

ENPq 1.03.04.00-2

Tricromacia e a Reprodução de Cores em Computador

Sílvia Delgado Olabarriaga

Instituto de Informática

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Caixa Postal 15064, 91501-970 Porto Alegre, RS - Brasil

E-mail: silvia@inf.ufrgs.br

Abstract

This paper presents the main physical and physiological facts of Trichromacy, which is the basis of color reproduction. We present the physics of light with emphasis on the spectral characterization and its implications for color perception. The main human visual system structures are presented, with emphasis on cones responses, which are responsible for the tricromatic nature of color vision. The additive and subtractive principles of color reproduction and their application to graphics peripherals are discussed. We emphasize aspects which make clear that RGB and CMY color systems are inadequate for reliable color representation.

Resumo

Este trabalho apresenta os principais aspectos físicos e fisiológicos da Tricromacia, que é a base da reprodução de cores. Apresenta-se a base Física da luz, com ênfase na caracterização espectral e suas implicações para a percepção de cor. As principais estruturas do sistema visual humano são apresentadas, com ênfase no funcionamento dos cones, responsáveis pela natureza tricromática da visão de cores. Os princípios aditivo e subtrativo para reprodução de cores são discutidos e sua utilização em alguns equipamentos gráficos comentada. Enfatiza-se aspectos referentes à representação de cor que atestam a inadequação do uso dos sistemas RGB e CMY.

Key-Words: color representation, color reproduction, color perception.

Palavras-Chave: representação de cor, reprodução de cor, percepção de cor.

1 Introdução

A recente popularização de periféricos gráficos coloridos trouxe consigo a possibilidade de virtualmente qualquer pessoa manipular e controlar a produção de cores com auxílio de computadores. Para que o resultado possa ser previsível, no entanto, é necessário conhecer os

mecanismos empregados nos equipamentos, bem como suas limitações. É necessário também que os programas armazenem a informação de cor de forma adequada, que permita sua reprodução nos diferentes tipos de equipamentos.

Como *cor é uma sensação*, o que se faz ao *reproduzir cores* é manipular os estímulos luminosos de forma controlada a fim de causar determinada sensação no observador. Assim, a reprodução de cores em qualquer meio envolve aspectos físicos e/ou químicos, no que se refere ao controle do estímulo luminoso, e aspectos fisiológicos, no que se refere à sensação que tal estímulo causa no observador.

Para representar cores em computador, portanto, é necessário armazenar informações suficientes para que o controle do estímulo, produzido por meio de periféricos gráficos, possa ser exercido com precisão a fim de causar determinada sensação de cor. Não basta tratar a cor como um ponto no espaço, simplificação muitas vezes adotada em programas e livros introdutórios. É também preciso conhecer profundamente o significado dos eixos do espaço de cor utilizado, algo que não pode ser dissociado de considerações perceptuais.

A motivação deste trabalho foi a constatação de que o tema *cor* não tem sido abordado com esta ênfase em textos na área de Computação Gráfica. É usual encontrar extensas discussões sobre os diferentes espaços de cor e conversões entre eles, tais como [BOU95], [FOL90] e [GOM;VEL94], porém poucos explicam claramente o significado de cada um em termos perceptuais, e quais os riscos de adotá-los. [HAL89] e [THO;SMI90] são exemplos de textos que efetivamente usam este enfoque.

Este trabalho contém apenas uma introdução à tricromacia, que é a base para todas as técnicas modernas de reprodução de cores. Apresenta-se, de forma integrada, seus fundamentos, que normalmente encontram-se dispersos em publicações de diversas áreas como Fisiologia, Física e Psicologia. O objetivo é sensibilizar o leitor para a complexidade inerente à representação e reprodução de cores, alertando para a necessidade de uso de sistemas mais completos, que contemplem também aspectos perceptuais.

2 Tricromacia

Qualquer livro de Física básica apresenta como verdade o fato de que se pode produzir qualquer cor por meio da adição de três componentes primárias de luz (vermelha, verde e azul) [HEW87]. Em geral são sugeridos experimentos simples, como projetar três círculos de luz numa superfície branca, utilizando filtros das cores primárias para controlar a cor da luz em cada projetor, e sobrepor parcialmente estes círculos, observando as cores que são assim produzidas.

Quando apresentados a este fato, no entanto, os estudantes em geral questionam o conceito de *cor primária*. Por experiência com manipulação de tintas, sabe-se que a mistura de azul e amarelo resulta em verde. Como então se explica o fato de que verde é uma primária de luz? E que amarelo é feito com mistura de luz verde e vermelha? E ainda que branco é produzido com uma mistura de verde, azul e vermelho em iguais proporções?

Estas questões são pertinentes, e têm respostas simples: tratam-se, de fato, de dois princípios distintos, um para *adição*, e outro para *subtração* de luz. Ambos permitem a produção de virtualmente qualquer cor a partir de apenas três cores, porém essas primárias são, de fato,

diferentes nos dois casos: vermelho, verde e azul, para adição; ciano, amarelo e magenta, para subtração.

Este fenômeno é denominado *tricromacia* : a partir de *três* cores pode-se produzir todas as demais [HUN87]. Como cor é uma *sensação* produzida por um estímulo luminoso, o que se faz com estas três primárias é, na realidade, produzir estímulos capazes de causar sensações de cores de forma controlada. Este controle pode ser feito através de dois mecanismos básicos: aditivo (mistura de luz) e subtrativo (eliminação seletiva de componentes da luz).

2.1 História da Tricromacia

Ao longo do tempo, a tricromacia vem sendo explicada por princípios diferentes, que evoluíram até à comprovação de que é um fato fisiológico, cuja base é a existência de três classes de sensores na retina do olho humano [MOL89].

Em 1757, Lomosoenov (poeta e cientista russo) usou o termo pela primeira vez, mas o princípio da tricromacia já era conhecido no início do século XVIII.

Em 1719, Jakob Le Blon introduziu em Londres a técnica de impressão de gravuras usando três cores. Publicou o livro "Il Coloritto", onde explica como as cores podem ser obtidas a partir de combinações de Vermelho, Azul e Amarelo, fazendo ainda a distinção entre a mistura de pigmentos e de luz. Naquela época, acreditava-se que a tricromacia era um fato físico, e não decorrente da fisiologia humana.

Numa abordagem intermediária, o inglês G. Palmer sugeriu, em 1777, que existem três *tipos* de raios de luz, e, correspondentemente, três tipos de células sensoras na retina.

Foi somente em 1801 que Thomas Young sugeriu que a tricromacia é um fato exclusivamente fisiológico, aceito atualmente devido à comprovação da existência de três classes de sensores na retina humana.

Em 1861 James Maxwell realizou a primeira fotografia tricromática, lançando assim as bases de todos os processos modernos de reprodução de cores [HUN87]. Sua intenção era mostrar a natureza da visão colorida, e para isto realizou o seguinte experimento: fotografou a mesma cena usando filtros de cor vermelha, verde e azul. Com o resultado, produziu três diapositivos (em preto-e-branco), que foram projetados simultaneamente sobre o mesmo local, utilizando, na frente do projetor, filtros de cores correspondentes às usadas para obtenção das imagens. A imagem formada pela projeção reproduzia as cores da cena original, mostrando assim que a informação completa de cor pode ser obtida e posteriormente reproduzida a partir de três registros individuais correspondentes às cores primárias dos filtros.

3 Base Física: a Luz

Luz é energia emitida pela vibração das cargas elétricas dos átomos [HEW87]. Esta energia trafega no espaço como onda que é, em parte, elétrica, e, em parte, magnética - onda eletromagnética. A luz, assim como ondas de rádio, microondas e raios-X, compõem o espectro eletromagnético.

O sistema visual humano é sensível a estreita faixa deste espectro, entre comprimentos de onda de aproximadamente 400 e 700 nanômetros, chamada de *luz*. Se um prisma for usado para

separar esta energia em suas componentes espectrais, um ser humano com visão normal será capaz de identificar, na seguinte ordem, as *cores espectrais*: violeta ($\approx 400\text{nm}$), azul, ciano, verde, amarelo, laranja, vermelho ($\approx 700\text{nm}$).

É importante notar, no entanto, que a cor propriamente dita não está contida na luz, e sim trata-se de uma sensação decorrente do estímulo luminoso. Isaac Newton, em 1704, no livro *Optiks*, foi o primeiro a expressar a distinção entre a sensação e o estímulo: "the rays, to speak properly, are not coloured. In them there is nothing else than a certain Power and Distribution to stir up a Sensation of this or that Colour" [LEV94].

Assim sendo, a sensação de cor na realidade depende das componentes espectrais da luz, expressas no gráfico de *distribuição espectral de energia* (ver figura 1).

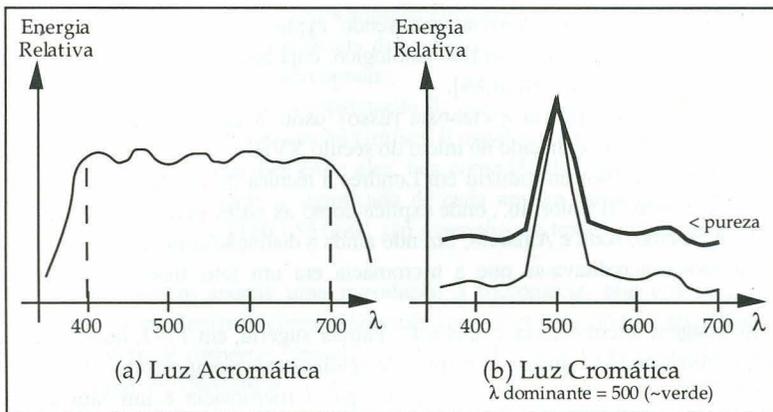


Figura 1 - Distribuição Espectral de Energia Acromática e Cromática

Este tipo de gráfico é usado para caracterizar a luz, apresentando a proporção de energia em cada frequência ou comprimento de onda ($\lambda = \frac{c}{f}$).

Quando a luz apresenta proporções semelhantes em todas as frequências, é dita *acromática*, ou branca [figura 1(a)]. Quando existe concentração de energia em alguma região do espectro, a luz é dita *cromática* [figura 1(b)] ou ainda *monocromática*, se a energia estiver concentrada em faixa estreita do espectro. A luz do sol é considerada acromática.

Pela distribuição espectral da energia é possível determinar dois importantes atributos da luz cromática: *matiz* e *pureza*.

Matiz é o que se chama coloquialmente de "cor"; é o que distingue o verde do vermelho e do amarelo. Este atributo, determinado pela faixa do espectro em que se concentra a energia, é denominado de *comprimento de onda dominante* [figura 1(b)].

Pureza é a distância da luz em relação à energia acromática. No gráfico de distribuição espectral este atributo é identificado pela presença de energia em outras regiões fora da faixa dominante. Quanto maior a proporção de energia presente em outras faixas do espectro, menos pura será a luz. A figura 1(b) mostra distribuições espectrais de energia com diferentes graus de pureza. A luz menos pura seria mais esbranquiçada do que a outra, embora do mesmo matiz.

As características espectrais da energia que atinge o olho influem na sensação de cor, mas não a determinam diretamente. Isto é provado pelo fato de que energias luminosas com componentes espectrais diferentes podem causar a mesma sensação de cor. Neste caso, são chamadas de *metâmeras*, ou *pares metaméricos*, e constituem o princípio básico da tricromacia. A explicação para este fenômeno é encontrada na fisiologia do sistema visual humano, apresentada a seguir.

4 Base Fisiológica: o Sistema Visual Humano

Na retina, que é a parede posterior do olho, estão localizadas células foto-sensíveis: os cones e os bastonetes. Os bastonetes reagem principalmente à intensidade luminosa, enquanto os cones respondem diferentemente ao longo do espectro. Assim, os cones são responsáveis pelo início do processo de percepção de cor, que vai efetivamente acontecer apenas no córtex visual. Ao abordarmos o funcionamento deste complexo sistema, iremos omitir detalhes que não contribuam diretamente para a compreensão da tricromacia. Mais informações sobre o sistema visual humano podem ser obtida em [COR70] e [ROC90].

4.1 Sensibilidade dos Cones

Existem três tipos de cones, cada um com sensibilidade acentuada em determinada região do espectro. Na realidade, os três tipos de cones são sensíveis à energia em todo o espectro, porém respondem com maior intensidade em determinadas faixas de comprimentos de onda: curtos (C ou azuis), médios (M ou verdes) e longos (L ou vermelhos).

A sensibilidade dos cones é caracterizada pela *curva de resposta espectral*, que indica a intensidade da resposta do cone para cada componente espectral do estímulo luminoso (ver figura 2).

A intensidade do sinal gerado por um cone é resultado da integração das respostas nas diferentes faixas espectrais, sendo impossível identificar posteriormente qual a natureza do estímulo que provocou a resposta. Por este motivo, um cone isolado é dito *cego para cores*. A figura 2 mostra diferentes situações em que um cone hipotético respondeu da mesma forma para estímulos luminosos com caracterização espectral diferente. Nas legendas, R simboliza a resposta total do cone, que resulta da soma das respostas em todas as faixas espectrais.

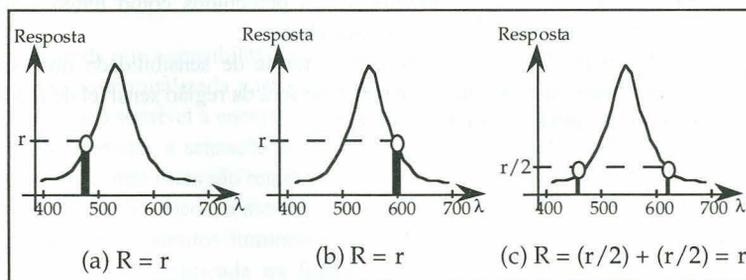


Figura 2 - Resposta Espectral de um Cone Hipotético

Vistos unicamente por aquele cone, os estímulos apresentados na figura 2 seriam considerados metâmeros, pois provocariam a mesma resposta do aparelho sensorial. W.A H. Rushton descreveu este comportamento dos cones pelo *Princípio da Univariância*: apesar do estímulo variar em duas dimensões (comprimento de onda e intensidade), a resposta varia em apenas uma [MOL89].

Fica claro assim que a sensação de cor azul, por exemplo, não decorre unicamente do sinal gerado pelos cones sensíveis a comprimentos de onda curtos. O mesmo acontece com todas as demais cores: é necessário comparar as respostas obtidas pelos três tipos de cones para determinar a cor propriamente dita.

4.2 Curvas de Resposta

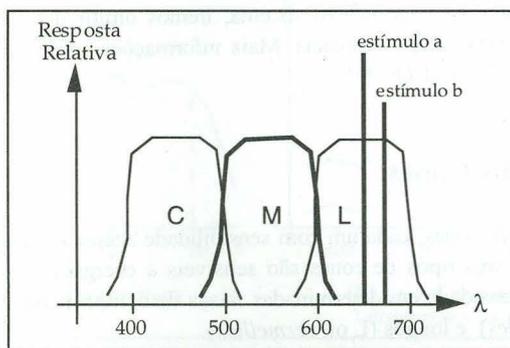


Figura 3 - Curvas de Sensibilidade Disjuntas e Abrangentes

As curvas de resposta espectral dos diferentes tipos de cones têm zonas de sensibilidade acentuada em diferentes regiões do espectro. Analisemos agora qual deve ser a distribuição destas zonas ao longo do espectro para que o maior número possível de cores possa ser identificado [POY94].

Suponha as curvas hipotéticas da figura 3. Embora cubram todo o espectro, estes cones hipotéticos não permitiriam a diferenciação dos dois estímulos apresentados, pois os cones do tipo L responderiam da mesma forma. Estes estímulos seriam percebidos como tendo a mesma cor, limitando significativamente o número total de cores percebidas.

Uma solução para o problema seria estreitar as faixas de sensibilidade dos cones, como ilustrado na figura 4. Neste caso, um estímulo que estivesse fora da região sensível de todos os cones seria percebido como preto, como é o caso do estímulo b.

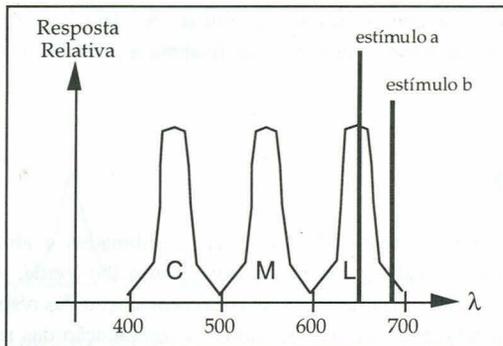


Figura 4 - Curvas de Sensibilidade Disjuntas e Estreitas

Esta linha de raciocínio deixa claro o motivo pelo qual as curvas são na realidade sobrepostas (figura 5). Esta sobreposição é necessária para garantir a detecção e diferenciação de estímulos em todas as regiões do espectro visível, e necessariamente implica em que os sinais gerados pelos cones sejam comparados e analisados num momento posterior para a efetiva identificação da cor.

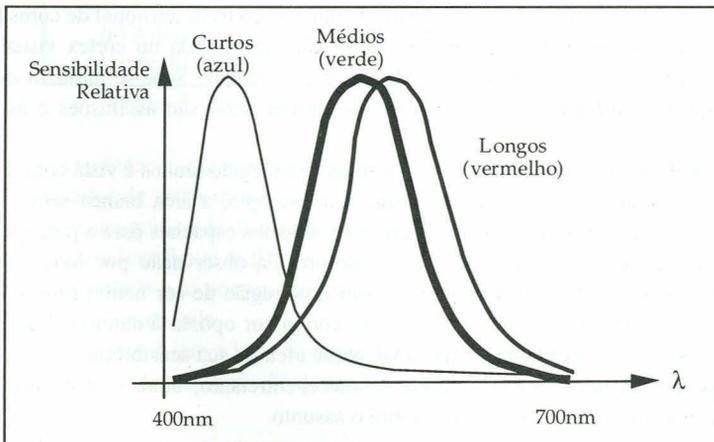


Figura 5 - Curvas estimadas de sensibilidade de cones da retina humana

Note-se ainda que a sensibilidade dos cones do tipo C é muito menor do que a dos cones L e M, porém a curva foi normalizada para apresentação na figura 5. Isto significa que o sistema visual humano é bem menos sensível a energia em pequenos comprimentos de onda (luz azul).

Simplificadamente, a sensação de cor depende de uma combinação dos sinais gerados pelos três tipos de cones. Como estes são regidos pelo princípio da univariância, fica evidente o porquê da existência de pares metaméricos: a mesma combinação de respostas dos três tipos de cones pode ser produzida a partir de estímulos luminosos com diferentes composições espectrais, tal como foi observado de maneira simplificada na figura 2. Esta é a *base fisiológica da tricromacia*. Os princípios aditivo e subtrativo de reprodução de cores nada mais são do que formas diferentes de

produzir metâmeros para a cor que se deseja reproduzir. A idéia central em ambos os casos é compor o estímulo luminoso de forma controlada, de maneira a provocar no sistema visual humano determinada sensação de cor.

4.3 Além da Retina

Há evidências de que os sinais dos cones são combinados e alimentam um sistema de *oponência de cor*, organizado também em três canais: Vermelho-Verde, Azul-Amarelo e Preto-Branco. O canal Vermelho-Verde seria responsável pela comparação das respostas dos cones de tipo L e M. O canal Azul-Amarelo, por sua vez, permitiria a comparação das respostas dos cones C à soma das respostas dos cones L + M. O terceiro canal mediria a quantidade de luz total percebida pelos três tipos de cones (C + M + L).

A existência destes canais cerebrais para o processamento da cor foi comprovada por experimentos psicofísicos e por medidas diretas feitas em animais com sistema visual semelhante ao humano [MOL89]. Ainda como reforço a essa tese há o trabalho de Edwald Hering, que determinou os *eixos psicofísicos para a representação de cor*, correspondentes aos canais oponentes. Segundo este fisiologista, uma cor não pode ser simultaneamente verde e vermelha, ou azul e amarela, ou preta e branca, determinando assim os eixos ortogonais de um espaço tridimensional de cores [ZEK93].

Supõe-se que a sensação de cor propriamente dita seja gerada no córtex visual, a partir da comparação das proporções de sinais em cada um destes canais. Sabe-se também que aspectos temporais e espaciais influem na percepção de cor; prova disto são as ilusões e as pós-imagens [ROC90].

Um exemplo de ilusão é a *cor invisível*, em que uma região branca é vista com a cor oposta à da vizinhança. Se o contorno da região for verde, por exemplo, a área branca será vista com tom avermelhado. Neste caso, fica evidente a influência de aspectos espaciais para a percepção de cor.

As pós-imagens referem-se ao efeito que decorre da observação por longo tempo de uma região de determinada cor. Ao mudar a atenção para uma região de cor neutra (cinza ou branco), a tendência é, durante alguns instantes, ver esta região com a cor oposta à anterior. Supõe-se que este efeito decorra da saturação ou adaptação do canal, o que afetaria sua sensibilidade.

A forma exata como a percepção de cor acontece, entretanto, ainda é desconhecida; [ZEK93] apresenta um panorama atual e interessante sobre o assunto.

5 Princípio Aditivo

No princípio aditivo, as cores são reproduzidas pela mistura de três componentes primárias de luz. As figuras 6(a) e 6(b) mostram primárias hipotéticas. Em geral são escolhidas fontes luminosas aproximadamente monocromáticas, representando as regiões espectrais de comprimentos de onda curtos, médios e longos. Este é o princípio usado em aparelhos de televisão e monitores de computador, e deu origem ao sistema *RGB* (Red-Green-Blue), muito popular para representação de cores em aplicações de computadores.

Quando energias com diferentes composições espectrais são misturadas, o espectro resultante corresponde à soma das componentes em cada frequência. A figura 6(c) apresenta o

espectro aproximado da mistura das energias descritas nas figuras 6(a) e 6(b). Observe que existe concentração de energia nas faixas espectrais correspondentes às primárias usadas na adição.

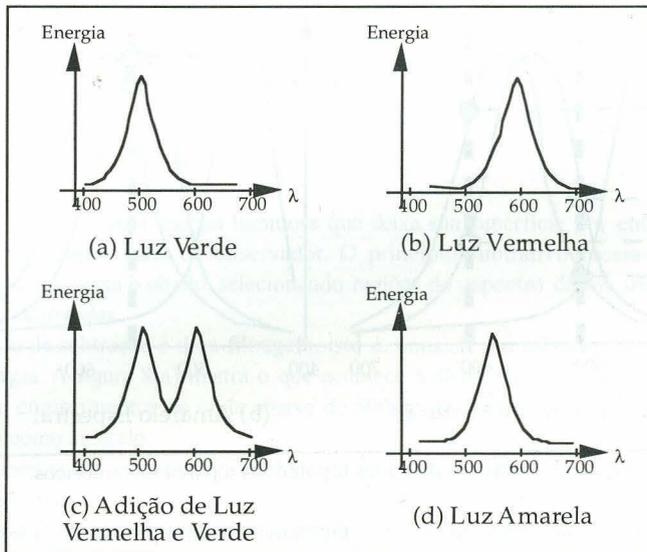


Figura 6 - Espectro da luz amarela obtida por adição

Sabe-se por experiência que a energia resultante da mistura de luz verde com vermelha seria vista por um observador de visão normal como *amarela*. No entanto, a energia luminosa cromática de matiz amarelo teria um gráfico de distribuição espectral diferente, com concentração de energia em apenas uma estreita faixa [ver figura 6(d)]. Verifica-se, assim, que o amarelo gerado pela adição de luz vermelha e verde na verdade *não* possui concentração de energia unicamente na região do espectro associada à sensação da cor amarela.

O que ocorre de fato é que a luz resultante da mistura estimula os cones da mesma maneira que a luz pura, causando a mesma sensação de cor, ou seja, as figuras 6(c) e 6(d) correspondem a um *par metamérico*.

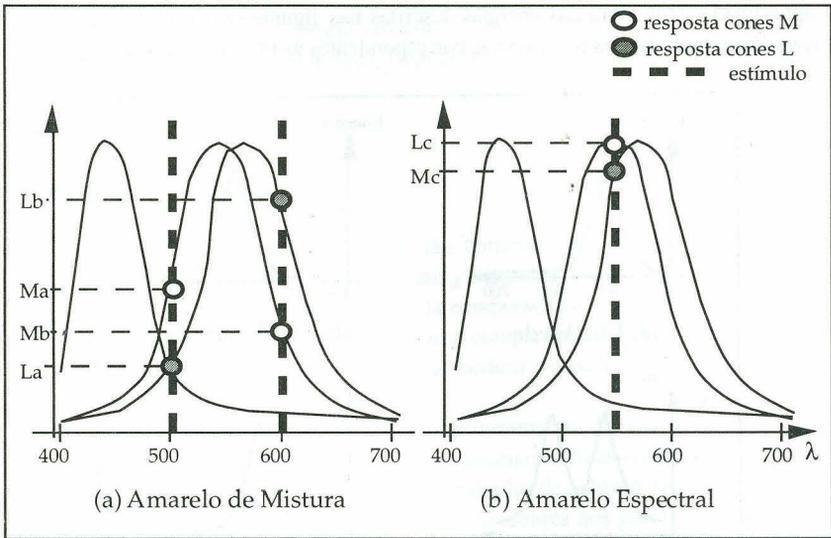


Figura 7 -Resposta de cones hipotéticos a pares metaméricos

A figura 7 apresenta a resposta de cones hipotéticos a estímulos ideais, mostrando de forma simplificada a resposta a pares metaméricos. A cor da luz, neste caso, é amarela.

O estímulo da figura 7(a) representa luz amarela produzida por mistura de luz vermelha e verde, com concentração de energia respectivamente em 500nm e 600nm. A resposta dos cones L e M, nesta situação, resulta da sensibilização provocada pela energia em ambas as faixas de concentração, totalizando $(Ma + Mb)$ e $(La + Lb)$.

Na figura 7(b), as respostas dos cones são respectivamente Mc e Lc , valores que correspondem aproximadamente aos totais obtidos no caso anterior. Como as respostas dos cones nas duas situações são bastante semelhantes, as sensações de cor produzidas são também próximas. Geralmente este grau de semelhança é suficiente para a identificação de cores com o mesmo matiz, porém com diferentes níveis de pureza. Esta é a principal limitação do sistema aditivo de reprodução de cor, explicada a seguir.

Outras cores podem ser geradas com o controle das proporções de cada primária. A cor magenta, por exemplo, seria produzida por iguais quantidades de vermelho e azul e sem verde.

5.1 Limitações do Princípio Aditivo

Para reproduzir a sensação de determinada cor, é necessário controlar as respostas dos cones C, M e L, o que, em termos teóricos, pode ser feito por três componentes primárias. Para isto, seria necessário obter primárias que estimulassem cada tipo de cone independentemente. Como pode ser observado na figura 5, entretanto, os cones são sensíveis à energia em todo o espectro, tornando impossível, na prática, a obtenção de tais primárias.

O que se obtém na realidade são primárias que *sempre* estimulam todos os tipos de cones, mesmo que minimamente, como as apresentadas nas figuras 6(a) e 6(b). Estes estímulos indesejados resultam na percepção de cores impuras ou esbranquiçadas. Em algumas situações, estes podem até mesmo acarretar desvio de matiz, deixando evidente a limitação deste princípio para a reprodução correta de *todas* as cores perceptíveis por um observador de visão normal.

6 Princípio Subtrativo

Um objeto é visível se a energia luminosa que deixa sua superfície por emissão, transmissão ou reflexão de luz, atinge o olho do observador. O princípio subtrativo baseia-se em controlar a natureza da energia que deixa o objeto, selecionando regiões do espectro da luz incidente que devem ser eliminadas ou *subtraídas*.

A operação de subtração é uma filtragem, isto é, consiste em eliminar algumas componentes espectrais da energia. A figura 8(a) ilustra o que acontece à distribuição espectral da luz acromática após filtragem de comprimentos de onda abaixo de 500nm. O objeto que reflete ou transmite esta energia será visto como amarelo.

Se esta energia for novamente filtrada, desta vez eliminando as componentes acima de 600nm, o resultado terá um gráfico de distribuição espectral semelhante ao apresentado na figura 8(b). Note que a cor do objeto neste caso seria verde.

Em geral, considera-se que a luz incidente é acromática, e que os filtros usados para manipular a cor são capazes de eliminar seletivamente uma de três faixas do espectro. Diferentes cores podem ser produzidas pelo controle das proporções de energia filtrada em cada faixa do espectro. As cores primárias do princípio subtrativo são:

- amarelo: absorve comprimentos de onda curtos, abaixo de 500nm, ou seja, na região dos azuis (corresponde grosseiramente ao tipo de filtro da figura 8(a).
- magenta: absorve comprimentos de onda médios, entre 500 e 600nm, ou seja, na região dos verdes.
- ciano: absorve comprimentos de onda longos, acima de 600nm, ou seja, na região dos vermelhos (corresponde grosseiramente ao tipo de filtro da figura 8(b)).

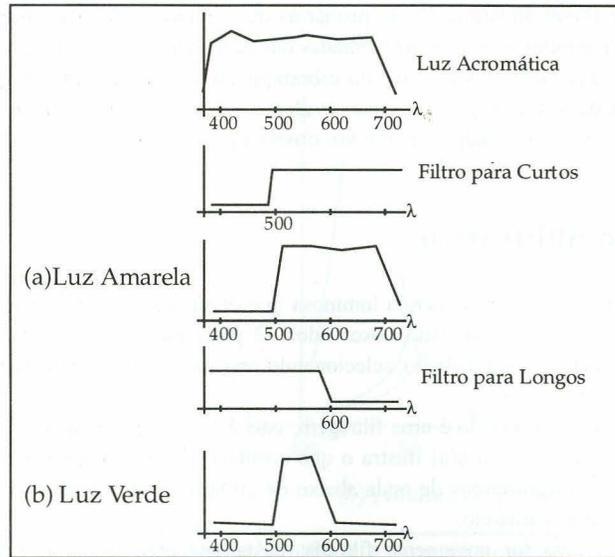


Figura 8 - Filtragem/Subtração de Luz

Por construção, pode-se observar que o princípio subtrativo permite a reprodução de cores mais puras, com concentração de energia em faixas mais estreitas do espectro. Por esta técnica, seria teoricamente possível filtrar componentes da luz incidente até a energia que deixa o objeto ser aproximadamente monocromática. As cores assim geradas seriam próximas das cores espectrais, que caracterizam-se por elevado grau de pureza.

As primárias, aqui chamadas simplesmente de *filtros*, agem de forma diferente conforme o método de reprodução de cores. No caso de uso de corantes, por exemplo, tratam-se de material líquido e transparente, capaz de absorver energia em algumas faixas do espectro e transmitir as outras. Neste caso, o fenômeno físico explorado é a *transmissão* de luz. No caso de pigmentos, o material é sólido e capaz de refletir com maior intensidade energia em determinadas faixas espectrais. Este processo explora o fenômeno da *reflexão*.

Vários aspectos físicos e químicos afetam a combinação das primárias, tornando este processo mais complexo do que a adição de luz. [HUN87] apresenta as questões relevantes para a área da fotografia.

6.1 Limitações do princípio subtrativo

A manipulação do espectro por meio de apenas três filtros tem as mesmas limitações em termos de pureza das cores produzidas por adição de luz. Isto acontece porque a energia resultante pode sensibilizar todos os tipos de cone, implicando a percepção de cores esbranquiçadas.

O princípio subtrativo tem ainda um problema adicional. Os filtros exemplificados na figura 8 são ditos *ideais*, pois impedem a passagem de energia em apenas uma faixa bem específica do

espectro. Na realidade, os filtros absorvem energia em todo o espectro, e não apenas nas faixas limitadas de comprimentos de onda curtos, médios ou longos. Estas são absorções indesejadas, que causam a queda da intensidade total da energia que deixa o objeto, sendo responsáveis pelo *escurecimento* das cores.

7 Uso dos princípios aditivo e subtrativo para reprodução de cores

Os dois princípios na verdade são muito semelhantes, pois ambos propõem-se a controlar a natureza da energia que, atingindo o sistema visual humano, possibilita a sensação de determinada cor. As características desta energia são definidas em função do funcionamento dos cones, e, portanto, não variam de um princípio para o outro. A diferença básica entre eles reside nas cores primárias misturadas, e a maneira como a mistura se processa.

Variadas técnicas e equipamentos para reprodução de cores baseiam-se nestes princípios, tais como os televisores e monitores de computador (aditivo), impressoras (subtrativo, por reflexão) e os projetores de slides (subtrativo, por transmissão). Cada um utiliza cores primárias próprias, adequadas ao tipo de técnica em questão. Em termos gerais, pode-se afirmar que as técnicas baseadas no princípio aditivo usam Vermelho, Verde e Azul como primárias, e que as baseadas no princípio subtrativo usam Amarelo, Ciano e Magenta. Este fato pode gerar a falsa impressão de que, para reproduzir uma cor, basta saber as proporções adequadas das primárias segundo determinado princípio. Na verdade, no entanto, isto não é suficiente, pois as primárias propriamente ditas podem variar, impossibilitando a reprodução da cor original. Este aspecto será discutido a seguir, com enfoque nos dispositivos conectados a computador.

8 Reprodução de Cores em Computador

Os periféricos controlados por computador utilizam os princípios aditivo e subtrativo para a reprodução de cor em diversos suportes. Os mais comuns são monitores e impressoras, sobre os quais serão feitos alguns comentários a seguir. Maiores detalhes sobre as diferentes tecnologias de reprodução de cor para exibição ou impressão de imagens são descritos em [THO; SMI90].

8.1 Monitores e o sistema RGB

No caso do monitor, o princípio utilizado é o de adição de luz. Cada pixel da tela é composto por três pontos de fósforo que emitem luz vermelha, verde e azul. A intensidade da luz emitida pode ser controlada pela aplicação de diferentes níveis de tensão, possibilitando assim a reprodução de grande número de cores. As proporções das intensidades de luz emitidas pelos pontos de fósforo determinam uma tripla de valores, em geral normalizada, que deram origem ao sistema *RGB* (Red, Green, Blue).

Estes valores são interpretados como pontos num espaço de cor, em que os eixos indicam proporções das três cores primárias. O formato deste espaço é um cubo [ver figura 9(a)].

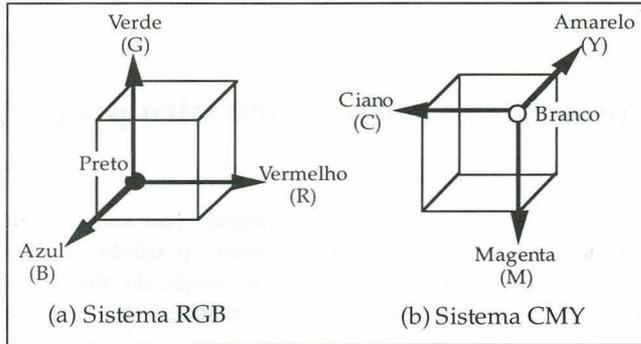


Figura 9 - Sistemas RGB e CMY de representação de cor

Este sistema é o mais popular para representação de cores em programas de computador, sendo descrito em vários textos, tais como [GOM;VEL95], [BOU95], [FOL90], [HAL89]. Seria redundante detalhá-lo novamente, e por este motivo neste texto apresenta-se apenas um aspecto complementar, que em geral não é suficientemente enfatizado.

A caracterização espectral da energia emitida por cada tipo de fósforo pode variar entre modelos de monitores, materiais de diferentes fornecedores, e até mesmo da remessa de componentes eletrônicos. Como a sensação de cor é governada pela sensibilização dos cones, e esta varia conforme as componentes espectrais do estímulo luminoso, fica evidente a razão pela qual observa-se variação de cores numa imagem quando apresentada em diferentes monitores.

Devido a este fato, a cor representada no sistema RGB em geral está vinculada a um conjunto específico de primárias, o que nem sempre é levado em consideração pelo usuários de computador que se surpreendem com as variações de cor observadas. Para garantir a reprodutibilidade da cor representada neste sistema, seria necessário armazenar, também, dados sobre a natureza das cores primárias empregadas. [HAL89] apresenta mais detalhes sobre as limitações deste sistema para a representação de cores e sua reprodução em monitores.

8.2 Impressoras e o sistema CMYK

A produção de cores em impressoras baseia-se no princípio subtrativo por reflexão de luz. Os pigmentos primários são combinados em diferentes proporções para produzir as variadas cores. Neste caso, as cores primárias são ciano, amarelo e magenta, dando origem ao sistema *CMY* (Cyan, Magenta, Yellow). Assim como no sistema RGB, o espaço de cores representáveis é um cubo [ver figura 9(b)]. Devido à dificuldade de produzir preto unicamente a partir de mistura dos pigmentos primários, é comum a utilização de uma primária adicional, o preto (black), dando origem ao sistema *CMYK*. Este é o sistema usual para representação de imagens que devem ser impressas. Como o sistema CMY é suficientemente descrito em outros textos, a ênfase aqui será novamente em aspectos complementares.

Uma questão importante refere-se à enorme variedade de tipos de pigmentos, bem como de técnicas para fixação dos mesmos ao suporte de impressão. Assim, são grandes as diferenças entre o tipo de energia gerado pela combinação dos pigmentos, determinando variações de cor facilmente perceptíveis entre imagens impressas com diferentes tecnologias.

Mesmo quando o mesmo tipo de impressora é utilizado, pode-se observar variações de cores decorrentes de diferenças sutis nas primárias empregadas. Pelas mesmas razões já comentadas em relação a monitores coloridos, a variação na natureza das primárias pode se traduzir visualmente como diferenças de cor.

Por estas razões, é insuficiente armazenar apenas as coordenadas CYM para descrever uma cor que deve ser reproduzida com fidelidade em equipamento de impressão. Assim como no sistema RGB, para uma completa descrição da cor seria necessário armazenar também informações sobre as primárias usadas para sua geração.

É interessante ressaltar ainda mais um ponto interessante. Limitações inerentes ao princípio subtrativo, aliadas às restrições impostas pela manipulação dos pigmentos, fazem com que as possibilidades de reprodução de cores em impressoras sejam significativamente menores do que nos monitores (ver [THO;SMI90]). Esta questão, no entanto, pode passar despercebida devido à facilidade de realizar a conversão de cores entre os sistemas RGB e CMY, operação implementada através de transformações geométricas entre sistemas de referência [FOL90]. Matematicamente, a conversão é uma operação simples, porém seu resultado visual pode parecer inconsistente - ou seja, a imagem aparece com cores diferentes na tela e nas diferentes impressoras. Este problema é muito comum, principalmente na área de editoração eletrônica, onde o planejamento das cores é feito com muito cuidado e pequenas diferenças são detectadas com facilidade pelo exigente usuário.

8.3 Sistemas Perceptuais de Representação de Cor

Analisando as limitações dos sistemas RGB e CMY para representação de cores e possibilidade de reprodução fiel num momento posterior, fica claro que é necessário adotar uma métrica independente deste ou daquele equipamento, num sistema de nível mais alto. Idealmente, o que se deseja é representar cores num sistema que tenha como referencial a percepção humana, dito *perceptual*.

Em 1905, Munsell definiu um sistema para nomenclatura de cores que posteriormente viria a influenciar o sistema adotado pelo National Bureau of Standards [THO;SMI90]. Para qualificar as cores, Munsell identificou a importância de três parâmetros, aos quais denominou: *matiz*, *saturação* (ou pureza) e *brilho* (ou luminosidade). Estes parâmetros, quando representados em eixos ortogonais, parecem definir um sistema semelhante ao HSV (figura 10).

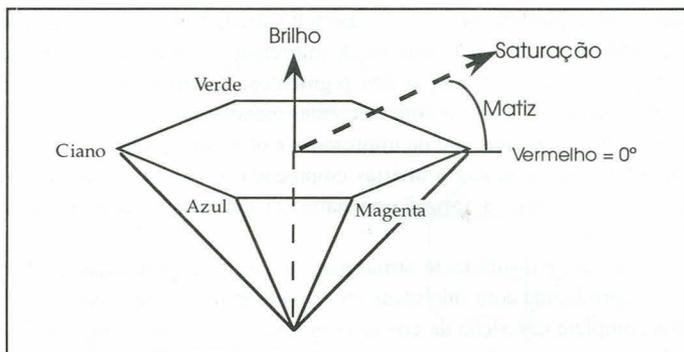


Figura 10 - Sistema HSV (Hue, Saturation, Value)

Ambos representam o matiz (Hue) por um ângulo, a saturação (Saturation) pela distância em relação ao centro e a luminosidade (Value) como a altura. Há, no entanto, diferenças entre os formatos dos sólidos que representam o espaço de cores determinados por ambos. No caso do sistema HSV, o formato aproxima uma pirâmide de base hexagonal (figura 10), enquanto que o sistema de Munsell assume forma aproximadamente esférica [THO;SMI90].

Esta diferença ocorre porque, no sistema proposto por Munsell, a variação dos parâmetros ao longo dos eixos acompanha variações percebidas por seres humanos. Isto significa que a distância entre dois pontos neste sistema representa de fato a diferença perceptível entre as duas cores por eles representadas. Como a percepção de cores, assim como de outros atributos visuais, não é linear, a escala nos eixos não é uniforme, resultando em diferenças entre os dois sistemas. O sistema elaborado por Munsell, por este motivo, é dito *perceptual*, permitindo que cores sejam representadas como são percebidas por um observador com visão normal.

Outro exemplo deste tipo de sistema é o diagrama de cromaticidade *CIE* [HUN87], elaborado como parte de um esforço para a padronização de medidas de cor, coordenado pela Comissão Internationale de L'Éclairage (CIE). Iniciativas como esta encontram-se no domínio da *Colorimetria*, que busca uma métrica precisa para a cor.

Um esboço do diagrama é apresentado na figura 11 e corresponde a um plano do espaço de cor determinado com base em experimentos psicométricos. Neste plano variam apenas o matiz e a saturação, sendo a intensidade constante. Sobre a linha em forma de ferradura estão localizadas as cores puras, na região interior estão localizadas as cores visíveis por um ser humano de visão normal. A saturação decresce em direção ao centro, onde localiza-se a cor branca. [HUN87], [HAL89] e [THO;SMI90] apresentam detalhes sobre a construção deste tipo de diagrama, discutindo suas vantagens e limitações, assim como de outros sistemas derivados (CIE-XYZ, CIE-Lab, CIE-RGB).

É importante chamar a atenção para o fato de que este diagrama é uma alternativa para a representação de cor, pois possui uma métrica bem definida e baseada em parâmetros perceptuais. A partir deste diagrama, por exemplo, é possível prever o resultado de mistura de cores em termos perceptuais; este conhecimento poderia ser usado para determinar com mais precisão as cores que podem ser geradas com as primárias, e assim garantir resultados mais homogêneos entre diferentes equipamentos [HAL89].

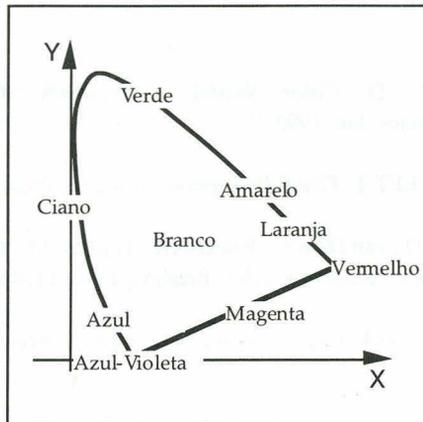


Figura 11 - Esboço do Diagrama de Cromaticidade CIE

9 Conclusão

Diversos outros fatores que não foram aqui abordados influenciam a sensação de cor, como intensidade das primárias, contraste, características de iluminação ambiente, distribuição das cores na cena e seqüência temporal em que são apresentadas. Todos eles formam um panorama complexo, que torna a reprodução de cores um tema de estudo muito interessante, não apenas no domínio da computação.

Abordá-los em profundidade, porém, está além do objetivo deste texto, que visa apenas sensibilizar o leitor para os motivos pelos quais é importante tratar a cor como algo mais do que um ponto no espaço RGB ou CMY. Obviamente, o tratamento simplificado pode ser aceitável em situações em que não seja necessário rigor na reprodução de imagens, o que acontece em diversas áreas de aplicação da Computação Gráfica. Há áreas, no entanto, em que a cor deve ser tratada com maior precisão, havendo, portanto, motivação para a busca de ferramentas mais adequadas para a representação, manipulação e reprodução de cor com computador. Um possível ponto de partida seriam os fundamentos já estabelecidos da Colorimetria, como, por exemplo, o diagrama de cromaticidade CIE.

Qualquer que seja o caminho tomado, no entanto, é necessário ter em mente que a cor é um atributo *visual*, e por isto a avaliação dos resultados deve ser feita com critérios que levem em conta a maneira como são *percebidos* pelos seres humanos.

"Man was now aware that for centuries he had been mistaking paint for color, confusing stimulus with sensation, confounding cause with effect. He knew now that the green of the apple, like its smell and taste, existed not in the outside world but inside himself".

Maitland Graves, *Color Fundamentals*, 1954.

Bibliografia

- [BOU95] BOURGIN D. *Color Spaces - Frequently Asked Questions*. Newsgroup comp.graphics, Jan. 1995.
- [COR70] CORNSWEET T. *Visual Perception*. Academic Press, New York, 1970.
- [FOL90] FOLEY J.D.; van Dam A.; Feiner S.K.; Hughes J.F. *Computer Graphics - Principles and Practice*. Addison-Wesley, Reading, 1990. 1174p.
- [GOM;VEL89] GOMES J.; VELHO L. *Computação Gráfica: Imagem*. IMPA/SBM, Rio de Janeiro, 1994.
- [HAL89] HALL R. *Illumination and Color in Computer Imagery*. Springer-Verlag, New York, 1989. 282p.
- [HEW87] HEWITT P.G. *Conceptual Physics - A High-School Program*. Addison-Wesley, Menlo Park, 1987.
- [HUN87] HUNT R.W.G. *The Reproduction of Colour in Photography, Printing & Television*. Fountain Press, England, 1987. 640p.
- [LEV94] LEVKOWITZ H. Foundations of Vision and Color. In: Levkowitz H.; Reingans P. *Introduction to Perception-Based Visualization*. ACM SIGGRAPH (course notes - tutorial SIGGRAPH'94), 1994.
- [MOL89] MOLLON J.D. Colour vision and colour blindness. In: Barlow H. B.; Mollon J.D. *The Senses*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989. p. 165-191.
- [POY94] POYNTON C. *The Science of Digital Color*. ACM SIGGRAPH (course notes - tutorial SIGGRAPH'94), 1994.
- [ROC90] ROCK I. *The Perceptual World*. W.H.Freeman and Co., New York, 1990.
- [THO90] THORELL L.G.; Smith W.J. *Using Computer Color Effectively*. Prentice-Hall, Elewood Cliffs, 1990. 258p.
- [ZEK93] EKI S. The retinex theory and the organization of the colour pathways in the brain. In: *A Vision of the brain*. Blackwell, London, 1993. p.246-255.

Agradecimentos

Aos colegas Carla, Manuel, Bea, Cabral, Alexandre e Soraia, pelas discussões e revisões preliminares do texto; e aos revisores, pelas valiosas sugestões.

Autora

Tecnóloga em Processamento de Dados e Mestre em Ciência da Computação pela UFRGS, professora do Instituto de Informática da UFRGS.

Áreas de interesse

Visualização científica; interação homem-máquina para 3D; percepção visual.