

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia Eletrônica

BT/PEE/94-14

**COR: ASPECTOS RELEVANTES PARA
VISUALIZAÇÃO DE DADOS**

Sílvia Delgado Olabariaga

Computação gráfica - SBU/II
Processamento: Imagem
Cor: Computação gráfica

CNPq 1.03.03.00-6

UFRGS INSTITUTO DE INFORMATICA BIBLIOTECA		
Nº CHAMADA FL 2655		35596
	DATA:	31/03/1995
ORIGEM: D	DATA: 05/01/95	PREÇO: R\$ 15.00
FUNDO: II	FORN.: II	(Prof. SILVIA D. OLABARRIAGA)

Olabarriaga, Sílvia Delgado

Cor : aspectos relevantes para visualização de dados / S.D. Olabarriaga. -- São Paulo : EPUSP, 1994.

32p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Eletrônica, BT/PEE/94-14)

1. Imagens - Processamento 2. Computação gráfica 3. Cor I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Eletrônica II. Título III. Série

CDU 621.391
519.674
535.6

MOD. 2.3.1

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Antônio Zuffo, por ter possibilitado a escolha livre do tema COR para o seminário da disciplina PEE899, que resultou na escrita deste texto.

Aos meus colegas desta mesma disciplina, pelo interesse e paciência em discutir diversos aspectos deste trabalho.

Por fim, e em especial, ao Antônio Martins, pela valiosa revisão, e à Tânia Fraga, pelas inúmeras aulas sobre cor.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	
Resumo	
Abstract	
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA HISTÓRIA	3
3 FÍSICA DA COR	6
4 COR EM COMPUTAÇÃO GRÁFICA.....	8
4.1 Equipamentos gráficos coloridos	8
4.2 Modelos para representação de cor	10
4.2.1 Sistemas RGB e CMY.....	10
4.2.2 Espaços perceptuais de cor	12
4.2.3 Sistema CIE	12
4.2.4 Sistemas HSV e HSL	14
5 PERCEPÇÃO DE COR	16
5.1 Cristalino	18
5.2 Retina	18
5.3 Além da Retina	17
5.4 Não-linearidade da percepção	19
5.5 Cor inexistente.....	19
6 RECOMENDAÇÕES PARA USO DE COR.....	22
6.1 Uso de matizes	22
6.2 Uso de brilho e saturação.....	23
6.3 Outros comentários importantes	24
7 EXEMPLOS DO USO DE COR EM VISUALIZAÇÃO DE DADOS....	25
7.1 Construção de rampas	25
7.2 Aplicações.....	26
CONCLUSÕES.....	28
GLOSSÁRIO	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Espectro Visível	6
Figura 3.2 - Comprimento de Onda Dominante, Pureza e Luminância	7
Figura 4.1 - Sistema RGB.....	11
Figura 4.2 - Diagrama CIE.....	13
Figura 4.3 - Comparação de gama de cores em monitores de fósforo e impressoras	14
Figura 4.4 - Hexágono de Matizes.....	15
Figura 4.5 - Sistemas HSV e HSL	15
Figura 5.1 - Esquema Simplificado do Olho Humano.....	16
Figura 5.2 - Funções de Resposta Espectral dos Cones	17
Figura 5.3 - Canais Opostos	18
Figura 5.4 - Contraste Simultâneo	20
Figura 5.5 - Efeito "Mach Band"	21

RESUMO

Este texto apresenta os aspectos relevantes do uso de cor na geração de imagens para visualização de dados. Tópicos referentes a cor são abordados sob diferentes enfoques, apresentando os conceitos e terminologia básicos em cada caso. Inicialmente descreve-se como ocorre a manifestação de cor na energia luminosa, para depois comentar brevemente como é tratada em computadores em termos de hardware e software.

Em seguida são considerados aspectos da percepção humana, salientando aqueles que originam as *ilusões* - cuja compreensão é muito importante para o uso controlado de cor.

Por fim são apresentadas diversas recomendações sobre o uso eficiente de cor para visualização de dados, considerando as limitações de hardware e características da percepção humana. Alguns exemplos em que tais recomendações foram utilizadas são apresentados, além de conclusões acerca do panorama atual deste tema na área de Visualização Científica.

ABSTRACT

This work presents the main aspects of color usage in the generation of images for data visualization. Color concepts and terminology are presented using different approaches. We initially describe how color is considered in terms of light, and then we briefly present how it is generated in computers (hardware and software issues).

We then present how color is perceived by human beings, with special emphasis on the so called *illusions*, whose understanding is very important to the use of color in a controlled fashion.

We finally list some recommendations for the efficient use of color in data visualization, taking into account hardware and perception constraints. Examples of applications in which such recommendations were followed are considered and some conclusions about the current issues of color for Scientific Visualization are presented.

1 INTRODUÇÃO

Cor é um aspecto muito importante da comunicação visual. Este fato tem sido comprovado em diversas áreas em que a transferência de informações visuais é relevante, independentemente do uso de computadores.

O correto uso de cor pode facilitar significativamente a compreensão de informações visuais, desde que o observador esteja familiarizado com a codificação empregada. Assim, cores podem ser utilizadas para agilizar a identificação e/ou a separação de elementos apresentados, sendo superior a outras formas de codificação como forma, tamanho, brilho, texto ou números [CHRIST 75]. Um exemplo interessante é o livro "The First Six Books of the Elements of Euclid", de Oliver Byrne [Londres, 1847 apud TUFTE 90]. Nesta publicação o autor apresenta a explicação de diversos teoremas através de diagramas coloridos e símbolos num notável e bem sucedido esforço. Mapas são igualmente ótimos exemplos em que o emprego de cor é imprescindível para a classificação da informação em diferentes níveis, o que facilita sua interpretação [TUFTE 90].

O incorreto uso de cor, no entanto, pode levar a desconforto, fadiga visual, erros de comunicação, ou ainda reduzir a eficácia da imagem a um terço do que teria se fosse monocromática [FOLEY; GRIMES 88]. Basta utilizar codificação cromática que contrarie os padrões estabelecidos para obter resultados catastróficos (ex. usar verde para sinalizar que uma via está interrompida, enquanto que a cor natural seria o vermelho).

Por esses motivos, cor é um tema que assume papel importante em áreas como Visualização Científica, onde a idéia central é transmitir uma *impressão* sobre os dados através da imagens, facilitando assim a compreensão dos mesmos. Neste caso, o incorreto uso de cor é ainda mais grave, pois a imagem pode induzir a erros na interpretação dos dados apresentados [GERSHON 93].

Como exemplo considere-se a seguinte aplicação: visualização de dados sobre o desempenho de empresas ao longo de um ano. Neste contexto, em geral a cor vermelha é associada a insucesso; assim, ao assinalá-la a determinada empresa, já estamos indiretamente induzindo a idéia de que seu desempenho não foi bom, o que pode ser falso.

Outro exemplo seria o uso de uma escala randômica de cores para apresentar dados com determinada relação de ordem. Em geral utiliza-se escalas com intensidade crescente (claro=valor baixo, escuro=valor alto), que facilitam a observação de relações entre os valores. A compreensão da relação entre os dados seria prejudicada se as cores fossem escolhidas ao acaso.

Estes exemplos ilustram situações bastante óbvias de uso indevido de cor, porém nem sempre é assim tão simples avaliar a correção e/ou eficácia de seu uso para apresentação de dados. Muitos são os aspectos envolvidos, especialmente aqueles relacionados à percepção humana, de caráter fisiológico e cultural, havendo diversos relatos de experiências realizadas no âmbito da Psicologia que mostram grande preocupação com a determinação de critérios para tal avaliação. Embora poucos deles tenham chegado a resultados conclusivos e absolutos, possibilitaram a

geração de conhecimento acerca da percepção humana de cor, assim como a determinação de regras gerais que podem ser usadas para no mínimo prevenir erros graves de comunicação de informações pelo uso deste tipo de codificação visual.

Este tipo de conhecimento faz parte do cotidiano de profissionais ligados à área de Comunicação Visual, fazendo com que resultados impressionantes sejam obtidos por eles. É o caso de artistas como Mondrian, capazes de induzir sensações no observador pela manipulação de cores e formas [LIVINGSTONE 88].

As pessoas envolvidas com Visualização Científica, no entanto, normalmente não são familiarizadas com o assunto, e por isto desconsideram estas questões durante a geração de imagens para a apresentação de dados. É dentro deste contexto que se insere este texto, com a finalidade de chamar a atenção para o assunto e oferecer ao leitor leigo uma revisão sobre os principais aspectos deste complexo e fascinante tema.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão histórica da bibliografia (desde 1975) sobre o uso de cor em diversas áreas do conhecimento, e comenta as primeiras referências ao tema no domínio específico da Computação Gráfica. O capítulo 3 apresenta os conceitos e nomenclatura referentes à Física de cores. O capítulo 4 comenta como cores são tratada a nível de hardware e software, com ênfase em monitores de tubo de raios catódicos. O capítulo 5 introduz questões referentes à percepção de cores por seres humanos.

Finalmente o capítulo 6 enumera e comenta uma série de regras e recomendações gerais acerca do uso de cor na apresentação de dados, que foram compiladas a partir de diversas publicações pesquisadas. No capítulo 7 apresenta-se alguns exemplos de aplicações de Visualização Científica em que as características da percepção humana foram levadas em consideração.

No final são apresentadas conclusões que situam o panorama atual deste tema, sugerindo direções para trabalhos futuros.

Como anexo encontra-se um glossário de termos referentes a cores usados no texto. Como trata-se de um assunto muito subjetivo, este glossário visa apenas padronizar algumas expressões que fazem sentido no contexto deste trabalho.

Cabe ainda salientar que a intenção deste capítulo não é reprisar temas que são tratados em outras referências. O objetivo aqui é salientar algumas questões importantes relativas e remeter o leitor para bibliografia mais aprofundada.

2 REVISÃO DA HISTÓRIA

Cor é usada com significado simbólico desde os povos primitivos. O vermelho era associado ao fogo e sangue; o amarelo ao ouro e, portanto, à riqueza; o branco, relacionado à tranqüilidade e paz. [PEDROSA 82] apresenta uma revisão sobre o significado das cores sob diferentes óticas, incluindo preferências e aspectos mais abstratos. Este tema, no entanto, está além do objetivo deste texto; aqui, a intenção é abordar apenas aspectos ligados ao uso da cor para comunicação de idéias e informações de forma objetiva, principalmente em áreas técnicas.

A preocupação com o uso adequado de cor para a transferência de informações remonta a publicações anteriores à existência de cor em computadores. Estes trabalhos relatam tentativas de medir a eficácia do uso da cor para auxiliar tarefas como identificação de elementos de uma figura, contagem de objetos, compreensão de dados e legibilidade.

Um clássico exemplo é o livro "Kartographische Geländedarstellung" (Cartographic Relief Presentation), que contém recomendações para a confecção de mapas suíços [Berlin, 1965 apud TUFTE 90]. As primeiras regras contidas neste documento visam minimizar danos produzidos pelo mau uso da cor, tais como: usar cores neutras para o fundo da figura; não colocar cores brilhantes em áreas adjacentes a regiões brancas; etc.

A maior parte das publicações sobre o assunto, porém, concentra-se em áreas que estudam os fatores humanos que influem na forma com que diversas atividades profissionais são desempenhadas. Existe uma revista especializada sobre o assunto, chamada *Human Factors*, publicada pela Human Factors Society, em que são encontrados diversos trabalhos sobre o impacto do uso de cor para a apresentação de informações, com ênfase em áreas de risco, como no projeto de painéis de controle de aviões e sinalização de estradas.

[TOLLIVER 73] relata experiências na área de Biblioteconomia para determinar a eficácia da cor na percepção e retenção de informação que chegaram a alguns resultados interessantes. Um deles é que o uso de cor não natural pode atrapalhar a compreensão da cena. Foi detectada, por exemplo, dificuldade em ler a palavra AZUL quando esta for escrita em cor verde. Outro resultado curioso foi o de que não há diferença significativa para a compreensão de informações entre a apresentação colorida ou monocromática, o que contraria a maior parte dos outros trabalhos consultados.

[CHRIST 75] apresenta uma importante revisão de experimentos realizados em ambiente controlado que efetivamente possibilitaram a comparação das alternativas para codificação de dados (cor, tamanho, formas, letras e dígitos). As conclusões mais importantes apresentadas pelo autor foram as seguintes:

- (a) a cor ganha em relação a outras formas de codificação, como forma e tamanho;
- (b) o uso de cor apresenta maior ganho à medida que aumenta a complexidade da tarefa, ou seja, quando o volume de informações cresce;

(c) o uso de cor como codificação redundante sempre produz resultados melhores do que se usada sozinha (ex. tamanho e cor).

Há também trabalhos como o de [WALLER; LEFRERE; MAC-DONALD-ROSS 82] que justificam o uso de uma segunda cor para enriquecer textos técnicos ou didáticos, demonstrando preocupação com o tema na área de comunicação profissional e educacional. Publicações mais recentes apresentam ainda estudos sobre a influência da cor para a legibilidade de texto, como é o caso de [PASTOOR 90].

Na linha de compreensão de dados há vários trabalhos no domínio da Estatística, dos quais [BENBASAT; DEXTER; TODD 86] é um exemplo. Neste trabalho os autores realizam comparações entre a eficácia dos gráficos em relação às tabelas e das imagens coloridas em relação às monocromáticas, para o auxílio à tomada de decisões administrativas. Um resultado interessante é que as imagens perdem para as tabelas nos casos em que precisão é relevante, mas em geral permitem compreensão mais rápida dos dados apresentados.

Com o surgimento de periféricos coloridos, o tema cor apareceu também no domínio da Computação Gráfica. O enorme número de cores que podem ser geradas em computador e a facilidade de manipulação das mesmas tem atraído profissionais que geralmente ficam maravilhadas com este potencial. O risco de cometer erros na utilização desta potencialidade, entretanto, é igualmente grande, o que exige um cuidado ainda maior, principalmente dos profissionais leigos em fatores humanos da comunicação visual.

Os primeiros trabalhos significativos apresentados na conferência considerada o referencial internacional da área de Computação Gráfica surgiram em 1978. Trata-se da conferência anual da comissão especial de Computação Gráfica Interativa (SIGGRAPH) da ACM (Association for Computing Machinery).

[JOBLOVE; GREENBERG 78] apresentam o equacionamento dos sistemas de representação de cores mais populares na época (RGB, CMY, HSI). Na mesma conferência foi apresentado outro trabalho importante que descreve as transformações geométricas entre os modelos de cor [SMITH 78] e apresenta a dedução dos sistemas HSI e HSV a partir do sistema RGB (ver capítulo 4 para mais detalhes sobre os modelos de cor).

Em 1980 apareceu pela primeira vez nesta conferência a preocupação com a percepção humana de cor e sua influência na área de Computação Gráfica. [MEYER; GREENBERG 80] afirmam que maior conhecimento sobre a percepção de cores poder ser usado para maior eficácia na comunicação, além de possibilitar compressão de imagens. Este conhecimento já havia sido efetivamente aproveitado na definição do padrão de sinal de televisão a cores, que é anterior a esta época [ver POYNTON 94] para mais detalhes.

Em 1983 foi apresentado um tutorial intitulado "Percepção de Cor", sinalizando a importância que o tema vinha adquirindo entre os profissionais da área de Computação Gráfica.

A nível de custo, no entanto, cores só ficaram realmente disponíveis no final anos 80. A partir de então, muitos trabalhos foram publicados sobre o assunto, enfocando temas como a melhoria dos modelos de cor, portabilidade de cor entre

equipamentos, influência da percepção de cor e recomendações para seu uso em interfaces gráficas e/ou imagens. Um marco importante foi a edição especial sobre cor da revista *IEEE Computer Graphics and Applications* em setembro de 1988, cujo editorial reafirma a necessidade de cuidado com o uso de cor [FOLEY; GRIMES 88].

Recentemente este tema voltou a ser explorado na área de Visualização Científica, devido à já mencionada importância da cor para a correta comunicação de informações visuais. As conclusões deste trabalho comentam mais detalhadamente o panorama atual e tendências nesta área específica.

3 FÍSICA DAS CORES

Para que objetos do mundo sejam vistos é necessário que sobre eles incida luz e que esta, por sua vez, seja refletida em direção ao olho do observador. A Física caracteriza a luz que entra no olho e excita o sistema nervoso, responsável pelo fenômeno da visão monocromática e em cores.

Luz é uma forma de energia que tem sido explicada e estudada ao longo do tempo a partir de diferentes perspectivas. Newton achava que a luz era composta de partículas, mas depois descobriu-se que comporta-se como uma onda; mais recentemente, no entanto, concluiu-se que às vezes a luz efetivamente comporta-se como partícula (ver [FEYNMANN 71] para uma discussão aprofundada deste tema).

Ao invés de tentar explicar o que é luz e descrever os procedimentos da Óptica, neste texto pretendemos salientar apenas os aspectos físicos relativos à sensação de cor. Para este fim, é conveniente utilizar a abordagem clássica, onde luz é a parte visível do espectro de radiações eletromagnéticas, sendo tratada como um fenômeno oscilatório e descrita em termos de *freqüências* e *comprimentos de onda*.

$$f = v / \lambda \quad (\text{eq. 1})$$

onde f : freqüência
 λ : comprimento de onda
 v : velocidade

Segundo a colocação de Isaac Newton em seu livro *Opticks*, 1704, "os raios [de luz] por si só não são coloridos. Neles não há nada mais do que uma certa Energia e Disposição para conduzir uma Sensação desta ou daquela cor" [LEVKOWITZ 94]. Na verdade o que acontece é que diferentes faixas de freqüência do espectro são associadas a diferentes sensações, ou cores (fig. 3.1).

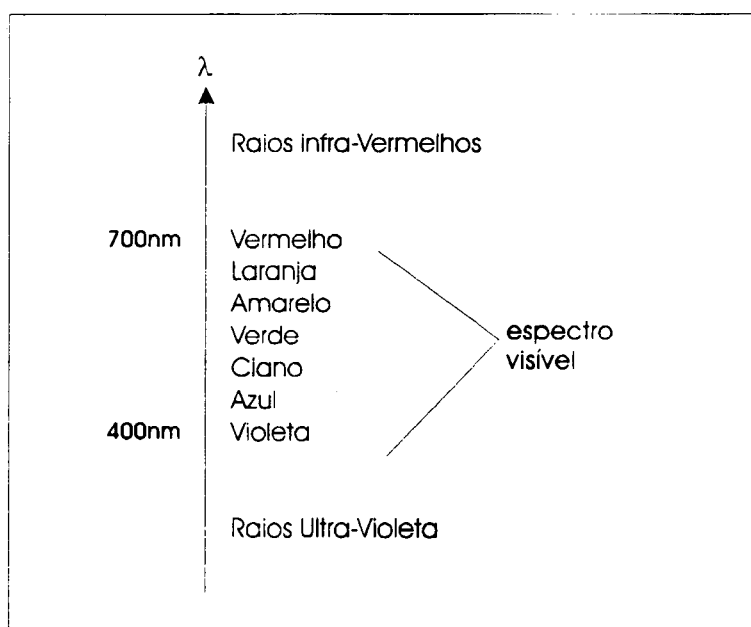


Figura 3.1 - Espectro Visível

Apenas uma parte do espectro de ondas eletromagnéticas é visível pelos seres humanos, na faixa entre 400nm (violeta) e 700nm (vermelho). Os diferentes matizes

da luz estão localizados no espectro na seguinte ordem: violeta, azul, ciano, verde, amarelo, vermelho, formando o "arco-íris" (ver fig. 3.1). Abaixo de 400nm encontram-se os raios ultra-violeta e acima de 700nm estão os raios infra-vermelhos, ambos invisíveis. As denominações "ultra" e "infra" referem-se à ordenação do espectro conforme as freqüências de onda, que são inversamente proporcionais ao comprimento da onda (eq.1).

Uma fonte de luz, no entanto, dificilmente emite energia em uma única freqüência, mas sim em várias simultaneamente [uma exceção são as fontes de luz laser, em que é possível controlar com grande precisão a natureza da energia emitida]. Assim sendo, a luz é caracterizada em termos de cor pela sua *distribuição espectral* (ver fig. 3.2).

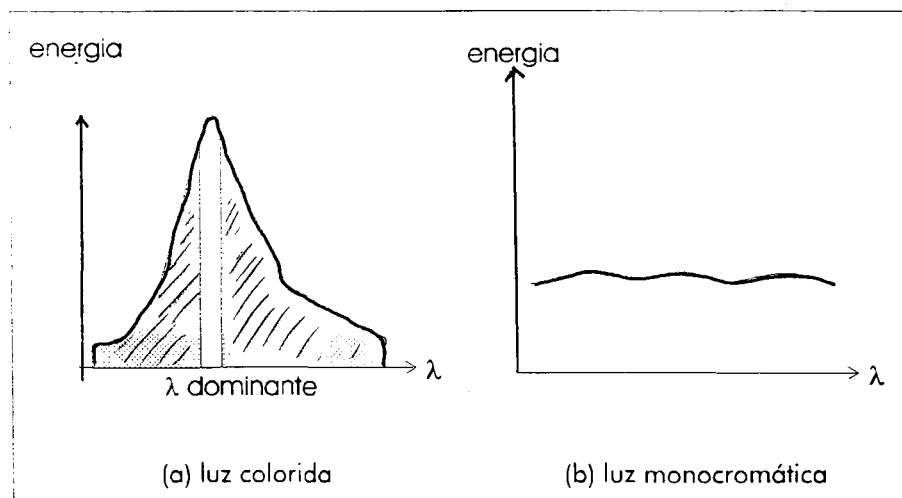


Figura 3.2 - Comprimento de Onda Dominante, Pureza e Luminância

É possível que diferentes distribuições espectrais produzam num espectador humano a mesma sensação de cor - *metâmeros* [FOLEY et al. 90]. Por isto, o efeito visual da luz pode ser melhor medido através dos seguintes parâmetros: comprimento de onda ou freqüência dominante, pureza e luminância ou intensidade.

A *freqüência dominante* determina o matiz, sendo que a luz será branca se a energia for semelhante nas diferentes faixas do espectro (ver fig. 3.2 (b)).

A *pureza* indica a quantidade de outros comprimentos de onda presentes na luz: quanto maior a mistura, menos pura a cor será, aproximando-se do branco. No gráfico da fig. 3.2 (a), a pureza é inversamente proporcional à área da região hachurada.

O parâmetro *intensidade* ou *luminância* mede a quantidade de energia presente na luz, caracterizando-se visualmente pelo *brilho*. Se a intensidade é muito baixa, não há cor, pois é necessário haver um nível mínimo de estímulo para a produção desta sensação pelo cérebro.

Estes parâmetros caracterizam a cor da luz em termos físicos, o que não significa que a cor percebida por um ser humano possa ser qualificada da mesma maneira. Na realidade, diversos aspectos peculiares da percepção humana possibilitam a ocorrência de ilusões, conforme apresentado no capítulo 5.

4 COR EM COMPUTAÇÃO GRÁFICA

O tema cor surgiu em Computação Gráfica quando equipamentos gráficos passaram a oferecer a possibilidade de apresentação simultânea de mais do que uma cor de desenho. Isto aconteceu há muito tempo, porém apenas recentemente o uso de tais equipamentos foi popularizado devido à redução drástica do custo. Atualmente é comum que micro-computadores de uso pessoal estejam equipados com monitor e/ou impressora colorida, periféricos que há alguns anos só poderiam ser adquiridos por empresas especializadas devido ao elevado custo. Aspectos relevantes destes equipamentos gráficos coloridos são apresentados na seção 4.1.

A possibilidade de produzir cores no hardware gerou a necessidade de manipulá-las em programas, através de representação numérica, o que motivou o desenvolvimento de sistemas (ou modelos) para representação de cor comentados na seção 4.2.

4.1 Equipamentos gráficos coloridos

A cor é gerada de forma diferente conforme o tipo de suporte utilizado em cada equipamento gráfico. Considerando-se apenas o quesito *produção de cor*, é possível classificar os equipamentos gráficos em quatro grandes grupos:

- (a) monitores: geram cores pela adição ponderada das cores-luz primárias Vermelho (*Red*), Verde (*Green*) e Azul (*Blue*), usando o sistema RGB (ver seção 4.2.1). Pontos de substâncias capazes de emitir luz em uma destas três cores são distribuídos sobre a tela e seletivamente excitados. Como estes pontos estão muito próximos uns dos outros, a visão humana é capaz de integrar a luz emitida, percebendo como uma única cor, resultante da adição das três intensidades. A qualidade das cores geradas, neste caso, depende da capacidade de controle da intensidade luminosa emitida por cada ponto, além das características particulares da própria substância emissora de luz;
- (b) impressoras: depositam no papel tinta as cores-pigmento primárias Ciano (*Cyan*), Amarelo (*Yellow*) e Magenta, usando o sistema CMY (ver seção 4.2.1). Os pigmentos destas tintas seletivamente filtram alguns comprimentos de onda da luz incidente, permitindo assim o controle de cor da luz refletida por cada ponto do papel. Diversas cores podem ser geradas a partir da mistura destas primárias, como por exemplo Verde = Amarelo + Ciano. Como a cor preta é difícil de produzir desta forma, muitas impressoras utilizam ainda um quarto pigmento preto (sistema CMYK, onde "K" representa "Black"). A forma como as tintas são misturadas e depositadas sobre o papel varia conforme a tecnologia empregada na impressora, o que pode afetar significativamente a qualidade ou mesmo a gama de cores impressas;
- (c) registradores em filme fotográfico: utilizam um monitor para gerar a imagem e um processo químico para fixá-la ao filme. Neste caso o filme é impressionado por processo fotográfico conforme a cor da luz emitida pelos pontos do monitor, sendo o resultado final dependente de uma série de elementos: do monitor, do pigmento do filme, da revelação e ampliação;

(d)traçadores gráficos: utilizam as cores disponíveis no repertório de canetas para realizar o desenho. Neste caso as cores são indicadas por números que são associados às canetas. A cor usada no desenho depende da caneta disponível no momento da plotagem, podendo ser inclusive de outro matiz do que o determinado originalmente pelo programa.

Para mais detalhes sobre o funcionamento destes equipamentos ver [MARSHALL 87], [FOLEY et al. 90, capítulo 4] e [THORELL; SMITH 90]. No contexto deste trabalho, no entanto, é mais importante apresentar o efeito da tecnologia empregada para geração das cores do que descrever detalhadamente o funcionamento de cada um destes equipamentos.

Na adição das primárias de luz, a gama de cores possíveis é limitada a uma parte do espectro visível. Um exemplo é a luz marron (ocres, sépias), difícil de reproduzir por ser na verdade um amarelo *sombrio*. Isto se deve a limitações do próprio modelo RGB em relação à percepção humana. Em algumas cores, o estímulo de determinados comprimentos de onda agem como inibidores, o que em outras palavras significa uma *subtração*, tornando difícil sua reprodução através de um sistema que simplesmente adicione valores positivos.

A gama de cores que podem ser impressas é ainda menor, sendo difícil a reprodução de cores puras diferentes das primárias amarelo, ciano e magenta. Para tentar reduzir este problema, as impressoras podem usar mais primárias, como o preto (CYMK) ou outras cores. A situação no caso de registro em filme fotográfico ou sinal de vídeo composto (para televisão) é semelhante, em geral com limitações na reprodução de cores saturadas ou puras como vermelho, verde, azul e ciano.

Estas restrições de gama de cores causam pelo menos dois problemas. O mais óbvio deles é a impossibilidade de gerar e imprimir por computador exatamente a cor desejada, o que não chega a ser grave na área de visualização de dados, pois o conjunto de opções ainda assim é grande.

O outro problema diz respeito ao transporte de imagens coloridas entre suportes: é comum haver surpresas quanto às cores de uma mesma imagem quando impressa em papel, registrada em slide ou exibida em vídeo. Isto se deve ao fato de que o usuário elabora a imagem no monitor e depois a transporta para os outros tipos de periféricos. Como o conjunto de cores representáveis num monitor é muito maior do que nos demais equipamentos, as cores que não têm correspondência ficam diferentes. É difícil prever a cor resultante, problema grave enfrentado principalmente na área de editoração eletrônica. Para mais detalhes sobre as diferenças entre as gamas de cores representáveis nos diversos tipos de equipamentos ver [THORELL; SMITH 90] e [BAILEY 93].

Na tentativa de minimizar este problema, atualmente busca-se *portabilidade de cor*, que só será obtida através do desenvolvimento de modelos precisos de representação baseados na percepção humana, independentes desta ou daquela tecnologia. Um exemplo é o diagrama CIE, comentado na seção 4.2.2 (ver [SANTISTEBAN 83] para uma discussão mais profunda).

Um outro aspecto importante da geração de cores em qualquer tipo de suporte diz respeito à *não-linearidade* da reprodução de intensidades. De maneira geral, isto

significa que a adição de duas componentes duas vezes mais intensas não produz uma cor duas vezes mais intensa. No caso de monitores de raios catódicos, por exemplo, aumento de voltagem não corresponde a aumento proporcional de intensidade da luz emitida pelo ponto de fósforo.

Este fenômeno é em geral associado ao símbolo λ (*gamma*), e sua compensação referida como *correção gamma*. Esta compensação em geral consiste em trabalhar com escalas logarítmicas ao invés de lineares, o que geralmente é feito pelo próprio equipamento, em tabelas. É possível ainda realizar esta correção por software, o que permite combinar numa só operação também a compensação da não-linearidade da percepção humana (ver capítulo 5).

[POYNTON 94] apresenta detalhadamente os aspectos importantes da não-linearidade sob diferentes pontos de vista, a saber: Física, percepção humana, fotografia e vídeo.

4.2 Modelos para representação de cor

Para que programas possam manipular cores é necessário que estas sejam representadas por modelos numéricos. Assim, a representação de uma imagem na memória seria uma matriz bidimensional de elementos contendo o código numérico da cor em cada posição. Este código em geral corresponde a coordenadas de um ponto num sistema de referência cartesiano, chamado de *espaço de cor*, cuja forma e valores variam conforme o modelo utilizado (os termos *modelo* e *sistema* de representação de cor serão aqui usados indistintamente).

A seguir serão apresentados os modelos de representação de cor mais populares na área de Computação Gráfica. Alguns deles apresentam vantagens em relação a determinados aspectos, o que será enfatizado no decorrer do texto (ver [SCHWARZ; COWAN; BEATTY 87] para uma comparação entre os modelos).

4.2.1 Sistemas RGB e CMY

Estes são os sistemas mais adequados para interface com monitores gráficos e impressoras, respectivamente, pois representam diretamente a maneira como se processa a geração de cores por combinação de primárias de cor-luz e de cor-pigmento.

No sistema RGB, os eixos correspondem às componentes aditivas (Vermelho, Verde e Azul), sendo as cores formadas por coordenadas (r,g,b) que indicam uma ponderação das primárias. Normalmente os valores nos eixos variam entre zero e um, podendo ser representados também através de inteiros no intervalo $[0,255]$. O espaço de cores assim formado é um cubo; nos vértices estão as cores primárias, as secundárias, o preto e o branco. A fig. 4.1 mostra o cubo e as coordenadas destas cores no sistema RGB.

Os valores das coordenadas neste sistema indicam a quantidade de cada componente necessária para produzir determinada cor, podendo ser usados para

diretamente alimentar conversores de sinal digital-analógico e assim controlar o equipamento que excita a substância emissora de luz na tela de monitores.

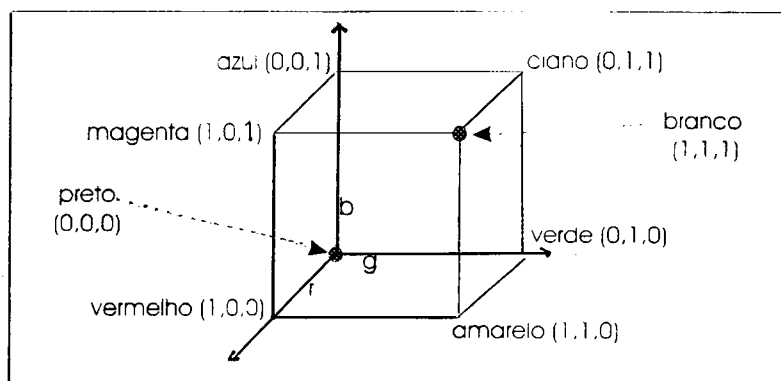


Figura 4.1 - Sistema RGB

Apesar de eficiente em termos de hardware, este sistema não é intuitivo, sendo difícil controlar os valores para gerar a cor desejada. Já o sistema CMY é mais familiar às pessoas, devido à prática infantil de misturar tintas. Este é o sistema natural para a representação de cores que deverão ser impressas com tinta ou pigmentos. A função dos pigmentos depositados sobre a superfície dos objetos é refletir seletivamente a luz incidente, que em geral é branca. Este processo pode ser visto como uma *filtragem* de determinadas frequências do espectro, também chamado de *subtração*. Exemplo: o pigmento amarelo as frequências referentes à cor azul, e reflete apenas as vermelhas e verdes. Assim, a impressão de verde é obtida pela mistura de pigmento amarelo (filtra azul) e ciano (filtra vermelho); o resultado é que a luz refletida conterá apenas frequências na região do espectro correspondente ao verde.

O espaço de cores CMY também é um cubo com as cores primárias, secundárias, preto e branco, porém em locais diferentes do sistema RGB. Na origem localiza-se a cor branca, e os eixos representam as componentes subtrativas (Ciano, Magenta, e Amarelo). A mesma figura 4.1 pode ser interpretada para visualizar o sistema CMY, a partir de uma transformação geométrica do sistema RGB.

A transformação entre sistemas de referência neste caso é simples, e consiste em apenas uma translação representada matricialmente da seguinte forma:

$$[c\ m\ y] = [1\ 1\ 1] - [r\ g\ b] \quad (\text{eq. 2})$$

É importante que estas transformações de sistemas de referência possam ser realizadas para permitir que a imagem seja gerada ou armazenada num sistema mais adequado à aplicação e que depois seja convertida para o sistema adequado à exibição ou impressão. Nas seções a seguir serão apresentados outros modelos que podem ser igualmente convertidos de/para os sistemas RGB (e conseqüentemente CMY). Mais detalhes sobre estas conversões podem ser obtidos em [SMITH 78], [JOBLOVE; GREENBERG 78] e [FOLEY et al. 90].

Note-se, no entanto, que a existência de equações para a conversão entre sistemas de referência não garante que as cores apresentadas pelos periféricos sejam percebidas da mesma maneira. Estes sistemas consideram situações ideais para a reprodução de cores, o que na prática não acontece. Devido às limitações

anteriormente mencionadas, a apresentação em determinado periférico pode implicar em alteração das cores, mesmo quando a representação numérica é idêntica.

4.2.2 Espaços perceptuais de cor

Muito antes do assunto ser tratado no âmbito da Ciência da Computação, já havia preocupação com a representação precisa de cores e com formas de quantificação que expressassem diferenças entre cores em termos perceptuais, e não puramente numéricos.

Em 1905 Munsell publicou um sistema de nomenclatura de cores que serviu como base para o sistema adotado pelo National Bureau of Standards dos Estados Unidos da América do Norte [MUNSELL A.H. A Color Notation. apud JOBLOVE; GREENBERG 78]. O sistema baseia-se em três parâmetros: matiz (*hue*); saturação ou pureza (*chroma*); e intensidade ou valor (*value*). Esta foi a primeira proposta de sistema perceptual para representação de cores, pois baseia-se na aparência das mesmas para a medida dos parâmetros. Como pode ser observado, tais parâmetros são semelhantes àqueles usados para qualificar cores-luz (ver capítulo 3), porém neste caso são usados para cores-pigmento.

O espaço de cores aproxima-se de uma esfera que tem branco num dos pólos e preto no outro. O branco corresponde à saturação mínima, e o preto, ao valor máximo (ou brilho mínimo). Os matizes são dispostos radialmente, obedecendo à ordem no espectro (ver fig. 4.4). O sistema proposto por Munsell inspirou a definição do sistema HSV, descrito na seção 4.2.4.

Munsell publicou o livro "The Munsell Book of Color", cujas páginas contêm planos do espaço perceptual onde um dos parâmetros foi fixado. Exemplo: uma página com todas as tonalidades de determinado amarelo, dispostas conforme a saturação e brilho. A imagem resultante assemelha-se à forma como os programas de pintura atualmente apresentam a palheta de cores.

O sistema CNS (Color Naming System) situa-se na mesma linha do sistema de Munsell, porém adota palavras da língua inglesa ao invés de números para quantificar os parâmetros [MURCH 83]:

- matiz: yellow, green, etc., com sufixo *ish* para cores intermediárias
- brilho: permite cinco intensidades (very dark, dark, medium, light, very light)
- saturação: usa quatro níveis (grayish, moderate, strong, vivid).

Este sistema possibilita a nomenclatura de até 627 cores com expressões do tipo: *grayish dark red*; *vivid light yellowish-green*, etc.

4.2.3 Sistema CIE

Em 1920 foi fundada a Comissão Internationale de L'Éclairage, denominada "CIE", que tem representantes de diversos países e se destina à padronização da métrica de cores. A proposta é definir um sistema que possibilite tanto a especificação

matemática de cores, como também a visualização das relações de ordem entre elas num diagrama.

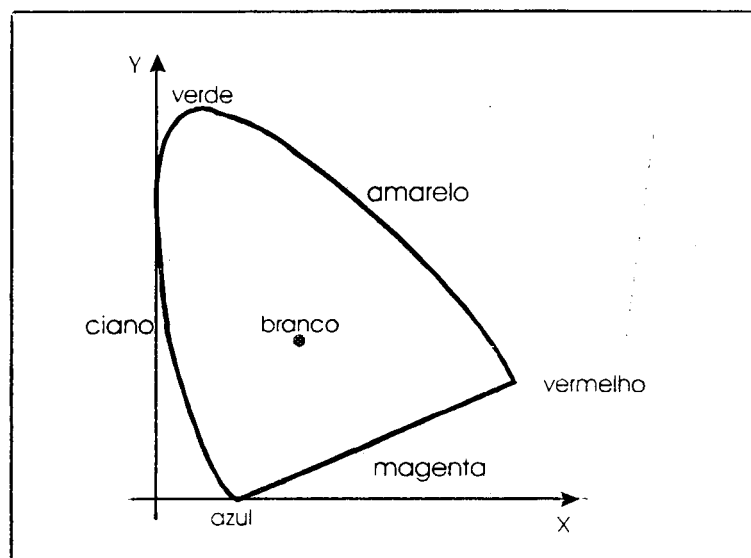


Figura 4.2 - Diagrama CIE

Esta comissão desenvolveu diversas experiências que obtiveram resultados muito importantes para a colorimetria, entre eles a determinação das funções de resposta dos diferentes sensores cromáticos existentes no olho humano e a definição de um sistema denominado CIE [POYNTON 94].

O diagrama CIE, especificado em 1931, apresenta as cores num plano, cujos eixos representam a *croma* propriamente dita depois de retirada a informação referente à *intensidade* da cor. Estas novas primárias são chamadas de X e Y (ver fig. 4.2). As cores puras estão localizadas sobre a linha em forma de ferradura, que delimita a região das cores perceptíveis pelo sistema visual humano normal. O branco é localizado no centro, e a saturação das cores cresce em direção à linha do contorno.

Como pode ser observado, o diagrama CIE permite a apresentação de todas as cores num plano, ao contrário do que acontece nos sistemas RGB, HSV e Munsell. Isto é possível porque a intensidade (ou luminância) das cores foi fixada no plano representado no diagrama; se a intensidade for considerada, o espaço de cores CIE transforma-se num sólido em forma semelhante a um cone, sendo o preto localizado no vértice.

Uma das importantes aplicações deste diagrama é possibilitar a comparação dos conjuntos (ou gama) de cores representáveis em diferentes equipamentos. Tais conjuntos são representados por polígonos cujos os vértices correspondem à posição das cores primárias no diagrama CIE. A figura 4.3 mostra de forma aproximada os conjuntos de cores representáveis num monitor de fósforo convencional e numa impressora colorida. Representados assim, fica clara a diferença de gama de cores entre os dois tipos de equipamentos.

Através do diagrama é possível também determinar uma política para substituição das cores que não têm representação no conjunto de menor resolução. Um exemplo

seria traçar uma reta entre a cor original e o branco, escolhendo como substituta a cor na interseccção desta reta com o polígono-destino [BAILEY 93].

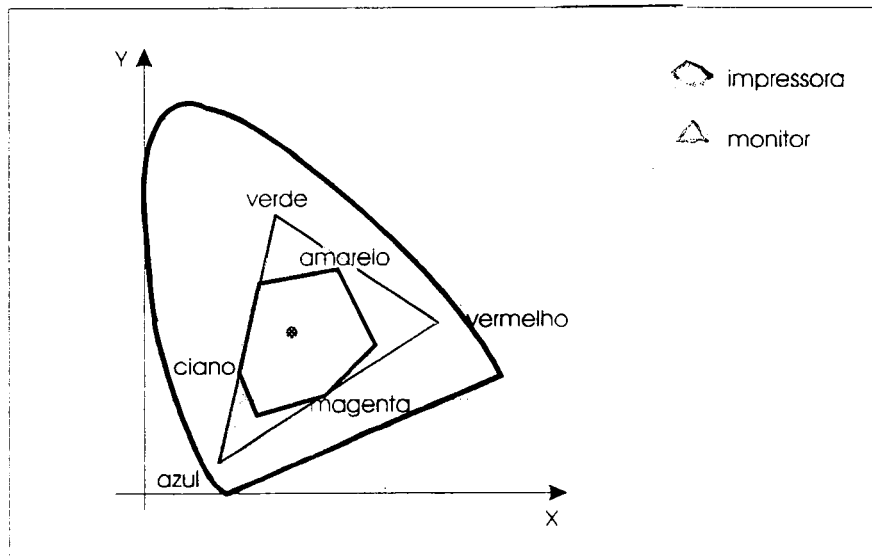


Figura 4.3 - Comparação de gama de cores em monitores de fósforo e impressoras

Apesar de interessante, o diagrama CIE não satisfaz plenamente as necessidades da colorimetria, e por isto tem sido aperfeiçoado para gerar novas propostas como CIE-LUV, CIE-LAB e CIE-UCS. [THORELL; SMITH 90] e [HALL 89] apresentam mais detalhes sobre a forma como o diagrama original e seus derivados foram obtidos.

Curiosidade: [JOBLOVE; GREENBERG 78] comentam brevemente o diagrama CIE e afirmam que "sua utilidade para área de Computação Gráfica ainda não havia sido comprovada". Dois anos depois, [MEYER; GREENBERG 80] desenvolvem especificamente o tema de espaços perceptuais de cor, apresentando detalhes do mesmo diagrama CIE. Atualmente especula-se que este tipo de diagrama é um caminho para a obtenção da portabilidade de cor, comentada na seção 4.1.

4.2.4 Sistemas HSV e HSL

Estes sistemas baseiam-se no modelo intuitivo de cor e propiciam controle mais natural para seres humanos. Os parâmetros são semelhantes aos utilizados por Munsell para qualificar cores.

O modelo HSV (Hue, Saturation, Value) baseia-se no sistema de Munsell, onde as cores são definidas em termos de matiz, pureza e intensidade (aqui chamada de "valor").

O *matiz* ou *hue* é representado por um ângulo (entre zero e 360°) num disco em que as cores são dispostas na mesma ordem em que aparecem no espectro. Este disco na realidade origina-se do hexágono derivado de um plano ortogonal à diagonal $(0,0,0)-(1,1,1)$ do cubo correspondente ao espaço RGB (ver fig. 4.1 e 4.4).

De forma grosseira, a *pureza* determina o quanto a cor se afasta do branco: um significa cor pura; zero representa a cor branca, não importando o matiz. A medida

geométrica da pureza é a distância da cor ao centro do disco. O parâmetro valor indica a intensidade da cor: zero corresponde ao preto; um representa a intensidade máxima.

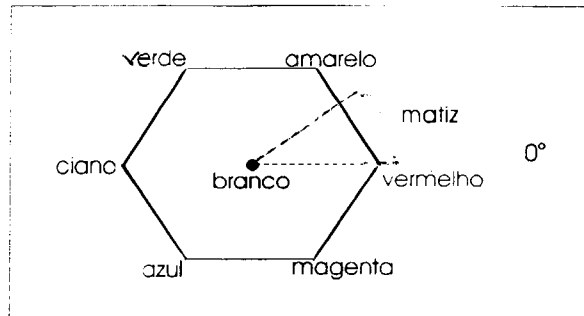


Figura 4.4 - Hexágono de Matizes

O sólido correspondente ao sistema HSV é um cone invertido ou uma pirâmide de base hexagonal, conforme o formato do polígono utilizado para representação dos matizes. A diferença entre a base circular ou hexagonal reside na forma de codificação da saturação, conforme detalhado em [JOBLOVE; GREENBERG 78]. Em ambos os sistemas, os tons de cinza localizam-se sobre o eixo central (ver fig.4.5).

O modelo HSL (Hue, Saturation, Lightness), também chamado de HSI (Hue, Saturation, Intensity), modela as cores nos mesmos termos usados para luz (ver capítulo 3). A diferença em relação ao sistema HSV está no parâmetro de intensidade, luminância ou valor da cor; no HSV a intensidade máxima é representada por 1, enquanto que no HSL/HSI a intensidade máxima é 0.5. Esta pequena diferença resulta em espaços de cor diferentes, como pode ser observado na fig. 4.5. A representação tridimensional do sistema HSL corresponde a dois cones (ou pirâmides hexagonais) justapostos pela base.

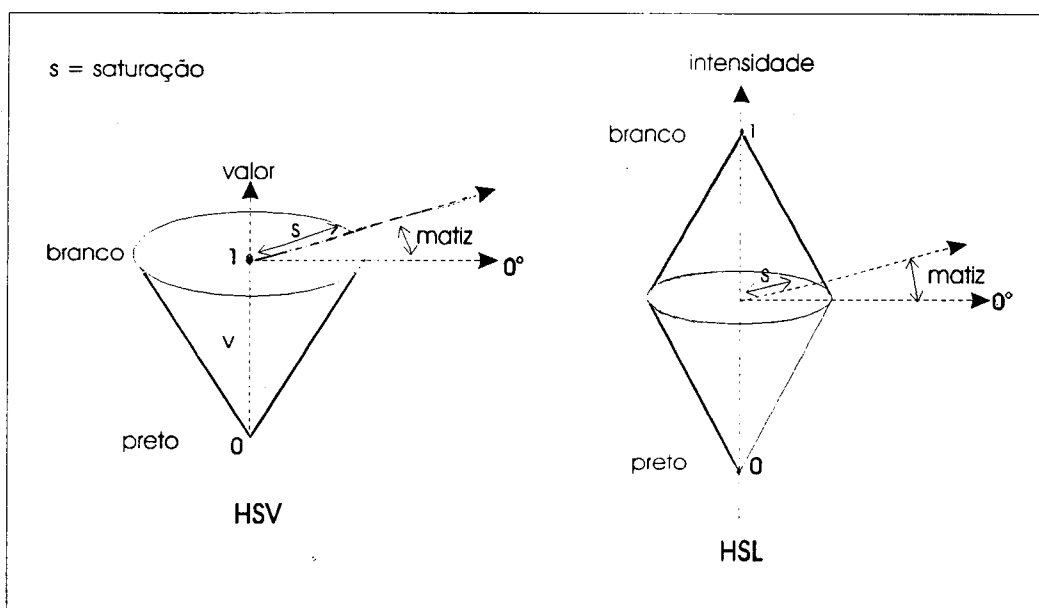


Figura 4.5 - Sistemas HSV e HSL

5 PERCEPÇÃO DE COR

O sistema visual humano é complexo e apresenta características curiosas, sendo, por isso, um assunto muito interessante. Seria necessário, no entanto, mais do que um capítulo (ou mesmo um livro) para apresentar este tema com a merecida profundidade. Por esta razão, este texto será limitado à apresentação dos aspectos mais relevantes para a compreensão das recomendações sobre o uso de cores apresentadas no capítulo 6. Mais detalhes sobre este assunto podem ser encontrados em [MURCH 84], [BROU et.al. 86], [LIVINGSTONE 88] e [THORELL; SMITH 90].

A percepção de cores ocorre como resultado de propriedades do sistema nervoso, que é estimulado diferentemente pelos comprimentos de onda presentes na luz.

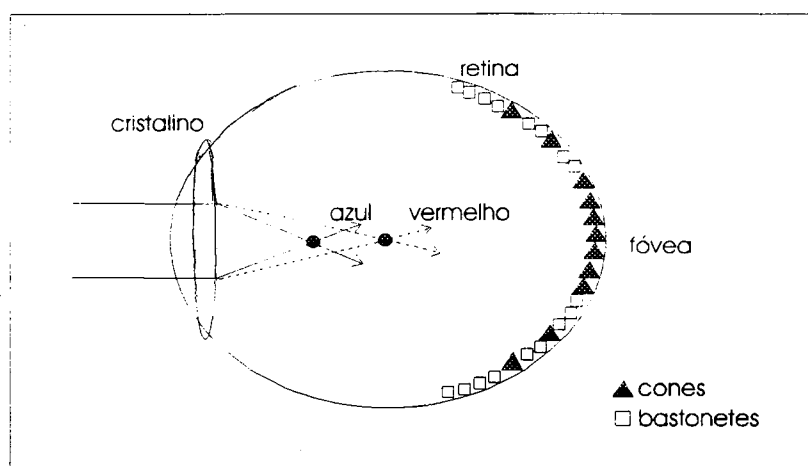


Figura 5.1 - Esquema Simplificado do Olho Humano

Um esquema simplificado do olho humano é apresentado na figura 5.1. Os principais componentes são o *cristalino*, que converge os raios de luz para a *retina*, onde estão localizados os sensores de luminosidade (bastonetes ou *rods*) e de cor (*cones*). Estes sensores transmitem o estímulo ao cérebro pelo nervo óptico, onde a visão acontece efetivamente. A fisiologia destes componentes determina as características curiosas da percepção de cor que serão apresentadas a seguir.

5.1 Cristalino

A lente direciona os raios de luz para a retina e, como qualquer lente, focaliza diferentes comprimentos de onda em diferentes posições. Isto significa que cores puras são focadas no olho em diferentes locais, sendo necessária constante acomodação do cristalino pelos músculos do olho a fim de manter as imagens em foco. Quando há uma variação muito grande no comprimento de onda em áreas adjacentes (azul e vermelho, por exemplo), o olho não consegue manter o foco na linha divisória, e a imagem parece borrada. Pelo mesmo motivo, as pessoas muitas vezes têm a sensação de que objetos estão à frente de outros que, na realidade, estão localizados no mesmo plano. Este efeito é chamado de *cromoestereoscopia* e

pode ser explorado para induzir o espectador à sensação de profundidade em imagens planas.

Outra característica da lente do olho humano afeta diretamente a percepção de cor: as diferentes faixas do espectro não são transmitidos igualmente, sendo as freqüências na faixa dos azuis mais absorvidas do que na faixa dos vermelhos e verdes. Com o envelhecimento, esta característica se acentua devido ao *amarelamento* da lente, o que reduz ainda mais a percepção da cor azul.

5.2 Retina

É na retina que efetivamente inicia a percepção de cor. Sobre a retina estão dispostos pigmentos foto-sensíveis de dois tipos, chamados de cones e bastonetes devido a sua aparência. Os *bastonetes* são sensíveis a pequenas variações de intensidade, sendo responsáveis pela visão noturna, que é essencialmente monocromática. Os *cones* são seletivamente sensíveis a diferentes comprimentos de onda da luz, sendo por isto responsáveis pela visão colorida.

Existem três tipos de cones, cada um com sensibilidade acentuada em uma faixa do espectro (baixas, médias e altas freqüências). São grosseiramente chamados de *vermelho*, *verde* e *azul*, embora os picos de sensibilidade de cada tipo sejam respectivamente amarelo (575 nm), verde (535 nm) e azul (445 nm). Este fato deu origem à *teoria do tri-estímulo*, que afirma ser possível produzir a sensação de qualquer cor pela combinação ponderada de três estímulos, chamados de luz vermelha, verde e azul (sistema RGB, ver seção 4.2.1).

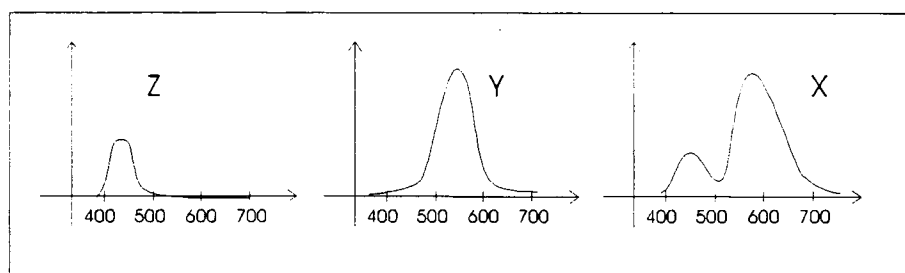


Figura 5.2 - Funções de Resposta Espectral dos Cones

A distribuição de cones e bastonetes na retina é outro importante aspecto a considerar. Há muito mais bastonetes do que cones na retina, o que significa que a visão humana se processa, em grande parte, com informação monocromática. [LIVINGSTONE 88] mostra que na realidade a forma, movimento e profundidade são completamente processados apenas com base nas diferenças de intensidade luminosa presentes na imagem - ou seja, com informação monocromática.

Outro aspecto interessante é que estes elementos não são uniformemente distribuídos na retina. Na fóvea (região central da retina) praticamente não há bastonetes, o que torna a visão totalmente dependente da cor nesta área. Na extrema periferia ocorre o inverso: não há cones, sendo percebidas apenas as diferenças de intensidade luminosa.

Além disto, o número de cones de cada tipo não é igual. Aproximadamente 64% do total são sensíveis ao vermelho, 32% ao verde e apenas 2% ao azul, sendo maior a proporção de cones azuis na região periférica da retina do que na fóvea. Uma consequência disto é a dificuldade em enxergar objetos pequenos e azuis no centro do campo de visão; a dificuldade é ainda maior se o azul for puro, pois neste caso o sistema visual tem pouca luminosidade para processar o contorno e assim reconhecer a forma. [MURCH 84] apresenta um diagrama que mostra sensibilidade a cores conforme o ângulo de visão.

Os percentuais aqui apresentados correspondem à situação de visão normal, consideradas as variações naturais entre as pessoas. Grandes desvios, no entanto, são considerados *daltonismo*, o ocorre com maior frequência em homens do que em mulheres. Devido à irregularidade da distribuição e da quantidade de cones de cada tipo, é mais comum que pessoas com alguma espécie de daltonismo tenham dificuldade em ver vermelho ou verde do que azuis.

5.3 Além da retina

A percepção de cor, entretanto, não acontece apenas nos cones, mas sim em uma rede de células neurais que processam os sinais gerados por estes. Como todos os tipos de cones são sensíveis (mesmo que minimamente) a todas as frequências do espectro visível, o sinal gerado por eles é ambíguo em termos de cor. Por isto estes sinais precisam ser comparados pelas células para determinar relações que efetivamente indiquem a cor percebida. Se o sinal enviado pelos cones vermelhos é forte e o dos cones azuis e verdes é fraco, por exemplo, a pessoa percebe vermelho; se os sinais dos cones vermelhos e verdes forem fortes e o dos azuis fraco, a cor percebida é o amarelo; e assim por diante.

Este processo é ilustrado na figura 5.3 e denominado de *oponência de cor* (opponent color). Um tipo de célula soma os estímulos enviados pelos três tipos de cones para determinar a intensidade luminosa da cor. Note-se que a contribuição do azul para a intensidade é mínima devido ao pequeno número de cones sensíveis a esta faixa do espectro.

Outro tipo de célula recebe estímulos dos cones verdes e vermelhos e um sinal inibidor dos cones azuis; esta célula é capaz de determinar a relação entre a quantidade de amarelo (verde+vermelho) e azul.

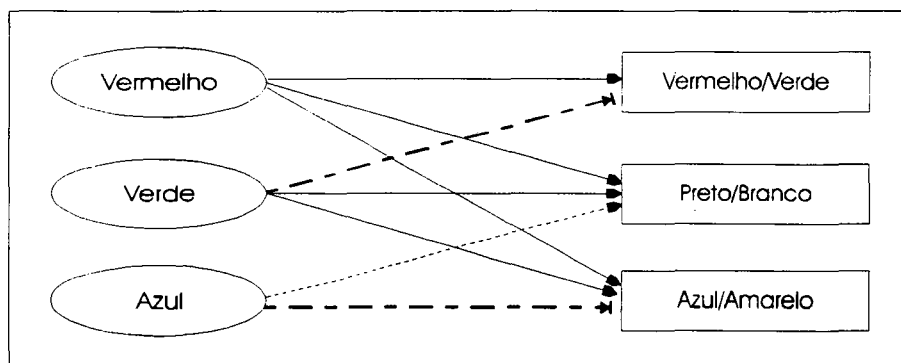


Figura 5.3 - Canais Opostos

O terceiro tipo recebe estímulo dos cones vermelhos e um sinal inibidor dos cones verdes, sendo assim capaz de determinar a relação entre estas duas componentes [THORELL; SMITH 90].

Estas células produzem como resultado valores que indicam as seguintes taxas: preto/ branco, amarelo/azul e vermelho/verde, que são por sua vez transmitidas ao cérebro, onde a sensação de cor é produzida. A teoria da oponência de cor foi usada como base para a definição de um novo modelo de representação de cores, supostamente mais intuitivo devido à estreita relação com o funcionamento do cérebro humano. [SCHWARZ; COWAN; BEATTY 87] relata experiências com este sistema.

5.4 Não-linearidade da percepção

A percepção humana não é linear, fato que verifica-se não só na visão, como também no olfato, audição e percepção de peso [POYNTON 94]. Assim sendo, para apresentar uma escala de cores em que a intensidade seja linearmente crescente, é necessário realizar algum tipo de compensação, semelhante à correção gamma mencionada na seção 4.1. Em geral, esta correção é realizada em software, através da definição de uma tabela programada previamente com valores que crescem exponencialmente. Cada entrada desta tabela produz uma intensidade com distância perceptual constante em relação às entradas adjacentes. Os valores desta tabela podem combinar correções que compensem não só a não-linearidade da percepção humana, como também a do meio usado para apresentação da imagem.

5.5 Cor inexistente

[PEDROSA 82] é um livro dedicado às *ilusões de ótica* decorrentes de peculiaridades do sistema visual humano e por ele denominadas de *cor inexistente*. As ilusões referem-se a cores que não estão fisicamente presentes na cena, mas que ainda assim são percebidas em decorrência do funcionamento do sistema visual humano. Elas vêm reforçar a afirmação de que "a cor, como a beleza, está no olho de quem vê" [BROU et.al. 86], além de contrariar uma noção básica adotada na síntese de imagens realísticas de que "a cor depende [apenas] da luz refletida pelo objeto e que, de alguma forma, atinge o olho do observador" [FOLEY et.al. 90]. A percepção de cores, na verdade, combina estas duas idéias.

Grande parte das ilusões decorrem do fato de que a cor não é percebida em pontos isolados e independentes dos vizinhos, tal como seria possível conceber num ambiente discreto. Antes de tudo, a visão é um processo dinâmico, que acontece continuamente no tempo e no espaço, sendo capaz de adaptar-se ao ambiente. Por causa disto, as vizinhanças espacial e temporal das cores (assim como de outros aspectos da imagem) são determinantes para sua percepção e podem causar sensações que, por não serem completamente compreendidas por nós, são denominadas de *ilusões*.

[BROU et.al. 86] apresenta uma hipótese para o funcionamento do sistema visual que tenta explicar como e porque estas ilusões acontecem. Em linhas gerais, descreve um sistema baseado em células capazes de identificar a luminosidade em diferentes bandas do espectro visível. Estas células estariam organizadas numa rede e conectadas às adjacentes. Cada célula seria capaz de ajustar-se à luminosidade do ambiente (vizinhança espacial) e reportar às vizinhas a variação sofrida em relação ao estado anterior (vizinhança temporal). Esta proposta tem respaldo em fenômenos observados na realidade, como a constância de cor e sombras coloridas.

Constância de cor refere-se à constatação de que uma cor é percebida da mesma maneira, mesmo quando vista sob diferentes condições de iluminação. Se a percepção dependesse unicamente da luz refletida por um corpo, o olho humano seria sensível à diferença de cor entre uma roupa branca vista ao ar livre ou dentro de uma sala iluminada com lâmpada incandescente. A distribuição espectral da luz que atinge o olho nos dois casos é diferente, mas ainda assim a cor é percebida como branco, simplesmente. Este fenômeno é explicado pelo fato de que o sistema visual é capaz de compensar a iluminação ambiente, adaptando-se para medir os contrastes de cor, e não a cor absoluta. Por este motivo, a iluminação ambiental deve ser mantida baixa quando é desejável que pequenas diferenças entre cores sejam percebidas, principalmente em aplicações de visualização científica, onde muitas vezes estas variações refletem aspectos importantes dos dados.

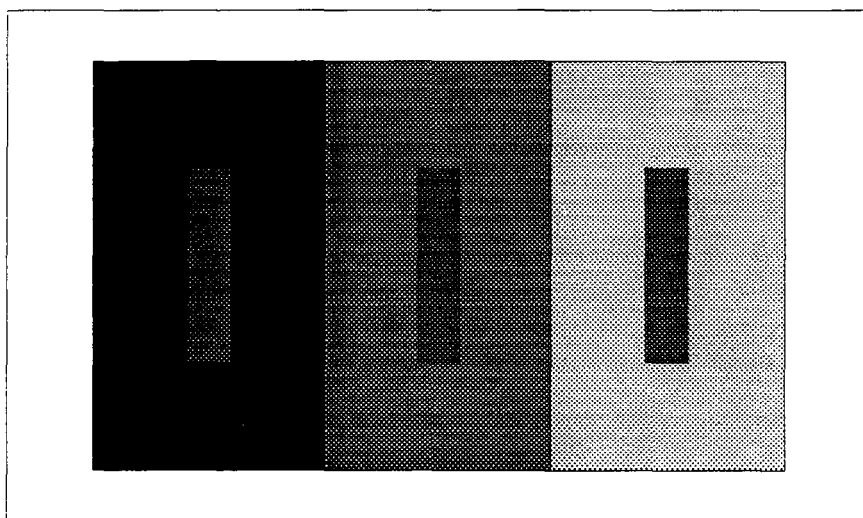


Figura 5.4 - Constraste Simultâneo

Sombras coloridas referem-se ao caso inverso: um mesmo estímulo (luz) é percebido diferentemente conforme as cores das regiões vizinhas. Este fenômeno reforça a tese de que a percepção de cores é relativa, e não absoluta. É por este motivo, por exemplo, que os olhos das pessoas parecem mais claros quando elas estão bronzeadas, ou que elas parecem mais bronzeadas quando vestem roupas claras. A fig. 5.4 apresenta um exemplo: o retângulo pequeno tem a mesma intensidade nos três casos, mas aparenta luminosidades diferentes em função da área em que se encontra.

O fato mais curioso é que, além do brilho, pode também ocorrer mudança de matiz, pois uma região tende a ser percebida com a cor complementar à da vizinhança. Este efeito pode ser constatado da seguinte maneira: disponha um pequeno quadrado branco em meio a uma grande área verde: ao invés de branco, a cor percebida tenderá ao magenta (ou rosa), cor complementar ao verde.

Observa-se o mesmo efeito ao longo do tempo, sendo então chamado de imagem posteriore (*after image*). Depois de fixar o olhar numa área verde durante algum tempo, a tendência será perceber áreas brancas com tonalidade rósea (ou magenta), numa clara indicação de que o cérebro continuamente compara os estímulos vizinhos no tempo e no espaço para produzir sensação de cor.

Há ainda o efeito "Mach Band", em que as discontinuidades de intensidade são acentuadas pela percepção. A fig. 5.5 mostra uma rampa de tons de cinza onde notam-se claramente faixas mais claras nas arestas entre duas regiões de intensidades diferentes.

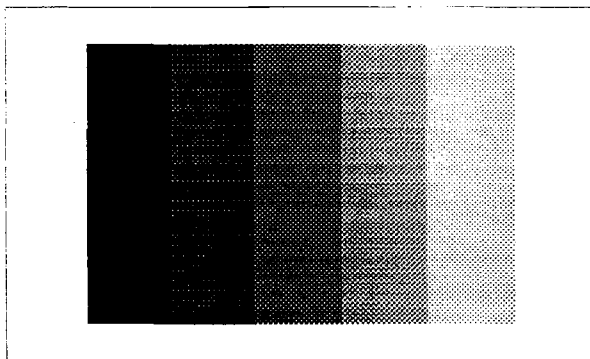


Figura 5.5 - Efeito "Mach band"

As implicações destes fenômenos para a área de visualização de dados é enorme. Se estes aspectos forem ignorados, é possível que a imagem sintetizada induza o observador a uma sensação diversa daquela pretendida pelo programa (ou programador), prejudicando a compreensão dos dados.

6 RECOMENDAÇÕES PARA USO DE COR

Os diversos aspectos até agora apresentados influenciam significativamente a eficácia do uso de cores para apresentação de dados. É preciso respeitar as limitações dos programas e equipamentos em que a imagem será gerada, além de considerar as peculiaridades da percepção humana envolvidas.

As diversas fontes consultadas para a elaboração deste texto ([SAMIT 83], [MURCH 84], [FOLEY; GRIMES 88], [PASTOOR 90], [THORELL; SMITH 90], [TUFTE 90], [RICE 91] e [BAILEY 93]) apresentam extensas listas de recomendações para o uso eficaz de cor no planejamento de imagens ou de interfaces gráficas. Todas as regras e sugestões são baseadas em experiências para medida da eficácia do uso de cor para a interpretação, identificação e aceitação de imagens. Curiosamente, porém, os resultados obtidos pelos experimentos por vezes foram diferentes ou até mesmo contraditórias. Esta constatação pode significar diversas coisas, entre elas que não há ainda critérios indiscutíveis para a escolha do melhor conjunto de cores ou avaliação da eficácia de seu uso. Aparentemente estas recomendações variam conforme o objetivo e o ambiente em que a cor é empregada, incluídos aí também os aspectos culturais.

O panorama geral é de fato confuso, porém há algumas regras básicas que podem ser seguidas para minimizar a probabilidade de causar estragos pelo incorreto uso da cor. A seguir serão enumeradas apenas aquelas recomendações mais gerais, cuja aplicação é indiscutível na maioria dos casos de visualização de dados. As regras foram organizadas em três grupos: uso de matizes, uso de brilho/saturação e outras.

6.1 Uso de matizes

Os matizes em geral são empregados para diferenciar os elementos da cena, facilitando sua identificação e reconhecimento pelo observador. Para que a codificação em matizes seja eficiente, é necessário que o observador seja capaz de rapidamente associar "significado" às diversas cores apresentadas, e para tal as seguintes recomendações devem ser observadas:

- 1) mantenha consistência no emprego das cores, pois isto permite ao usuário memorizar seu significado e fazer a associação correta com rapidez. Exemplo: sempre mostrar as mensagens de erro em vermelho.
- 2) use as cores de forma natural, seguindo os padrões existentes. Algumas cores por si só invocam sensações como frio (azul); quente (vermelho); perigo (vermelho); ligado (amarelo, branco); desligado (preto); pesado, distante, profundo, alto (cores escuras); leve, próximo, raso, baixo, grande (cores claras). Há também os significados particulares a determinadas áreas profissionais: o vermelho significa "perigo" em processos industriais, "deficitário" na Economia e "saudável" na Medicina. É importante considerar a codificação natural para evitar que a cor cause uma sensação incorreta no observador.
- 3) use o menor número possível de matizes diferentes para identificar elementos da imagem. O limite de 5 a 9 matizes deve ser observado se o significado de cada

um tiver que ser lembrado pelo usuário (para identificação de objetos, por exemplo). Use legendas para as cores se o significado não for óbvio ou quando mais de 5 cores simultâneas tiverem que ser lembradas.

- 4) use cores neutras no fundo, preferencialmente cinza. Isto facilita a sobreposição de outras cores na imagem, além de diminuir a fadiga visual.
- 5) use pequenas diferenças de matiz para codificar pequenas variações nos dados (ex. verde-azul), mantendo distância entre elas para que sejam discerníveis. Cerca de 10 matizes eqüidistantes podem ser diferenciados pelo olho normal.
- 6) use cores complementares para salientar diferenças (ciano/vermelho, amarelo/azul). Cores distantes no espectro são mais facilmente discerníveis, devendo ser usadas para codificar variações significativas nos valores dos dados.
- 7) cuidado ao usar azul. Como o olho humano é menos sensível a esta cor, deve-se evitar o uso de azul saturado em áreas muito pequenas ou em movimento, assim como a diferenciação de cores em áreas adjacentes apenas por esta componente. Azuis desaturados devem ser preferidos aos demais tons, pois a mistura com outros comprimentos de onda facilitam a detecção da luminosidade e conseqüentemente da forma do objeto, resultando em maior nitidez;
- 8) evite o uso de cores extremas do espectro em áreas adjacentes, pois a necessidade de continuamente focar a imagem causa fadiga visual (ver seção 5.1).
- 9) lembre-se de que as cores não são mais identificadas a partir de certo tamanho, sendo que algumas desaparecem antes das outras, como o azul. Este fato deve ser levado em conta para a escolha de cores conforme a espessura de linhas, tamanho de marcas e de texto, devendo-se evitar diferenciação de elementos muito pequenos apenas pela cor.

6.2 Uso de brilho e saturação

Brilho e saturação afetam a legibilidade da imagem porque a percepção de formas, profundidade e movimento depende do contraste de intensidade. Por este motivo, para garantir o reconhecimento dos contornos dos elementos de uma imagem é necessário que as regiões adjacentes apresentem significativo contraste de brilho e/ou saturação, além do contraste de matiz. As seguintes regras particularizam esta recomendação geral de diferentes maneiras:

- 1) use brilho e diferenças de matiz para maximizar a discriminação de áreas da imagem que representam dados muito diferentes. Esta regra aplica-se principalmente à diferença entre cor de desenho e de fundo, muito importante para a legibilidade de texto, linhas finas e regiões pequenas. Por este motivo, prefira cores neutras e desaturadas para o fundo, o que facilita a escolha das demais cores do desenho.
- 2) para salientar bordas entre regiões de cores semelhantes, use uma linha em cor neutra (preto, branco ou cinza). Isto ajuda o sistema visual a detectar a forma, independentemente do contraste cromático entre as áreas.

- 3) use cores brilhantes e saturadas para atrair a atenção e aumentar a retenção da informação.
- 4) use diferentes intensidades de um mesmo matiz para aumentar ou diminuir a visibilidade de um objeto na imagem (por exemplo, para ativar ou desativar opções de um menu).
- 5) reduza a iluminação ambiental ao mínimo possível para possibilitar a discriminação entre cores com pequenas diferenças de saturação.

6.3 Outros comentários importantes

- 1) lembre-se de que as cores da vizinhança de um objeto podem alterar a percepção de sua cor. Por isto, áreas separadas podem parecer ter cores diferentes, mesmo que a cor efetivamente presente na imagem seja a mesma em termos físicos. Neste caso, a diferença pode se manifestar como alteração da intensidade ou do matiz, com tendência à complementar da cor da vizinhança.
- 2) sempre que possível, use redundância na codificação dos dados, diferenciando-os pela cor e algum outro atributo (como forma ou tamanho). Isto de maneira geral facilita a compreensão da imagem, mas principalmente possibilita o uso do sistema por pessoas com alguma espécie de daltonismo. Outra vantagem da redundância é permitir a reprodução das imagens em preto e branco, característica desejável para a divulgação de textos científicos.
- 3) esteja atento às diferenças entre as gamas de cores dos diversos periféricos onde a imagem será apresentada. [ROBERTSON 87] e [RHEINGANS 92] comentam a importância da determinação precisa da gama de cores disponíveis em termos da percepção humana. Ambos apresentam sistemas em que o usuário tem instrumentos para visualizar e controlar parâmetros que determinam o conjunto de cores a ser empregado na codificação dos dados. Segundo estes autores, este ponto é fundamental para a correta interpretação da imagem e dos dados nela representados.

7 EXEMPLOS DO USO DE COR EM VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Na área de Visualização Científica é comum o uso da cor como auxílio à apresentação dos dados, mas em apenas poucos trabalhos observa-se preocupação explícita com a eficiência ou correção do conjunto de cores empregado. Isto não significa que nos demais casos as cores tenham sido necessariamente usadas de maneira incorreta ou negligente, mas de fato sugere. Por esta razão, o tema tem sido abordado em vários painéis em congressos realizados recentemente, visando sensibilizar a comunidade científica sobre o assunto.

Nas seções seguintes são comentados trabalhos em que a preocupação com o correto uso de cor é evidente. A seção 7.1 discute a construção de rampas, onde a escolha de cores e tonalidades é muito importante para a correta interpretação dos dados apresentados. A seção 7.2 apresenta alguns exemplos claros de aplicação das recomendações do capítulo 6.

7.1 Construção de rampas

Rampas são seqüências de cores diferentes normalmente usadas para codificar conjuntos de dados com alguma ordenação natural [WARE 88]. Valores dos dados são associados a cores, sendo ambos indicadas por meios de intervalos. Normalmente apenas alguns valores e cores são informados, sendo os demais obtidos por algum tipo de interpolação. O resultado é uma seqüência contínua de valores que são associados a uma rampa de cores igualmente contínua.

O tipo de interpolação mais empregado é a linear, porém [PHAM 90] propõe interpolação baseada em splines para permitir maior controle e possibilitar maior correlação com o comportamento dos dados que se deseja apresentar. A escolha de cores, no entanto, é um dos aspectos mais importantes, e deve feita em função do tipo de informação que se deseja ver: métrica ou de formato [WARE 88].

Dados *métricos* são quantidades referentes a cada ponto de uma superfície, tais como pressão e temperatura. Este tipo de dado é melhor interpretado quando apresentado numa rampa espectral, pois os diferentes matizes possibilitam a identificação de diferentes medidas. Matizes próximos no espectro indicam pequenas variações nos dados, sendo a magnitude da diferença nos dados previsível pela distância das cores no espectro.

Dados de *forma* dizem respeito à própria estrutura ou formato da superfície, tais como gradiente, cúspides e suavidade. Rampas de intensidades de uma mesma cor são a maneira mais adequada de codificar este tipo de dado, pois a percepção de formas e a tridimensionalidade acontece exatamente por diferenças de intensidade. É importante observar, no entanto, que a percepção humana tende a acentuar discontinuidades de intensidades (ver discussão sobre o efeito "Mach Band" na seção 5.4), o que pode conduzir a uma incorreta interpretação dos dados.

[WARE 88] apresenta uma rampa em que combina variação espectral (preto, roxo, vermelho, laranja, branco) e de intensidade para apresentar simultaneamente ambos os tipos de dados, métricos e de forma. Embora incomum, esta rampa obteve sucesso nas experiências realizadas.

É importante lembrar ainda que a construção de uma rampa deve levar em consideração algum mecanismo de compensação da não-linearidade da percepção (ver seção 5.4).

7.2 Exemplos de aplicações

A cor é um elemento importante para a identificação visual de estruturas contidas em volumes tridimensionais de dados, pois ajuda a identificar áreas de interesse em meio à informação ruidosa normalmente fornecida pelos equipamentos de aquisição.

[FARREL 83] descreve um dos sistemas pioneiros para *visualização volumétrica* de dados médicos, que já continha ferramentas para conduzir o usuário à correta escolha de cores. Isto era feito pelo uso de fundo azul e fixação de intervalos razoáveis em termos de percepção para os parâmetros de controle das cores:

- (a) saturação $\in [0.6, 1.0]$, pois cores com menor saturação aproximam-se do branco e tendem a ser confundidas;
- (b) brilho $\in [0.1, 0.7]$, pois cores muito brilhantes aproximam-se do branco;
- (c) matizes com diferença mínima de 50° , para garantir discernimento.

Outro trabalho na mesma área de aplicação revela cuidadosas experiências para a escolha de quatro cores que seriam usadas na visualização de dados obtidos por PET (Positron Emission Tomography) [GERSHON 90]. O conjunto resultante (preto, branco, verde e azul) garantia o contraste desejado, além de permitir a combinação das cores sem o surgimento de artefatos. Foi observado que o uso de vermelho ao invés de branco fazia com que as regiões parecessem menores do que eram na realidade, comprovando a importância da incorporação de conhecimentos sobre percepção de cor neste projeto.

Há, no entanto, exemplos mais audazes de uso de cor para codificação de dados. Um deles propõe o uso das próprias dimensões das cores para codificar dimensões dos dados. [WARE; BEATTY 88]. Neste caso, dados multivariados de até cinco dimensões poderiam ser simultaneamente apresentados numa única imagem, sendo duas dimensões codificadas como posição (x,y) e as outras três como componentes de cor (r,g,b) . A imagem resultante apresentaria, então, um panorama geral dos dados, possibilitando a identificação de tendências gerais e regiões de possível interesse. Apesar de sofisticado, este tipo de recurso pode ser muito valioso na fase de análise exploratória dos dados, sendo mais vantajosa à medida que cresce o volume de dados.

A abordagem de [LEVKOWITZ 91a] situa-se no mesmo contexto, propondo o uso de ícones coloridos para a codificação de dados. Os ícones são construídos conforme os valores dos dados em determinada região da imagem, sendo cada dimensão codificada em um ou mais de seus atributos. Uma das dimensões, por exemplo, pode ser associada à cor na metade superior do ícone, enquanto que outra seria usada para determinar a cor da parte de baixo. A aparência de um ícone indicaria a combinação de valores naquela região, enquanto que conjuntos de ícones poderiam formar texturas que revelassem padrões de relacionamentos e valores dos

dados. A intenção neste caso é explorar não só a percepção de cor, mas também a de textura para visualização grosseira das tendências dos dados e suas relações.

CONCLUSÕES

Como pode ser constatado pela diversidade de assuntos tratados neste texto, o uso eficiente de cor é um tema complexo, e ainda está em discussão. Não existem critérios claros que dirijam o projetista ou usuário à escolha de um conjunto de cores que efetivamente sejam úteis na interpretação de dados. Ainda mais grave do que isto: não há formas seguras nem mesmo de impedir que importantes aspectos dos dados sejam ocultados ou falsificados pelo uso incorreto de cor.

O tratamento que o assunto tem tido em importantes conferências de Computação Gráfica e Visualização Científica atestam a instabilidade nesta área: há poucos artigos com propostas concretas para reduzir o problema, e, ao mesmo tempo, diversos painéis e tutoriais que discutem a questão de maneira ainda informal. O título de um dos painéis realizados no ACM-SIGGRAPH em agosto de 1993 resume por si só o enfoque adotado para sensibilizar os profissionais envolvidos para este tema: "How to Lie and Confuse with Visualization" (Como mentir e confundir com Visualização) [Gershon 93]. Em geral destes painéis fazem parte profissionais das áreas de Computação, Design, Psicologia e Fisiologia, sendo que todos eles reafirmam a necessidade de exploração das características da percepção humana para facilitar a interpretação de dados complexos, incluindo-se aí o uso de som e animação (ver [PICKETT 90], [REUTER 90], [LEVKOWITZ 91b] e [KOSSLYN 92]). Em 1994 o assunto esteve novamente em pauta no tutorial "Introdução à Visualização baseada em Percepção", realizado durante a programação do ACM-SIGGRAPH [LEVKOWITZ 94].

Todo este esforço deve conduzir à elaboração de diretrizes para o emprego de cor em visualização de dados que sejam mais objetivas do que as aqui apresentadas. É importante e necessário que, num futuro próximo, existam nos trabalhos publicados frases mais otimistas do que as seguintes, extraídas das conclusões de alguns textos consultados:

- "sem regras, métodos estruturados e entendimento da teoria e terminologia de cor, a codificação em cores será subjetiva e ineficiente" [RICE 91].
- "deve-se tentar auxiliar o projeto das cores com o pouco conhecimento que se tem" [ROBERTSON 88].
- "experimente, experimente, experimente e então escolha as cores mais fiés" [GERSHON 93].
- "acima de tudo, não cause danos" [TUFTE 90].

Além de critérios seguros para a aplicação de cor na apresentação de dados por imagens, também é necessário fornecer condições para que estas regras sejam aplicadas, preferencialmente de forma automática. Assim sendo, acredita-se que um caminho a ser explorado é o uso de técnicas de Inteligência Artificial para auxiliar o processo de escolha de cores, com base no conhecimento sobre a percepção humana e a aplicação. Este tema será investigado na seqüência deste trabalho.

GLOSSÁRIO

- BRILHO** *intensidade ou luminância da cor. Em termos de cor-pigmento, cores brilhantes são também chamadas de vivas.*
- CROMA** *saturação ou pureza da cor.*
- COR COMPLEMENTAR** "par de cores cuja mistura produz o branco" [PEDROSA 82]. Exemplos são verde-magenta (cor-luz) e azul-laranja (cor-pigmento).
- COR-LUZ** "radiação luminosa visível que tem como síntese aditiva a luz branca" [PEDROSA 82].
- COR-PIGMENTO** "substância material que, conforme sua natureza, absorve, refrata e reflete os raios luminosos componentes da luz que se difunde sobre ela. É a qualidade da luz refletida que determina a sua demoninação" [PEDROSA 82].
- COR PRIMÁRIA** "uma das três cores indecomponíveis que, misturadas em proporções variáveis, produzem todas as cores do espectro" [PEDROSA 82]. As primárias de luz são vermelho, verde e azul, e as de pigmento são vermelho, amarelo e azul claro.
- INTENSIDADE** a intensidade de uma cor está associada à quantidade de energia da luz (emitida ou refletida), e não está diretamente relacionada à sua cor. Na verdade, entretanto, cores pouco intensas (fracas) têm a tendência a serem percebidas como preto, e cores muito intensas (ou brilhantes) parecem esbranquiçadas.
- LUMINÂNCIA** o mesmo que *intensidade*.
- LUMINOSIDADE** *intensidade ou brilho da cor.*
- MATIZ** característica luminosa (estímulo) que provoca a sensação denominada *cor*. Cada faixa do espectro visível provoca uma sensação diferente, correspondentes a vermelho, amarelo, verde, azul, etc. As palavras *cor* e *matiz* muitas vezes se confundem; entretanto, a sensação de cor envolve mais do que a percepção de matiz, pois há também os outros parâmetros (pureza e intensidade).
- PUREZA** o mesmo que *saturação ou croma*. A pureza mede o grau de mistura de uma cor com as demais do espectro. No caso extremo, a pureza é zero e a cor é branca (máximo de mistura de todas as cores). Quando a pureza é máxima, obtém-se luz (por emissão ou reflexão) com concentração de energia em uma faixa bem determinada do espectro, com pouca energia nas demais faixas (ver fig. 3.2).
- SATURAÇÃO** *croma ou pureza da cor.*
- TOM, TONALIDADE** variações de uma cor com o mesmo matiz. Termo em geral aplicado a cores que compõem rampas ou escalas de cores obtidas pela variação de intensidade ou pureza de um mesmo matiz.
- VALOR** na nomenclatura usada por artistas (que trabalham com pigmentos), valor indica o *brilho ou luminosidade da cor*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAILEY M.J. Guidelines for the use of Color in Scientific Visualization. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 20., Anaheim, 1993. Tutorial Notes (Curso Introduction to Scientific Visualization Tools and Techniques) . ACM, 1993.
- BROU P.; ACIASCIA T.; LINDEN L; LETTVIN J. The Colors of Things. *Scientific American*, v.255, n. 3, p.80-7, Sept. 1986.
- BENBASAT I.; DEXTER A.; TODD P. An Experimental Program Investigating Color-Enhanced and Graphical Information Presentation: An Integration of the Findings. *Communications of the ACM*, v. 29, n.11, p.1095-105, Nov. 1986.
- CHRIST R. Review and Analysis of Color Coding Research for Visual Displays. *Human Factors*. v.17, n.6, p.542-70, 1975.
- FARREL E. Color Display and Interactive Interpretation of 3-D Data. *Journal of Research and Development*, v.24, n.4, p.356-66, Jul. 1983.
- FEYNMAN R.; LEIGHTON R.; SANDS M. The Feynman Lectures on Physics, Mainly Mechanics, Radiation and Heat. v.3. Bogota, Fondo Educativo Interamericano, 1971
- FOLEY J. & GRIMES J. Using Color in Computer Graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.8, n.8, p.25-7, Sept. 1988.
- FOLEY J.; VAN DAM A.; FEINER S. HUGHES J. *Computer Graphics - Principles and Practice*. Reading, Addison-Wesley, 1990.
- GERSHON N. Visualization and Three-Dimensional Image Processing of Positron Emission Tomography (PET) Brain Images. In: *Visualization*, 1., 1990. *Proceedings*. IEEE Computer Society Press, 1990. p.144-9.
- GERSHON N. How to Lie and Confuse with Visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.13, n.1, p.102-3, Jan. 1993.
- HALL R. Perceptual response. In: _____. *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*. New York, Springer-Verlag, 1989.
- JOBLOVE G.; GREENBERG D. Color Spaces for Computer Graphics. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 5., Atlanta, 1978. *Proceedings*. p.20-5.
- KOSSLYN S. Improving Visualization: Theoretical and Empirical Foundations. In: *VISUALIZATION*, 3., Boston, 1992. *Proceedings*. IEEE Computer Society Press, 1992. p.372-4.
- LEVKOWITZ H. Color Icons: Merging Color and Texture Perception for Integrated Visualization of Multiple Parameters. In: *VISUALIZATION*, 2., San Diego, 1991. *Proceedings*. IEEE Computer Society Press, 1991. p.164-70.
- LEVKOWITZ H. Color vs. Black-and-White in Visualization. In: *VISUALIZATION*, 2., San Diego, 1991. *Proceedings*. IEEE Computer Society Press, 1991. p.336-9.

- LEVKOWITZ H. Foundations of Vision and Color. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 21., Orlando, 1994. Tutorial Notes (Curso Introduction to Perception-Based Visualization). ACM, 1994.
- LIVINGSTONE M. Art, Illusion, and the Visual System. *Scientific American*, v. 258, n.1, p.68-75, Jan. 1988.
- MARSHALL G. Displaying Images. In: ____. *Computer Graphics in Application*. London, Prentice-Hall, 1987.
- MEYER G.; GREENBERG D. Perceptual Color Spaces for Computer Graphics. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 7., Seattle, 1980. Proceedings. ACM, 1980, p.254-61.
- MURCH G. Perceptual Considerations of Color. *Computer Graphics World*, v.6, n.7, p.32-40, July 1983.
- MURCH G. Physiological Principles for Effective Use of Color. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.4, n.11, p.49-54, Nov. 1984.
- PASTOOR S. Legibility and Subjective Preference for Color Combinations in Text. *Human Factors*. v.32, n.2, p.157-71, 1990.
- PEDROSA I. *Da Cor à Cor Inexistente*. 3. ed. Rio de Janeiro, Léo Christiano Ed., 1982.
- PHAM B. Spline-based Sequences for Univariate, Bivariate and Trivariate Mapping. In: *Visualization*, 1., 1990. Proceedings. IEEE Computer Society Press, 1990. p.202-207.
- PICKETT R.M. Visualization of Multiparameter Images. In: *Visualization*, 1., 1990. Proceedings. IEEE Computer Society Press, 1990. p.388-90.
- POYNTON C. The Science of Digital Color. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 21., Orlando, 1994. Tutorial Notes. ACM, 1994.
- REUTER L. H. Human Perception and Visualization. In: *Visualization*, 1., 1990. Proceedings. IEEE Computer Society Press, 1990. p.401-5.
- RHEINGANS P. Color, Change, and Control for Quantitative Data Display. In: *VISUALIZATION*, 3., Boston, 1992. Proceedings. IEEE Computer Society Press, 1992. p.252-59.
- RICE J. Display Color Coding: 10 Rules of Thumb. *IEEE Software*, v.8, n.1, p.86-8, Jan. 1991.
- ROBERTSON P. Visualizing Color Gamuts: A User Interface for the Effective Use of Perceptual Color Spaces in Data Displays. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.8, n.5, p.50-63, Sept. 1988.
- SAMIT M. The Color Interface. *Computer Graphics World*, v.6, n.7, p.42-50, July 1983.

- SANTISTEBAN A. The Perceptual Color Space of Digital Image Display Terminals. *IBM Journal of Research and Development*, v.27, n.2, p.127-32, Mar. 1983.
- SCHWARZ M.; COWAN W.; BEATTY J. An Experimental Comparison of RGB,YIQ, LAB, HSV and Opponent Color Models. *ACM Transactions on Graphics*, v,6, n.2, p.123-58, Apr. 1987.
- SMITH A. Color Gamut Transform Pairs. In: ANNUAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES (SIGGRAPH), 5. Atlanta, 1978. Proceedings. ACM, 1978, p.12-9.
- THORELL L.G.; SMITH W.J. Using Computer Color Effectively - An Illustrated Reference. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1990.
- TOLLIVER D. Color Functions in Information Perception and Retention. *Information Storage and Retrieval*, v.9, n.5, p.257-65, May 1973.
- TUFTE E. Color and Information. In: _____. *Envisioning Information*. Cheshire, Graphics Press, 1990.
- WALLER R.; LEFRERE P.; MACDONALD-ROSS M. Do You Need that Second Color? *IEEE Transactions on Professional Communication*, v.PC-25, n.2, p.80-5, Jun. 1982.
- WARE C. Color Sequences for Univariate Maps: Theory, Experiments, and Principles. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.8, n.5, p.41-9, Sept. 1988
- WARE C.; BEATTY J. Using Color Dimensions to Display Data Dimensions. *Human Factors*, v.30, n.2, p.127-42, 1988.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEE/93-01 - Oscilador a HEMT - 10 GHz - FÁTIMA S. CORRERA, EDMAR CAMARGO
- BT/PEE/93-02 - Representação Senoidal da Voz através dos Polos do Filtro Preditor - MARCELO B. JOAQUIM, NORMONDS ALENS
- BT/PEE/93-03 - Blindagens por Grades Conductoras: Cálculo do Campo Próximo - LUIZ CEZAR TRINTINALIA, ANTONIO ROBERTO PANICALI
- BT/PEE/93-04 - Sistema de Otimização e Controle de Produção em Minas de Pequeno e Médio Porte - TSEN CHUNG KANG, VITOR MARQUES PINTO LEITE
- BT/PEE/94-01 - Determinação das Frases de Aplicação Forense para o projeto NESPER e Tese de Mestrado IME/94, com Base em Estudos Fonéticos - MARCONI DOS REIS BEZERRA, EUVALDO F. CABRAL JUNIOR
- BT/PEE/94-02 - Implementação e Teste de uma Rede Neural Artificial do Tipo KSON (Kohonen Self-Organizing Network) com Entradas Bidimensionais - MARCELO YASSUNORI MATUDA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-03 - Transformada de Walsh e Haar Aplicadas no Processamento de Voz - ALEXANDRE AUGUSTO OTTATI NOGUEIRA, THIAGO ANTONIO GRANDI DE TOLOSA, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/94-04 - Aplicação de Redes Neurais ao Problema de Reconhecimento de Padrões por um Sonar Ativo - ALEXANDRE RIBEIRO MORRONE, CRISTINA COELHO DE ABREU, EDUARDO KOITI KIUKAWA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-05 - Tudo que se Precisa Saber sobre a Prática da FFT - Transformada Rápida de Fourier (Inclui Software) - ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-06 - A Survey on Speech Enhancement Techniques of Interest to Speaker Recognition - CELSO S. KURASHIMA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-07 - Identificação de Pulsos Decádicos em Linhas Telefônicas - ANTONIO P. TIMOSZCZUK, MÁRCIO A. MATHIAS, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-08 - Implementação e Teste de Filtros do Tipo Adaptativo e "Notch" para a Remoção de Interferência de 60 Hz em Sinais de Eletrocardiograma - FLÁVIO ANTÔNIO MENEGOLA, JOSÉ AUGUSTO DE MATTOS, JOSÉ GOMES G. FILHO, SIDNEY SILVA VIANA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-09 - Compressão de Sinais de Voz utilizando Transformadas de Karhunen-Loève, Fourier e Hadamard - IVAN LUIS VIEIRA, LUIZ FERNANDO STEIN WETZEL, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/94-10 - "Ray Tracing" Paralelo - EDUARDO TOLEDO SANTOS, JOÃO ANTONIO ZUFFO
- BT/PEE/94-11 - Implementação de uma Ferramenta Posicionador para "Gate-Arrays" Tipo Mar de Portas - JORGE W. PERLAZA PRADO, WILHELMUS A. M. VAN NOIJE
- BT/PEE/94-12 - Tudo que se Precisa Saber Sobre a Teoria da FFT - Transformada Rápida de Fourier - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/94-13 - Análise do Ruído Sonoro em uma Sala de Aquisição de Amostras de Som com Microcomputador - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, EUVALDO CABRAL JR.