

## Elaborazione di immagini a colori

Solo dopo anni di preparazione il giovane artista dovrebbe toccare il colore – non il colore usato per descrivere, ma come mezzo di espressione personale.

*Henri Matisse*

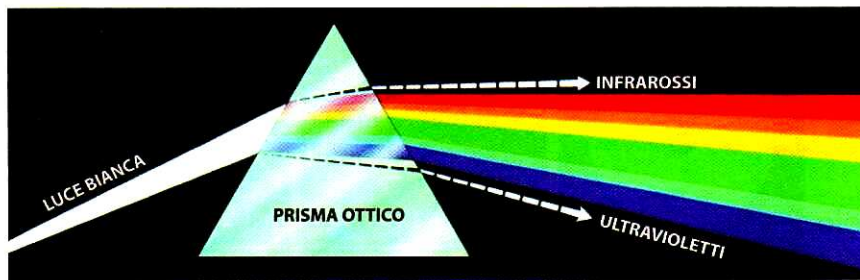
Per un lungo periodo mi sono limitato all'uso di un solo colore – come forma di disciplina.

*Pablo Picasso*

L'uso del colore nell'elaborazione delle immagini è motivato da due fattori principali. Per prima cosa, il colore è un descrittore che semplifica l'identificazione di un oggetto e la sua estrazione da una scena. In secondo luogo, gli uomini sono in grado di distinguere migliaia di gradazioni di colore e di intensità, in confronto a solo due dozzine di tonalità di grigio. Ciò è di particolare importanza nell'analisi manuale dell'immagine (attuata da esseri umani).

In particolare, distinguiamo l'elaborazione *full-color* (letteralmente, “a colore pieno”) e quella a falsi colori. Nel primo caso, le immagini in questione vengono acquisite con un sensore full-color, come ad esempio una macchina fotografica o uno scanner. Nel secondo caso, si assegna un colore a particolari valori di intensità monocromatici o appartenenti a una gamma di intensità. Le tecniche di elaborazione a falsi colori sono state per molto tempo le uniche modalità di trattamento del colore nelle immagini. Negli ultimi anni, la disponibilità di sensori a colori e di hardware in grado di elaborare immagini a colori ha fatto sì che le tecniche di elaborazione full-color possano essere usate in numerose applicazioni quali editoria, visualizzazione (anche scientifica) e Internet.

Sarà evidente dalla trattazione che segue che alcuni metodi in scala di grigio illustrati nei capitoli precedenti sono facilmente applicabili alle immagini a colori. Alcune tecniche richiedono invece una specifica riformulazione per essere coerenti con le proprietà degli spazi colore. Saranno descritte le principali metodologie legate all'elaborazione delle immagini a colori.



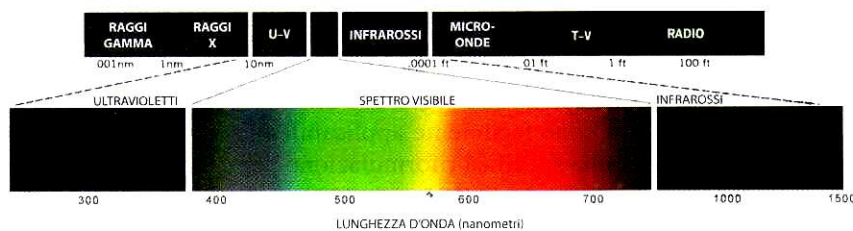
**Figura 6.1** Lo spettro cromatico ottenuto facendo passare della luce bianca attraverso un prisma. (Per gentile concessione della General Electric Co., Lamp Business Division.)

## 6.1 Considerazioni di base sul colore

Anche se il processo seguito dal cervello umano nel percepire e interpretare il colore è un fenomeno fisiopsicologico che non è stato ancora completamente capito, la natura fisica del colore può essere espressa su base formale supportata da risultati sperimentali e teorici.

Nel 1666, Sir Isaac Newton scoprì che, quando un raggio di sole passa attraverso un prisma di vetro, il raggio di luce in uscita non è bianco ma consiste, invece, di uno spettro continuo di colori che vanno dal viola al rosso. Come mostra la Figura 6.1, lo spettro del colore può essere diviso in sei ampie regioni: viola, blu, verde, giallo, arancio e rosso. Se si vedono in full-color, cioè a piena risoluzione cromatica (Figura 6.2), nessun colore nello spettro termina bruscamente, ma ogni colore sfuma gradualmente nel successivo.

I colori che gli esseri umani e alcuni animali percepiscono in un oggetto sono determinati dalla natura della luce riflessa dall'oggetto. Come illustrato nella Figura 6.2, la luce visibile è composta da una banda relativamente stretta di frequenze nello spettro elettromagnetico. Un corpo che riflette la luce che è bilanciato in tutte le lunghezze d'onda visibili appare all'osservatore completamente bianco. Un corpo che favorisce la riflessività in una gamma limitata dello spettro visibile mostra alcune gradazioni di colore. Ad esempio, gli oggetti verdi riflettono la luce con lunghezze d'onda principalmente nella gamma da 500 a 570 nm, mentre assorbono la maggior parte dell'energia alle altre lunghezze d'onda.

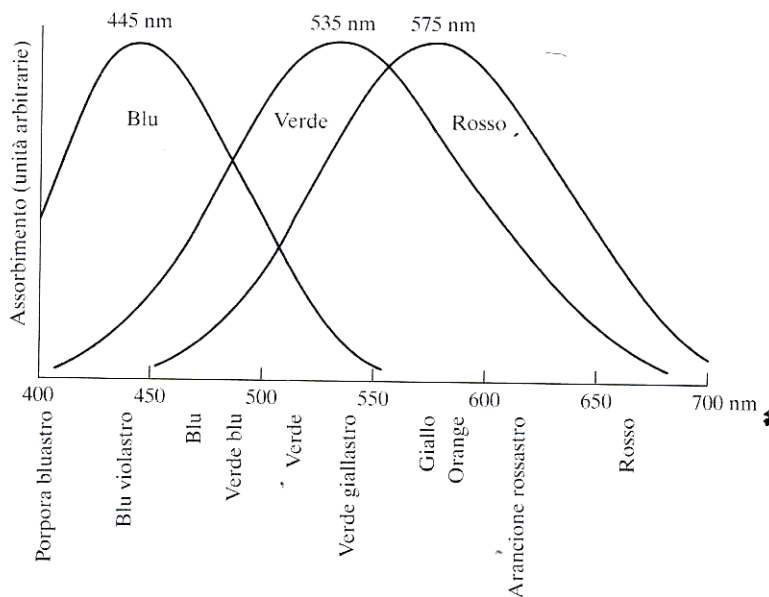


**Figura 6.2** Lunghezze d'onda che comprendono la gamma visibile dello spettro elettromagnetico. (Per gentile concessione della General Electric Co., Lamp Business Division.)

La caratterizzazione della luce è un nodo centrale della scienza del colore. Se la luce è acromatica (senza colore), il suo unico attributo è l'*intensità*, o consistenza (si pensi ai vecchi televisori in bianco e nero). Come definito nel Capitolo 2, il termine *livello di grigio* si riferisce a una misura scalare di intensità che va dal nero ai grigi e, infine, al bianco.

La luce cromatica copre lo spettro elettromagnetico da circa 400 fino a 700 nm. Per descrivere la qualità di una fonte di luce cromatica vengono usate tre quantità di base: radianza, luminanza e luminosità. La *radianza* è la quantità totale di energia che fuoriesce dalla fonte di luce ed è solitamente misurata in watt (W). La *luminanza*, misurata in lumen (lm), dà una misura della quantità di energia che un osservatore *percepisce* da una fonte di luce. Ad esempio, la luce emessa da una fonte che opera nella regione infrarossa dello spettro potrebbe avere un'energia (radianza) significativa, ma un osservatore difficilmente la percepirebbe in quanto la sua luminanza sarebbe quasi nulla. Infine, la *luminosità* è un descrittore soggettivo che è praticamente impossibile da misurare. Essa ingloba la nozione acromatica di intensità ed è uno dei fattori chiave nella descrizione della percezione del colore.

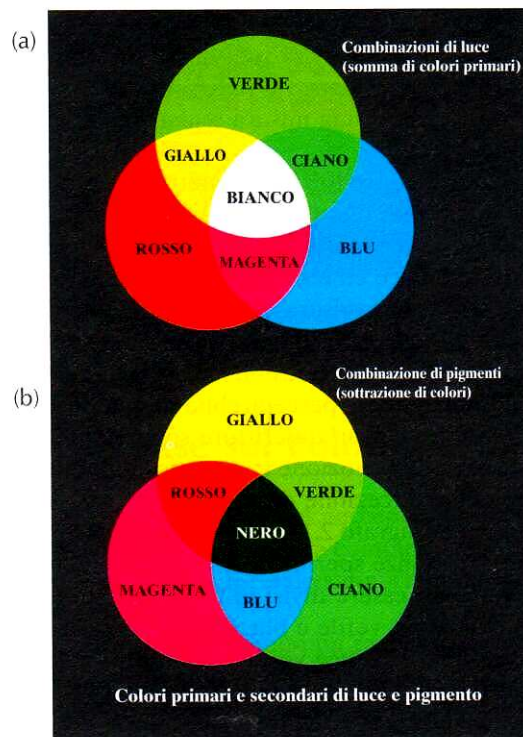
Come detto nel Paragrafo 2.1.1, i coni sono i sensori dell'occhio responsabili della visione del colore. Evidenze sperimentali hanno stabilito che i 6-7 milioni di coni dell'occhio umano possono essere divisi in tre principali categorie percettive, corrispondenti grosso modo a rosso, verde e blu. Circa il 65% di tutti i coni è sensibile alla luce rossa, il 33% è sensibile alla luce verde e solo circa il 2% è sensibile al blu (ma i coni blu sono più sensibili). La Figura 6.3 mostra delle curve che descrivono in media l'assorbimento della luce da parte dei coni rossi, verdi e blu dell'occhio. Grazie a queste caratteristiche dell'occhio umano, i colori vengono visti come combinazioni variabili dei cosiddetti *colori primari* rosso (R - red), verde (G - green) e blu (B - blue).



**Figura 6.3** Assorbimento della luce da parte dei coni rossi, verdi e blu dell'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda.

**Figura 6.4**

Colori primari e secondari di luce e pigmento. (Per gentile concessione della General Electric Co., Lamp Business Division.)



Il CIE (*Commission International de l'Eclairage* – Commissione Internazionale dell'Illuminazione) ha indicato nel 1931 i seguenti valori di lunghezza d'onda specifici per i tre colori primari: blu = 435.8 nm, verde = 546.1 nm e rosso = 700 nm. Questo standard è stato impostato prima che le curve sperimentali dettagliate mostrate nella Figura 6.3 fossero rese note, nel 1965. Quindi, gli standard CIE corrispondono solo in modo approssimativo ai dati sperimentali. Si noti dalle Figure 6.2 e 6.3 che nessun colore può essere detto completamente rosso, verde o blu. Inoltre, è importante ricordare che avere a disposizione tre specifiche lunghezze d'onda per i colori primari standard non significa che queste tre componenti RGB, agendo da sole, possano generare tutti i colori dello spettro. L'uso del termine *primario* è stato ampiamente frainteso nel senso che i tre colori primari standard, mescolati in varie proporzioni di intensità, venivano considerati capaci di produrre *tutti* i colori visibili. Come si vedrà a breve, questa interpretazione non è corretta a meno che si permetta anche alla lunghezza d'onda di variare, ma in questo caso non si avrebbero tre colori primari standard fissi.

I colori primari possono essere mescolati per produrre i colori *secondari* – magenta (rosso e blu), ciano (verde e blu) e giallo (rosso e verde). Mescolare i tre colori primari o un colore secondario con il suo colore primario opposto, alle giuste intensità produce il bianco. Questo risultato viene mostrato nella Figura 6.4a, che illustra anche i tre colori primari e le loro combinazioni utili a produrre i colori secondari.

La differenziazione tra i colori primari della luce e i colori primari dei pigmenti (o coloranti) è importante. In questi ultimi, il colore primario è definito come un colore che sottrae o assorbe un colore primario di luce e riflette o trasmette gli altri due. Quindi, i colori primari dei pigmenti sono magenta, ciano e giallo e i colori secondari sono

rosso, verde e blu. Questi colori vengono mostrati nella Figura 6.4b. Una combinazione appropriata dei tre pigmenti primari o di un secondario con il suo primario opposto, produce il nero.

La ricezione del colore su un televisore è un esempio della natura additiva dei colori di luce. L'interno degli schermi TV a colori CRT (tubo a raggi catodici) è composto da una grande matrice a punti triangolari di fosforo elettrosensibile. Se eccitato, ogni punto di una triade produce luce in uno dei colori primari. L'intensità dei punti di fosforo ad emissione rossa è modulata da un cannone elettronico all'interno del tubo, che genera impulsi corrispondenti all'energia rossa verso lo schermo TV. I punti di fosforo verdi e blu in ogni triade vengono modulati allo stesso modo. L'effetto, visto sullo schermo televisivo, è che i tre colori primari di ogni triade di fosforo vengono "sommati" e ricevuti dai coni dell'occhio come un'immagine full-color. Trenta cambiamenti successivi di immagine al secondo rispetto a tutti e tre i colori completano l'illusione della visualizzazione continua di un'immagine sullo schermo. I display CRT vengono sempre più sostituiti da tecnologie digitali "a schermo piatto", come i *display a cristalli liquidi* (LCD) e i dispositivi al *plasma*. Anche se sono fundamentalmente diversi dai CRT, utilizzano lo stesso principio, cioè richiedono le specifiche di tutti e tre i sub-pixel (rosso, verde e blu) per generare un singolo pixel colore. Gli LCD utilizzano le proprietà della luce polarizzata per bloccare o far passare la luce attraverso lo schermo LCD e, nel caso della tecnologia di visualizzazione a matrice attiva, vengono utilizzati i transistor a pellicola sottile (TFT, *Thin Film Transmision*) per dare segnali in grado di indirizzarsi su ogni pixel dello schermo. Per produrre i tre colori primari di luce a ogni posizione della triade di pixel vengono utilizzati appositi filtri. Nelle unità al plasma, i pixel sono cellule minuscole di gas ricoperte di fosforo in grado di produrre uno dei tre colori primari. Le singole cellule vengono colpite in modo analogo a quanto avviene negli LCD. Questa capacità di colpire coordinate individuali della triade di pixel è il fondamento delle tecnologie dei display digitali.

Le caratteristiche generalmente utilizzate per distinguere un colore da un altro sono *luminosità*, *tonalità (hue)* e *saturazione*. Come già indicato in questo paragrafo, la luminosità ingloba la nozione acromatica di intensità. La tonalità è un attributo associato alla lunghezza d'onda dominante in un insieme di onde luminose. Quindi, quando diciamo che un oggetto è rosso, arancione o giallo, ci riferiamo alla sua tonalità. La saturazione si riferisce alla purezza relativa della quantità di luce bianca mescolata a una data tonalità. I colori puri dello spettro sono pienamente saturi. Colori come rosa (rosso e bianco) e lavanda (viola e bianco) sono meno saturi, con un grado di saturazione inversamente proporzionale alla quantità di luce bianca aggiunta.

Tonalità e saturazione prese insieme vengono dette *cromaticità* e, quindi, un colore può essere caratterizzato dalla sua luminosità e cromaticità. Le quantità di rosso, verde e blu necessarie per formare un dato colore vengono dette valori *tristimolo* e vengono indicati rispettivamente con  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . Un colore, dunque, viene specificato tramite i suoi *coefficienti tricromatici*, definiti come

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (6.1-1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (6.1-2)$$

e

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (6.1-3)$$

Da queste equazioni deriva che<sup>1</sup>

$$x + y + z = 1 \quad (6.1-4)$$

Per ogni lunghezza d'onda di luce nello spettro visibile, i valori tristimolo necessari per produrre il colore corrispondente a quella lunghezza d'onda possono essere ottenuti direttamente dalle curve o tabelle che sono state compilate a seguito di sperimentazioni (Poynton [1996], Walsh [1958] e Kiver [1965]).

Un altro metodo per specificare un colore è utilizzare il *diagramma di cromaticità* CIE (Figura 6.5), che mostra la composizione del colore come funzione di  $x$  (rosso) e  $y$  (verde). Per ogni valore di  $x$  e  $y$ , il corrispondente valore  $z$  (blu) è ottenuto dall'Equazione (6.1-4) ponendo  $z = 1 - (x + y)$ . Il punto segnato in verde nella Figura 6.5, ad esempio, contiene approssimativamente il 62% di verde e il 25% di rosso. Dall'Equazione (6.1-4), la composizione di blu è circa del 13%.

Le posizioni dei vari colori dello spettro, dal violetto a 380 nm al rosso a 780 nm, sono indicate sul bordo del diagramma di cromaticità a forma di lingua. Questi sono i colori puri mostrati nello spettro della Figura 6.2. Qualunque punto che non si trova sul bordo, ma all'interno del diagramma, rappresenta una miscela dei colori dello spettro. Il punto di uguale energia mostrato nella Figura 6.5 corrisponde a frazioni uguali dei tre colori primari e rappresenta lo standard CIE per la luce bianca. Qualunque punto posto sul bordo del diagramma di cromaticità è pienamente saturo. Quando un punto lascia il bordo e si avvicina al punto di uguale energia, viene aggiunta più luce bianca al colore ed esso diventa meno saturo. La saturazione nel punto di uguale energia è zero. Il diagramma di cromaticità è utile per mescolare i colori perché un segmento lineare che unisce due punti qualsiasi nel diagramma definisce tutte le diverse variazioni di colore che possono essere ottenute mediante combinazione lineare dei due colori. Consideriamo, ad esempio, una linea retta disegnata dal punto rosso al punto verde mostrato nella Figura 6.5. Se c'è più luce rossa che verde, il punto esatto che rappresenta il nuovo colore sarà ancora sul segmento, ma più vicino al punto rosso che a quello verde. In modo simile, una linea disegnata dal punto di uguale energia verso qualunque punto sul bordo della carta definirà tutte le tonalità di quel particolare colore dello spettro.

L'estensione di questa procedura a tre colori è un'operazione semplice. Per determinare la gamma di colori che può essere ottenuta da ognuno dei tre colori dati nel diagramma di cromaticità, disegniamo semplicemente le linee di connessione dei tre punti colore. Il risultato è un triangolo e ogni colore sul bordo o all'interno del triangolo può essere prodotto attraverso varie combinazioni dei tre colori iniziali. Un triangolo con vertici su tre colori *fissi* non può racchiudere l'intera regione di colore nella Figura 6.5. Questa osservazione supporta graficamente la considerazione già fatta che non tutti i colori possono essere ottenuti con i singoli tre colori primari fissi. Il triangolo nella Figura 6.6 mostra una tipica gamma di colori (chiamata *gamut dei colori*) prodotta dai monitor RGB. La regione irregolare all'interno del triangolo è rappresentativa della serie di colori dei dispositivi di stampa a colori ad alta qualità.

<sup>1</sup> L'uso di  $x$ ,  $y$  e  $z$  in questo contesto segue la notazione convenzionale. Questi simboli non devono essere confusi con l'uso di  $(x, y)$  usato per indicare le coordinate spaziali in altri capitoli del libro.

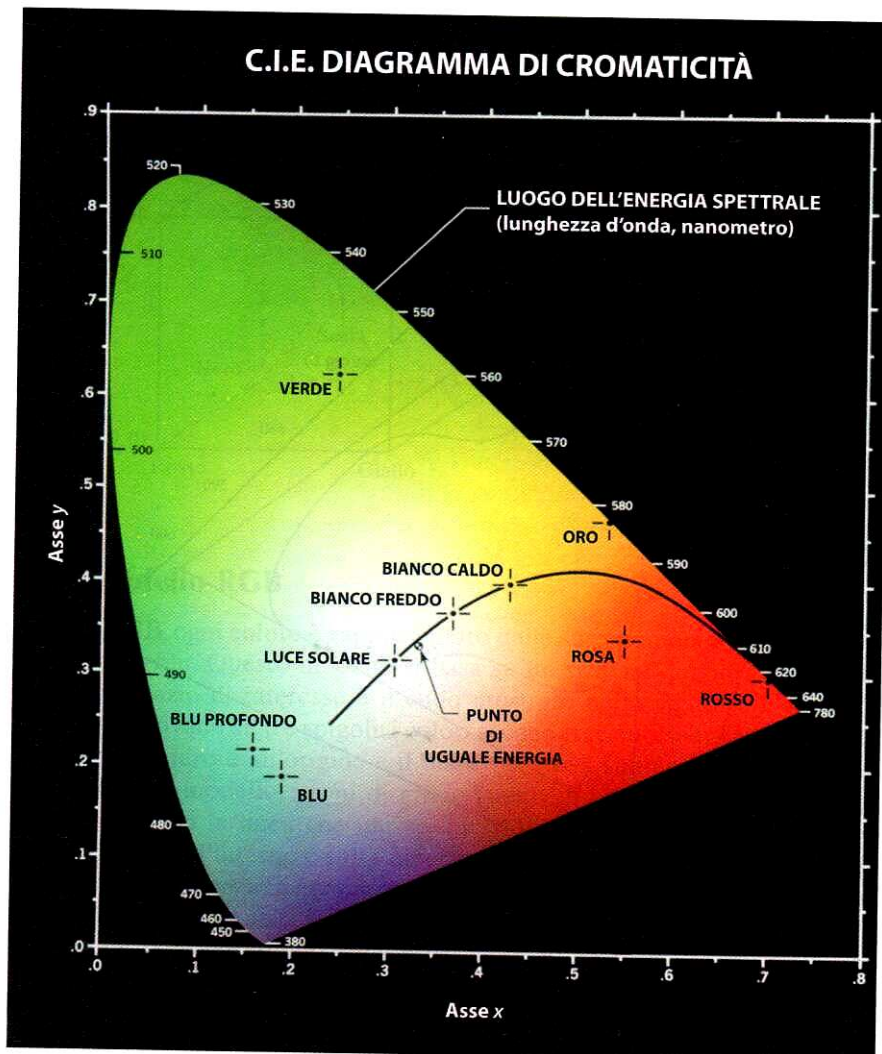
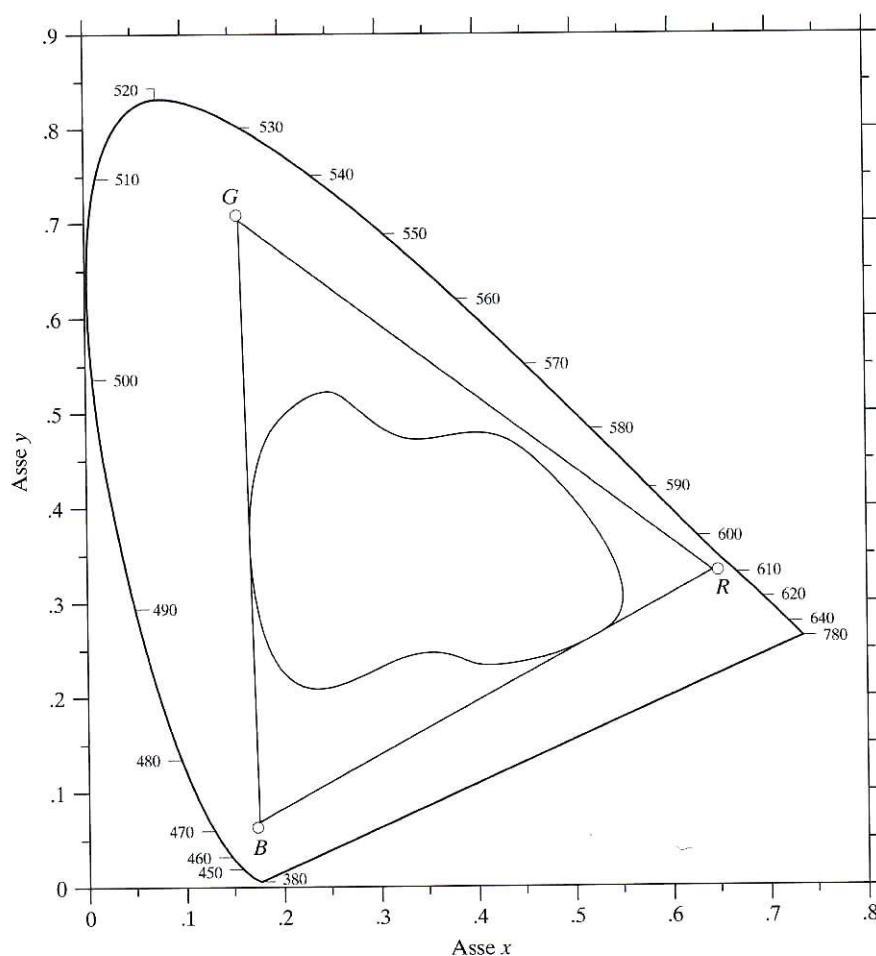


Figura 6.5 Diagramma di cromaticità. (Per gentile concessione della General Electric Co., Lamp Business Division.)

Il bordo del range di stampa a colori è irregolare perché la stampa a colori utilizza una combinazione di miscele additive e sottrattive di colori, processo molto più difficile da controllare rispetto alla visualizzazione di colori su un monitor, che si basa sulla somma di tre colori primari facilmente gestibili.

## 6.2 Modelli di colore

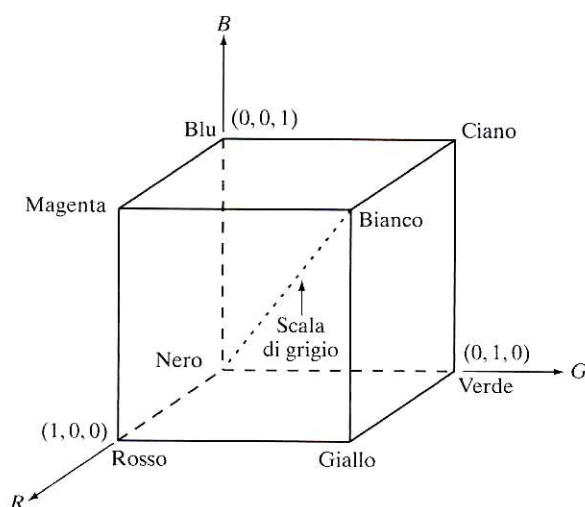
Lo scopo di un modello colore (detto anche *spazio colore* o *sistema colore*) è quello di facilitare e standardizzare la specifica dei colori. In sostanza, un modello colore è un sistema di coordinate e di un sottospazio all'interno di quel sistema dove ogni colore



**Figura 6.6** Gamut di colori tipica di monitor a colori (triangolo) e dispositivi di stampa a colori (regione irregolare).

viene rappresentato da un singolo punto. La maggior parte dei modelli di colore attualmente in uso sono orientati all'hardware (come monitor e stampanti a colori) e verso applicazioni dove l'obiettivo è la manipolazione del colore (come nella grafica a colori per l'animazione). In termini di image processing, i modelli più comunemente utilizzati sono il modello RGB (rosso, verde, blu) per monitor e telecamere a colori; i modelli CMY (ciano, magenta e giallo) e CMYK (ciano, magenta, giallo e nero) per stampanti a colori e il modello HSI (tonalità, saturazione e intensità), che corrisponde meglio con il modo in cui gli uomini descrivono e interpretano i colori. Il modello HSI ha anche il vantaggio di decorrelare le informazioni dei colori da quelle a scala di grigio; ciò rende adattabili alle immagini a colori molte delle tecniche in scala di grigio presentate nel testo. Esistono altri modelli di colore. In questo testo, ci soffermiamo soltanto sui più rappresentativi. Una volta appresi i contenuti di questo capitolo, non si dovrebbero avere difficoltà nel comprendere altri modelli di colore attualmente in uso.



**Figura 6.7**

Schema del cubo RGB. I punti lungo la diagonale principale rappresentano i valori di grigio, dal nero dell'origine al bianco nel punto  $(1, 1, 1)$ .

### 6.2.1 Il modello RGB

Nel modello RGB, ogni colore è rappresentato dalle sue componenti primarie spettrali di rosso, verde e blu. Questo modello si basa su un sistema di coordinate cartesiane, mentre il sottospazio di interesse è il cubo mostrato nella Figura 6.7, in cui i valori primari RGB si trovano su tre spigoli; i colori secondari ciano, magenta e giallo sono in altri tre spigoli; il nero è all'origine e il bianco si trova sullo spigolo più lontano dall'origine. In questo modello, i toni di grigio (punti di uguali valori RGB) vanno dal nero al bianco lungo la linea che unisce questi due punti. I diversi colori in questo modello sono punti all'interno o sulla superficie del cubo e vengono definiti in maniera vettoriale. Per convenienza, si assume che tutti i valori siano stati normalizzati in modo tale che il cubo mostrato nella Figura 6.7 sia il cubo unitario. Tutti i valori di  $R$ ,  $G$  e  $B$  vengono, quindi, considerati appartenenti al range  $[0, 1]$ .

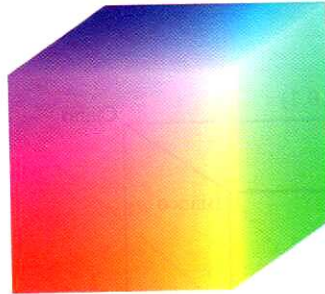
Le immagini rappresentate nel modello RGB sono formate da tre immagini, una per ogni colore primario. Quando vengono inserite in un monitor RGB, queste tre immagini si combinano sullo schermo per produrre un'immagine a colori composta, come spiegato nel Paragrafo 6.1. Il numero di bit utilizzato per rappresentare ogni pixel nello spazio RGB viene detto *profondità del pixel* (*pixel depth*). Si consideri un'immagine RGB in cui ognuna delle immagini rossa, verde e blu è un'immagine a 8 bit. A queste condizioni, ogni pixel *colore* RGB [cioè, una tripletta di valori  $(R, G, B)$ ] ha una profondità di 24 bit (3 volte il numero di bit per piano). Si usa spesso la definizione di immagine *full-color* (o *true color*) per indicare un'immagine a colori RGB a 24 bit. Il numero totale di colori in un'immagine RGB a 24 bit è  $(2^8)^3 = 16777216$ . La Figura 6.8 mostra il cubo di colori RGB a 24 bit corrispondente al diagramma nella Figura 6.7.

#### Esempio 6.1

##### Creazione di piani nascosti e di una sezione trasversale del cubo RGB

Il cubo mostrato nella Figura 6.8 è un solido, composto dai  $(2^8)^3 = 16777216$  colori menzionati nel paragrafo precedente. Un modo conveniente per vedere questi colori è creare piani di colore (facce o sezioni trasversali del cubo). Ciò viene fatto semplice-

**Figura 6.8**  
Cubo RGB  
a 24 bit.

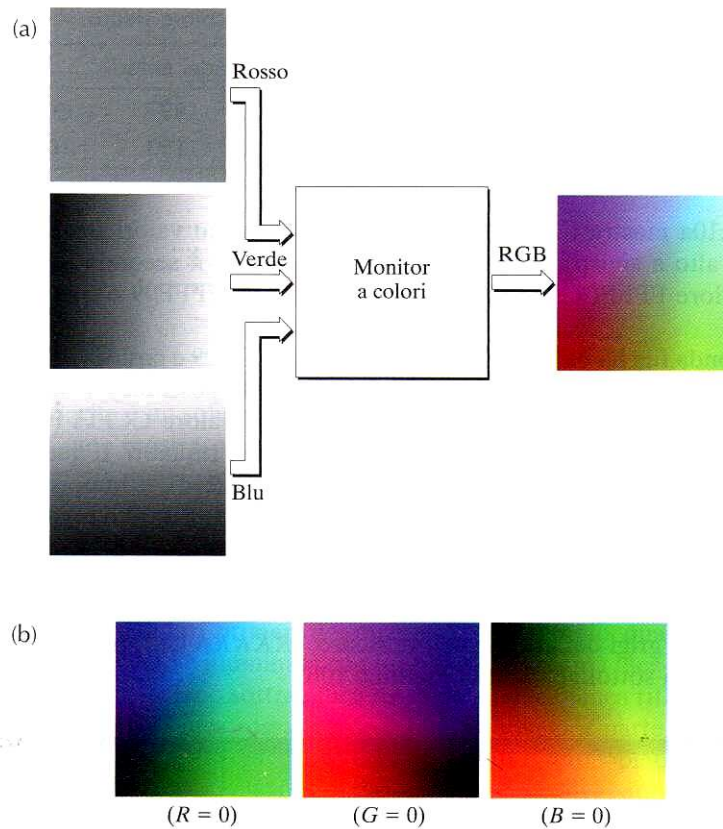


mente fissando uno dei tre colori e permettendo agli altri due di variare. Ad esempio, un piano trasversale che passa attraverso il centro del cubo e parallelo al piano  $GB$  nella Figura 6.8 è il piano  $(127, G, B)$  con  $G, B = 0, 1, 2, \dots, 255$ . In questo caso, utilizziamo i valori dei pixel reali, anziché i valori normalizzati nella gamma  $[0, 1]$ , perché i primi valori sono quelli realmente utilizzati in un computer per creare i colori. La Figura 6.9a mostra come l'immagine del piano trasversale prende forma semplicemente inserendo le tre immagini individuali che la compongono in un monitor a colori. Nelle immagini componenti, il valore 0 rappresenta il nero e il valore 255 rappresenta il bianco (si noti che esse sono immagini a scala di grigio). Infine, la Figura 6.9d mostra tre superfici planari nascoste del cubo nella Figura 6.8, creati nello stesso modo.

È interessante notare che l'*acquisizione* di un'immagine a colori è fondamentalmente l'inverso del processo mostrato nella Figura 6.9. Un'immagine a colori può essere acquisita utilizzando tre filtri, sensibili rispettivamente a rosso, verde e blu. Quando vediamo una scena a colori con una macchina fotografica monocromatica fornita di uno di questi filtri, il risultato è un'immagine monocromatica la cui intensità è proporzionale alla risposta di quel filtro. Ripetendo questo processo con ciascun filtro, si ottengono tre immagini monocromatiche che sono le immagini più usate nella rappresentazione RGB della scena a colori (in pratica, i sensori di immagini a colori RGB di solito integrano questo processo in un singolo dispositivo). Chiaramente, visualizzando queste tre immagini RGB nella forma mostrata nella Figura 6.9a, si avrà una resa a colori RGB della scena originale a colori.

---

Mentre le schede video e i monitor ad alta definizione forniscono una resa ragionevole dei colori di un'immagine RGB 24 bit, molti sistemi attualmente in uso si limitano a 256 colori. Inoltre, ci sono numerose applicazioni in cui non ha senso utilizzare più di qualche centinaio di colori. Un buon esempio di ciò è fornito dalle tecniche di imaging a falsi colori presentate nel Paragrafo 6.3. Data la varietà dei sistemi di uso corrente, è molto interessante avere un sottoinsieme di colori dei quali la riproduzione "fedele" è indipendente dalle capacità dell'hardware. Questo sottoinsieme di colori viene detto insieme di *colori RGB sicuri* (*safe RGB colors*) o insieme di *colori sicuri per tutti i sistemi* (*all-systems-safe colors*). Nelle applicazioni Internet, essi vengono chiamati *colori web sicuri* (*safe web colors*) o *colori browser sicuri* (*safe browser colors*). Assumendo che 256 colori sia il numero minimo di colori che possono essere riprodotti fedelmente da qualunque sistema in cui è probabile che venga visualizzata un'immagine, è utile avere una notazione standard per riferirsi a questi colori. Si sa che 40 di questi 256



**Figura 6.9** (a) Creazione dell'immagine RGB del piano di sezione  $(127, G, B)$ . (b) I tre piani superficiali nascosti nel cubo di colori di Figura 6.8.

colori vengono processati in modo diverso da vari tipi di sistemi operativi, mentre 216 colori sono comuni alla maggior parte dei sistemi. Questi 216 colori sono diventati gli standard di fatto dei colori sicuri, specialmente nelle applicazioni Internet. Essi vengono utilizzati quando si vuole che i colori visti dalla maggior parte delle persone siano gli stessi.

Ognuno dei 216 colori sicuri è formato come sempre da tre valori RGB, ma ogni valore può essere solo 0, 51, 102, 153, 204 o 255. Quindi, le triplette RGB di questi valori ci danno  $(6)^3 = 216$  valori possibili (si noti che tutti i valori sono divisibili per 3). È consuetudine esprimere questi valori nel sistema numerico esadecimale, come mostrato nella Tabella 6.1. Ricordiamo che i numeri esadecimali 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F corrispondono ai numeri decimali 0, 1, 2, ..., 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15. Ricordiamo anche che  $(0)_{16} = (0000)_2$  e  $(F)_{16} = (1111)_2$ . Quindi, per esempio,  $(FF)_{16} = (255)_{10} = (11111111)_2$  ed inoltre un gruppo di due numeri esadecimali forma un byte a 8 bit.

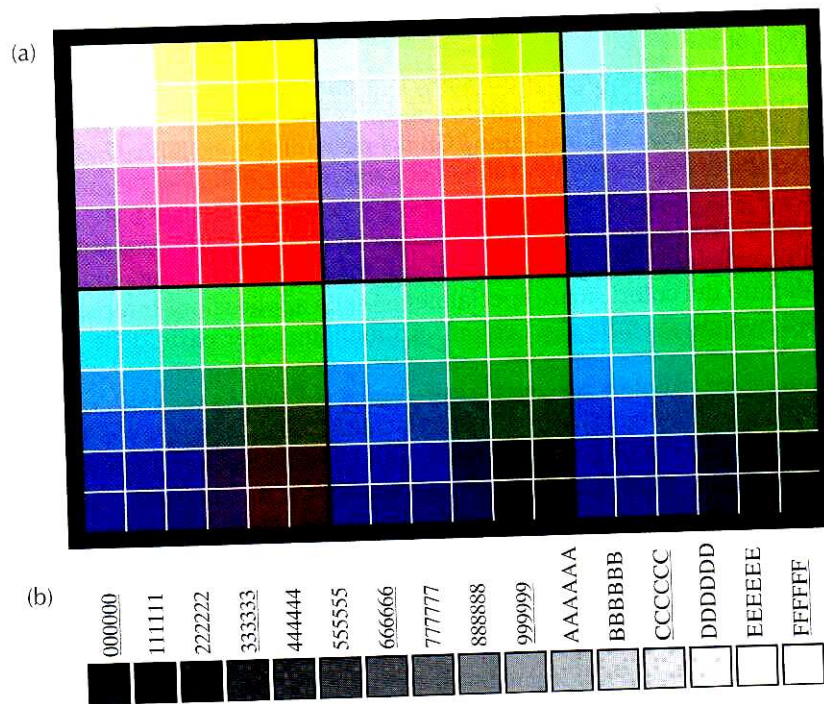
Dato che sono necessari tre numeri per formare un colore RGB, ogni colore sicuro è formato da tre dei numeri esadecimali a due cifre nella Tabella 6.1. Ad esempio, il rosso puro è FF0000. I valori 000000 e FFFFFFFF rappresentano rispettivamente il nero e il bianco. Si ricordi che lo stesso risultato è ottenuto utilizzando il più familiare sistema decimale. Ad esempio, il rosso più chiaro nella simbologia decimale è  $R = 255$  (FF) e  $G = B = 0$ .

**Tabella 6.1** Valori validi per ogni componente RGB di un colore sicuro.

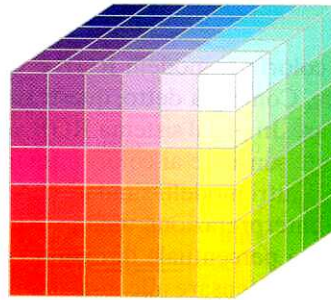
Sistema di numerazione	Equivalenti dei colori					
Esadecimale	00	33	66	99	CC	FF
Decimale	0	51	102	153	204	255

La Figura 6.10a mostra i 216 colori sicuri, organizzati in valori RGB decrescenti. Il quadrato in alto a sinistra ha valore FFFFFFFF (bianco), il secondo quadrato alla sua destra ha valore FFFFCC, il terzo quadrato ha valore FFFF99 e così via per tutta la prima fila.

La seconda fila ha valori FFCCFF, FFCCCC, FFCC99 e così via. Il quadrato finale di quel riquadro ha valore FF0000 (il rosso più brillante possibile). Il secondo riquadro a destra di quello appena esaminato comincia con il valore CCFFFF e procede allo stesso modo, così come avviene per i rimanenti quattro riquadri. Il quadrato finale (in basso a destra) dell'ultimo riquadro ha valore 000000 (nero). È importante notare che non tutti i possibili grigi a 8 bit sono inclusi nei 216 colori sicuri. La Figura 6.10b mostra i codici esadecimali per *tutti* i grigi possibili in un sistema RGB a 256 colori. Alcuni di questi valori sono fuori dall'insieme dei colori sicuri, ma sono rappresentati in modo proprio (in termini delle loro intensità relative) dalla maggior parte dei sistemi di visualizzazione. I grigi del gruppo colore sicuro,  $(KKKKKK)^{16}$ , per  $K = 0, 3, 6, 9, C, F$ , vengono mostrati sottolineati nella Figura 6.10b.



**Figura 6.10** (a) I 216 colori RGB sicuri. (b) Tutti i grigi nel sistema RGB a 256 colori (i grigi che fanno parte del gruppo di colori sicuri sono sottolineati).



**Figura 6.11**  
Cubo RGB  
dei colori  
sicuri.

La Figura 6.11 mostra il cubo RGB dei colori sicuri. Diversamente dal cubo full-color nella Figura 6.8, che è un solido, il cubo nella Figura 6.11 ha colori validi solo nei piani in superficie. Come mostrato nella Figura 6.10a, ogni piano ha un totale di 36 colori, così l'intera superficie del cubo dei colori sicuri è coperta da 216 diversi colori.

### 6.2.2 I modelli CMY e CMYK

Come indicato nel Paragrafo 6.1, ciano, magenta e giallo sono i colori secondari di luce o, alternativamente, i colori primari dei pigmenti. Ad esempio, quando una superficie coperta di pigmenti ciano è illuminata con luce bianca, nessuna luce rossa viene riflessa dalla superficie. Cioè, il ciano sottrae luce rossa dalla luce bianca riflessa, che è composta da quantità uguali di luce rossa, verde e blu. La maggior parte dei dispositivi che depositano pigmenti colorati su carta, come stampanti e fotocopiatrici a colori, richiedono input di dati CMY o applicano internamente una conversione da RGB a CMY. Questa conversione viene effettuata utilizzando la semplice operazione

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6.2-1)$$

dove, ancora una volta, la condizione è che tutti i valori siano stati normalizzati nel range  $[0, 1]$ . L'Equazione (6.2-1) dimostra che la luce riflessa da una superficie coperta con ciano puro non contiene rosso (cioè,  $C = 1 - R$  nell'equazione). In modo simile, il magenta puro non riflette il verde, e il giallo puro non riflette il blu. L'Equazione (6.2-1) rivela anche che i valori RGB possono essere facilmente ottenuti da un insieme di valori CMY sottraendo i singoli valori CMY da 1. Come già detto, nell'elaborazione delle immagini questo modello colore viene utilizzato per la creazione di output di stampa, mentre l'operazione inversa da CMY a RGB generalmente è di scarso interesse pratico.

Secondo la Figura 6.4, uguali quantità dei pigmenti primari, ciano, magenta e giallo, dovrebbero produrre il nero. In pratica, combinando questi tre colori per la stampa, si produce un colore simile al nero. Così, per produrre il vero nero (che è il colore predominante nei processi di stampa), viene aggiunto un quarto colore, *nero (black)*, dando origine al modello CMYK. Quindi, quando gli editori parlano di "stampa in quadricromia", si riferiscono ai tre colori del modello CMY più il nero.

### 6.2.3 Il modello HSI

Come abbiamo visto, creare i colori nei modelli RGB e CMY e passare da un modello all'altro è un processo semplice. Come già detto, questi sistemi sono idealmente pensati per implementazioni su hardware. In più, il sistema RGB si abbina facilmente con il fatto che l'occhio umano è fortemente sensibile ai colori primari rosso, verde e blu. Sfortunatamente, i modelli RGB, CMY e altri modelli simili non sono molto adatti a *descrivere* i colori in termini pratici per l'interpretazione umana. Ad esempio, non ci si riferisce al colore di un'automobile dando la percentuale di ognuno dei colori primari che lo compongono. Inoltre, non si è abituati a pensare alle immagini a colori come composte da tre immagini primarie che si combinano per formare quella singola immagine.

Quando gli uomini vedono un oggetto colorato, lo descrivono tramite la sua tonalità, saturazione e luminosità. Ricordiamo che la tonalità è un attributo del colore che descrive un colore puro (giallo puro, arancione o rosso), mentre la saturazione dà una misura del grado in cui il colore puro è diluito dalla luce bianca. La luminosità è un descrittore soggettivo che è praticamente impossibile da misurare. Esso ingloba la nozione acromatica di *intensità* ed è uno dei fattori chiave per descrivere la percezione di un colore. Quest'ultima è misurabile (livello di grigio) ed è facilmente interpretabile. Il modello che stiamo per presentare, chiamato *modello HSI* (tonalità-hue, saturazione, intensità), divide la componente intensità dalle informazioni relative al colore (tonalità e saturazione) di un'immagine a colori. Come risultato, il modello HSI è uno strumento ideale per sviluppare gli algoritmi di elaborazione di un'immagine in quanto si basa su descrizioni dei colori che sono più naturali e intuitive. In conclusione, il modello RGB è ideale per la creazione di immagini a colori (come nella cattura di un'immagine attraverso una macchina fotografica a colori o nella visualizzazione di un'immagine su un monitor), ma il suo uso per la *descrizione* del colore è molto più limitato.

Come discusso nell'Esempio 6.1, un'immagine a colori RGB può essere vista come tre immagini di intensità monocromatiche che rappresentano rosso, verde e blu, quindi non dovrebbe sorprendere il fatto che è possibile estrarre un valore di intensità. Questo diventa ancora più evidente se consideriamo il cubo dei colori della Figura 6.7 e lo posizioniamo sul vertice nero (0, 0, 0), con il vertice bianco (1, 1, 1) direttamente sopra di esso, come mostrato nella Figura 6.12a. Come già detto per la Figura 6.7, l'intensità (scala di grigio) si trova lungo la linea che unisce questi due vertici. Nello schema mostrato nella Figura 6.12, la linea (asse di intensità) che unisce i vertici bianco e nero è verticale. Quindi, se vogliamo determinare la componente di intensità di ogni punto colore, dobbiamo semplicemente far passare un piano *perpendicolare* all'asse di intensità che contenga il punto. L'intersezione del piano con l'asse di intensità ci darà un punto con valore di intensità nella gamma [0, 1]. Inoltre, si noti che la saturazione (purezza) di un colore aumenta in funzione della distanza dall'asse di intensità. Infatti, la saturazione di punti sull'asse di intensità è zero, come provato dal fatto che tutti i punti lungo questo asse sono grigi.

Per vedere come anche la tonalità possa essere determinata da un dato punto RGB, consideriamo la Figura 6.12b, che mostra un piano definito da tre punti (nero, bianco e ciano). Il fatto che i punti bianco e nero siano contenuti nel piano, ci dice che anche l'asse di intensità è contenuta nel piano. Inoltre, vediamo che *tutti* i punti contenuti nel segmento di piano definiti dall'asse di intensità e i bordi del cubo hanno la stessa *tonalità* (ciano, in questo caso). Arriveremmo alla stessa conclusione ricordando dal Paragrafo 6.1 che tutti i colori generati dai tre colori giacciono su un triangolo de-

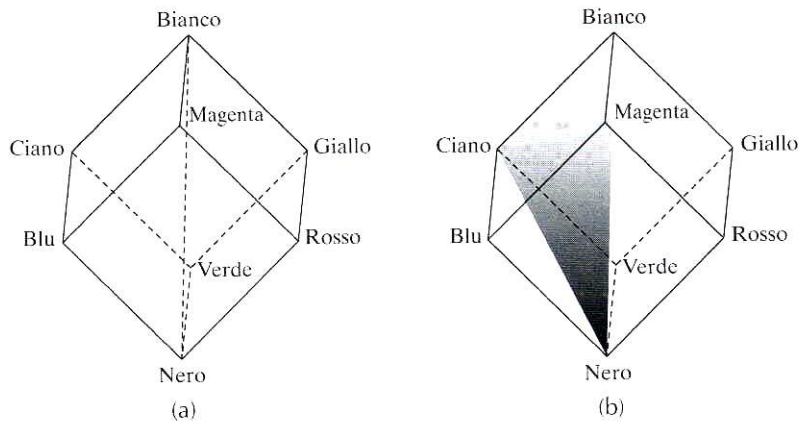
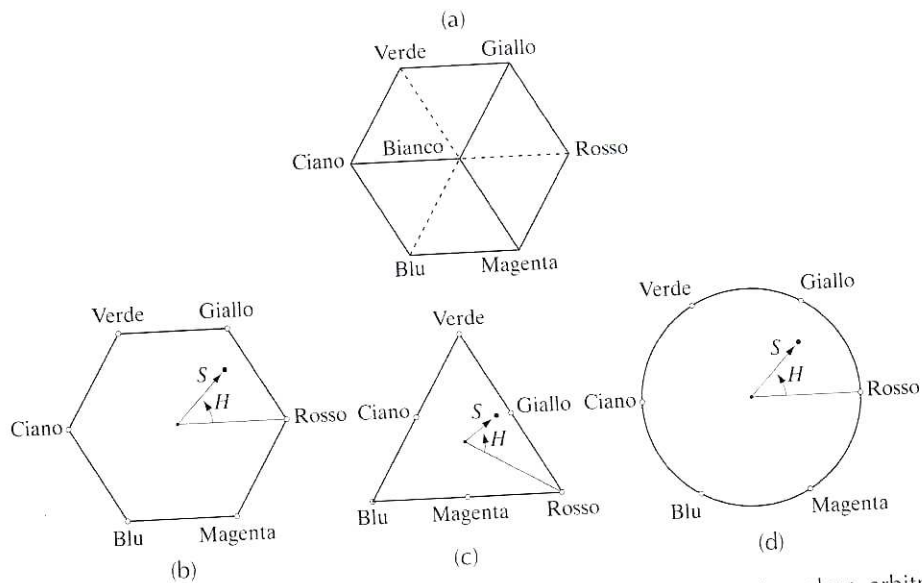


Figura 6.12 Relazioni concettuali tra i modelli di colori RGB e HSI.

finito da quei colori. Se due di quei punti sono bianco e nero e il terzo è un punto colore, tutti i punti sul triangolo non possono cambiare di tonalità (ovviamente, l'intensità e la saturazione dei punti in questo triangolo potrebbero essere differenti). Ruotando il piano tratteggiato lungo l'asse verticale di intensità, otterremo diverse tonalità. Da questi concetti, arriviamo alla conclusione che i valori di tonalità, saturazione e intensità richiesti per formare lo spazio HSI possono essere ottenuti dal cubo RGB. Cioè, possiamo convertire qualunque punto RGB in un punto corrispondente nel modello HSI applicando le formule geometriche che descrivono il ragionamento illustrato nelle discussioni precedenti.

Il concetto più importante da tenere a mente riguardo allo schema del cubo nella Figura 6.12 e il corrispondente spazio colore HSI, è che lo spazio HSI è rappresentato da un asse di intensità verticale e dal luogo dei punti colore che giacciono su piani *perpendicolari* a questo asse. Dato che i piani si muovono su e giù lungo l'asse di intensità, i bordi definiti da una intersezione di ogni piano con le facce del cubo hanno una forma triangolare o esagonale. Questo può essere visualizzato meglio osservando il cubo al di sotto del suo asse in scala di grigio, come mostrato nella Figura 6.13a. In questo piano vediamo che i colori primari sono separati da  $120^\circ$ . I colori secondari sono a  $60^\circ$  rispetto ai colori primari; ciò significa che anche l'angolo tra i colori secondari è di  $120^\circ$ . La Figura 6.13b mostra la stessa forma esagonale e un punto colore arbitrario (mostrato con un punto). La tonalità del punto è determinata dall'angolo rispetto a qualche punto di riferimento. Di solito (ma non sempre) un angolo di  $0^\circ$  dall'asse rosso indica la tonalità 0 e la tonalità aumenta in senso orario a partire da quel punto. La saturazione (distanza dall'asse verticale) è la lunghezza del vettore dall'origine a quel punto. Si noti che l'origine è definita dall'intersezione del piano colore con l'asse di intensità verticale. Le componenti importanti dello spazio HSI sono l'asse di intensità verticale, la lunghezza del vettore verso un punto colore e l'angolo che questo vettore descrive con l'asse del rosso. Inoltre, non è insolito vedere i piani HSI indicati come l'esagono appena trattato, un triangolo o anche un cerchio, come mostrano le Figure 6.13c e 6.13d. La forma scelta non è un problema perché ognuna di queste forme può essere trasformata in una delle altre due attraverso una trasformazione geometrica. La Figura 6.14 mostra il modello HSI basato su triangoli di colore e anche su cerchi.



**Figura 6.13** Tonalità e saturazione nel modello HSI. Il punto è un punto colore arbitrario. L'angolo dall'asse rosso dà la tonalità e la lunghezza dal vettore è la saturazione. L'intensità di tutti i colori in ognuno di questi piani è data dalla posizione del piano sull'asse di intensità verticale.

### Convertire i colori da RGB a HSI

Data un'immagine in formato RGB, la componente  $H$  di ogni pixel RGB è ottenuta utilizzando l'equazione<sup>2</sup>

$$H = \begin{cases} \theta & \text{se } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{se } B > G \end{cases} \quad (6.2-2)$$

con<sup>3</sup>

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}$$

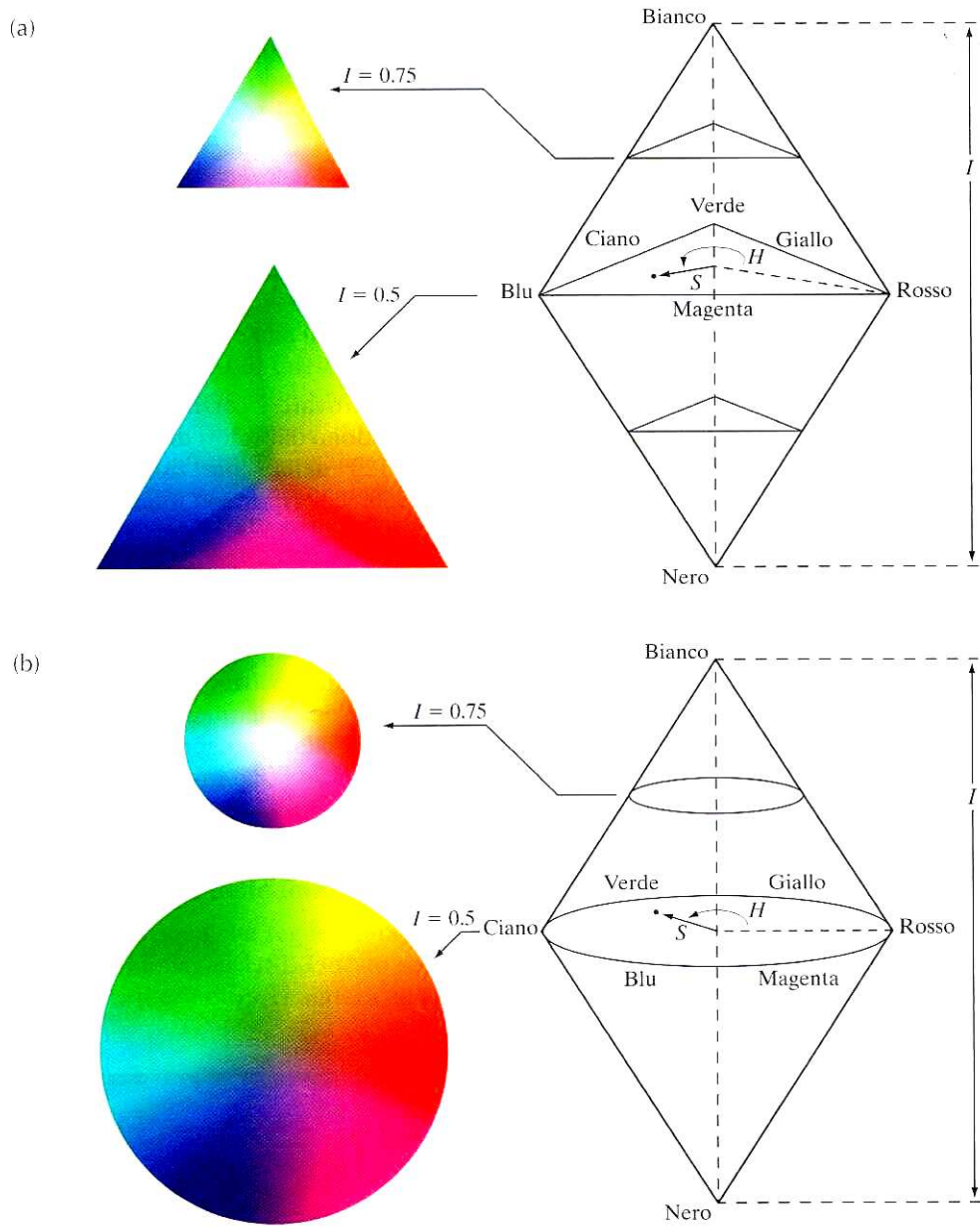
La componente di saturazione è data da

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (6.2-3)$$

<sup>2</sup> Le conversioni da RGB a HSI e viceversa vengono effettuate per singolo pixel. Abbiamo ommesso la dipendenza da  $(x, y)$  delle equazioni di conversione per semplicità di notazione.

<sup>3</sup> È buona norma aggiungere un numero molto piccolo al denominatore di questa espressione per evitare di dividere per 0 quando  $R = G = B$ , caso in cui  $\theta$  sarà  $90^\circ$ . Si noti che, quando tutte le componenti RGB sono uguali, l'Equazione (6.2-3) dà  $S = 0$ . Inoltre, la conversione da HSI a RGB nelle Equazioni da (6.2-5) a (6.2-7) darà, in questo caso,  $R = G = B = I$ , come previsto, perché quando  $R = G = B$ , si ha a che fare con immagini in scala di grigio.





**Figura 6.14** Il modello HSI basato su piani di colore (a) triangolari e (b) circolari. I triangoli e i cerchi sono perpendicolari all'asse verticale di intensità.

Infine, la componente di intensità è data da

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (6.2-4)$$

È chiaro che i valori RGB sono stati normalizzati nella gamma  $[0, 1]$  e che l'angolo  $\theta$  viene misurato rispetto all'asse rosso dello spazio HSI, come indicato nella Figura 6.13. La tonalità può essere normalizzata nella gamma  $[0, 1]$  dividendo per  $360^\circ$  tutti i valori risultanti dall'Equazione (6.2-2). Le altre due componenti HSI sono già nel range se i valori RGB dati sono nell'intervallo  $[0, 1]$ .

Il risultato nelle Equazioni da (6.2-2) a (6.2-4) può essere derivato dalla geometria mostrata nelle Figure 6.12 e 6.13. La spiegazione della derivazione non aggiungerebbe nulla di significativo alla trattazione. Chi fosse interessato può consultare le referenze del testo o il sito web per le relative dimostrazioni, così come per la conversione da HSI a RGB, dal paragrafo che segue.

### Convertire i colori da HSI a RGB

Dati i valori di HSI nell'intervallo  $[0, 1]$ , si vogliono trovare i corrispondenti valori RGB nello stesso range. Le equazioni applicabili dipendono dai valori di  $H$ . Ci sono tre settori di interesse, corrispondenti agli intervalli di  $120^\circ$  nella separazione dei colori primari (Figura 6.13). Si inizia moltiplicando  $H$  per  $360^\circ$ , che riporta la tonalità alla sua gamma originale di  $[0^\circ, 360^\circ]$ .

**Settore RG** ( $0^\circ \leq H < 120^\circ$ ): quando  $H$  si trova in questo settore, le componenti RGB sono date dalle equazioni

$$B = I(1 - S) \quad (6.2-5)$$

$$R = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-6)$$

e

$$G = 3I - (R + B) \quad (6.2-7)$$

**Settore GB** ( $120^\circ \leq H < 240^\circ$ ): se il dato valore di  $H$  si trova in questo settore, sottraiamo  $120^\circ$  da esso:

$$H = H - 120^\circ \quad (6.2-8)$$

Allora le componenti RGB sono

$$R = I(1 - S) \quad (6.2-9)$$

$$G = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-10)$$

e

$$B = 3I - (R + G) \quad (6.2-11)$$

**Settore BR** ( $240^\circ \leq H < 360^\circ$ ): se  $H$  si trova in questa gamma, sottraiamo  $240^\circ$  da esso:

$$H = H - 240^\circ \quad (6.2-12)$$

Allora le componenti RGB sono

$$G = I(1 - S) \quad (6.2-13)$$

$$B = I \left[ 1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (6.2-14)$$

e

$$R = 3I - (G + B) \quad (6.2-15)$$

### Esempio 6.2

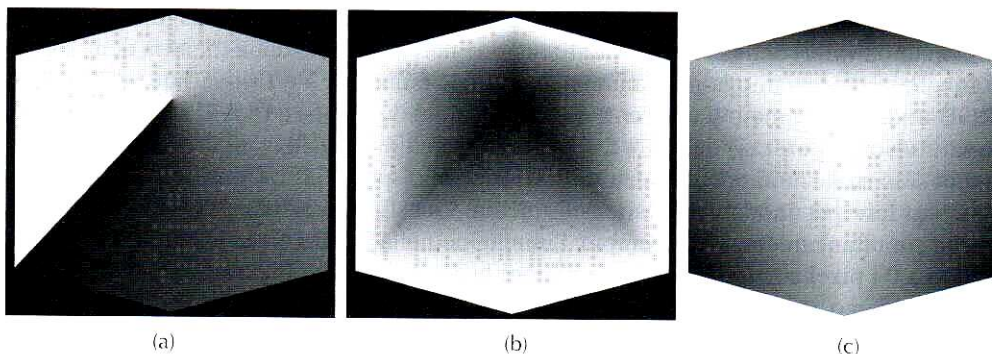
#### I valori HSI corrispondenti all'immagine del cubo RGB

La Figura 6.15 mostra le immagini di tonalità, saturazione e intensità per i valori RGB mostrati nella Figura 6.8. La Figura 6.15a è l'immagine della tonalità. La sua caratteristica più evidente è la discontinuità nel valore lungo una linea di 45° nel pannello frontale (rosso) del cubo. Per capire il motivo di questa discontinuità, fare riferimento alla Figura 6.8, disegnare una linea dal vertice rosso al vertice bianco del cubo e selezionare un punto al centro di questa linea. Partendo da quel punto, disegnare un percorso a destra, seguendo il cubo tutto intorno fino a ritornare al punto di partenza. I colori incontrati in questo percorso sono giallo, verde, ciano, blu, magenta e di nuovo rosso. Secondo la Figura 6.13, i valori di tonalità lungo questo percorso aumentano da 0° a 360° (cioè, dai valori di tonalità più bassi ai più alti possibili). Questo è esattamente quello che è mostrato nella Figura 6.15a perché il valore più basso è rappresentato come nero e il più alto come bianco nella scala di grigio. Infatti, l'immagine della tonalità è stata originariamente normalizzata nella gamma [0, 1] e poi ridotta a 8 bit; cioè, è stata convertita nella gamma [0, 255], per la visualizzazione.

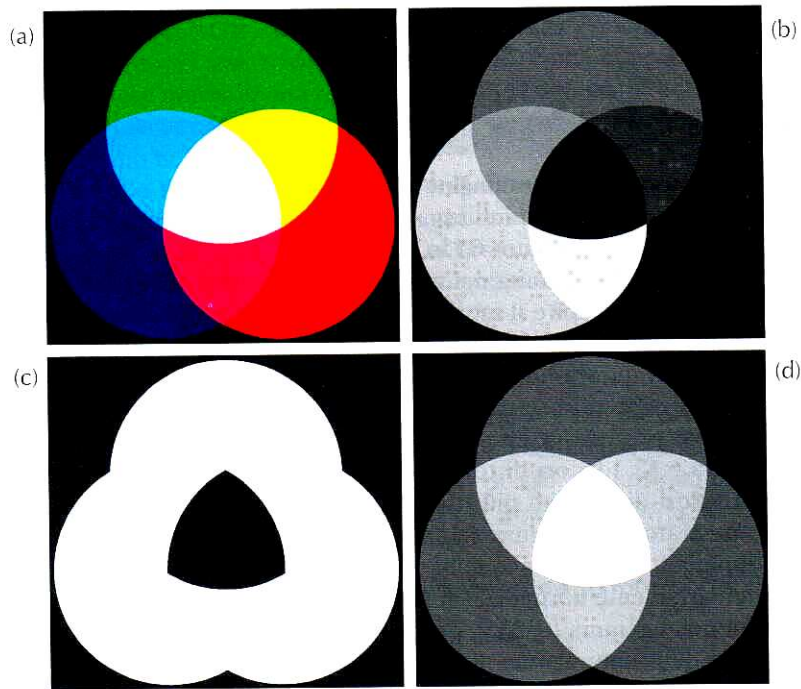
L'immagine della saturazione nella Figura 6.15b mostra valori progressivamente più scuri verso il vertice bianco del cubo RGB; ciò indica che i colori diventano sempre meno saturi man mano che si avvicinano al bianco. Infine, ogni pixel nell'immagine dell'intensità mostrata nella Figura 6.15c è la media dei valori RGB al pixel corrispondente nella Figura 6.8.

### Manipolazione delle immagini HSI

Nella trattazione che segue, diamo uno sguardo ad alcune semplici tecniche per manipolare le immagini HSI. Questo servirà per avere maggiore familiarità con le singole componenti e, inoltre, ci aiuterà ad approfondire la comprensione del modello HSI. La



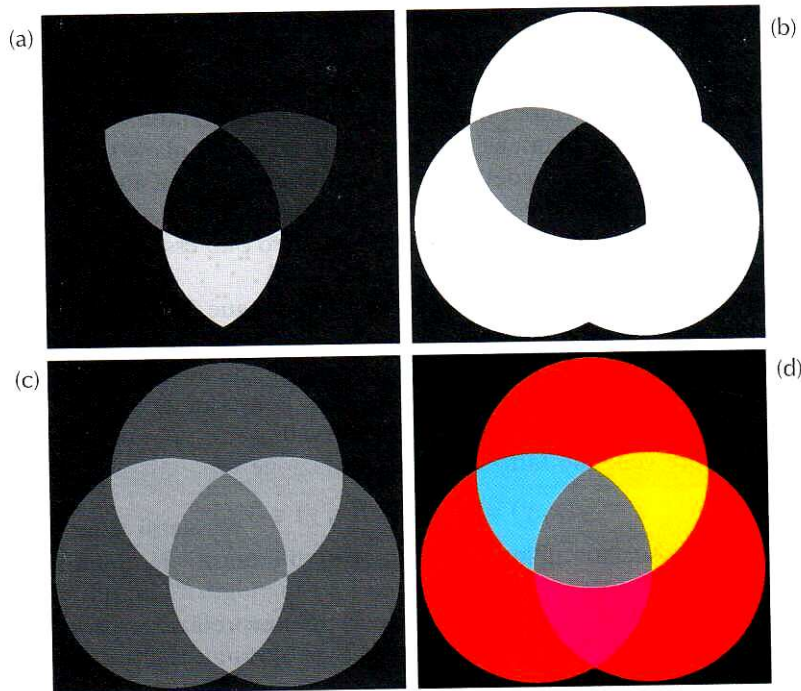
**Figura 6.15** Componenti HSI dell'immagine nella Figura 6.8. Immagini di (a) tonalità, (b) saturazione e (c) intensità.



**Figura 6.16** (a) Immagine RGB e le componenti della stessa immagine in HSI: (b) tonalità, (c) saturazione e (d) intensità.

Figura 6.16a mostra un'immagine composta da colori RGB primari e secondari. Le Figure da 6.16b a 6.16d mostrano le componenti  $H$ ,  $S$  e  $I$  di questa immagine, create utilizzando le Equazioni da (6.2-2) a (6.2-4). Ricordiamo che i valori in scala di grigio nella Figura 6.16b corrispondono agli angoli; quindi, ad esempio, dato che il rosso corrisponde a  $0^\circ$ , la regione rossa nella Figura 6.16a è trasformata in una regione nera nell'immagine della tonalità. In modo simile, i livelli di grigio nella Figura 6.16c corrispondono alla saturazione (essi sono stati ridotti nella gamma  $[0, 255]$  per la visualizzazione) e i livelli di grigio nella Figura 6.16d sono le intensità medie.

Per modificare un singolo colore di una data regione in un'immagine RGB, modifichiamo i valori della corrispondente regione nell'immagine della tonalità della Figura 6.16b. Poi, convertiamo la nuova immagine  $H$  e le immagini  $S$  e  $I$  (invariate) di nuovo in RGB utilizzando i metodi derivanti dalle Equazioni da (6.2-5) a (6.2-15). Per modificare la saturazione (purezza) del colore, si procede in maniera analoga, operando dei cambiamenti solo nella componente della saturazione nello spazio HSI. Considerazioni simili si possono fare per modificare l'intensità media. Queste alterazioni possono essere fatte anche simultaneamente. Ad esempio, l'immagine nella Figura 6.17a è stata ottenuta ponendo a 0 i pixel corrispondenti alle regioni blu e verde nella Figura 6.16b. Nella Figura 6.17b abbiamo ridotto di metà la saturazione della regione ciano nell'immagine della componente  $S$  della Figura 6.16c. Nella Figura 6.17c abbiamo ridotto a metà l'intensità della regione bianca centrale nell'immagine dell'intensità della Figura 6.16d. Il risultato della conversione di questa immagine HSI modificata nello spazio RGB è mostrato nella



**Figura 6.17** (a)-(c) Immagini delle componenti HSI modificate. (d) Immagine RGB risultante (si veda la Figura 6.16 per le immagini HSI originali).

Figura 6.17d. Come previsto, le porzioni esterne di tutti i cerchi sono ora rosse; la purezza della regione ciano è stata diminuita e la regione centrale è diventata grigia, anziché bianca. È stata, quindi, verificata l'efficacia del modello HSI nel permettere il controllo *indipendente* su tonalità, saturazione e intensità, quantità utili e familiari nella descrizione dei colori.

## 6.3 Elaborazione di immagini a falsi colori

L'elaborazione di immagini *a falsi colori* (*pseudocolori*) consiste nell'assegnare opportunamente l'informazione colore ai valori di grigio. Il termine *pseudo* (o *falso*) colore viene utilizzato per differenziare il processo di assegnazione dei colori per immagini monocromatiche da quanto, invece, avviene per le immagini true color (Paragrafo 6.4). L'uso principale delle immagini a falsi colori si ha nel settore della visualizzazione e dell'interpretazione visiva da parte dell'uomo di fenomeni a toni di grigio descritti da una o più immagini in sequenza.

### 6.3.1 Ripartizione delle intensità (*slicing*)

La tecnica di *ripartizione delle intensità* (a volte detta *densità*) e la codifica del colore sono uno degli esempi più semplici di image processing a falsi colori. Se un'immagine viene interpretata come una funzione 3-D (Figura 2.18a), il metodo consiste nel porre