com a distribuição de cenas naturais, embora a área do <i>gamut</i> seja consideravelmente menor.	Todas as obras de arte foram digitalizadas através de equipamento hiperspectral.
199 imagens de pinturas clássicas entre séc. XV e XVII. (Romero et al., 2018)	Área do <i>gamut</i> : $2,9 \times 10^3$ Razão dos eixos a* b*: 0,45 Ângulo de orientação: 99°	Os parâmetros colorimétricos variaram muito pouco entre todas as pinturas.	Ausência de uso de qualquer calibração colorimétrica.
228 graffiti urbanos de São Paulo, SP. (Feitosa-Santana et al., 2020)	Área do <i>gamut</i> : $6,2 \times 10^3$ Razão dos eixos a* b*: 0,57 Angulo de orientação: 64°	Área do <i>gamut</i> consideravelmente maior do que em pinturas tradicionais. O estilo artístico permite o uso de pigmentos muito mais puros do que os das pinturas tradicionais. O espalhamento da curva para o ângulo do <i>gamut</i> foi maior do que em pinturas tradicionais, indicando maior liberdade no uso das cores.	Macbeth ColorChecker® de 24 amostras e um espectro-colorímetro.

Diversas relações entre contraste e luminância já foram identificadas e modeladas de acordo com a hipótese da codificação eficiente, permitindo inclusive prever nível de desconforto visual para uma grande variedade de imagens, incluindo obras de arte (Ogawa & Motoyoshi, 2020).

Verificou-se que determinadas frequências espaciais chegam a causar dores de cabeça, e até mesmo ataque epilético em pessoas mais susceptíveis, indicando a existência de uma clara associação entre alguns desvios específicos da natureza e desconforto visual (Penacchio & Wilkins, 2015).

Embora a cor seja uma parte importante da experiência visual, há poucos estudos sobre as relações entre a distribuição colorimétrica de cenas naturais e a hipótese da codificação eficiente. Os testes realizados por Penacchio et al. (2021) mostraram que o nível de desconforto visual parece estar associado com versões exageradas das diferenças de cromaticidade, começando a surgir quando os mecanismos sensoriais são super estimulados por classes específicas de estímulos raramente encontrados na natureza.

A possibilidade de analisar quantitativamente elementos visuais complexos fez com que houvesse uma demanda crescente de estudos sobre as regularidades estatísticas de diversas obras de arte, buscando relações com a codificação neuronal do sistema visual (Kim et al., 2014; Mallon et al., 2014). A principal hipótese é a de que os artistas devem mimetizar certas regularidades das cenas naturais, fazendo com que determinados elementos de suas composições causem respostas mais eficientes pelos neurônios sensoriais (Graham & Redies, 2010; Redies, 2008).

Esse artigo busca revisar estudos recentes a respeito do uso das cores em pinturas de diferentes estilos e períodos artísticos, bem como as possíveis relações entre a distribuição colorimétrica e o grau de preferência.

Tabela 2

Resumo dos Testes Psicofísicos e Principais Achados a Respeito da Preferência pela Distribuição Colorimétrica de Pinturas e Fotografias.

Preferência pela Distribuição Colorimétrica

Delineamento	Resultados Observados	Pontos Principais	Calibração Colorimétrica
10 pinturas abstratas e figurativas. 50 participantes. Escolher a composição colorimétrica preferida ajustando livremente a rotação do gamut de cada pintura, individualmente. (Linhares et al., 2017)	Média de 3,3° para pinturas abstratas e 12° para pinturas realistas. 0° representa o ângulo original.	Tendência sistemática em escolher o ângulo que se encontra mais próximo da composição original.	Pinturas previamente digitalizadas com equipamento hiperspectral. Teste realizado em ambiente controlado de laboratório e uso de monitor com calibração colorimétrica específica.
4 pinturas, apresentadas na forma original e com distorção espacial. 15 participantes. Escolher a condição colorimétrica preferida através de um procedimento de escolha forçada entre 2 opções. 11 condições colorimétricas para cada pintura. (Albers et al., 2020)	As curvas de preferência tiveram seu pico próximo ao ângulo original. O efeito foi mais fraco nas versões com distorção espacial, porém observados.	A cor parece produzir um papel independente no julgamento de preferência: o balanço na distribuição colorimétrica parece levar a um julgamento mais positivo ou negativo.	Pinturas previamente digitalizadas com equipamento hiperspectral. Teste realizado em ambiente controlado de laboratório e uso de monitor com calibração colorimétrica específica.
4 fotografias de cenas naturais, apresentadas na forma original e com distorção espacial. 12 participantes. Duas tarefas: (i) escolher a condição preferida; (ii) escolher a mais natural. Procedimento de escolha forçada entre 2 opções. 11 condições colorimétricas. (Nascimento et al., 2021)	Sem distorção espacial: Preferência: -1° Naturalidade: -6° Com distorção espacial: Preferência: 0° Naturalidade: 7° Grau de sobreposição entre preferência e naturalidade: Sem distorção espacial: 77% Com distorção espacial: 68%	A preferência produziu um maior espalhamento na distribuição gaussiana comparado a curva obtida para naturalidade. Isso representa uma maior variabilidade na preferência estética, em contrapartida ao julgar qual composição colorimétrica é mais natural.	Pinturas previamente digitalizadas com equipamento hiperspectral. Teste realizado em ambiente controlado de laboratório e uso de monitor com calibração colorimétrica específica.

A primeira seção revisa as bases dos estudos da Colorimetria que possibilitaram a criação de modelos de aparência de cor cada vez mais sofisticados (Fairchild, 2013), e que auxiliaram os estudos sistemáticos da estatística das cores. A segunda seção foi dividida em duas subseções: (i) distribuição colorimétrica, buscando similaridades e diferenças de pinturas tradicionais e contemporâneas com os ambientes naturais (Feitosa-Santana et al., 2020; Montagner et al., 2016; Romero et al., 2018); (ii) preferência pela distribuição colorimétrica, que investiga a

relação entre a preferência das diferentes organizações cromáticas de pinturas e fotografias de cenas naturais, utilizando-se de testes psicofísicos (Albers et al., 2020; Nascimento et al., 2017; Nascimento et al., 2021).

Espera-se que essa revisão sirva para encorajar estudos formais em artes visuais através da utilização de metodologias científicas com base na fisiologia da visão humana, na realização de manipulações digitais adequadas e no uso de medidas psicofísicas.

Espaço de Cor Uniforme

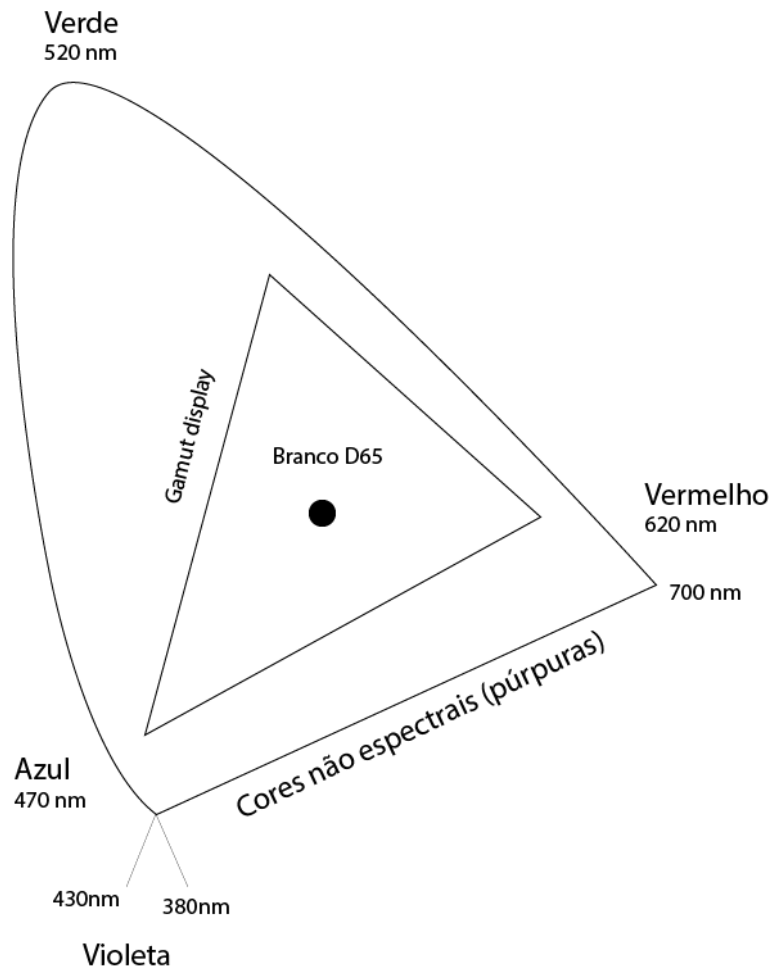
Os estudos da Colorimetria, a primeira descrição matemática abrangente da cor, foram definidos há quase 100 anos atrás, graças ao estabelecimento da *Commission Internationale de l'Eclairage* – CIE (Fairchild, 2019), em 1931, a qual possibilitou o controle preciso da cor em muitas aplicações industriais, tais como: fabricação têxtil, impressão, fotografia, cinema e iluminação.

A construção do espaço de cor CIE de 1931 (Figura 1) se deu com auxílio de medidas psicofísicas de equiparação cromática. Essa técnica consiste em apresentar ao observador um campo circular bipartido com um dos lados iluminado por uma luz monocromática e o outro iluminado simultaneamente por três luzes diferentes sobrepostas, as quais correspondem às cores primárias – vermelho, verde e azul. A tarefa consiste em ajustar a intensidade de cada uma das três primárias até que as duas metades do campo circular sejam percebidas como iguais. Adota-se a trinca de valores escolhidas para corresponder à luz monocromática em questão. Também conhecidas como cores puras ou espectrais, as coordenadas das cores monocromáticas são representadas no lócus espectral, que ocupa mais de dois terços da borda do diagrama. Correspondem ao comprimento de onda entre 380nm e 780nm, e equivalem a faixa de absorção espectral das células da retina. As áreas púrpuras são representadas em linha reta e sem valores, pois representam as cores não-espectrais. O branco está localizado em sua porção mais central, e sua determinação resulta da combinação dos três comprimentos de onda

adotados como primárias³.

Figura 1

Diagrama de Cromaticidade CIE (1931).



Nota. As áreas dentro do diagrama representam a aparência aproximada da mistura aditiva das três luzes monocromáticas adotadas como primárias. A região central representa a mistura de luzes que são percebidas como brancas. A borda do diagrama é representada pelo lócus espectral de 380nm a 700nm. A linha reta representa as cores não espectrais. A área dentro do triângulo indica o *gamut* de cor que a maioria dos monitores conseguem reproduzir.

O sistema CIE (1931) representa muito bem os estágios iniciais do processamento da visão de cor na retina, na qual a luz é absorvida e traduzida em sinal neuronal através da excitação de

³ Uma revisão sobre a origem dos espaços de cor pode ser conferida em Feitosa-Santana et al. (2006).

três classes de cones com diferentes faixas de absorção espectrais. Isto providencia um ponto de partida para criação de métricas da cor, prevendo como dois ou mais estímulos monocromáticos misturados serão percebidos.

A tricromacia diz que três classes de cones são suficientes para explicar os dados de todas as combinações possíveis de cores. O primeiro estágio da visão de cor ocorre na retina, e é dependente da absorção de três receptores, portanto tricromático. No entanto, a tricromacia não fornece uma descrição completa da aparência relativa das cores em diferentes ambientes de iluminações. Atributos como brilho, saturação e matiz caracterizam-se como puramente psicológicos e são influenciados não apenas pelas qualidades físicas da luz (intensidade luminosa, pureza colorimétrica e comprimento de onda), mas também por fatores diversos, como os demais estímulos presentes no campo visual e a comparação relativa entre eles. Isso ocorre porque esta informação tricromática é organizada no segundo estágio da visão de cor, ainda na retina, em dois canais de oponências cromáticas.

Como o sinal da retina tem que ser convergido para o nervo óptico, é realizado um processamento para reduzir a informação, a fim de eliminar redundâncias. Esse estágio ocorre nas células ganglionares da retina, que codificam a informação tricromática dos cones em sinais de oponência. A evidência comportamental para o Processamento de Cor Oponente foi notada pela primeira vez por Ewald Hering (1834-1918), que observou que alguns pares de cores – a saber, vermelho e verde, e amarelo e azul – não podem ser percebidos ao mesmo tempo. Esses pares de cores foram chamados de “cores oponentes”, uma vez que são mutuamente excludentes (Wuerger & Xiao, 2016). As cores para as quais o mecanismo amarelo-azul não emite nenhuma resposta são chamadas de “vermelho único” ou “verde único”, e dependem do lado do ponto neutro no qual elas se encontram. Já as cores que inibem os mecanismos oponentes vermelho-verde são chamadas de “amarelo único” ou “azul único”. Esse sistema possibilita uma transmissão mais eficiente do sinal e reduz possíveis ruídos e redundâncias.

Essa limitação fisiológica impede que seja percebido cores verde-avermelhadas ou azul-amareladas.

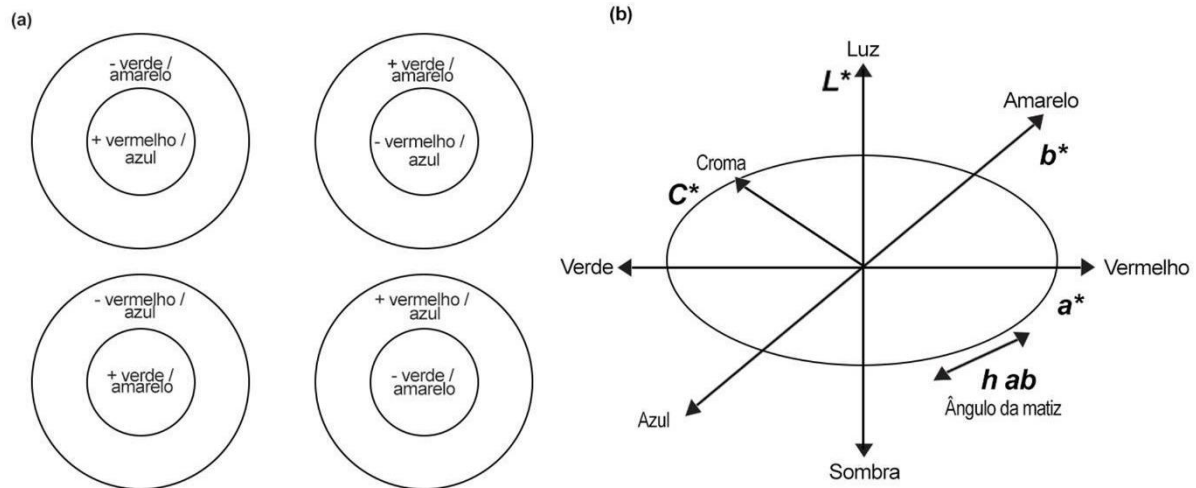
A percepção da cor vai muito além do comprimento de onda absorvido pelos cones da retina representados no diagrama CIE (1931). A tomar como exemplo a constância de cor, a manutenção da percepção de uma dada cor apesar das mudanças das condições de iluminação variarem. É por esse motivo que uma folha verde permanecerá verde mesmo ao meio-dia, com uma luz branca, ou ao pôr do sol, momento em que há predominância de luz vermelha. A cor é uma das informações que mais ajudam no reconhecimento de objetos, e uma vez que os níveis de intensidade e comprimento de onda das fontes luminosas variam, o sistema visual evoluiu para compensar eficientemente tais mudanças. Como resultado, a cor percebida do objeto permanece aproximadamente constante. Quando o iluminante é alterado, ocorre uma variação na cor branca devido a mudanças na temperatura de cor, podendo se tornar mais amarelada ou mais azulada (Witzel & Gegenfurtner 2018). A constância de cor permite que, independente dessa variação, as diferenças relativas entre as várias cores permaneçam as mesmas, tornando o verde percebido como verde, sob luz amarelada ou azulada.

As informações de cor também estão envolvidas em muitas tarefas visuais diferentes, desde a segmentação da cena e julgamento de materiais de superfície até a expressão de um rosto. Os processos subjacentes nas diferentes análises visuais envolvem caminhos neurais e áreas corticais distintos, e a forma como a cor contribui para essas análises pode variar bastante.

Considerando a dificuldade de representar, em um único modelo, todos os aspectos perceptuais da cor, tricromáticos e oponentes, de forma a garantirem uma representação próxima da percepção, muitas tentativas foram feitas para criar um espaço de cor uniforme, em que as distâncias no modelo correspondessem linearmente às mudanças na percepção cromática. Os primeiros passos para a construção de um modelo uniforme semelhante ao processamento das células ganglionares da retina (figura 2-a) tiveram início em 1976, quando o CIE introduziu o

espaço de cor CIELAB (figura 2-b), que permitiu correlações numéricas de iluminação, matiz e pureza colorimétrica. Os valores do CIELAB podem ser usados para descrever as diferenças percebidas entre os estímulos em um único conjunto de condições de visualização (Fairchild, 2013).

Figura 2



(a) Campo receptivo das células ganglionares da retina; (b) Modelo de aparência de cor CIELAB.

Nota. (a) Campo receptivo das células ganglionares da retina que respondem, respectivamente, para: centro excitatório vermelho e periferia inibitória verde; centro inibitório vermelho e periferia excitatória verde; centro excitatório verde e periferia inibitória vermelha; e centro inibitório verde e periferia excitatória vermelha. O mesmo ocorre separadamente para o canal azul-amarelo. Essas células possuem uma relação de organização antagônica de centro-periferia, de modo que a cor do centro produz uma resposta excitatória, ao passo que sua respectiva cor oponente na periferia é inibida. (b) Representação cilíndrica do espaço de cor CIELAB. O eixo a^* corresponde ao canal de oposição verde-vermelho, e o eixo b^* ao canal amarelo-azul. O eixo L^* representa luminância.

O modelo de aparência de cor CIELAB consegue representar de maneira satisfatória os aspectos de mistura de cor esperados pela teoria tricromática da mesma forma que organiza estas

informações considerando os canais de oponência, de forma a se assemelhar com as características percebidas da cor.

O modelo CIELAB permite extrair três parâmetros puramente colorimétricos: (i) a área do plano cartesiano a^*b^* , que corresponde à saturação percebida; (ii) o ângulo de orientação do *gamut* no plano cartesiano a^*b^* , que diz respeito à percepção da matiz; e (iii) a razão entre o menor e o maior eixo do *gamut* no plano cartesiano a^*b^* , que captura o balanço entre as cores. Uma variação vermelho-verde é expressa em ângulos próximos a 180° ou 0° , e variações no amarelo-azul nos ângulos próximos a 90° ou 270° . Alinhado ao uso de sensores espectrais que permitem digitalizar uma imagem mantendo o registro do espectro eletromagnético refletido, é possível encontrar o valor correspondente de cada pixel para o espaço de cor CIE (1931) e converter para CIELAB com alta precisão⁴.

Embora esse modelo tenha recebido atualizações constantes ao longo das décadas, ainda não é capaz de capturar todos os aspectos da percepção de cor, e nem mesmo em ambiente controlado consegue prever todas as variáveis, especialmente para percepção de brilho e saturação (Witzel & Gegenfurtner, 2018). A maioria das métricas e espaços de cores são baseadas em medições médias em muitos indivíduos para definir um “observador padrão”. Pelo exposto, é óbvio que este padrão não descreve necessariamente a visão de cores de qualquer observador real, podendo aproximar-se mal das características de muitos deles. Por essa razão, avaliações precisas da visão de cores geralmente exigem a medição empírica da sensibilidade espectral do observador. Ainda assim, essa tecnologia já permitiu estimar o número de cores distinguíveis em cenas naturais (Linhares et al., 2008) utilizando uma câmera hiperespectral modificada com uma lente que simulasse ao máximo a visão humana. O valor encontrado foi de 690 mil cores, e mesmo quando a luminosidade (L^*) que resulta em percepção de brilho foi ignorada, apenas

⁴ Maiores detalhes sobre os métodos de aquisição de imagens hiperespectrais e computação necessária para conversão dos espaços de cor podem ser conferidos em Foster & Amano (2019).

26 mil cores puderam ser realmente discriminadas. O número estimado de cores percebidas pela visão humana era teórico, baseado na suposição de que todas as cores fossem igualmente presentes e de que esse valor era de aproximadamente 2.3 milhões (Linhares et al., 2008). Os dados mostraram que a refletância espectral natural é consideravelmente menor que as possibilidades de cores que o sistema visual pode distinguir. Na maior parte do tempo, o sistema visual lida com uma quantidade bem mais limitada de informação colorimétrica.

O uso de imagens espectrais tem sido aplicado ao campo da conservação e da história da arte desde o início da década de 1990, sendo uma ferramenta eficiente para fornecer informações espaciais e espectrais de pinturas e objetos arqueológicos (Linhares et al., 2020). Com os novos modelos de dispositivos de captura espectral, compactos e com interface amigável, mas mantendo a mesma qualidade de resolução e captura hiperespectral dos equipamentos convencionais, novas aplicações estão surgindo, ampliando seu uso para diferentes contextos (Picollo et al., 2020), e possibilitando análises colorimétricas com alta precisão, sendo de grande interesse para os estudos das artes (Montagner et al., 2017).

Distribuição Colorimétrica em Pinturas

Montagner et al. (2016) investigaram a distribuição colorimétrica em 44 pinturas abstratas e figurativas. Vinte e quatro dessas obras são de autoria do artista modernista português Amadeo de Souza-Cardoso, produzidas entre 1911 e 1917, e pertencem ao acervo do Centro de Arte Moderna da Fundação Calouste Gulbenkian (CAM-FCG), localizado em Lisboa. As demais são oriundas do acervo do Museu Nogueira da Silva, situado em Braga, e caracterizam épocas, artistas e estilos diferentes. Cinquenta fotografias de cenas naturais também foram analisadas. As pinturas e fotografias foram digitalizadas através de um sistema hiperespectral. O mesmo procedimento de Linhares et al. (2008) foi adotado para obter as medidas colorimétricas em CIELAB. As máximas gaussianas para pinturas; área do *gamut*: 3.4×10^3 ; razão dos eixos: 0,58; ângulo de orientação: 66° . Para cenas naturais, a razão dos eixos foi de 0,51 e o ângulo

de 92° (Montagner et al., 2016).

Um estudo de Romero et al., 2018 utilizou uma amostra de 199 pinturas digitalizadas e disponíveis na internet, dos pintores Titan (*circa* 1490-1576), El Greco (1541-1614), Rubens (1577-1640), Velásquez (1599-1660), Rembrandt (1606-1669) e Vermeer (1632-1675), para uma análise de parâmetros colorimétricos, porém sem calibração nem precisão da digitalização hiperespectral. Os resultados encontrados foram: área do *gamut*: $6,2 \times 10^3$; razão dos eixos a^* b^* : 0,57; ângulo de orientação: 64°. Os achados de Rometo et al. (2018) parecem generalizar os resultados encontrados em Montagner et al. (2016).

Foi feita uma análise colorimétrica para 228 *graffiti* urbanos da cidade de São Paulo (Feitosa-Santana et al., 2020). Em todas as fotografias utilizou-se um *ColorChecker* de 24 amostras e um espectro-colorímetro para implementar as calibrações necessárias e representar o *gamut* em CIELAB com alta precisão. A máxima gaussiana dos *graffiti*; área 6.2×10^3 ; razão dos eixos 0,57; ângulo do *gamut* 64°. A área foi consideravelmente maior em relação às pinturas tradicionais. Para explicar esses resultados, os pesquisadores coletaram amostras de pigmentos utilizados por artistas urbanos para uma análise espectral e as compararam com pigmentos tradicionais de pintura a óleo (Feitosa-Santana et al., 2020). Os pigmentos modernos se mostraram muito mais puros, possibilitando estilos artísticos de maior riqueza cromática. A razão e o ângulo foram muito próximos das pinturas tradicionais, apresentando maior variabilidade no eixo amarelo-azul. Isto evidencia que, apesar dos diferentes estilos artísticos, são usadas as mesmas cores e nas mesmas proporções. Entretanto, o espalhamento da curva gaussiana dos ângulos dos *graffiti* foi maior em relação às pinturas, indicando grande liberdade no uso das cores pelos artistas urbanos.

Preferência pela Distribuição Colorimétrica

Nascimento et al. (2017) selecionaram 10 pinturas analisadas previamente por Montagner et al. (2016) para um teste de preferência para diferentes composições colorimétricas. Entre essas

obras, seis eram abstratas e quatro possuíam elementos realistas. Cinquenta participantes com visão de cor normal e não familiarizados com as pinturas selecionadas realizaram uma tarefa que constava em alterar suas composições colorimétricas, por meio da rotação do gamut no eixo $a^* b^*$ até encontrar a composição colorimétrica que mais lhe agradasse. A rotação do *gamut* altera a composição colorimétrica sem mudar sua relação ou o número das cores, e ainda preserva saturação e brilho. As médias dos valores absolutos correspondentes foi de $3,3^\circ$ para pinturas abstratas e 12° para pinturas realistas, onde 0° representa o ângulo original da pintura (Nascimento et al., 2017). Os resultados mostraram uma tendência sistemática em escolher o ângulo que se encontrava mais próximo da composição original, sendo menos preferidos à medida que se afastavam do ângulo original.

A fim de medir a preferência colorimétrica das pinturas excluindo os elementos que oferecessem pistas de contornos e elementos figurativos, Albers et al. (2020) mediram as preferências por mudanças colorimétricas em pinturas por meio da fragmentação e embaralhamento de seus elementos. Foram utilizadas duas foram pinturas abstratas de Amadeo de Souza Cardoso, previamente analisadas por Montagner et al. (2016). As outras duas foram criadas de forma a mimetizar o estilo do artista das duas primeiras. Todas as obras foram digitalizadas usando equipamento hiperespectral. Cada pintura digitalizada teve seu ângulo de rotação do *gamut* modificado em passos de 20° , de -100° a $+100^\circ$, totalizando 11 condições para cada pintura, que foram usadas no teste (i). No teste (ii) foram aplicadas distorção espacial nas pinturas, preservando apenas o conteúdo cromático. No teste (iii) as pinturas sofreram distorção espacial e colorimétrica (Albers et al., 2020).

Quinze participantes com visão de cor normal realizaram uma tarefa utilizando o paradigma de escolha forçada (*2 alternative forced choice*) das diferentes condições colorimétricas para uma mesma pintura, na qual cada participante deveria indicar, entre as duas condições apresentadas, qual seria preferida. Esse procedimento foi realizado para todos os possíveis pares, o que requer

pelo menos $n (n - 1)$ repetições. Em cada rodada, duas condições eram sequencialmente apresentadas durante 1000ms, com um intervalo inter-estímulo de 500ms entre elas. A resposta deveria ser dada após a exibição. As comparações envolviam sempre duas versões da mesma pintura, na mesma condição espacial (original, distorção espacial e distorção espacial e cromática), mas com configurações colorimétricas diferentes (Albers et al., 2020). A curva de preferência do teste (i) teve a máxima distribuição próxima da composição original. Para as pinturas que sofreram distorção espacial (ii), essa tendência foi mais fraca, porém observada. Não houve um pico de preferência para o teste (iii). Ao menos nesse conjunto de pinturas, ficou evidente que a composição colorimétrica exerce um papel independente na preferência.

Para relacionar preferência com naturalidade, realizou-se um teste (Nascimento et al., 2021) que utilizava quatro fotografias de cenas naturais – duas cenas rurais e duas urbanas. Estas fotografias foram previamente digitalizadas por câmera hiperespectral (Linhares et al., 2008), assim como apresentadas em sua forma original e com manipulação espacial nas mesmas 11 condições colorimétricas usadas anteriormente. Doze participantes deveriam escolher a condição preferida através do protocolo de escolha forçada. O objetivo desse teste consistiu obter curvas individuais para naturalidade e preferência em função do ângulo de orientação do *gamut* (Nascimento et al., 2021). Para as versões originais (sem distorção espacial), o valor médio da máxima gaussiana encontrada foi de 6° para naturalidade e -1° para preferência. Nas versões com distorção espacial, o valor foi de 7° para naturalidade e 0° para preferência. O grau de sobreposição entre preferência e naturalidade para as fotografias sem distorção espacial foi de 77%, e para as versões com distorção espacial, 68% (Nascimento et al., 2021). Na média, para todas as condições, a preferência produziu um maior espalhamento na distribuição gaussiana, flutuando bem mais do que a curva para naturalidade.

Discussão

O uso das cores em pinturas de diferentes épocas e estilos (Feitosa-Santana et al., 2020;

Montagner et al., 2016; Romero et al., 2018) parece indicar que os artistas usam uma variedade limitada das combinações colorimétricas possíveis. Ainda que de forma inconsciente, os artistas acabam por mimetizar diversas regularidades geralmente encontradas na natureza, mesmo com acesso a um número muito maior de pigmentos, e em estilos artísticos nos quais se supõe maior liberdade em suas composições.

Os testes psicofísicos de Nascimento et al. (2017)) mostraram o quanto de mudança do ângulo de orientação do *gamut* é necessária para se perceber a mínima diferença colorimétrica em composições complexas. Albers et al. (2020) e Nascimento et al. (2021) realizaram testes psicofísicos aplicando distorções espaciais nos estímulos utilizados, de modo a isolar todo conteúdo semântico, preservando apenas a cor. O protocolo experimental de escolha forçada usado nos dois experimentos é o mais eficiente e com menor viés para estudos de preferência visual (Palmer et al., 2013). Embora o número de participantes seja baixo, os resultados indicaram que composições colorimétricas mais naturalistas também são as mais preferidas. A cor parece produzir um papel independente no julgamento de preferência, e apesar de o efeito ter sido muito mais fraco nas versões que sofreram distorção espacial, é possível dizer que certas configurações movem a imagem em direção a uma experiência estética mais positiva ou negativa.

Cor é um mecanismo biológico sinalizador que exemplifica muito bem a demanda do cérebro pela busca de conhecimento através das contínuas mudanças no ambiente. À medida que a reflectância dos objetos varia, o cérebro busca uma proporção que permita não ser enganado por qualquer mudança do comprimento de onda refletido do objeto. A manutenção perceptual das cores em diferentes níveis de iluminação é ainda mais verdadeira e significativa quando aplicadas aos *graffiti* e artes em geral. Os *graffiti* estão expostos em ambientes externos, que estão sujeitos a grandes mudanças de luminosidade ao longo do dia. Durante a noite, essas mesmas artes estão expostas à diferentes tipos de iluminação artificial. A propriedade

psicológica da constância de cor permite a apreciação das obras de arte sem grandes distorções produzidas pelos diferentes iluminantes.

Investigações realizadas a respeito da preferência estética em pinturas sob diferentes iluminantes (Nascimento et al., 2020) mostraram que os japoneses tendem a preferir um espectro mais azulado em relação aos portugueses. Esses resultados parecem ser justificados por aspectos geográficos, pela diferença de espectro luminoso e da incidência solar. Como exemplo, pinturas impressionistas francesas, que eram realizadas à luz solar do dia europeu, são mais bem reproduzidas se expostas em iluminação que simule ao máximo o espectro luminoso daquela determinada região. Isso pode ser um aspecto importante para iluminação de exposições em museus, com potencial quantitativo de estudo.

Os estudos quantitativos a respeito da distribuição colorimétrica das cenas naturais permitiram a realização de testes de discriminação de objetos em daltônicos. Os resultados mostraram que, em condições de iluminação natural, os dicromatas tiveram uma performance tão boa quanto os tricromatas normais. Além disso, revelaram uma maior discriminação (por volta de 10%) usando apenas diferença de brilho. (Pastilha et al., 2019). As conclusões oferecidas por esses estudos contribuem para o entendimento do porquê a dicromacia é a forma mais comum de visão nos mamíferos.

Assim como o número de cores perceptíveis na natureza é muito menor do que a teoria supôs, os dicromatas também parecem não ter grandes problemas com a discriminação de objetos. Ambos os valores teóricos eram calculados com base na suposição de que todas as cores fossem igualmente presentes, o que não é uma realidade. Em nossa revisão literária não encontramos estudos quantitativos que explorassem a preferência estética em dicromatas. No entanto, estudos do gênero já são possíveis, e poderiam auxiliar o entendimento da representação subjetiva da cor para esse grupo.

Por integrar conhecimento de diferentes áreas, como psicologia sensorial, neurociências da

visão, artes, estética, este trabalho de revisão fornece subsídios sobre as teorias da visão de cores, metodologias psicofísicas e métodos de medida da cor e da luz recentes e inovadores, como as medidas hiperspectrais, para futuros estudos que busquem analisar relações entre preferências e composições cromáticas.

Financiamento

Esta pesquisa teve apoio CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) concedida ao primeiro autor.

Referências

- Albers, A. M., Gegenfurtner, K. R., & Nascimento, S. M. (2020). An independent contribution of colour to the aesthetic preference for paintings. *Vision Research*, *177*, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.08.005>
- Artusi, A., Mantiuk, R. K., Richter, T., Hanhart, P., Korshunov, P., Agostinelli, M., Ten, A., & Ebrahimi, T. (2019). Overview and evaluation of the JPEG XT HDR image compression standard. *Journal of Real-Time Image Processing*, *16*(2), 413–428. <https://doi.org/10.1007/s11554-015-0547-x>
- Fairchild, M. D. (2013). *Color appearance models* (3rd ed.). Wiley.
- Fairchild, M. D. (2019). CIE 015:2018 Colorimetry, 4th Edition. The International Commission on Illumination, Vienna, Austria, 2019. 111 pp. €162.00 Members of CIE country bodies pay €54.00; hardcover or e-book. *Color Research & Application*, *44*(4), 674–675. <https://doi.org/10.1002/col.22387>
- Feitosa-Santana, C., Gaddi, C. M., Gomes, A. E., & Nascimento, S. M. C. (2020). Art through the colors of graffiti: From the perspective of the chromatic structure. *Sensors*, *20*(9), 2531. <https://doi.org/10.3390/s20092531>
- Feitosa-Santana, C., Oiwa, N. N., Costa, M. F. D., Tiedemann, K. B., Silveira, L. C. D. L., & Ventura, D. F. (2006). Espaço de cores. *Psicologia USP*, *17*(4), 35–62. <https://doi.org/10.1590/s0103-65642006000400003>
- Foster, D. H., & Amano, K. (2019). Hyperspectral imaging in color vision research: Tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*, *36*(4), 606. <https://doi.org/10.1364/josaa.36.000606>
- Geisler, W. S. (2008). Visual perception and the statistical properties of natural scenes. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 167–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085632>

Graham, D. J., & Redies, C. (2010). Statistical regularities in art: Relations with visual coding and perception. *Vision Research*, 50(16), 1503–1509.

<https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.05.002>

Kim, D., Son, S. W., & Jeong, H. (2014). Large-scale quantitative analysis of painting arts. *Scientific Reports*, 4(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/srep07370>

Linhares, J. M. M., Pinto, P. D., & Nascimento, S. M. C. (2008). The number of discernible colors in natural scenes. *Journal of the Optical Society of America A*, 25(12), 2918–2924.

<https://doi.org/10.1364/josaa.25.002918>

Linhares, J., Carneira, L., Bailão, A., Pastilha, R., & Nascimento, S. (2020). Chromatic changes in paintings of Adriano de Sousa Lopes after the removal of aged varnish. *Conservar Património*, 34, 50–64. <https://doi.org/10.14568/cp2018064>

Mallon, B., Redies, C., & Hayn-Leichsenring, G. U. (2014). Beauty in abstract paintings: Perceptual contrast and statistical properties. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(161), 1–14.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00161>

Montagner, C., Linhares, J. M. M., Vilarigues, M., & Nascimento, S. M. C. (2016). Statistics of colors in paintings and natural scenes. *Journal of the Optical Society of America A*, 33(3),

A170. <https://doi.org/10.1364/josaa.33.00a170>

Montagner, C., Linhares, J. M., Vilarigues, M., Melo, M. J., & Nascimento, S. M. (2017). Supporting history of art with colorimetry: The paintings of Amadeo de Souza-Cardoso. *Color Research & Application*, 43(3), 304–310.

<https://doi.org/10.1002/col.22189>

Nascimento, S. M. C., Herdeiro, C. F. M., Gomes, A. E., Linhares, J. M. M., Kondo, T., & Nakauchi, S. (2020). The best CCT for appreciation of paintings under daylight illuminants is different for occidental and oriental viewers. *LEUKOS*, 17(3), 310–318.

<https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1761828>

Nascimento, S. M., Linhares, J. M., Montagner, C., João, C. A., Amano, K., Alfaro, C., &

- Bailão, A. (2017). The colors of paintings and viewers' preferences. *Vision Research*, *130*, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.11.006>
- Nascimento, S. M., Marit Albers, A., & Gegenfurtner, K. R. (2021). Naturalness and aesthetics of colors – Preference for color compositions perceived as natural. *Vision Research*, *185*, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.03.010>
- Ogawa, N., & Motoyoshi, I. (2020). Differential effects of orientation and spatial-frequency spectra on visual unpleasantness. *Frontiers in Psychology*, *11*, e1342. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01342>
- Palmer, S. E., Schloss, K. B., & Sammartino, J. (2013). Visual aesthetics and human preference. *Annual Review of Psychology*, *64*(1), 77–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100504>
- Pastilha, R. C., Linhares, J. M., Gomes, A. E., Santos, J. L., de Almeida, V. M., & Nascimento, S. M. (2019). The colors of natural scenes benefit dichromats. *Vision Research*, *158*, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2019.02.003>
- Penacchio, O., & Wilkins, A. J. (2015). Visual discomfort and the spatial distribution of Fourier energy. *Vision Research*, *108*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.12.013>
- Penacchio, O., Haigh, S. M., Ross, X., Ferguson, R., & Wilkins, A. J. (2021). Visual discomfort and variations in chromaticity in art and nature. *Frontiers in Neuroscience*, *15*, e711064. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.711064>
- Piccolo, M., Cucci, C., Casini, A., & Stefani, L. (2020). Hyper-spectral imaging technique in the cultural heritage field: New possible scenarios. *Sensors*, *20*(10), 2843. <https://doi.org/10.3390/s20102843>
- Redies, C. (2008). A universal model of esthetic perception based on the sensory coding of natural stimuli. *Spatial Vision*, *21*(1–2), 97–117. <https://doi.org/10.1163/156856807782753886>
- Romero, J., Gómez-Robledo, L., & Nieves, J. (2018). Computational color analysis of paintings

for different artists of the XVI and XVII centuries. *Color Research & Application*, 43(3), 296–303. <https://doi.org/10.1002/col.22211>

Simoncelli, E. P., & Olshausen, B. A. (2001). Natural image statistics and neural representation. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 1193–1216. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.1193>

Witzel, C., & Gegenfurtner, K. R. (2018). Color perception: Objects, constancy, and categories. *Annual Review of Vision Science*, 4(1), 475–499. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-091517-034231>

Wuerger, S., & Xiao, K. (2016). Color vision, opponent theory. In M. R. Luo. (Ed.) *Encyclopedia of color science and technology* (pp. 413-418). New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8071-7_92