

Presidente da República
Fernando Henrique Cardoso

Ministro do Planejamento, Orçamento e Gestão
Martus Antônio Rodrigues Tavares

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE

Presidente
Sérgio Besserman Vianna

Diretor Executivo
Nuno Duarte da Costa Bittencourt

ÓRGÃOS TÉCNICOS SETORIAIS

Diretoria de Pesquisas
Maria Martha Malard Mayer

Diretoria de Geociências
Guido Gelli

Diretoria de Informática
Paulo Roberto Ribeiro da Cunha

Centro de Documentação e Disseminação de Informações
David Wu Tai

Escola Nacional de Ciências Estatísticas
Kaizô Iwakami Beltrão

UNIDADE RESPONSÁVEL

Diretoria de Geociências
Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais

Celso José Monteiro Filho
Primeira Divisão de Geociências do Nordeste
Roberval Matos Rocha

Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências
Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais
Primeira Divisão de Geociências do Nordeste

Manuais técnicos em geociências - número 9

Introdução ao Processamento Digital de Imagens

Rio de Janeiro
2001

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

Av. Franklin Roosevelt, 166 - Centro - 20021-120 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

ISSN 0103-9598 Manuais técnicos em geociências. Divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências.

ISBN 85-240-0762-1

© IBGE, 2001

Capa

Ubiratã O. dos Santos - Gerência de Criação - DIVIC/CDDI

Ilustração

Parte da Carta Imagem SD 21 YC - LANDSAT - utilizada no PROJETO SIVAM

Introdução ao processamento digital de imagens / IBGE, Primeira
Divisão de Geociências do Nordeste. - Rio de Janeiro : IBGE,
2001.

94p. - (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598 ; n.9)

ISBN 85-240-0762-1

1. Processamento de imagens - Técnicas digitais. I. IBGE. Primeira
Divisão de Geociências do Nordeste. II. Série.

Divisão de Biblioteca e Acervos Especiais CDU 528.852:681.32
RJ/99-28 CART

Impresso no Brasil / *Printed in Brazil*

Sumário

Apresentação	9
Siglas e abreviaturas	11
Características das imagens de sensoriamento remoto	13
O espectro eletromagnético	14
As janelas atmosféricas	15
A imagem digital	16
Resolução das imagens	18
Resolução espacial	18
Resolução espectral	18
Resolução radiométrica	19
Resolução temporal	19
Sistemas sensores	21
Classificação dos sensores	21
Fonte de energia	22
Região espectral	22
Sistemas de captação dos dados	22
Plataformas orbitais	24
Tipos de órbita	25
Evolução dos sistemas sensores	25
Das fotografias aéreas aos foguetes	25
Sensores de baixa resolução espacial	26
Sensores de resolução espacial intermediária	27
Programas de radar orbital	30
Programas espaciais brasileiros	31

Sensores com alta resolução espacial	32
Sensores de alta resolução espectral	33
Comportamento espectral dos materiais	35
Comportamento espectral da vegetação	35
Comportamento espectral da água	36
Comportamento espectral dos solos	37
Comportamento espectral das rochas	38
Comportamento espectral de áreas construídas	39
Crerios para seleção das imagens	39
Manipulaço do contraste	41
Histogramas de imagens	41
Contraste e brilho da imagem	42
Realces de contraste	42
LUT	43
Realce linear	43
Realce de equalizaço	45
Realce Gaussiano	45
Realce de raiz quadrada	46
Realce negativo	46
Realce de infreqüência	46
Realce logarítmico	46
Realce exponencial	47
Realce parcial (<i>piecewise stretch</i>)	47
Limiarizaço (<i>tresholding</i>)	48
Formaço das cores	49
O modelo RGB	49
Imagem monocromática/falsa/pseudocor	50
Fatiamento (<i>density slicing</i>)	53
Transformaço IHS (<i>Intensity, Hue, Saturation</i>)	54
Operaçoes aritméticas com imagens	57
Adiço	57
Subtraço	58
Raço espectral (<i>Ratio</i>)	59
Multiplicaço	61
Filtragem de imagens	63
Freqüência espacial	63
Convoluço	64
Filtros de passa-baixas (<i>low-pass filter</i>)	65
Filtro de média	65
Filtro de média ponderada	65
Filtro de moda	65

Filtro de mediana	66
Filtros de passa-altas (<i>high-pass filter</i>)	66
Filtros Laplacianos	67
Filtros Laplacianos + imagem original	67
Filtros direcionais	68
Subtração dos componentes de baixa frequência	68
Análise de principais componentes - APC	69
Variância e covariância de imagens	69
Correlação	69
Gráfico de dispersão	69
Correlação de imagens	70
Causas da existência de correlação	71
A transformação por principais componentes	71
Autovetores e autovalores	72
Interpretação de imagens PCs	74
Classificação	75
Classificação supervisionada	76
Método da mínima distância	77
Método do paralelepípedo	77
Método da máxima verossimilhança (MAXVER)	78
Classificação não-supervisionada (exploratória)	79
Isodata	80
Operações pós-classificação	81
Agregação de classes	81
Destaque de classe	81
Homogeneização	81
Avaliação da classificação	81
Correções geométrica e radiométrica	83
Correção radiométrica	83
Razão de canais	83
Estudos multitemporais	84
Compensação pela dispersão atmosférica (<i>haze compensation</i>)	84
Correção geométrica	85
Correção de erros sistemáticos (<i>bulk or system correction</i>)	85
Correção de precisão	86
Acurácia da correção geométrica	89
Referências bibliográficas	91
Lista de Quadros	
1 - Representação dos formatos de gravação dos dados	17
2 - Escalas de trabalho indicadas por algumas imagens	18

3 - Tipos de sensores	21
4 - Comparação entre os dois sistemas de varreduras	24
5 - Características do AVHRR	26
6 - Aplicações do sensor AVHRR	26
7 - Cronograma dos satélites LANDSAT	27
8 - Características orbitais do LANDSAT-5 e dos sensores MSS e TM	27
9 - Características do SPOT	28
10 - Especificações de satélite IRS-1C	29
11 - Características espectrais do RESURS-01	30
12 - CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellites	31
13 - Características dos SSRs da MECB	32
14 - Sistemas de alta resolução	33
15 - Regiões espectrais próprias ao estudo de propriedades dos solos	38
16 - Regiões do espectro indicadas para estudos das rochas e dos minerais	39
17 - Algumas aplicações das bandas do LANDSAT/TM	41
18 - Exemplo de matriz de correlação	71
19 - <i>Eigenvalues</i> da imagem de <i>Derbyshire</i>	73
20 - <i>Eigenvectors</i> da imagem de <i>Derbyshire</i>	74
21 - Matriz de erro ou de confusão	82

Lista de Figuras

1 - Representação esquemática da captação de dados por SR	14
2 - Espectro eletromagnético	15
3 - Transmitância percentual da atmosfera terrestre	16
4 - Formato da imagem digital	16
5 - Brilho do pixel	17
6 - Representação esquemática dos dados de três bandas	17
7 - <i>Instantaneous field of view</i>	18
8 - Espectro óptico	22
9 - Sistema fotográfico	23
10 - Sistemas de varreduras eletrônica e mecânica	24
11 - Características do imageamento do Thematic Mapper - TM	28
12 - a) Os sensores do SPOT; e b) O recurso do apontamento lateral	29
13 - Assinatura espectral (média) da folha verde	36
14 - Comportamento espectral da água	36
15 - Reflectância da água superficial e a 20 metros de profundidade	37
16 - Comparação entre as curvas de reflectância da água, vegetação sadia, solo e areia	38
17 - Comportamento espectral das feições urbanas/suburbanas	39

18 - Resolução espectral dos sensores SPOT e LANDSAT/TM	40
19 - Histograma de uma imagem	41
20 - Contraste e brilho de imagens	42
21 - Representação gráfica de uma FTC linear	43
22 - Realce linear	44
23 - Realce MinMax	45
24 - <i>Overflow</i>	45
25 - Realce de equalização	46
26 - Realce logarítmico	47
27 - Realce exponencial	47
28 - Realce parcial	48
29 - Limiarização	48
30 - Cubo de cores	50
31 - Formação da composição colorida (RGB)	50
32 - Formação das cores	51
33 - LUT para <i>Display</i> monocromático e pseudocor	52
34 - Representação gráfica do fatiamento	53
35 - Imagem fatiada	53
36 - Modelo do hexacôneo	54
37 - Transformação IHS	54
38 - Fusão de três bandas de imagem TM com SPOT	55
39 - Histograma de uma imagem de saída de subtração	58
40 - Redução do efeito da topografia	59
41 - Linhas de mesma razão	60
42 - Perda de informação na razão de canais	60
43 - Curvas de frequência espacial	64
44 - Convolução	65
45 - Filtro de média	65
46 - Efeitos do filtro passa-baixas	66
47 - Filtro de média ponderada	66
48 - Exemplo de aplicação de filtro de moda	66
49 - Exemplo de aplicação de filtro de mediana	67
50 - Exemplos de operadores de Laplace	67
51 - Efeitos do filtro de passa-altas	67
52 - Filtros de Sobel	68
53 - Filtros de Prewitt	68
54 - Gráfico de dispersão de duas variáveis altamente correlacionadas	70
55 - Gráfico de dispersão de duas variáveis com baixa correlação	70
56 - Imagens correlacionadas	70
57 - Parâmetros do elipsóide de distribuição	72
58 - Determinação dos eixos das PCs	72
59 - Rotação dos eixos das PCs	73
60 - Imagem classificada	75
61 - Assinatura espectral	76

62 - Modelo da classificação supervisionada	77
63 - Técnicas de classificação supervisionada	78
64 - Critérios para classificação pela técnica ML	79
65 - Isodata (iteração I)	80
66 - Isodata (iteração II)	80
67 - Isodata (iteração III)	81
68 - Homogeneização por filtro de moda	81
69 - Componentes do sinal recebido pelo sensor	84
70 - Gráfico de regressão	85
71 - Efeito da rotação da Terra	85
72 - Transformação da imagem bruta para a imagem corrigida	87
73 - Reamostragem (vizinho mais próximo)	88
74 - Reamostragem (interpolação bilinear)	88

Apresentação

Tradicionalmente, a extração de informações das imagens de sensoriamento remoto pelas equipes técnicas de geociências tem sido feita por métodos analógicos. Entretanto, a partir dos anos 90, constata-se uma utilização crescente do processamento digital. Esta mudança foi impulsionada pela vertiginosa evolução ocorrida na indústria da informática, marcada pelo aumento na capacidade de processamento e redução dos custos dos equipamentos, o que permite hoje o tratamento de imagens em computadores de mesa. Da mesma forma, um número cada vez maior de aplicativos dedicados ao processamento digital de imagens vem sendo disponibilizado no mercado.

Por outro lado, verifica-se um crescimento acelerado na produção de dados geoespaciais destinados a atender às necessidades específicas das várias categorias de usuários. A manipulação e integração desta multiplicidade de dados, de características e fontes distintas, para transformá-los em informações relevantes à sociedade, seria extremamente difícil sem os recursos da informática, visto que o armazenamento, processamento e transmissão dos dados são feitos na forma digital. O processamento digital de imagens oferece uma gama de técnicas que propiciam a exploração de detalhes inacessíveis pelos métodos convencionais e permite realçar e destacar aspectos de interesse específico a determinados temas e objetivos.

O processamento digital de imagens e os sistemas de informações geográficas constituem hoje ferramentas essenciais em várias áreas do conhecimento. Os profissionais de geociências precisam estar permanentemente atentos a estas transformações no *modus operandi*, sob pena de perder informações, rapidez e

eficiência. Neste contexto insere-se a elaboração deste Manual, que, de forma concisa e em nível introdutório, procura descrever os conceitos e técnicas digitais mais utilizados para a extração de informações das imagens nos vários ramos das ciências da terra. Entendemos que esta iniciativa vem atender a uma necessidade e representa uma contribuição efetiva para o aprimoramento dos métodos de trabalho nos levantamentos de recursos naturais, cartografia e meio ambiente.

Guido Gelli
Diretor de Geociências

Siglas e abreviaturas

AEB - Agência Espacial Brasileira
APC - Análise de Principais Componentes
AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer*
BPI - *Bits Per Inch*
BPS - *Bits Per Second*
CBERS - *China-Brazil Earth Resources Satellite*
DN - *Digital Number*
EM - eletromagnético
ERS - *European Remote Sensing Satellite*
FTC - Função de Transferência de Contraste
GCP - *ground control point*
GPS - *Global Positioning System*
IFOV - *Instantaneous Field of View*
IHS - *Intensity-Hue-Saturation*
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRS - *Indian Remote Sensing*
IV - infravermelho
ISODATA - *Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques*
JERS - *Japan Earth Resources Satellite*
LUT - *Look-up Table*
MAXVER - Máxima Verossimilhança
MECB - Missão Espacial Completa Brasileira
ML - Maximum Likelihood
MSS - *Mutispectral Scanner*
NASA - *National Aeronautics and Space Administration* (Estados Unidos)
NC - Nível de Cinza
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

NOAA - *National Ocean and Atmosphere Administration* (Estados Unidos)
PAN - Pancromático
PC - *Principal Component/Componente Principal*
PDI - Processamento Digital de Imagens
RBV - *Return Beam Vidicon*
REM - Radiação Eletromagnética
RGB - *Red-Green-Blue*
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SLAR - *Side Looking Airborne Radar*
SPOT - *Système Probatoire d'Observation de la Terre*
SR - Sensoriamento Remoto
TIROS - *Television and Infrared Observation Satellite*
TM - *Thematic Mapper*
UV - ultravioleta
WFI - Imageador de Visada Larga

Características das imagens de sensoriamento remoto

Sensoriamento Remoto - SR - consiste na medição ou aquisição de dados sobre um objeto ou cena a distância ou, mais especificamente, obtenção de informações sem entrar em contato direto com a área ou fenômeno sob investigação.

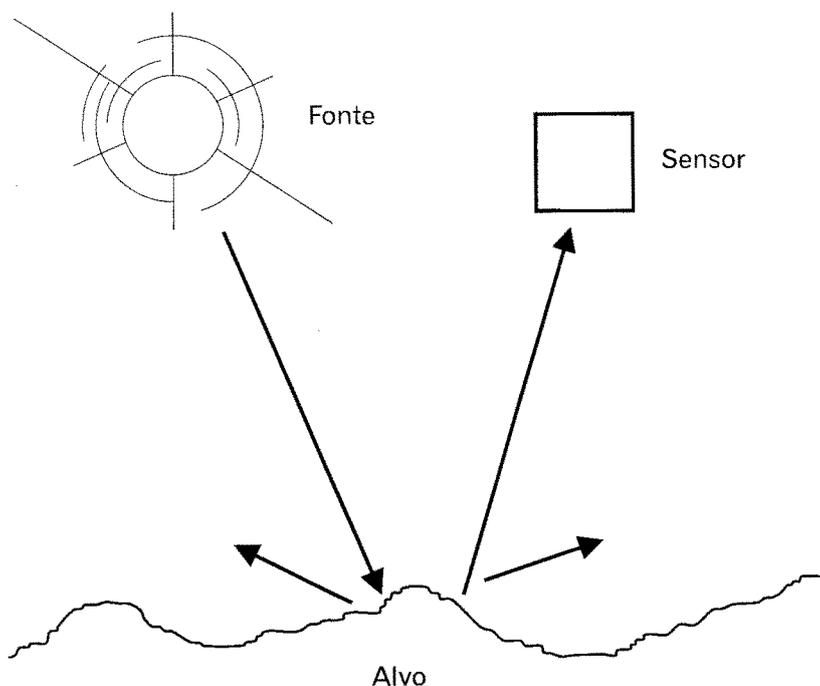
Um dos principais objetivos do SR é a aquisição de informações sobre a superfície da terra para mapeamento e avaliação de recursos terrestres e monitoramento ambiental. Todos os materiais (naturais ou artificiais) da superfície da terra, com temperatura superior a zero absoluto (0° K), podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente **Radiação Eletromagnética** - REM. A **Energia Eletromagnética** - EM - mais familiar e mais importante em SR é a energia solar.

Em sensoriamento remoto o fluxo radiante que deixa o objeto em direção ao sensor é denominado **radiância** do alvo. O fluxo de energia EM ao incidir sobre um objeto, sofre interações com o material que o compõe podendo ser parcialmente refletido, absorvido ou transmitido pelo objeto. A **reflectância espectral** de um objeto é dada pela razão entre a energia EM refletida pela energia incidente na superfície do mesmo.

A discriminação dos materiais por SR é feita com base no registro, na forma de imagens, da REM refletida ou emitida pelos alvos e captada por **Sistemas Sensores** (ou simplesmente **sensores**). O processo envolve:

- a) existência de uma fonte de emissão de REM; e
- b) captação de parte desta energia por algum tipo de sensor após incidir sobre o alvo (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática da captação de dados por SR



O espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético pode ser ordenado em função do seu comprimento de onda e sua frequência. A Figura 2 ilustra as principais regiões do espectro EM, com seus respectivos intervalos de comprimento de onda. As unidades utilizadas são:

milímetro (mm):	$1\text{mm} = 10^{-3}\text{m};$
micrômetro (μm):	$1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm};$
nanômetro (nm):	$1\text{nm} = 10^{-3}\mu\text{m};$ e
Angstrom (\AA):	$1\text{\AA} = 10^{-1}\text{nm}.$

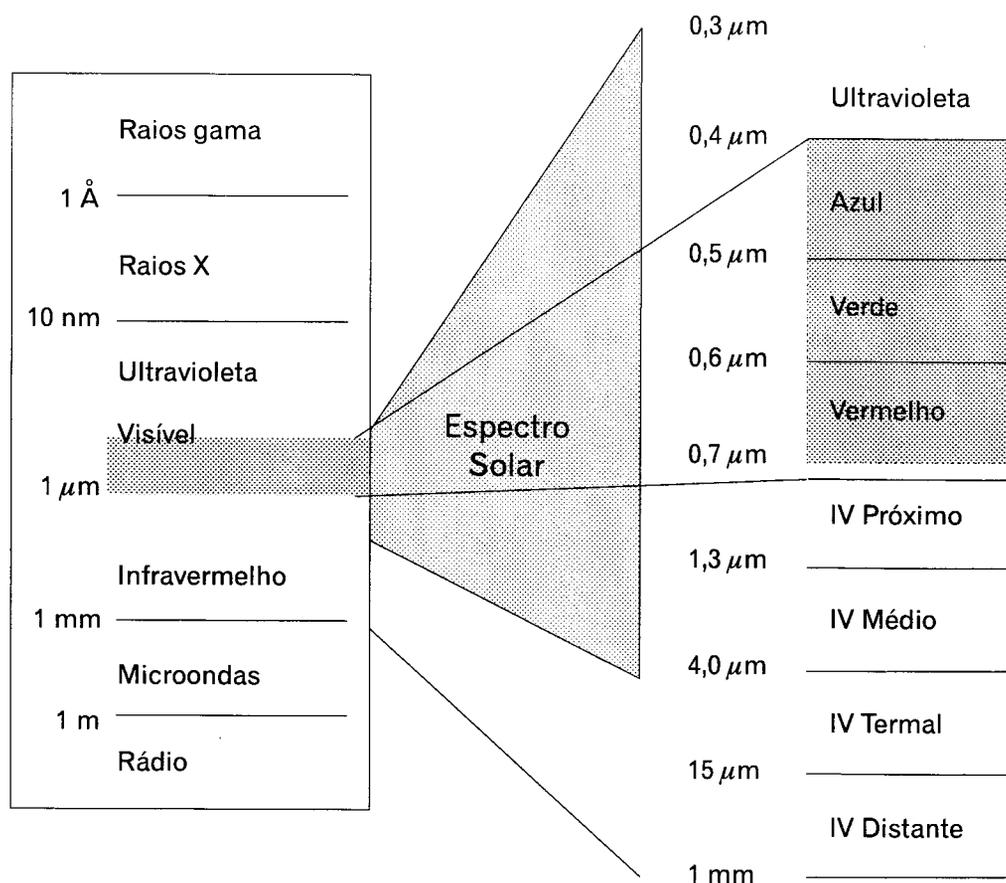
O sol emite radiação no intervalo de 0,28 a 4 micrômetros, o qual é denominado de **espectro solar**. Notar que o intervalo no qual o olho humano tem sensibilidade (**visível**) corresponde a uma faixa relativamente estreita do espectro EM (0,39-0,77 μm), compreendida dentro do espectro solar. Além do visível, o espectro solar abrange parte do ultravioleta - UV - e parte do infravermelho (IV).

A maior parte dos sensores de recursos terrestres operam nas seguintes regiões do espectro: visível, infravermelho e microondas.

A faixa da luz visível pode ser subdividida em:

violeta	: 0,390 a 0,455 $\mu\text{m}.$
azul	: 0,455 a 0,492 $\mu\text{m}.$
verde	: 0,492 a 0,577 $\mu\text{m}.$
amarelo	: 0,577 a 0,597 $\mu\text{m}.$
laranja	: 0,597 a 0,622 $\mu\text{m}.$ e

Figura 2 - Espectro eletromagnético



vermelho : 0,622 a 0,770 μm.

A faixa do infravermelho (IV) costuma ser dividida em:

- IV próximo (*Very Near Infra-red*) : 0,77 a 1,3 μm;
- IV médio (*Short Wave Infra-red*) : 1,3 a 3,0 μm;
- IV termal (*Thermal Infra-red*) : 7 a 15 μm; e
- IV distante (*Far Infra-red*) : 15 a 1000 μm.

A emissão de ondas termiais pela superfície terrestre é mais acentuada no intervalo de 7 μm a 15 μm, atingindo o seu máximo em 9,7 μm. A energia termal é derivada das seguintes fontes:

- a) fluxo de calor radiogênico do interior da terra;
- b) aquecimento da superfície pelo sol; e
- c) atividades humanas.

São denominadas de **microondas** as radiações EM produzidas por sistemas eletrônicos no intervalo de 1 mm a 1 metro.

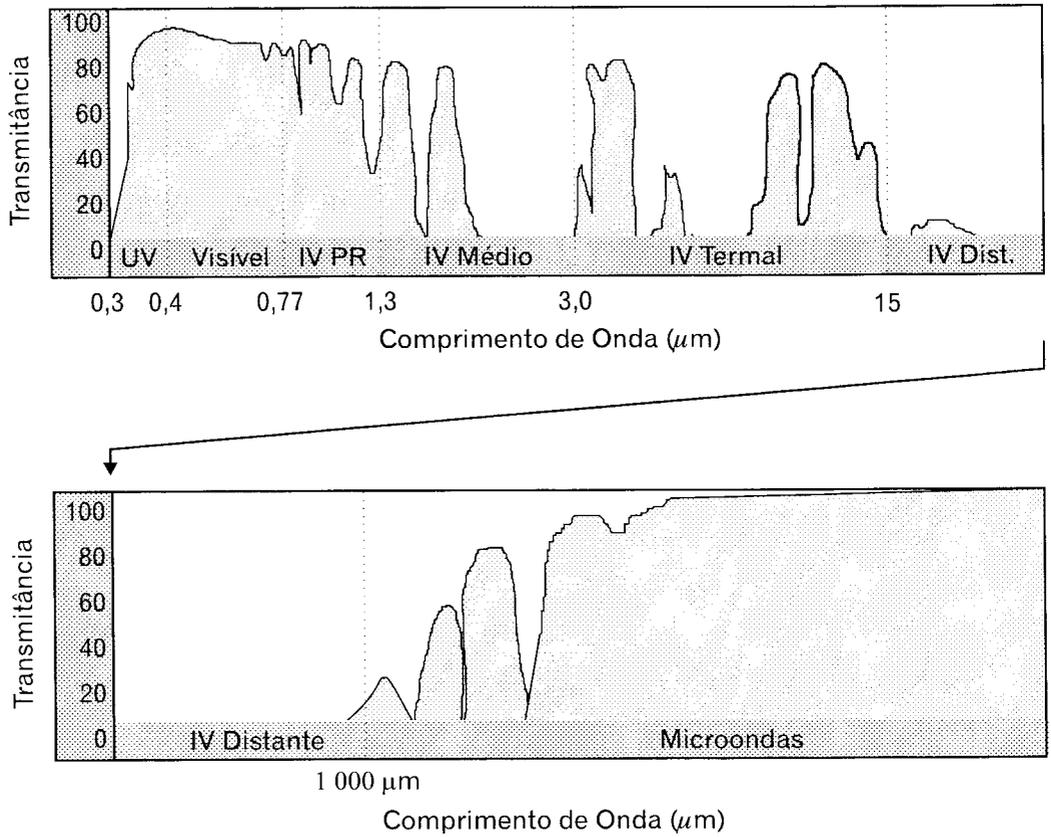
As janelas atmosféricas

Antes de atingir o sensor instalado no satélite, a energia solar deve passar pela atmosfera terrestre duas vezes, uma no sentido sol-superfície da terra e outra no sentido superfície da terra-satélite. A atmosfera contém vários gases (vapor de água, ozônio e dióxido de carbono) que interagem com a REM produzindo a absorção da energia em algumas faixas do espectro. A **transmitância** da atmosfera, dada pela

razão entre a REM que passa pelo total de energia incidente, varia com o comprimento de onda.

A Figura 3 mostra que aproximadamente 50% do espectro EM não se presta ao SR orbital, já que a REM não consegue penetrar a atmosfera nestes intervalos.

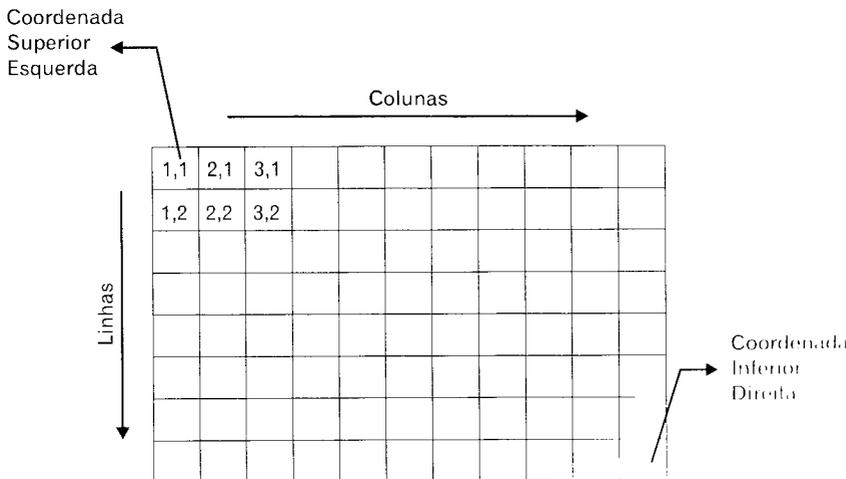
Figura 3 - Transmitância percentual da atmosfera terrestre



Modificado de Goetz & Roan, 1981.

As faixas do espectro eletromagnético que permitem a passagem total ou parcial da REM são chamadas de **janelas atmosféricas**.

Figura 4 - Formato da imagem digital



A imagem digital

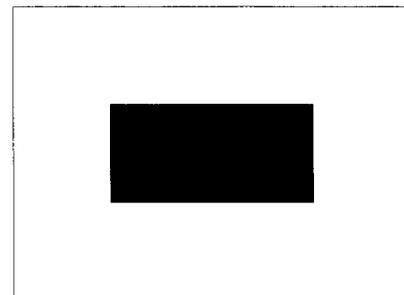
A **imagem digital** (ou imagem discreta) é constituída por um arranjo de elementos (dígitos) sob a forma de malha ou grade regular. As unidades ou células desta grade têm sua localização definida por um sistema de coordenadas "x" e "y", representadas por colunas e

linhas, respectivamente. Por convenção, a origem da imagem é sempre no canto superior esquerdo.

Na imagem, o menor elemento da grade é chamado de **pixel** (contração de *picture element*). O pixel representa uma área da superfície da terra. A cada pixel está associado um valor numérico que indica a intensidade da radiação eletromagnética da área da superfície da terra correspondente ao pixel. Exemplo: intensidade de luz refletida ou calor emitido. Esta intensidade, denominada de **Nível de Cinza - NC** - ou *Digital Number - DN* - ou *Pixel Value - PV* -, é representada por tonalidades de cinza que variam do preto (nível mínimo) ao branco (nível máximo), sendo também referida como o brilho do pixel (Figura 5).

Figura 5 - Brilho do pixel

255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	0	0	0	0	255	255
255	255	0	0	0	0	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255

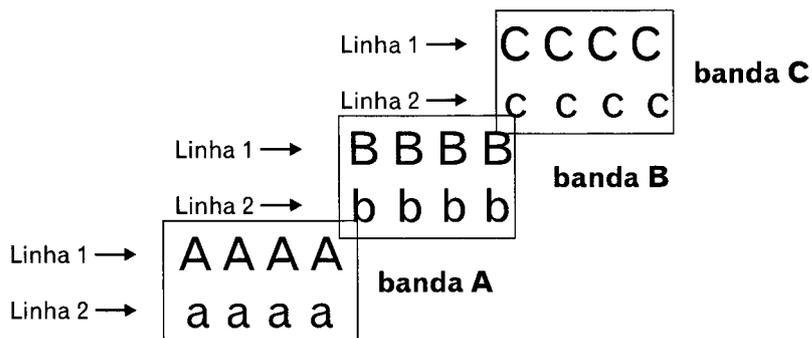


(a) imagem hipotética composta pelos NCs mínimo e máximo; e (b) tonalidades preto e branco correspondentes.

A imagem digital é, portanto, uma função bidimensional da intensidade de energia EM refletida ou emitida pela área imageada, representada por uma matriz $f(x,y)$, onde os valores de f são resultantes da intensidade (brilho) dos materiais da área correspondente ao pixel de coordenada (x,y) .

Denomina-se **Processamento Digital de Imagens - PDI** - ao conjunto de técnicas para a manipulação de imagens digitais no sentido de facilitar a extração de informações. O PDI tem capacidade para processar tanto dados de imagem **monocromática**, ou seja, aquela que representa as feições em uma única faixa espectral, quanto de imagem **multiespectral**, que é caracterizada pela representação das feições em várias faixas do espectro, denominados de canais ou bandas.

Figura 6 - Representação esquemática dos dados de três bandas



As imagens são gravadas em várias *mídias* (fitas magnéticas, CD-ROM e

Quadro 1 - Representação dos formatos de gravação dos dados			
BIP (Band Interleaved by Pixel)	linha 1	ABCABCABCABC	
	linha 2	abcabcabcabc	
BIL (Band Interleaved by Line)	linha 1	AAAABBBBCCCC	
	linha 2	aaaabbbbcccc	
BSQ (Band Sequential)	banda 1	AAAAaaaa	
	banda 2		BBBBbbbb
	banda 3		CCCCcccc

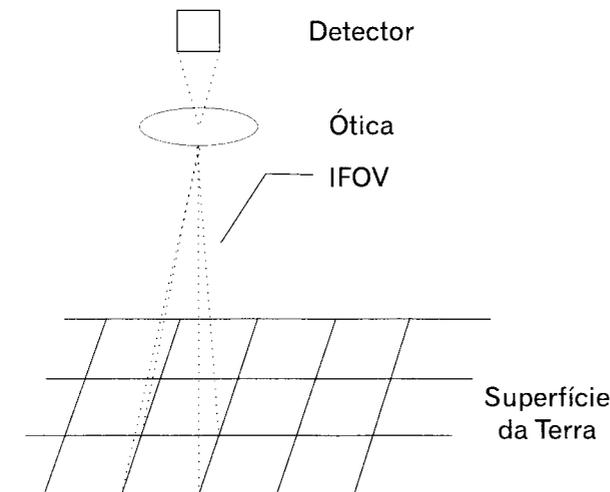
disco do computador). Geralmente os dados das várias bandas são organizados em um dos formatos representados no Quadro 1, referente à Figura 6.

Resolução das imagens

Resolução espacial

Cada sensor é projetado para fornecer dados a um determinado nível de detalhe espacial. Quanto menor o objeto possível de ser identificado, maior a resolução espacial. A resolução espacial pode ser definida como a habilidade que um sensor possui de distinguir objetos que são próximos espacialmente.

Figura 7 - Instantaneous Field of View



A referência mais usada para a resolução espacial, é o tamanho do pixel. Em geral, só objetos maiores do que a área do pixel podem ser identificados, embora isso também dependa da reflectância e contraste entre os objetos próximos. O tamanho do pixel é definido pelo IFOV - *Instantaneous Field of View* - do sensor, que é a área do terreno "vista" pelo sensor em um dado instante. O IFOV nominal é medido pelo ângulo do sistema ótico ou pela distância equivalente no terreno.

Um dos fatores mais importantes para a escolha da imagem mais adequada a um projeto de levantamento de recursos terrestres é a resolução

espacial. O Quadro 2 relaciona algumas imagens disponíveis no mercado, a respectiva resolução espacial, e as escalas de trabalho para as quais seriam mais indicadas.

Quadro 2 - Escalas de trabalho indicadas por algumas imagens

Sensor	Resolução espacial	Escala
NOOA/AVHRR	1 km	< 1 000 000
RESURS-01	160 m	1:500 000 a 1:1 000 000
LANDSAT/MSS	80 m	1:250 000 a 1:500 000
LANDSAT/TM	30 m	1:100 000 a 1:250 000
SPOT MULTIESP	20 m	1:50 000 a 1:100 000
SPOT PANCROMÁTICO	10 m	1:25 000 a 1:50 000

Resolução espectral

A capacidade de discriminação dos materiais da superfície da terra por SR fundamenta-se no comportamento dos mesmos ao longo do **espectro eletromagnético**. Uma premissa fundamental em SR é a possibilidade de discriminar materi-

ais pela sua resposta espectral característica em diferentes faixas de comprimento de onda. Diferentes materiais podem ter respostas espectrais semelhantes em um determinado intervalo de comprimento de onda e respostas distintas em outra faixa do espectro. Portanto, quanto maior o número de canais espectrais maior a capacidade discriminatória. A resolução espectral tem a ver com o número e a "finura" dos canais espectrais, e é definida como a **habilidade de separar coisas espectralmente semelhantes**.

Resolução radiométrica

Os NCs dos pixels são representados por números inteiros que se enquadram dentro de um determinado intervalo. Quanto maior o intervalo entre os NCs máximo e mínimo, maior a resolução radiométrica. A resolução radiométrica refere-se, portanto, aos níveis digitais, representados por níveis de cinza possíveis numa imagem e é expressa pelo número de dígitos binários (*bits*) necessários para armazenar o valor máximo de NC dos pixels. Por exemplo, para armazenar 64 níveis são necessários 6 bits ($2^6 = 64$); a resolução de 8 bits (1 byte) permite representar 256 níveis ($2^8 = 256$).

A resolução radiométrica implica diretamente no tamanho dos arquivos de imagem. Para imagens com resolução de 8 bits, é necessário um byte para cada pixel. Uma cena inteira do satélite LANDSAT é formada por aproximadamente 41 000 000 pixels (6 200 linhas por 6 600 colunas), resultando um arquivo de aproximadamente 41 Mb.

Resolução temporal

Refere-se à frequência com que o sensor imageia uma determinada área. É também referida como **periodicidade** ou **repetitividade**. A resolução temporal do LANDSAT/TM é de 16 dias, enquanto a resolução temporal do SPOT é de 26 dias.

A repetitividade é geralmente considerada em relação à posição de **nadir**, ou seja, a tomada da cena verticalmente abaixo do sensor. Os sensores com capacidade de imageamento lateral, formando um certo ângulo com a vertical, portanto, fora da posição de nadir, apresentam a possibilidade de repetir o imageamento de uma certa área em um tempo menor do que em posição de **nadir**. Esta propriedade do sensor é referida como **capacidade de revisita**.

Sistemas sensores

Classificação dos sensores

Usualmente os dados de sensoriamento remoto referem-se a dados da superfície da terra coletados por **sistemas sensores** em satélites ou aviões. O **sensor** pode ser definido como um equipamento capaz de transformar alguma forma de energia em sinal que possa ser convertido em informação sobre o objeto sensoriado. No caso específico do SR a energia utilizada é a radiação eletromagnética.

Os tipos de sensores podem ser classificados de acordo com:

- a) a fonte de energia;
- b) a região do espectro em que operam; e
- c) o tipo de transformação sofrida pela radiação detectada.

Quadro 3 - Tipos de sensores

Critérios de classificação	Sensor	
Fonte de energia	Passivos Ativos	
Região espectral	ópticos	refletivos (0,38 - 3 μm) termais (7 - 15 μm)
	microondas (1 mm a 1 m)	
Sistema de captação dos dados	fotográficos eletroópticos não-imageadores	

Fonte de energia

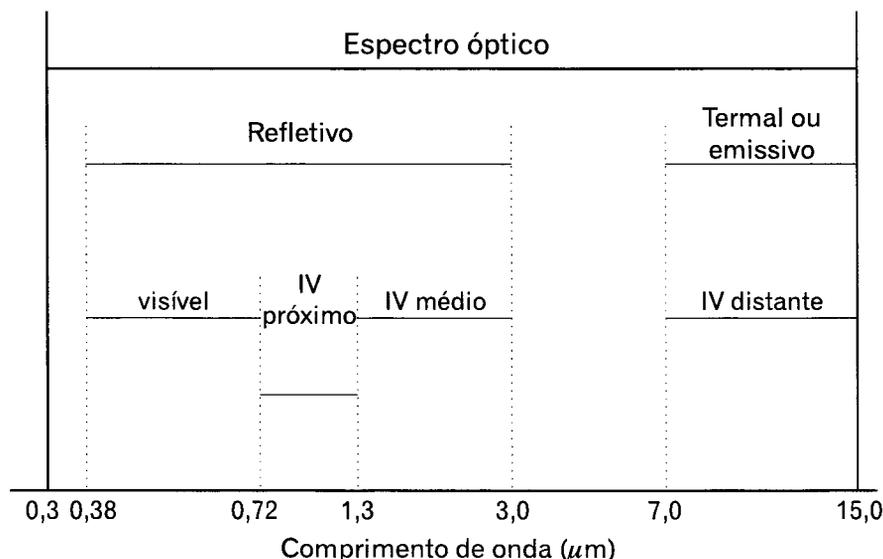
Sensor **passivo** é aquele que depende de uma fonte de radiação externa para poder operar. Enquadram-se nesta classificação todos os sensores que captam a radiação solar. Os sensores **ativos** são os que produzem sua própria radiação. Enquadram-se nesta categoria os sensores à base de radar.

Região espectral

Quanto à região espectral os sensores são classificados como **ópticos** ou de **microondas**.

Espectro óptico refere-se ao intervalo de 0,38 a 15 μm , no qual as radiações podem ser coletadas por sistemas ópticos. O sensoriamento remoto **óptico** é aquele relacionado com duas categorias de radiação da superfície da terra: (a) a que incide nela e é absorvida ou refletida; e (b) a que é emitida por ela. Considera-se fluxo solar **refletido** a radiação no intervalo de 0,38 μm a 3 μm e fluxo **termal** para os comprimentos de onda entre 7 e 15 μm (Figura 8). Com base nestas características os sensores ópticos são classificados como **refletivos** ou **termais**.

Figura 8 - Espectro óptico



Fonte: Swain e Davis, 1978.

vens e pelas condições atmosféricas, sendo por isso de fundamental importância em SR de recursos naturais, principalmente nas regiões tropicais. São sensores ativos que podem operar 24 horas por dia.

Sistemas de captação dos dados

Sistemas fotográficos

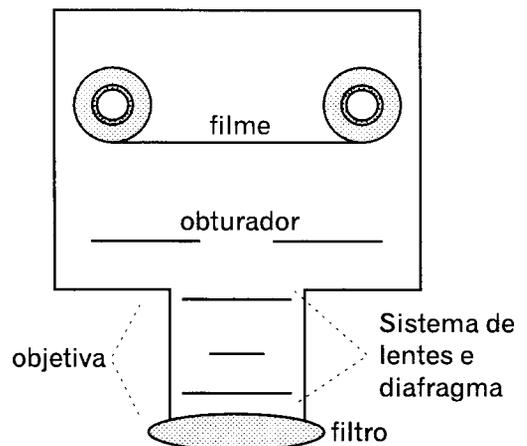
São câmeras fotográficas que possuem dispositivos para sincronizar o movimento do filme com o deslocamento do avião.

Os sensores fotográficos tiveram um papel fundamental no desenvolvimento do sensoriamento remoto já que as fotografias aéreas tomadas através de sobrevôos especiais foram as primeiras e, até recentemente, as ferramentas mais

utilizadas para os levantamentos cartográficos e de recursos naturais e para o planejamento urbano e regional.

Entretanto, o advento de sensores orbitais com alta resolução espacial e espectral tende a mudar este quadro. Os sistemas fotográficos atuam apenas numa parte restrita do espectro EM, entre o ultravioleta e o infravermelho próximos e não são utilizados nos sensores orbitais. Estes possuem uma repetitividade de imageamento, enquanto as fotografias aéreas necessitam de programas especiais de sobrevôo. Além disso, as fotografias aéreas necessitam de mais manuseio para corrigir os deslocamentos *off-nadir* e os erros devidos à instabilidade do avião.

Figura 9 - Sistema fotográfico



Sistemas eletroópticos

Nestes os dados são registrados na forma de sinal elétrico. Possuem dois componentes básicos: o sistema óptico e o detector. O sistema óptico tem a função de focalizar a energia proveniente da cena sobre o detector. A energia recebida pelo detector é então transformada em sinal elétrico, que por sua vez é processado, transformado em valor digital e disposto numa matriz de colunas e linhas.

Existem três tipos de imageadores eletroópticos: sistema de quadro, de varredura mecânica e de varredura eletrônica.

Sistema de quadro (*frame system*)

A imagem da cena inteira é coletada de forma instantânea. Os sensores de quadro são também conhecidos como *vidicons* e tiveram origem a partir de sistemas de televisão. A imagem é formada por tubo fotocondutivo (tubos de raios catódicos) que é varrida por um feixe de elétrons e transformada em um conjunto de sinais elétricos. Exemplo: o RBV - *Return Beam Vidicon*- do Landsat-1,2 e 3.

Sistema de varredura mecânica (*electromechanical scanner*)

Sistema que utiliza um espelho de varredura que oscila perpendicularmente ao deslocamento da plataforma, transmitindo a reflectância dos materiais para o sistema óptico e o detector. Os sinais são registrados linha a linha para formar a imagem (Figura 10.B). Exemplo: MSS e TM do LANDSAT.

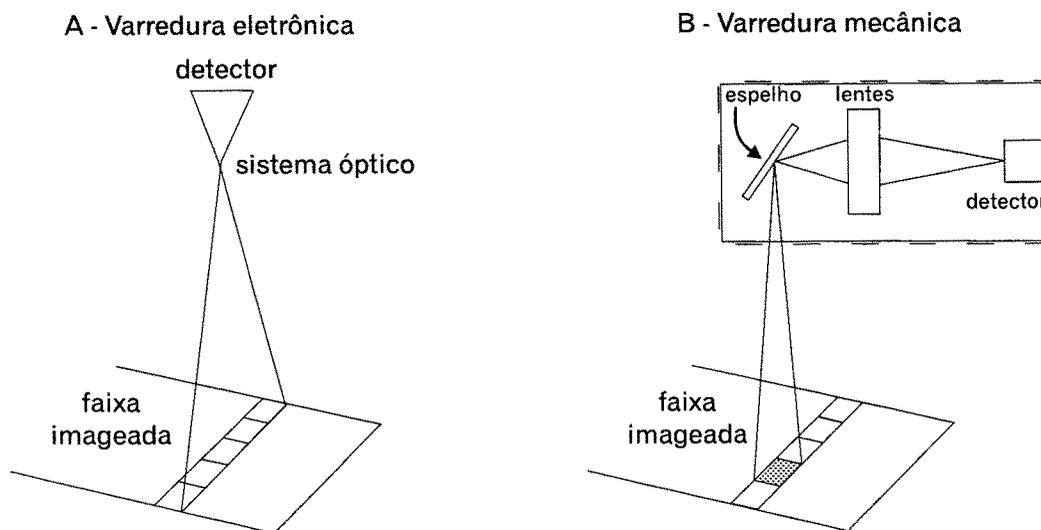
Sistema de varredura eletrônica (*pushbroom scanner*)

Utiliza um arranjo linear de detectores amplificados por lente grande-angular, o qual cobre toda a seção perpendicular à faixa imageada (Figura 10A). O arranjo de detectores é organizado de modo que haja tantos detectores quantos forem os elementos da linha, de modo que a reflectância de cada pixel é registrada por um detector. Desta forma, os dados de cada linha são captados

simultaneamente pelo conjunto de detectores e a imagem é formada através do processo de varredura causado pelo deslocamento da plataforma. Este sistema é utilizado pelo SPOT.

Quadro 4 - Comparação entre os dois sistemas de varreduras	
Varredura eletrônica	Varredura mecânica
- menor e mais leve, requer menos potência para operar	- capacidade de operar nas regiões além do infravermelho próximo
- não necessita de espelho móvel e fornece dados com melhor fidelidade geométrica	

Figura 10 - Sistemas de varreduras eletrônica e mecânica



Modificado de Mather, 1987.

Sistemas não-imageadores

São os aparelhos que detectam a radiação na forma pontual e não tem capacidade para formar imagens. Fazem parte desta categoria os radiômetros e espectroradiômetros.

Plataformas orbitais

Os sensores são instalados em plataformas orbitais projetadas para finalidades específicas. As principais são:

- de observação da Terra;
- meteorológicas;
- de uso militar;
- de telecomunicação;e
- de posicionamento geodésico - GPS.

Tipos de órbita

- **geoestacionária** - mantém uma posição fixa em relação a um ponto na superfície da terra;
- **polar** - circular de direção norte-sul, formando ângulo próximo de 90° com a linha do equador; e
- **sincronizada com o Sol ou Sol-síncrona** - é uma órbita quase-polar que mantém um ângulo constante entre o Sol, a Terra e o satélite, o que garante condições semelhantes de iluminação nas áreas de mesma latitude. Cruzam sempre o equador no mesmo horário solar.

Evolução dos sistemas sensores

Das fotografias aéreas aos foguetes

Atribui-se a Wilbur Wright a primeira utilização de fotografias aéreas, em 1909. Em 1930, com o aperfeiçoamento dos processos de revelação e copiagem, os Estados Unidos, Alemanha e Canadá realizaram as primeiras coberturas sistemáticas completas de seus territórios.

Durante a 2ª Guerra Mundial houve um desenvolvimento expressivo das técnicas de sensoriamento remoto. As fotografias aéreas foram aperfeiçoadas, surgiram a fotografia colorida e as películas infravermelhas (usadas na detecção de camuflagem) e começaram-se a utilizar sensores à base de radar. Neste período foram também desenvolvidos foguetes com propósitos bélicos.

O período da Guerra Fria foi marcado pela corrida espacial. Os foguetes foram utilizados por especialistas russos e americanos, como plataformas para instrumentos científicos, para sondagem de camadas superiores da atmosfera. Este foi o início dos programas espaciais de pesquisa. Os avanços no desenvolvimento de foguetes permitiu que eles pudessem ser utilizados para colocar satélites artificiais em órbita, a centenas de quilômetros da terra. O primeiro satélite artificial - Sputnik 1 - foi lançado pela URSS, em 1957.

Em 1954, foram desenvolvidos sistemas de radares imageadores (Forward-Looking Radar). Em 1961, foram fabricados os primeiros radares de visada lateral (SLAR).

O lançamento do primeiro satélite meteorológico (**TIROS**), em 1960, marcou o início das observações orbitais sistemáticas da Terra. Este satélite usava um sistema de câmara de televisão de resolução relativamente baixa. O último satélite da série, o TIROS-10, foi lançado em 1965.

Até 1966, o desenvolvimento de aparelhos de SR se deu principalmente no âmbito militar. Mas neste ano, um imageador infravermelho termal foi criado com características que escapou da classificação de "segurança" pelo Ministério da Defesa dos Estados Unidos. A partir daí, começaram os serviços comerciais de sensoriamento remoto.

De 1960 a 1970, foram obtidas fotografias orbitais a partir de três programas espaciais da NASA: os programas **Mercury**, **Gemini** e **Apollo**. Estas missões serviram para demonstrar a viabilidade do imageamento orbital e necessidade de métodos multiespectrais, tendo servido de base para o projeto **ERTS - Earth Resources Technology Satellite Program** (mais tarde denominado **LANDSAT**).

Em 1970, realizou-se recobrimento sistemático de todo o território brasileiro com imagens de radar. As imagens foram obtidas através de sobrevôos, com o sistema **SLAR** - *Side Looking Airborne Radar* - a partir dos quais foram compostos mosaicos na escala 1:250 000. Estas imagens serviram de base para o mapeamento sistemático (1:1 000 000) de cartografia, geologia, geomorfologia, pedologia e vegetação de todo o Território Nacional realizados pelo **PROJETO RADAMBRASIL**.

Sensores de baixa resolução espacial

NOAA/AVHRR

Os satélites para observações meteorológicas da série **TIROS** - *Television and Infra-red Observation Satellite* - foram lançados entre 1960 e 1965. A partir de 1970, os sucessores passaram a chamar-se **NOAA** - *National Ocean and Atmosphere Administration* -, entidade que assumiu a administração do Programa. As principais aplicações são na meteorologia, temperatura da superfície do mar, coberturas de gelo e neve e estudos das condições das vegetação global. Os programas TIROS e NOAA foram beneficiados pelas pesquisas desenvolvidas pelo programa NIMBUS, uma série de oito plataformas lançadas entre 1964 e 1978 para pesquisa de instrumentos espaciais usados em satélites.

O sensor **AVHRR** - *Advanced Very High Resolution Radiometer* -, a bordo do NOAA, pode ser utilizado para estudos de recursos naturais de escala continental, especialmente para o monitoramento de desmatamento e queimadas na Amazônia.

Quadro 5 - Características do AVHRR

órbita	quase-polar/sol síncrona
altitude	833-870 km
resolução espacial	1.1 km (nadir)
resolução radiométrica	10 bits (1 024 níveis)
abertura angular	+/- 56°
faixa imageada	3 000 km
ciclo de repetitividade	12 horas

Quadro 6 - Aplicações do Sensor AVHRR

Canal	Faixa espectral	Função
1	0,58 - 0,68	mapeamento diurno de nuvens
2	0,725 - 1,10	água, vegetação e agricultura
3	3,53 - 3,93	nuvens, temperatura da superfície do mar, queimadas e atividades vulcânicas
4	10,3 - 11,3	mapeamento (diurno e noturno) de nuvens, temperatura do mar, umidade do solo e atividades vulcânicas
5	11,5 - 12,5	temperatura do mar e umidade do solo

Nos satélites NOAA mais recentes outros sensores foram introduzidos para monitorar a distribuição de ozônio na atmosfera.

Sensores de resolução espacial intermediária

LANDSAT

O LANDSAT da NASA foi o pioneiro entre os programas de SR para recursos naturais. Os sensores são o MSS - *Multispectral Scanner* -, com 80 metros de resolução espacial e, a partir do LANDSAT-4, o TM - *Thematic Mapper* -, com 30 metros de resolução espacial. O sensor RBV - *Return Beam Vidicon* - foi utilizado apenas nos três primeiros satélites da série.

Quadro 7 - Cronograma dos satélites LANDSAT

Satélite	Lançamento	Fim de operação	Sensor
LANDSAT - 1	jul./1972	jan./1978	MSS/RBV
LANDSAT - 2	jan./1975	jul./1983	MSS/RBV
LANDSAT - 3	mar./1978	set./1983	MSS/RBV
LANDSAT - 4	jul./1982	em órbita	MSS/TM
LANDSAT - 5	mar./1984	operando	MSS/TM

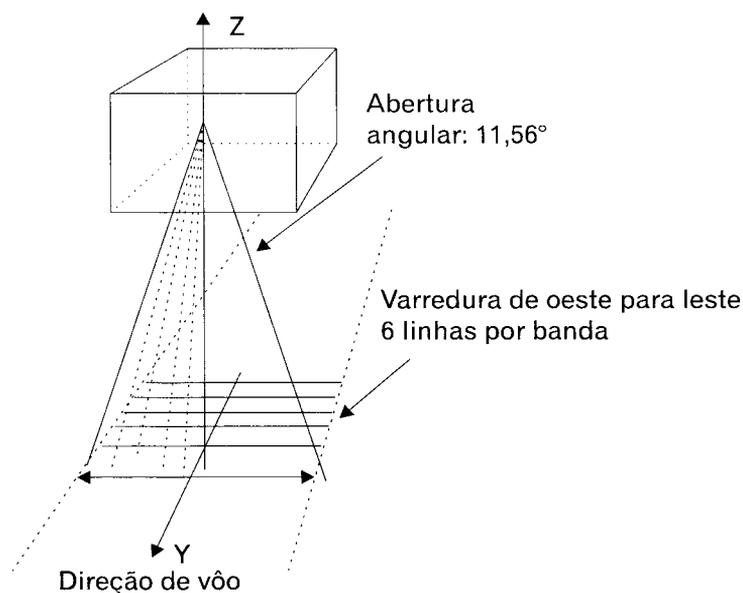
O LANDSAT-4 apresentou problemas com o sistema de suprimento de energia, o que apressou o lançamento do LANDSAT-5. Este foi programado para um tempo de vida de 3,5 anos, mas está operando até hoje (1998).

O LANDSAT-6, lançado em 1993, não conseguiu atingir sua órbita e caiu no mar. O LANDSAT-7 está programado para o ano 2000.

Quadro 8 - Características orbitais do LANDSAT-5 e dos sensores MSS e TM

MSS		TM	
Canal	C. de onda (mm)	Canal	C. de onda (mm)
4	0,5 - 0,6	1	0,45 - 0,52
5	0,6 - 0,7	2	0,52 - 0,60
6	0,7 - 0,8	3	0,63 - 0,69
7	0,8 - 1,1	4	0,75 - 0,90
		5	1,55 - 1,75
		6	10,40 - 12,50
		7	2,08 - 2,35
Resolução espacial	80 m	Resolução espacial	30 m (b6: 120)
Resolução rad.	6 bits (64 níveis)	Resolução rad.	8 bits (256 níveis)
Características orbitais do LANDSAT 5			
Largura da faixa imageada:	185km		
Órbita:	quase-polar, hélio-síncrona		
Altitude:	705 km		
Inclinação:	98,2°		
Período:	99min		
Hora de cruzamento do Equador:	09:45		
Periodicidade:	16 dias		
Abertura angular:	11,56°		

Figura 11 - Características do imageamento do Thematic Mapper - TM



SPOT

O programa **SPOT** - *Système Probatoire d'Observation de la Terre* -, foi iniciado pela França em 1978, em parceria com a Suécia e a Bélgica. O programa é gerenciado pela Agência Espacial Francesa - CNES.

O **SPOT-1** foi lançado em 1986. O **SPOT-2** em 1990. O **SPOT-3** em 1993. O **SPOT-4**, deverá incorporar outra banda ao sensor multiespectral no intervalo de 1,58-1,75 μm , com 20 m de resolução. O **SPOT-5**, previsto para 1999, terá a resolução espacial do sensor pancromático aumentada para cinco metros e do

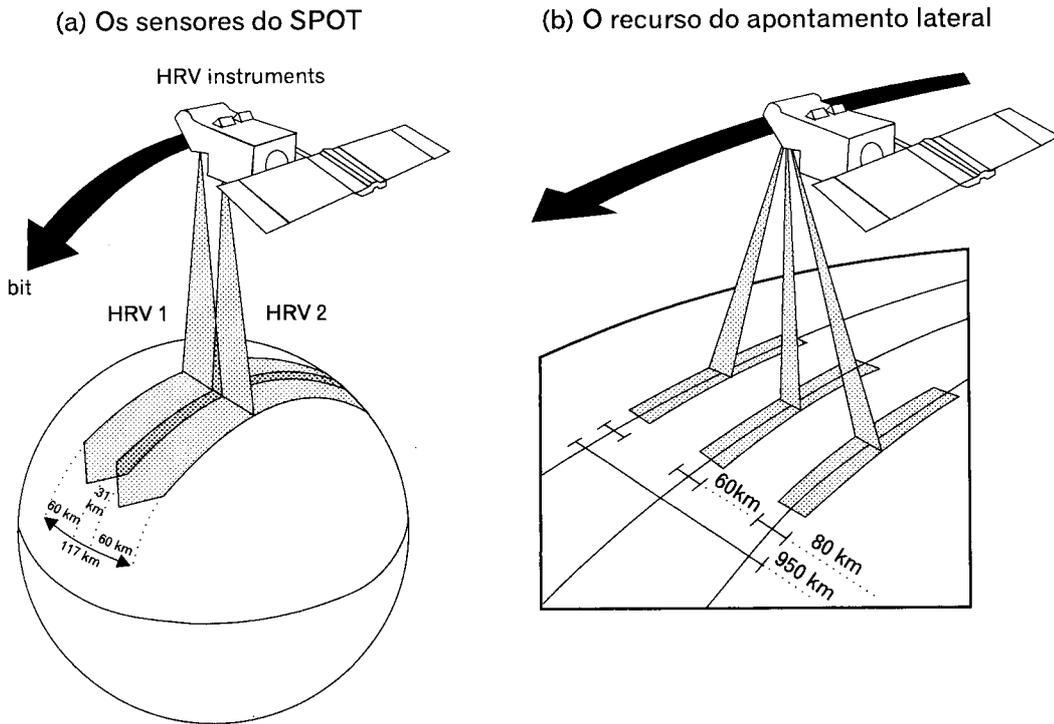
sensor multiespectral para dez metros. Incorporará também mais um instrumento para monitoramento da vegetação com 1 km de resolução.

Os satélites SPOTs carregam a bordo dois sistemas sensores idênticos - *High Resolution Visible* - HRV -, que podem ser ativados independentemente. Estes sensores operam no modo pancromático (0,51-0,73), com dez metros de resolução e no modo multiespectral com 20 metros de resolução. Um dos aspectos mais avançados do SPOT é a possibilidade de obtenção de visadas fora do *Nadir*, permitindo a obtenção de pares estereoscópicos de imagens de uma mesma cena (Figura 12).

Quadro 9 - Características do SPOT

Sensor		HRV (High Resolution Visible)
Largura da faixa imageada		60 km + 60 km - overlap (3 km) = 117 km
Resolução radiométrica		8 bits (256 níveis)
Resolução temporal		26 dias
Hora de passagem pelo Equador		10:30
Abertura angular		4,13°
Visada <i>off-nadir</i>		até 27° (máximo 475 km)
Multiespectral		
Canal 1		0,50 - 0,59 μm
Canal 2		0,61 - 0,68 μm
Canal 3		0,79 - 0,89 μm
Resolução espacial		20 metros
Pancromático		
Canal		0,51 - 0,73 μm
Resolução espacial		10 metros

Figura 12



As imagens do LANDSAT e do SPOT foram até recentemente as mais utilizadas no Brasil. Entretanto, uma série de novos sensores foram lançados recentemente ou estão em fase de construção, tanto com sistemas óticos como com sistemas de microondas, aumentando substancialmente a gama de opções para os usuários.

IRS (*Indian Remote Sensing*)

Os satélites indianos da série IRS foram lançados em 1989 (IRS-1A), 1991 (IRS-1B), 1994 (IRS-P2), 1995 (IRS-1C), 1996 (IRS-P3), 1996 (IRS-P4) e 1997 (IRS-P5). O satélite IRS-1C produz imagens de resolução espacial de cinco metros, no modo pancromático. Este fato aliado aos canais multiespectrais semelhantes aos do LANDSAT/TM, a possibilidade de apontamento para obter imagens *off-nadir* e ainda a elevada resolução temporal (revisita de até cinco dias), tornam este satélite um dos mais avançados do mercado.

Quadro 10 - Especificações de satélite IRS - 1C

Sensor	Comprimento de onda (μm)	Pixel	Faixa imageada	Repetitividade
panchrom.	0,50 - 0,75 (visível)	5 m	70 km	24 (nadir) dias 5 (off-nadir) dias
LISS - 3	0,52 - 0,59 (verde)	25 m	142 km	24 dias
	0,62 - 0,68 (vermelho)	25 m	142 km	
	0,77 - 0,86 (IV próximo)	25 m	142 km	
	1,55 - 1,70 (IV médio)	70,5 m	148 km	
WiFS (wide)	0,62 - 0,68 (vermelho)	180 m	774 km	24/5 (overlap) dias
	0,77 - 0,86 (IV próximo)	180 m	774 km	

Os dados podem ser utilizados para várias finalidades: agricultura, monitoramento de secas, inundação, recursos hídricos, uso do solo, recursos marinhos, florestais, planejamento urbano e geologia.

RESURS-01

Satélite russo com **resolução espacial de 160 metros**. Destina-se a preencher a lacuna entre o LANDSAT/MSS e o NOAA/AVHRR. As cenas de 600 x 600 km são ideais para escalas entre 1:500 000 e 1:1 000 000. A possibilidade de revisita é de quatro dias.

Bandas	Resolução espacial
0,5 - 0,6 μm	160 m
0,6 - 0,7 μm	160 m
0,7 - 0,8 μm	160 m
0,8 - 1,1 μm	160 m
10,4 - 12,6 μm	600 m

Programas de radar orbital

Até o início desta década todos os levantamentos à base de radar foram realizados por aviões. A utilização do **radar de abertura real** em plataformas orbitais era inviabilizado pela necessidade de uma antena muito longa. Este problema foi superado pelo advento do **Radar de Antena Sintética - SAR -**, no qual grandes antenas são matematicamente simuladas. Graças a este recurso, a partir do início desta década os sensores à base de radar passaram a ser utilizados em satélites.

ERS (European Remote Sensing Satellite)

Os satélites da série **ERS - European Remote Sensing Satellite -**, contêm vários instrumentos sensores de microondas para estudo da superfície terrestre, e, mais especificamente, do oceano e do gelo, imageando na banda C(5,7 cm). Por operar na faixa das microondas, os dados são interessantes também para os países tropicais, onde há constante cobertura de nuvens. O **ERS-1** foi lançado em 1991.

O **ERS-2**, lançado em 1995, leva a bordo também o Global Ozone Monitoring Experiment - GOME -, que mede traços dos constituintes da troposfera e estratosfera.

JERS (Japan Earth Resources Satellite)

Os satélites da série **JERS - Japan Earth Resources Satellite -** possuem um sensor SAR, imageando na banda L (23,5 cm) e um sensor óptico (OPS). Este tem recursos para observações estereoscópicas. O **JERS-1** foi lançado em 1992.

RADARSAT

O programa canadense **RADARSAT**, que teve início em 1995 com o RADARSAT-1, é considerado o mais avançado sistema de imageamento orbital por radar, operando em diferentes módulos para obter imagens de 500x500 km até 50x50 km, com resolução espacial variando de 100 a 10 metros, para atender às especificações dos usuários. Opera na banda C (5,6 cm de comprimento de onda), com polarização HH. As principais aplicações são o monitoramento do gelo, gelo flutuante, oceano, zonas costeiras, agricultura, florestas e geologia.

Programas espaciais brasileiros

CBERS (Satélites Sino-Brasileiros de Recursos Terrestres)

Resultado de um convênio entre o Brasil e a China para o desenvolvimento de satélites de observação da terra.

Quadro 12 - CBERS - China - Brazil Earth Resources Satellites			
Sensores	Câmara CCD	IR - MSS	WFI
Modo pancromático	0,51 - 0,73 μm	0,50 - 1,10 μm	
Modo multiespectral	0,45 - 0,52 μm 0,52 - 0,59 μm 0,63 - 0,69 μm 0,77 - 0,89 μm	1,55 - 1,75 μm 2,08 - 2,35 μm 10,4 - 12,5 μm	0,63 - 0,69 μm 0,76 - 0,90 μm
Resolução espacial	20 m	80/160(termal)	260 m
Periodicidade	3 - 26 dias (nadir)	26 dias	3 - 5 dias
Larg. da visada	120 km	120 km	900 km
Parâmetros orbitais do satélite	Altitude média: 778 km Período de recobrimento: 26 dias Órbita quase-polar, sincronizada com o Sol		

A característica singular do CBERS é sua carga útil de múltiplos sensores, com resoluções espaciais e frequências de observação variadas. Os três sensores imageadores são: imageador de visada larga (WFI), a câmara CCD de alta resolução e o varredor multiespectral infravermelho (IR-MSS). A câmara CCD tem a capacidade de apontamento lateral, o que permite aumentar a frequência das observações e a visão estereoscópica.

MECB (Missão Espacial Completa Brasileira)

A Missão Espacial Completa Brasileira – **MECB** -, é um projeto do governo brasileiro, coordenado pela Agência Espacial Brasileira – AEB - e executado pelo INPE. O programa compreende o projeto, desenvolvimento, integração, testes e operação em órbita de cinco satélites, três de coleta de dados (SCD1, SCD2 e SCD3) e dois de sensoriamento remoto da terra (SSR1 e SSR2).

Quadro 13 - Características dos SSRs da MECB

- Sensor WiFS com 3 bandas no visível e uma no infravermelho (2,08 - 2,35 μm).
- **Órbita equatorial (0°), programada para cobrir uma faixa de 2 200 km, entre as latitudes de 5° N e 15° S.**
- A resolução espacial no visível e infravermelho médio será de 100, 200, 300 e 400 metros, conforme o afastamento da posição Nadir.
- Periodicidade: **14 vezes ao dia**

Sensores com alta resolução espacial

Uma nova geração de sensores, caracterizados pela alta resolução espacial estão projetados para os próximos anos. Estes caracterizam-se também pela alta repetitividade das observações, cobertura simultânea de imagens pancromáticas e multiespectrais. A possibilidade de estereoscopia facilita a produção de ortofotos e Modelos Digitais de Terreno – MDT. Destinam-se ao planejamento urbano e cartografia de precisão. Os principais projetos são:

EarlyBird e QuickBird

A empresa norte-americana EarthWatch pretende lançar dois satélites.

EarlyBird deverá carregar dois sensores: o primeiro, operando no modo pancromático (0,45-0,80 μm) terá a resolução espacial de três metros, enquanto o segundo sensor irá operar no modo multiespectral com três bandas nos intervalos verde, vermelho e infravermelho próximos e resolução espacial de 15 metros.

O QuickBird terá resolução de um metro no modo pancromático e quatro metros no modo multiespectral.

SPIN 2

Produto do consórcio entre a Aerial Images (USA) e a Sovinform Sputnik (Rússia). Carrega duas câmaras fotográficas capazes de produzir imagens de dois a dez metros de resolução.

IKONOS 1

Satélite da Space Imaging EOSAT com um sensor pancromático com um metro de resolução e outro multiespectral (cinco bandas) com quatro metros de resolução. Terá capacidade para produzir imagens pancromáticas e multiespectrais da mesma área, que poderão ser integradas, gerando um produto multiespectral colorido com um metro de resolução. Periodicidade de 14 dias e com possibilidade de revisita de 1-3 dias pela utilização da visada lateral.

EROS A e B

Satélites da West Indian Space pretendem colocar em órbita até 2002 oito satélites da série EROS. Os EROS A e B virão com resolução espacial de 1,5 e 1 metro, respectivamente, periodicidade de 15 dias e possibilidade de revisita a cada três dias.

Quadro 14 - Sistemas de alta resolução (Fonte: Schmidlin, 1988)

Empresa	Satélite	Repetitividade	Revisita	Modo	Resol. Espacial	Resol. Espectral	Faixa imageada	Tamanho da cena
Earth Watch	Early Bird	20 dias	1,5 - 2,5 dias	Pan	3 m	0,45 - 0,80	6 km	36 km ²
				Multiesp.	15 m	0,50 - 0,59 0,61 - 0,68 0,79 - 0,89	30 km	900 km ²
	Quick Bird	20 dias	1,5 - 2,5 dias	Pan	1 m	0,45 - 0,90	36 km	1 296 km ²
				Multiesp.	4 m	0,45 - 0,52 0,53 - 0,59 0,63 - 0,69 0,77 - 0,90	36 km	1 296 km ²
Aerial Images/ Sovinform sputnik	SPIN - 2	-	-	Pan TK - 1000	2 m	0,51 - 0,76	160 km	6 400 km ²
				Pan TK - 350	10 m	0,51 - 0,76	200 km	60 000 km ²
Space Imaging/ EOSAT	IKONOS 1	14 dias	1 - 3 dias	Pan	1 m	0,45 - 0,90	11 km	121 km ²
				Multiesp.	4 m	0,45 - 0,53 0,52 - 0,61 0,64 - 0,72 0,77 - 0,88	11 km	121 km ²
West	EROS A	15 dias	3 dias	Pan	1,5 m	0,50 - 0,90	14 km	196 km ²
Indian	EROS B	15 dias	3 dias	Pan	1 m	0,50 - 0,90	20 km	400 km ²
Orbital Sciences Corporation	Orb View - 3	16 dias	< 3 dias	Pan	1 m	0,45 - 0,90	8 km	64 km ²
				Multiesp.	4 m	0,45 - 0,52 0,52 - 0,60 0,63 - 0,69 0,76 - 0,90	8 km	64 km ²
	Orb View - 4	16 dias	< 3 dias	Pan	1 m	0,45 - 0,90	8 km	64 km ²
				Multiesp.	4 m	0,45 - 0,52 0,52 - 0,60 0,63 - 0,69 0,76 - 0,90	8 km	64 km ²
				Hiperesp.	8 m	0,45 - 2,5 3,0 - 5,0	5 km	25 km ²

Orb View

A *Orbital Sciences Corporation* lançará em 1999 e 2000, respectivamente, os satélites Orb View 3 e 4, com imagens pancromáticas de um metro de resolução e multiespectrais de quatro metros.

Sensores de alta resolução espectral

As imagens com alta resolução espectral têm aplicações em exploração mineral, agricultura, monitoramento ambiental e segurança.

NASA/TRW Hyperspectral Imager (Lewis)

Este sensor, conhecido como Hyperspectral Imager - HSI -, ou Lewis, cobrirá de forma contínua o espectro EM entre 0,40 e 2,50 μm , através de **384 bandas espectrais** com resolução espacial de 30 metros. Este sensor será combinado com outro, no modo pancromático, com resolução espacial de cinco metros.

Orbview 4

Este satélite da série Orbview (Orbital Sciences Corporation), além da alta resolução espacial (1 m no modo pancromático e 4 m no modo multiespectral), carregará um instrumento para gerar imagens hiperespectrais em 280 canais.

Comportamento espectral dos materiais

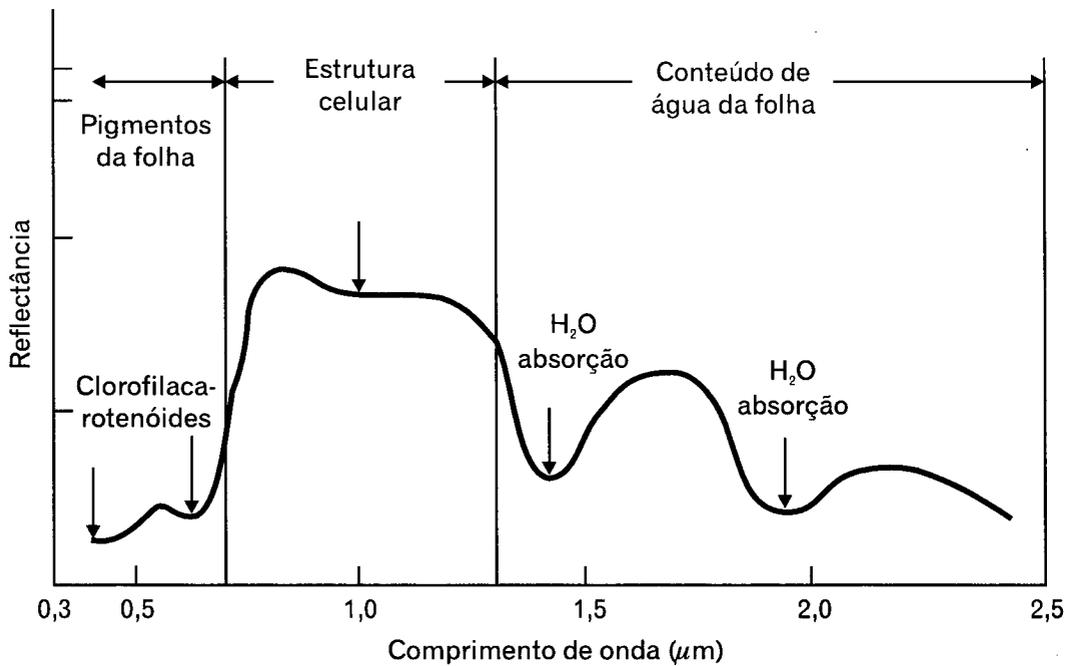
Neste capítulo são apresentadas as características espectrais gerais de alguns materiais da superfície da terra. A reflectância dos materiais varia com o comprimento de onda. O registro gráfico da reflectância ao longo do espectro eletromagnético fornece uma curva que descreve as propriedades radiométricas de um determinado material. Esta curva típica de cada material é chamada de **assinatura espectral** e constitui um padrão para identificação dos alvos de estudo por sensoriamento remoto.

Comportamento espectral da vegetação

As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado. As propriedades espectrais de uma folha são função de sua composição química, morfologia e estrutura interna. Os constituintes mais importantes para a radiação são: a celulose, os solutos (íons e moléculas), os espaços intercelulares e os pigmentos.

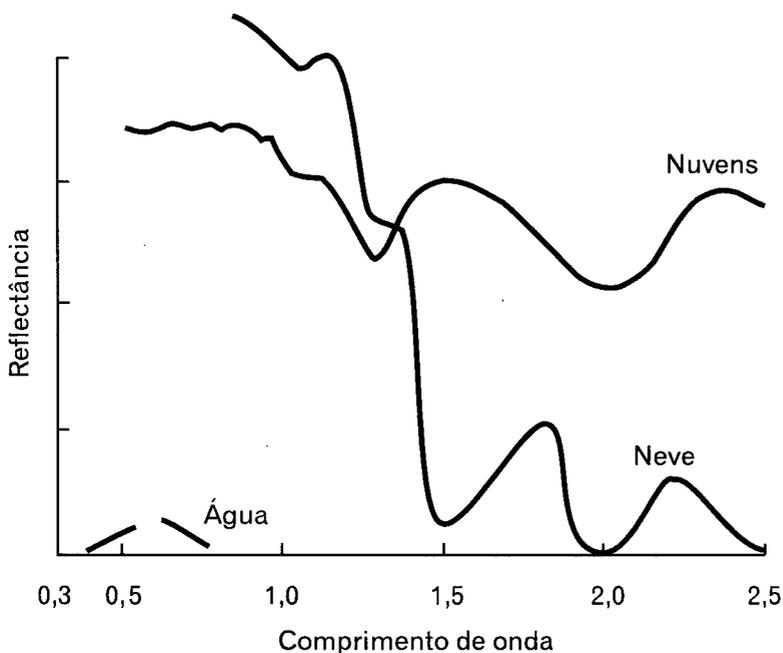
A Figura 13 mostra a curva espectral média da vegetação sadia. Observa-se que até $0,7 \mu\text{m}$ a reflectância é baixa devido à absorção causada pelos pigmentos, com um pequeno aumento na faixa do verde (máximo em $0,56 \mu\text{m}$). De $0,7 \mu\text{m}$ a $1,3 \mu\text{m}$ a reflectância é alta devido à interferência da estrutura celular. De $1,3 \mu\text{m}$ a $2,5 \mu\text{m}$ a influência maior é do conteúdo de água das folhas, com dois máximos de absorção em $1,4 \mu\text{m}$ e $1,95 \mu\text{m}$.

Figura 13 - Assinatura espectral (média) da folha verde



Comportamento espectral da água

Figura 14 - Comportamento espectral da água

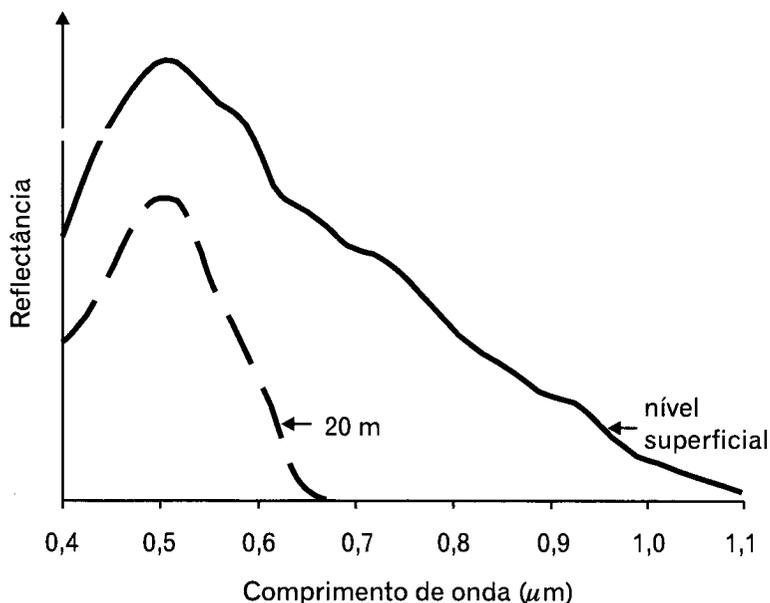


A água apresenta um comportamento espectral distinto conforme o estado físico que se encontra (Figura 14). No estado líquido apresenta uma reflectância baixa entre 0,38 e 0,70 μm , absorvendo toda a radiação acima de 0,7 μm . Todavia, este comportamento é afetado pela concentração de materiais em suspensão e dissolvidos na água e pela profundidade do corpo d'água, como ilustra a Figura 15. O aumento da concentração de materiais em suspensão implica o aumento da reflectância na faixa do vermelho.

Na forma de nuvens, a água apresenta altíssima reflectância. As ondulações na curva espectral são devidas à leve absorção em torno de 1,3 μm e 2,0 μm . A neve possui uma re-

reflectância altíssima no infravermelho próximo, mas decresce bruscamente no infravermelho médio, com picos de absorção em $1,5 \mu\text{m}$, $2,0 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$.

Figura 15 - Reflectância da água superficial e a 20 metros de profundidade



Fonte: Alföldi, 1982.

Comportamento espectral dos solos

Os solos são compostos de substâncias em três fases: **sólida** (minerais e matéria orgânica), **líquida** (água) e **gasosa** (ar). As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que definem o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são:

- constituição mineral;
- proporção de matéria orgânica;
- granulometria (textura e estrutura); e
- umidade.

De forma simplificada são estes os efeitos dos constituintes dos solos sobre a reflectância:

Água

O aumento no conteúdo de umidade implica uma diminuição da reflectância em todo o espectro, sendo esta diminuição mais acentuada quanto menor for a concentração de matéria orgânica.

Matéria orgânica

A reflectância diminui à medida que aumenta o conteúdo de matéria orgânica. Quando este conteúdo excede 2%, passa a mascarar as outras propriedades

espectrais dos constituintes dos solos. É possível discriminar melhor o nível de matéria orgânica no visível e no infravermelho próximo até $1,2 \mu\text{m}$.

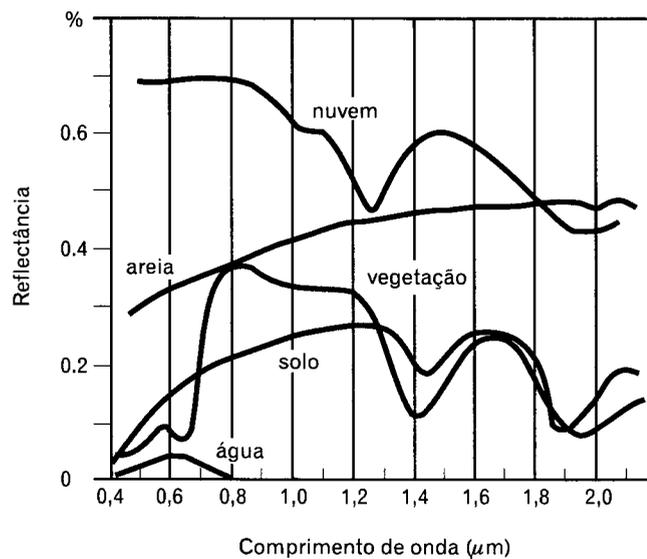
Minerais opacos e óxido de ferro

Diminuem a reflectância e mascaram as feições de absorção dos outros constituintes.

Granulometria

Os solos arenosos tendem a apresentar maior reflectância do que os argilosos, pois, também, são mais pobres em matéria orgânica, óxidos de ferro e minerais opacos, ou seja, constituintes que reduzem a reflectância. A Figura 16 apresenta a curva média da reflectância dos solos em relação à vegetação, à água, à areia e às nuvens.

Figura 16 - Comparação entre as curvas de reflectância da água, vegetação sadia, solo e areia



Quadro 15 - Regiões espectrais próprias ao estudo de propriedades dos solos (segundo Novo, 1992)

Regiões espectrais	Propriedades
0,57 μm 0,7 μm e 0,9 μm 1,0 μm 2,2 μm	matéria orgânica em solos sem cobertura vegetal conteúdo de composto de ferro férrico conteúdo de composto de ferro ferroso umidade do solo

Comportamento espectral das rochas

Em geral as rochas ricas em sílica (quartzo-feldspáticas) tendem a apresentar alta reflectância, enquanto as rochas ricas em magnésio e ferro (máficas) caracterizam-se pelas tonalidades escuras causadas pela baixa reflectância. Entretanto a

presença de minerais opacos (ex.: magnetita), diminui substancialmente a reflectância das rochas quartzo-feldspáticas.

As rochas **sedimentares arenosas** tendem a apresentar maior reflectância e bandas de absorção mais bem definidas do que as **argilosas**. Os principais constituintes responsáveis pela resposta espectral das rochas sedimentares são o ferro, o carbono orgânico total e as argilas.

Quadro 16 - Regiões do espectro indicadas para estudos das rochas e dos minerais (segundo Novo, 1992)

Região do espectro	Propriedades
0,8 μm a 1,0 μm	identificação de ferro
1,60 μm	indicação de zonas de alteração hidrotermal ricas em argila
2,17 μm e 2,2 μm	identificação de minerais de argila
2,74 μm	deteção de minerais com presença de hidroxilas na estrutura

Comportamento espectral de áreas construídas

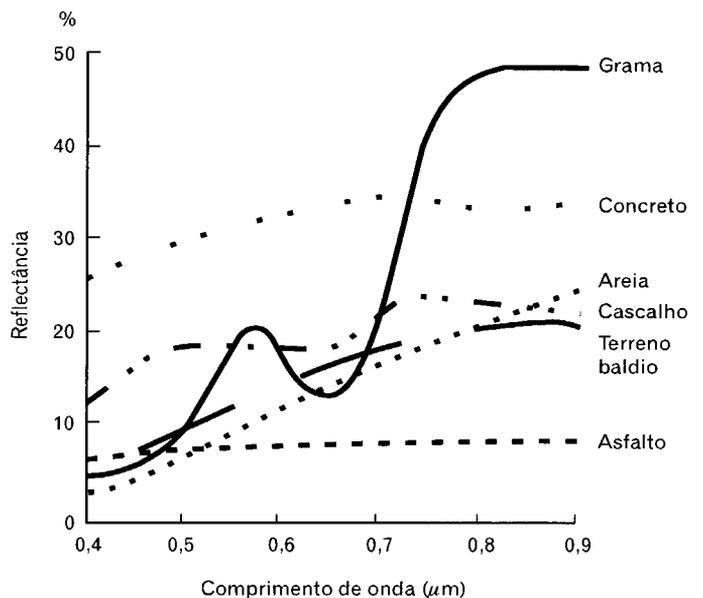
Nas áreas construídas verifica-se, para a maioria dos materiais, um ligeiro aumento da reflectância do visível para o infravermelho próximo, sendo que o concreto destaca-se pela reflectância relativamente alta em relação ao asfalto (Figura 17).

Critérios para seleção das imagens

Na hora da seleção do sensor e das bandas espectrais para um determinado projeto, dois parâmetros são fundamentais: a resolução espacial e a resolução espectral. A resolução espacial está relacionada com a escala de trabalho, enquanto a resolução espectral está relacionada com a capacidade de discriminação dos alvos espectralmente semelhantes. Por isso, o conhecimento da assinatura espectral auxilia na escolha da melhor combinação de canais para a discriminação dos alvos. Quanto maior a gama de opções em termos de canais (resolução espectral) maior será a capacidade discriminatória do sensor. Algumas aplicações dos canais espectrais do LANDSAT/TM são descritas no Quadro 17.

A Figura 18 ilustra a abrangência espectral dos sensores SPOT nos modos multiespectral e pancromático e LANDSAT/TM e a relação inversa entre a resolução espacial e a resolução espectral destes três sensores. A resolução espectral pode ser decisiva para a capacidade discriminatória de muitos alvos, devendo ser levada em consideração no momento da aquisição das imagens. Portanto, o analista deve balancear o maior poder discriminatório da resolução espectral

Figura 17 - Comportamento espectral das feições urbanas/suburbanas



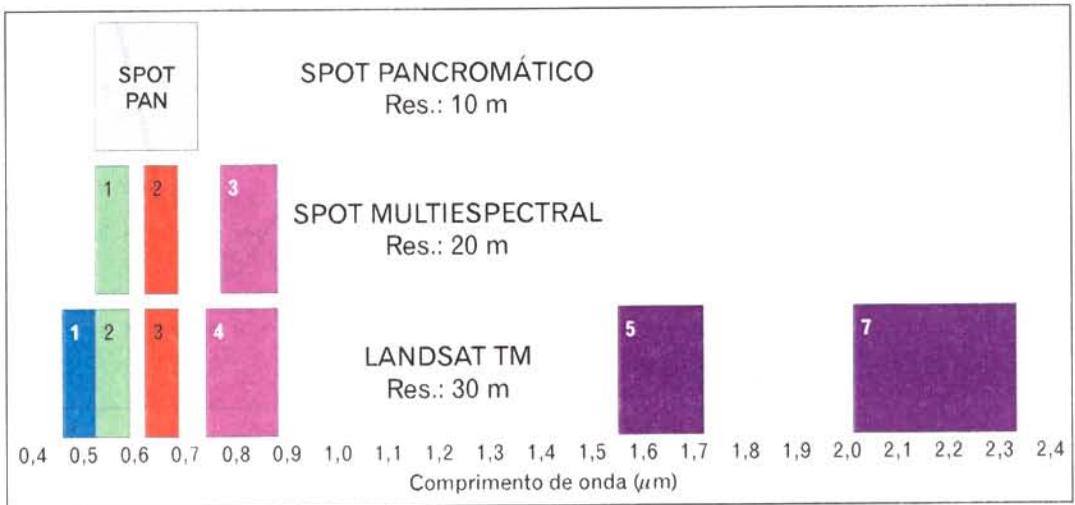
Adaptação de ASP, 1983, in Viadana, 1995.

do LANDSAT/TM com a melhor resolução espacial do SPOT, para, em função da escala e objetivos do projeto, fazer a melhor seleção das imagens.

Quadro 17 - Algumas aplicações das bandas do LANDSAT/TM

Banda	Faixa espectral	Aplicações
1	0,45 mm - 0,52 mm (azul)	Estudos de sedimentos na água Mapeamento de águas costeiras Diferenciação solo/vegetação
2	0,52 mm - 0,60 mm (verde)	Estradas e áreas urbanas Mapeamento de vegetação (maior reflectância dos canais do visível)
3	0,63 mm - 0,69 mm (vermelho)	Estradas e áreas urbanas Espécies vegetais (absorção da clorofila)
4	0,76 mm - 0,90 mm (IV próximo)	Levantamento da biomassa (pico da vegetação sadia) Delineação de corpos d'água
5	1,55 mm - 1,75 mm (IV médio)	Mapeamento de rios e corpos d'água Umidade da vegetação e solos
6	10,40 mm - 12,50 mm (IV distante)	Estresse térmico em vegetação Propriedades termais dos solos e rochas
7	2,08 mm - 2,35 mm (IV médio)	Estudos de rochas e minerais Umidade do solo e vegetação

Figura 18 - Resolução espectral dos sensores SPOT e LANDSAT/TM



Manipulação do contraste

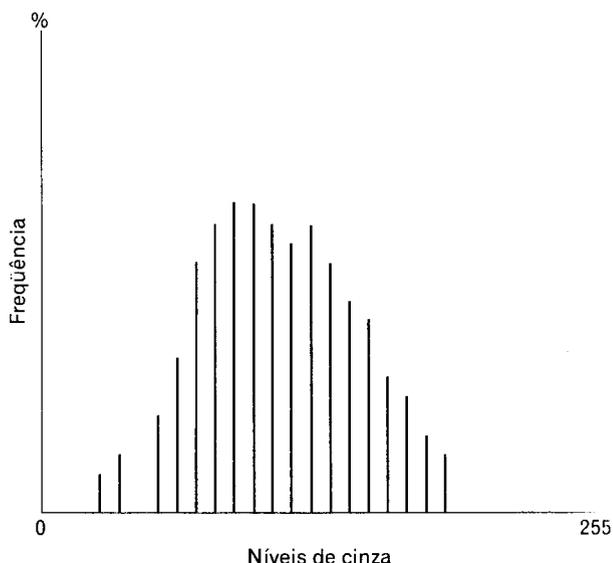
Um dos principais objetivos do PDI é a melhoria da qualidade visual da imagem para facilitar a interpretação. Para isso são utilizadas técnicas denominadas genericamente de **realces**. Os realces mais utilizados são produzidos através da **manipulação do contraste**.

Histogramas de imagens

O **histograma** é uma representação gráfica da frequência de distribuição dos NCs de uma imagem. No histograma, o eixo X representa os NCs, cujo intervalo de valores depende da resolução radiométrica da imagem, enquanto o eixo Y representa a frequência relativa dos NCs.

A maioria das imagens produzem histogramas unimodais, com distribuição normal (gaussiana) ou lognormal. Entretanto, cenas

Figura 19 - Histograma de uma imagem



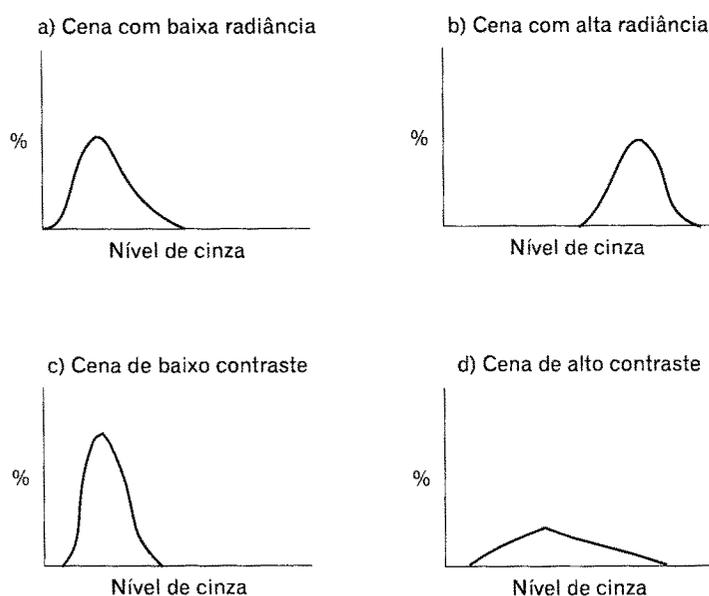
A altura da barra mostra a frequência dos pixels com um determinado nível de cinza.

com áreas espectralmente muito distintas poderão produzir histogramas bimodais ou multimodais.

Contraste e brilho da imagem

O **contraste** da imagem refere-se à distribuição dos NCs no intervalo radiométrico. Para um determinado sensor, o contraste depende da assinatura espectral dos objetos presentes na cena imageada e varia com o comprimento de onda (canal). Geralmente, os valores registrados pelo sensor ocupam uma pequena parte do intervalo possível de valores. Vamos exemplificar assumindo uma resolução de oito bits, ou seja, um intervalo de NC de 0 a 255. Se, para um determinado canal espectral, a cena incluir tanto materiais de baixa quanto de alta radiância, os NCs ocuparão uma faixa larga do intervalo radiométrico (por exemplo, 24 a 210), denotando um alto contraste. Se, por outro lado, na cena existirem apenas materiais de baixa radiância neste canal, esta imagem aparecerá escura. Os NCs estarão concentrados num pequeno intervalo (16 a 74, por exemplo), denotando um baixo contraste.

Figura 20 - Contraste e brilho de imagens



Fonte: Schowengert, 1983.

A forma do histograma e os parâmetros estatísticos fornecem informações sobre o contraste e o brilho da imagem. O contraste é diretamente proporcional ao espalhamento dos níveis de cinza, que é dado pela largura da base do histograma. Estatisticamente é expresso pela **variância**. O **brilho** dos pixels é dado pela posição das barras verticais mais à direita (brilho alto) ou mais à esquerda (brilho baixo). A **média** pode ser o parâmetro estatístico indicativo do brilho da imagem. Os histogramas unimodais de baixo contraste com média baixa indicam predominância de materiais de fraca radiância, resultando imagens de baixo brilho. A média alta, ao contrário, representa imagem de alto brilho (Figura 20).

Realces de contraste

Os níveis de cinza de uma imagem podem ser manipulados com o objetivo de melhorar a visualização da cena e aumentar a quantidade de informação que pode ser extraída visualmente. Estas técnicas são chamadas de **realces de contraste**.

Os realces de contraste produzem uma ampliação do intervalo original de níveis de cinza, de forma que eles são exibidos num intervalo maior. O objetivo é apresentar a mesma informação contida nos dados brutos,

porém de uma forma mais claramente visível ao intérprete. No exemplo da Figura 21, os NCs originais, concentrados no intervalo de 63 a 191, são **remapeados** de forma que o NC 63 é convertido para 0 e o NC 191 é convertido para 255 e os valores intermediários são redistribuídos segundo alguma função matemática. Desta forma, todo o intervalo possível de valores é utilizado para aumentar o contraste e conseqüentemente melhorar a aparência da imagem.

LUT

O realce é executado através de uma função matemática, chamada de **função de transferência de contraste - FTC** - ou **função de mapeamento**, que transforma os valores originais de níveis de cinza da imagem em novos valores, implicando uma alteração do histograma. A FTC pode ser linear (representada graficamente por linha reta) ou não-linear (representada por algum tipo de curva).

Nos sistemas de processamento de imagens os realces são implementados através de tabelas denominadas de **LUT - Look-up Tables**, as quais armazenam a informação sobre os valores originais (entrada) e transformados (saída) para cada NC, segundo a FTC escolhida. No exemplo da Figura 21, ao se aplicar a LUT, todos os NCs=63 na imagem de entrada serão convertidos em NC=0 na imagem de saída, evitando a repetição do cálculo para cada pixel da imagem e, portanto, agilizando o processo.

Realce linear

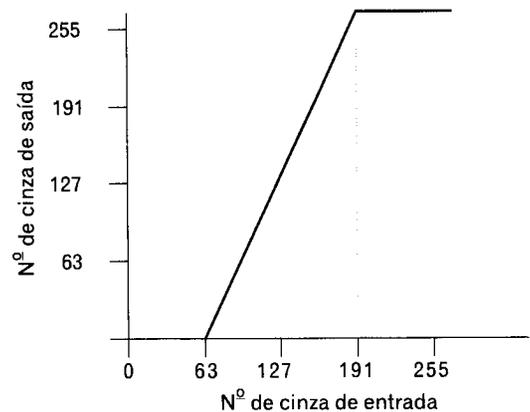
Consiste no aumento do espalhamento dos NCs, segundo uma função linear. Os NCs da imagem original são linearmente redistribuídos, com manutenção de suas posições relativas.

A FTC linear é uma reta e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de interseção com o eixo X. Quanto maior a inclinação da reta, maior a expansão do contraste.

Um caso particular de realce linear é aquele no qual todo o intervalo de NC é considerado, ou seja, o menor valor de NC da imagem (NCmin) é convertido a zero e o maior valor (NCmax) é convertido a 255. Este é denominado **realce MinMax** (Figura 23). O mais comum, entretanto, é desprezar os extremos dos histogramas, de modo a realçar mais a porção central. Neste caso, para valorizar mais os NCs mais freqüentes, desprezam-se NCs pouco freqüentes, produzindo *overflow*.

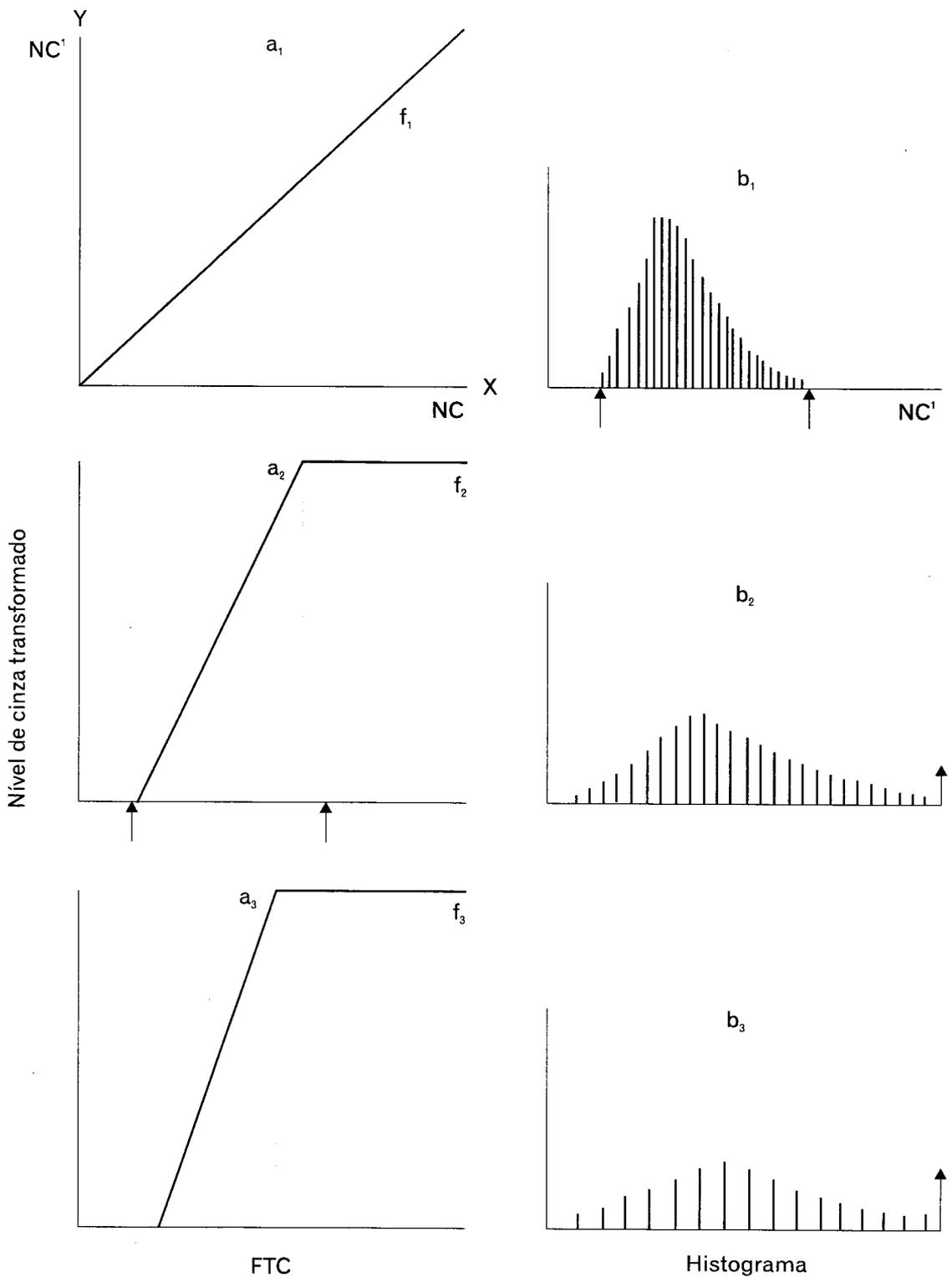
O *overflow* é a transformação de um intervalo de NC em um único NC (Figura 24). O *overflow* representa uma perda de informação em benefício de um realce maior da porção central do histograma. No realce MinMax não há *overflow*.

Figura 21 - Representação gráfica de uma FTC linear



Os NCs do intervalo 63-191 são ampliados para o intervalo 0-255.

Figura 22 - Realce linear



Em a_1 a função f_1 não altera o histograma original b_1 ; em a_2 a função f_2 promove espalhamento representado em b_2 ; em a_3 a função f_3 produz um espalhamento maior que f_2 representado em b_3 .

Fonte: Schowengerdt, 1983.

O realce linear por partes (*linear piecewise stretch*) consiste na aplicação do espalhamento linear, segundo diferentes funções ao longo do intervalo radiométrico, resultando em dois ou mais segmentos de reta com diferente inclinação.

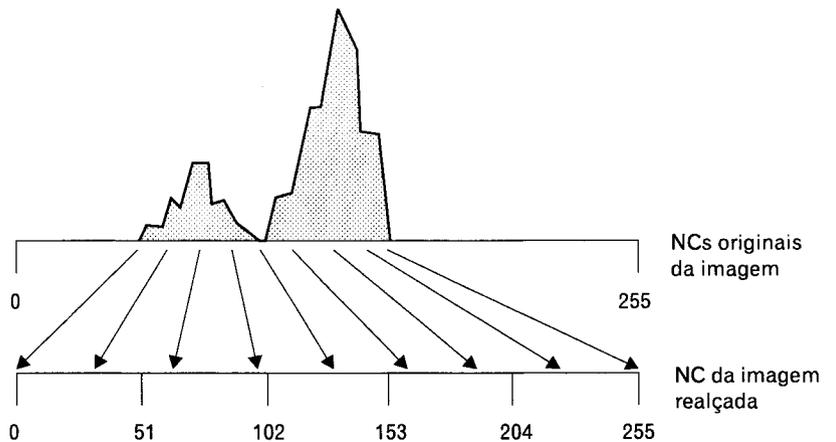
Realce de equalização

Uma limitação do realce linear é não levar em conta a frequência dos NCs. O realce de equalização é uma função de transferência não-linear que leva em conta a frequência dos níveis de cinza, ou seja, o espalhamento será maior para os NCs mais frequentes. A transformação do histograma é no sentido de uma expansão (aumento de contraste) dos intervalos centrais e uma compressão (perda de contraste) dos intervalos laterais.

Realce Gaussiano

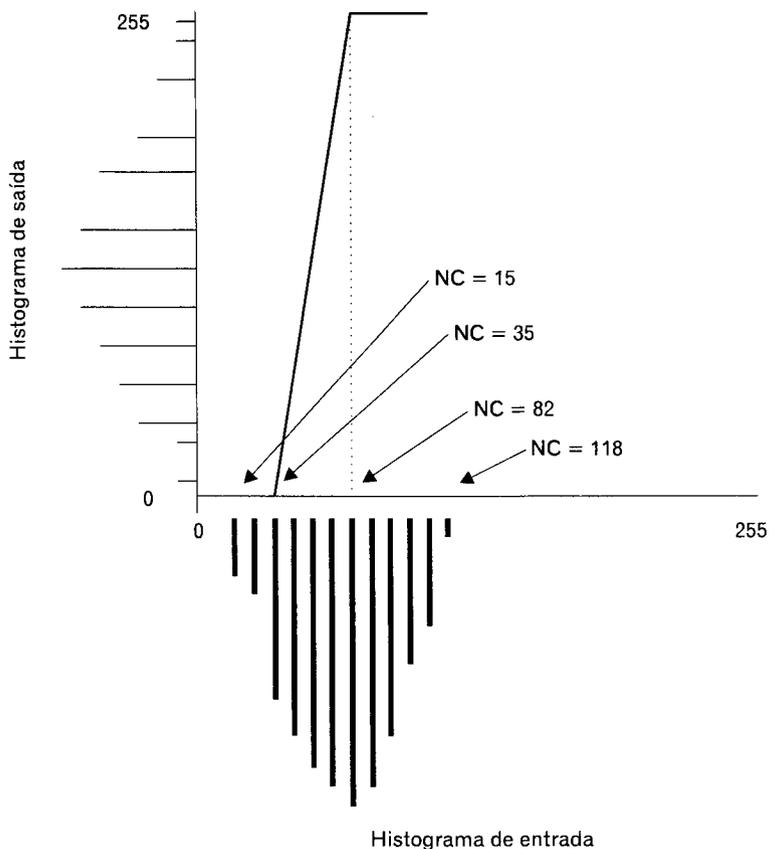
A característica da distribuição **normal** ou **Gaussiana** é o histograma na forma de sino, com os dados assim distribuídos em torno da média: 60,7% contidos em um desvio padrão (σ), 95,45% em dois σ e 99,73% em três σ . O método visa a enquadrar os dados, segundo uma distribuição gaussiana, também chamada de **normalização do histograma**.

Figura 23 - Realce MinMax

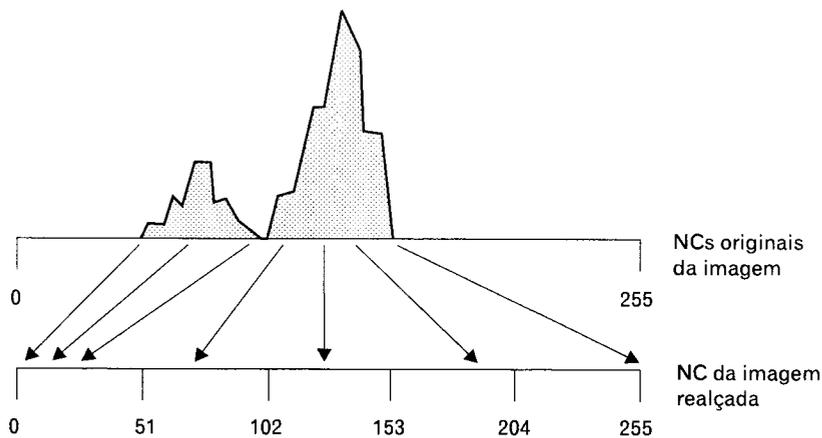


Fonte: PCI, 1997.

Figura 24 - Overflow



- Os NCs do intervalo 15-35 são transformados em 0;
- Os NCs do intervalo 82-118 são transformados em 255; e
- O intervalo de 35 a 82 é expandido.

Figura 25 - Realce de equalização

A população de maior frequência é realçada enquanto a população menos frequente é comprimida.

Fonte: PCI, 1997.

O aumento do desvio padrão produz um alargamento da curva de distribuição, com aumento do contraste. O efeito contrário pode ser obtido pela redução do desvio padrão. Em alguns softwares, a média também pode ser deslocada ao longo do intervalo radiométrico, o que permite aumentar ou reduzir o brilho da imagem.

A normalização do histograma é particularmente útil para equiparar imagens diferentes em termos de média e desvio

padrão, assim como em composições coloridas, para produzir um bom balanceamento das cores das três bandas.

Realce de raiz quadrada

Os níveis de cinza são expandidos, segundo a função de raiz quadrada promovendo um aumento do contraste, principalmente na porção inferior do histograma de entrada. Tende a conferir um aumento geral no brilho da imagem.

Realce negativo

Produz a inversão dos valores de NC: as áreas escuras tornam-se claras e vice-versa.

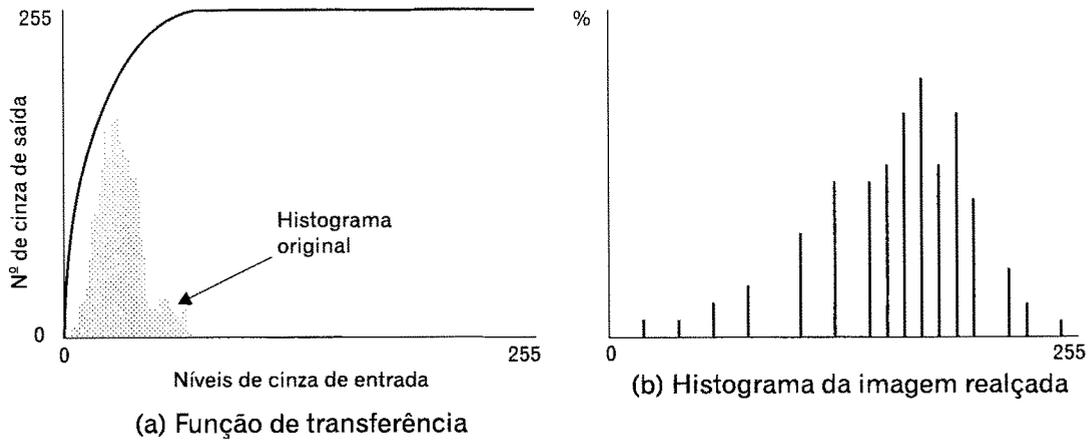
Realce de infreqüência

Esta função produz uma imagem de saída na qual os níveis de cinza menos frequentes recebem valores mais elevados de nível de cinza e vice-versa. A FTC é expressa pela inversão do histograma da imagem de entrada.

Realce logarítmico

A curva de transferência é uma função logarítmica, com uma inclinação maior na porção relativa aos NCs de baixa intensidade, a qual vai progressivamente tendendo à horizontalidade nos NCs de alta intensidade. Visa a realçar a informação contida nas porções mais escuras de uma imagem, às custas de um baixo realce das porções mais claras.

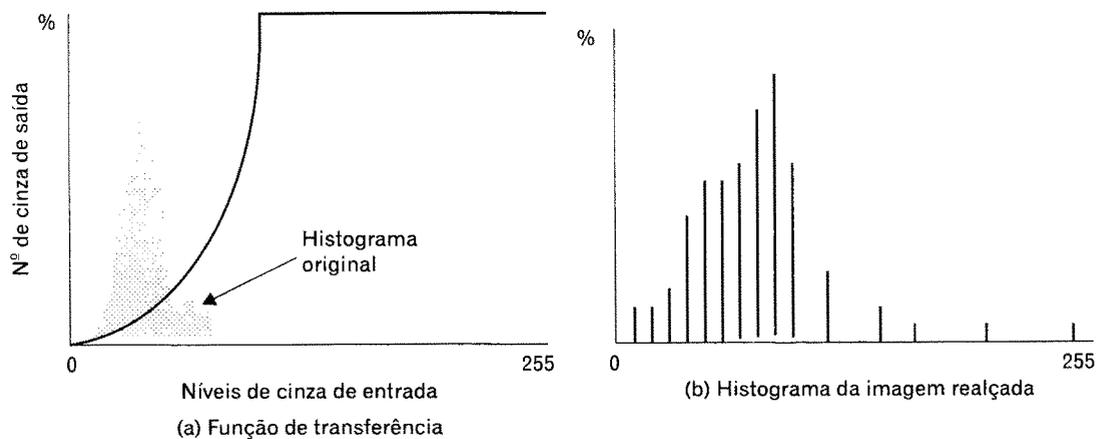
Figura 26 - Realce logarítmico



Realce exponencial

Tem um efeito inverso ao do realce logarítmico. A curva de transferência é mais suave nas porções inferiores e aumenta progressivamente, realçando as porções mais claras da imagem, às custas de menor contraste nas porções mais escuras.

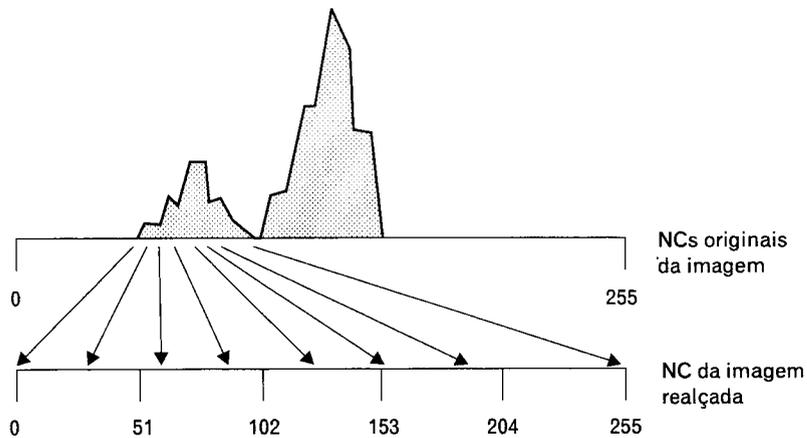
Figura 27 - Realce exponencial



Realce parcial (*piecewise stretch*)

Em algumas análises pode ser necessário examinar certas feições com maior detalhe. Através desta técnica pode-se utilizar todo o intervalo para expandir os níveis de cinza que representam uma determinada feição. Na Figura 28 o histograma bimodal pode representar feições aquáticas (NCs mais baixos) e feições terrestres (NCs mais altos). O realce parcial visa a destacar apenas as primeiras, desprezando, portanto, as informações terrestres.

Figura 28 - Realce parcial

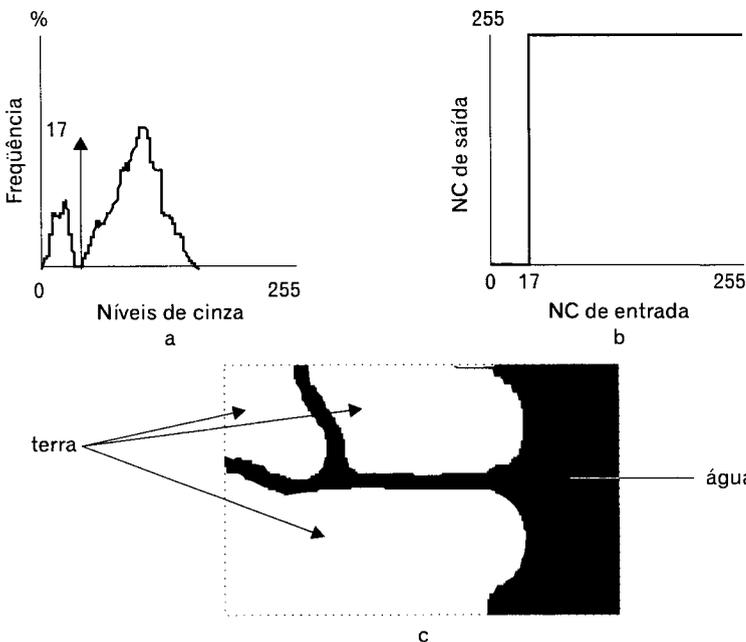


A população 1 (NCs mais baixos) é realçada, enquanto a população 2 (NCs mais altos) é toda convertida para o NC 255.

Fonte: PCI, 1997.

Limiarização (*thresholding*)

Figura 29 - Limiarização



Modificado de PCI, 1997.

É uma técnica para dividir os níveis de cinza de uma imagem em uma ou duas categorias, acima e abaixo de um determinado patamar. Este é um dos vários métodos para criar uma máscara binária (*bitmap*) para a imagem.

Na Figura 29 o histograma da imagem (a) mostra a existência de duas populações cujo limite situa-se em $NC=17$. A transformação segundo a função de transferência de contraste (b) reduz uma população a 0 e a outra a 255. A imagem resultante (c) é composta por apenas dois valores e pode também ser representada por uma máscara binária, com valores de 0 e 1.

Formação das cores

O modelo RGB

Embora o olho humano possa perceber apenas 20 a 30 tons de cinza, ele pode distinguir milhares de cores. As pesquisas de Thomas Young (1773-1829) demonstraram que uma série de cores pode ser obtida a partir de combinações do vermelho (**R**), verde (**G**) e azul (**B**). Tipicamente, as seguintes cores foram produzidas:

- branco - como resultado da mistura das três cores;
- magenta - como resultado da mistura do vermelho e azul;
- ciano (*cyan*) - como resultado da mistura de verde e azul;
- e
- amarelo - como resultado da adição de verde e vermelho.

No modelo RGB, a produção de uma cor **C** a partir de cores primárias aditivas pode ser definida pela equação:

$$C = r.R + g.G + b.B,$$

onde **R,G,B** são as cores primárias e **r,g,b** são os coeficientes da mistura, que no caso das imagens digitais é dada pela intensidade representada pelo NC do pixel (por exemplo, 0 a 255). Portanto, variando-se a intensidade, uma enorme variedade de cores pode ser produzida pela adição de vermelho, verde e azul. Por isso elas foram chamadas de **cores primárias aditivas**.

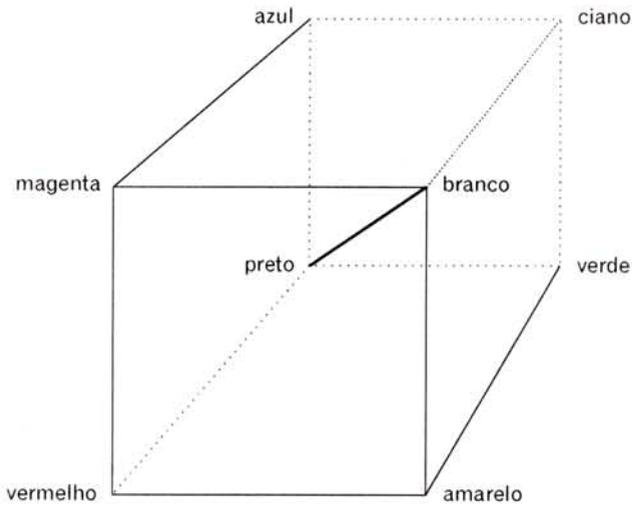
Um efeito complementar pode ser obtido pela subtração de vermelho, verde e azul da luz branca. Assim a subtração de vermelho produz ciano, subtração de verde produz magenta e subtração de azul produz amarelo. Ciano, magenta e amarelo foram chamadas de **cores primárias subtrativas** cujas combi-

nações, em diferentes proporções, também podem resultar numa gama imensa de cores.

Os monitores de sistemas de processamento de imagens são, em geral, capazes de representar cada uma das cores primárias em 256 níveis de intensidade, o que dá um total de 16 711 680 tonalidades. O sistema visual humano, porém, não consegue perceber as variações muito sutis.

A Figura 30 mostra que os vértices do cubo representam as cores primárias puras, com intensidade variando de 0 até o máximo. Cada lado do cubo é formado por duas cores, contendo portanto todas as possíveis misturas das cores que o definem. Se os níveis de cinza variam de 0 a 255, cada lado representará 65 280 cores, formadas pela combinação da intensidade possível de cada cor. Notar que a luz branca é formada pela soma dos máximos RGBs. A linha mais espessa que liga os vértices do preto ao branco representa cores formadas pela soma de iguais quantidades de luz vermelha, verde e azul ($r=g=b$). Este é o eixo acromático que representa as tonalidades de cinza. Portanto, uma imagem monocromática será formada quando a intensidade de luz vermelha, verde e azul for igual. Se a intensidade de luz vermelha, verde e azul for desigual, haverá a formação de uma cor.

Figura 30 - Cubo de cores

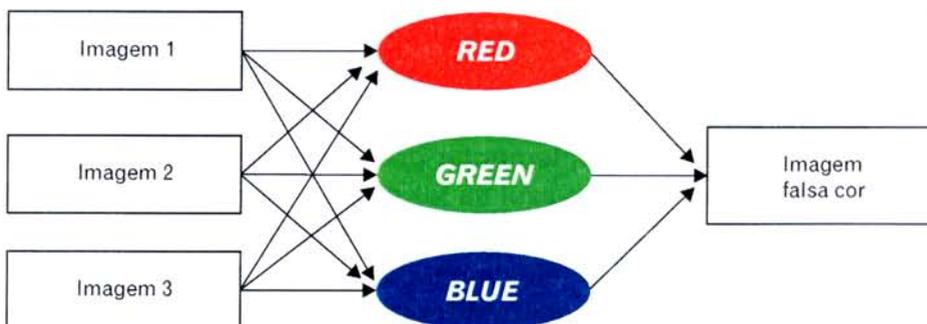


quando a intensidade de luz vermelha, verde e azul for igual. Se a intensidade de luz vermelha, verde e azul for desigual, haverá a formação de uma cor.

Imagem monocromática/falsa/pseudocor

As imagens de sensoriamento remoto multiespectral, por registrarem dados em várias faixas de espectro EM, permitem a combinação de bandas. A forma mais usual de combinação é através da combinação de três imagens (tripleto), cada uma colocada num "filtro" ou "plano de cor", resultando numa composição colorida. Para isto são utilizadas as três cores primárias: vermelho, verde e azul. Através desta técnica, a imagem colocada no plano de cor verme-

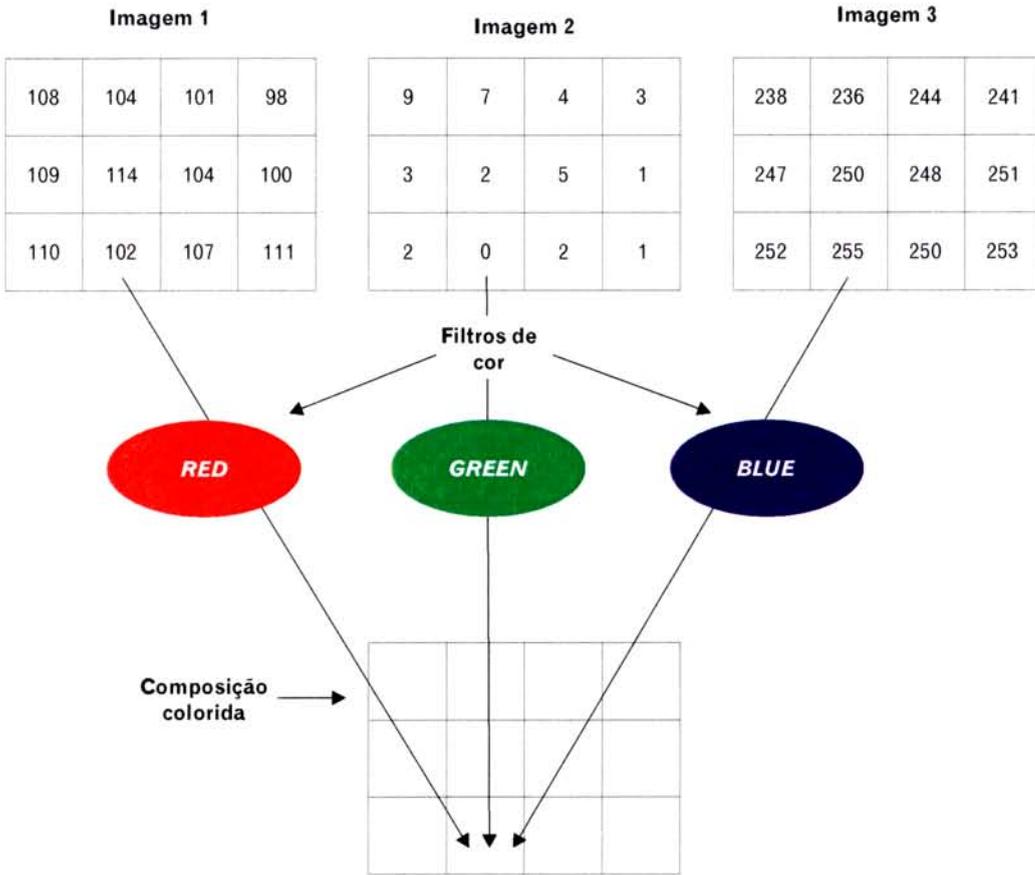
Figura 31 - Formação da composição colorida (RGB)



lho terá seus **níveis de cinza** convertidos em níveis de vermelho, o mesmo ocorrendo com as imagens colocadas no verde e no azul. Esta é uma forma de sintetizar três imagens em uma e ao mesmo tempo repre-

sentá-las em cores. As cores resultantes não têm nada a ver com as cores reais dos materiais no terreno, sendo por isso denominadas de composição **falsa cor** (Figura 31).

Figura 32 - Formação das cores



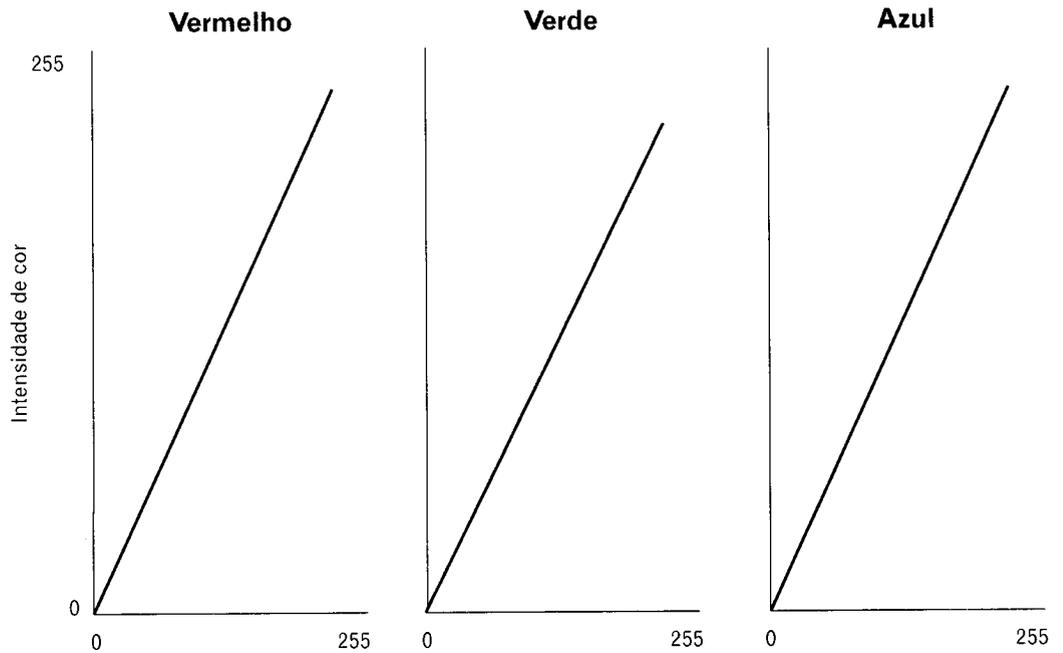
Na composição colorida cada pixel terá a cor resultante da combinação da intensidade das cores primárias expressa pelo NC. Isto é ilustrado pela Figura 32, na qual o pixel assinalado terá uma cor resultante de intensidade máxima de azul com intensidade média de vermelho e nenhuma contribuição do verde.

A imagem **monocromática** é formada quando a mesma banda é colocada nos três planos de cor, pois, neste caso, os pixels terão o mesmo NC no vermelho, verde e azul. Se, na Figura 32, a imagem I for colocada nos três planos de cor, o pixel assinalado será formado pela intensidade igual (NC=102) de vermelho, verde e azul, resultando num cinza médio.

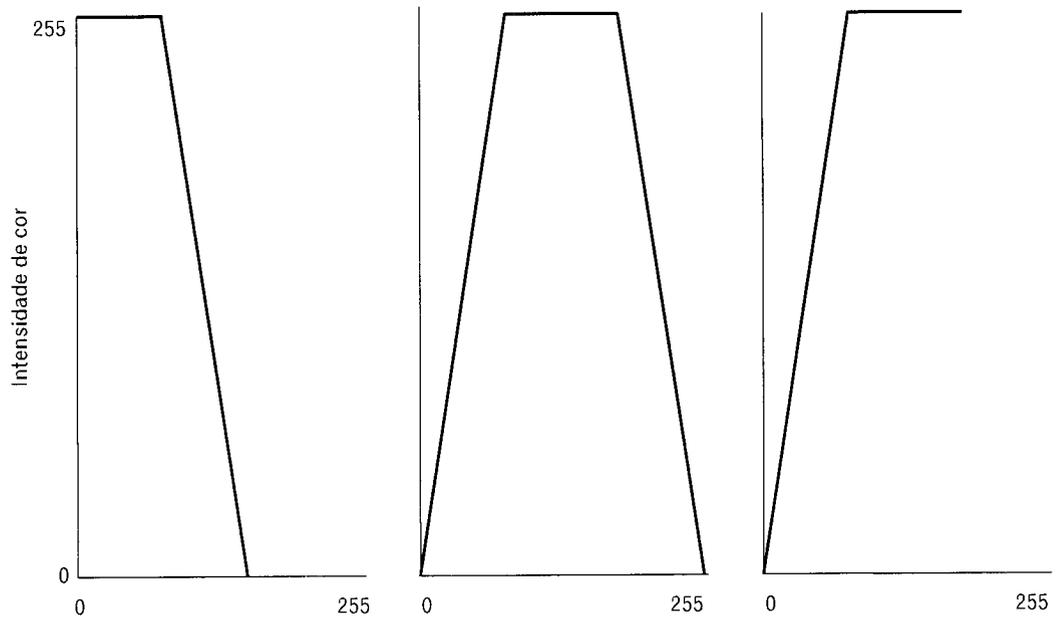
Pseudocor: É a transformação de uma imagem em preto e branco em imagem colorida pela conversão dos níveis de cinza de imagem unidimensional em três dimensões de cores.

A pseudocor é formada através da manipulação de *Look-up Tables* (LUTs) como mostra a Figura 33. Na parte superior da figura (a) são mostradas as LUTs nas quais a intensidade de cor corresponde ao NC da imagem. Se os NCs forem iguais para os três planos de cor, o *display* será monocromático. A Figura 33 b mostra as LUTs transformadas de forma que, para um mesmo NC,

Figura 33 - LUT para *display* monocromático e pseudocor



Níveis de cinza
(a) LUT para *display* monocromático



Níveis de cinza
(b) Pseudocor

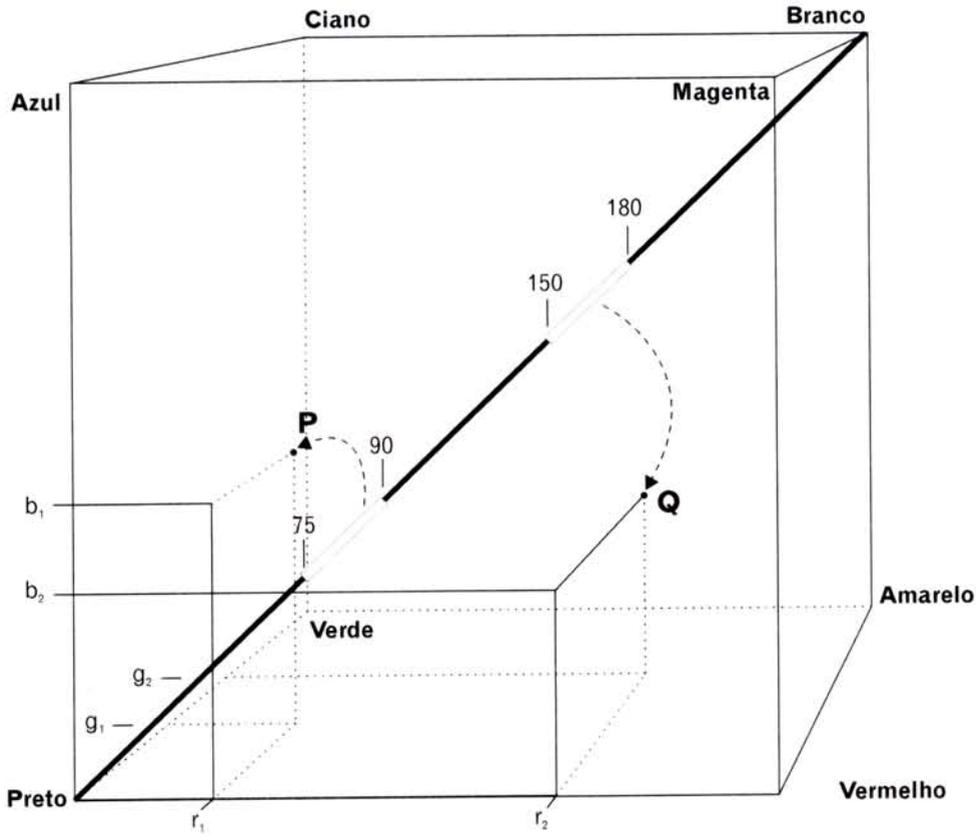
- (a) A intensidade de cor corresponde ao NC da imagem.
(b) As LUTs são alteradas para produzir intensidade de cor distinta em cada plano de cor.

haverá uma intensidade de cor distinta em cada plano de cor, para a produção de imagem pseudocor.

Fatiamento (*density slicing*)

É a subdivisão dos níveis de cinza de uma imagem monocromática em intervalos que são representados por cores. Cada faixa do intervalo, como,

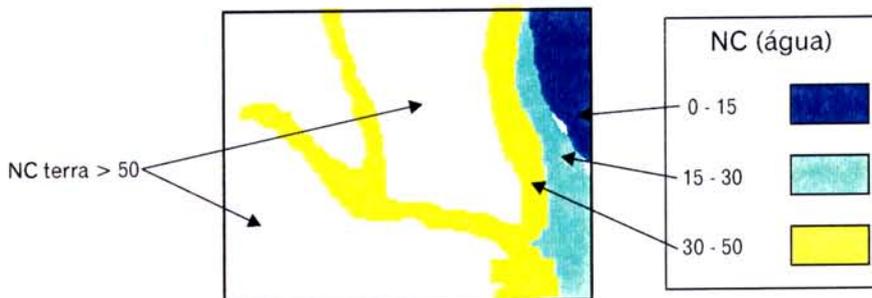
Figura 34 - Representação gráfica do fatiamento



O intervalo 75-90 de NC é representado pelo ponto P do cubo de cores, enquanto o intervalo 150-180 é representado pelo ponto Q.

Fonte: Mather, 1987.

Figura 35 - Imagem fatiada



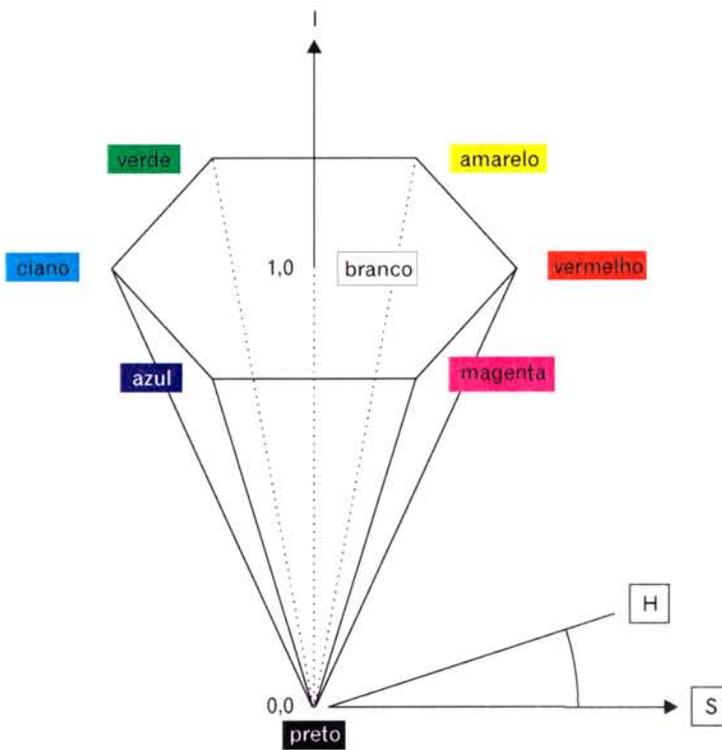
As cores representam níveis de profundidade da água.

por exemplo, 75-90, é representada por um ponto no cubo RGB (Figura 34). A Figura 35 mostra uma imagem composta por feições terrestres e aquáticas. As feições aquáticas foram fatiadas, segundo os níveis de cinza correspondentes à profundidade da água.

Transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*)

O modelo do HSI ou do hexacone usa os conceitos de *Hue* (H), *Saturation* (S) e *Intensity* (I) para explicar a idéia de cor. *Hue* (matiz, nuance da cor) é o que a gente percebe como cor (vermelho, azul, púrpura e rosa). É dado pelo comprimento de onda dominante do espectro EM. *Saturation* (saturação) é o grau de pureza da cor; pode ser considerado como a proporção de branco misturado com a cor. A cor pura é 100% saturada. *Intensity* (intensidade) é a medida do brilho da cor.

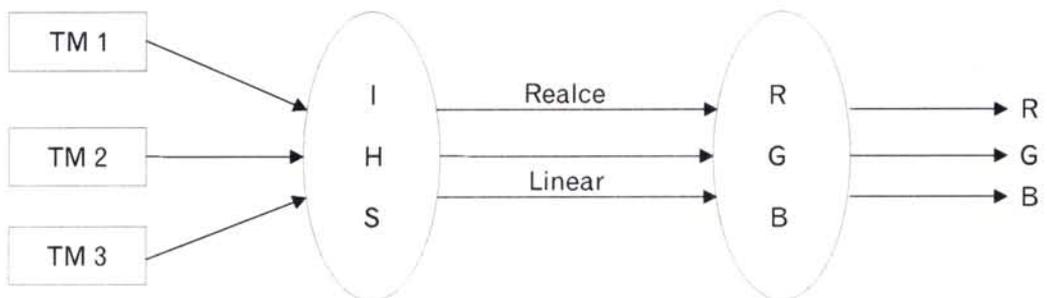
Figura 36 - Modelo de hexacone



O sistema IHS utiliza o hexacone invertido para representar as cores, ao invés do cubo como o sistema RGB (Figura 36). A intensidade varia de 0 a 1, do ápice à base. A distância radial até o eixo central representa a saturação, que varia do branco até a cor pura. Quanto mais distante do branco, maior a saturação. O matiz é representado como uma seqüência radial ao redor do eixo da intensidade.

A vantagem do modelo IHS é definir as cores por três atributos (I,H,S) ao invés da intensidade das cores primárias. Estes atributos podem ser analisados e manipulados individualmente, ao contrário do sistema RGB, onde eles estão intrinsecamente interligados. Esta independência permite processar os atributos separadamen-

Figura 37 - Transformação IHS



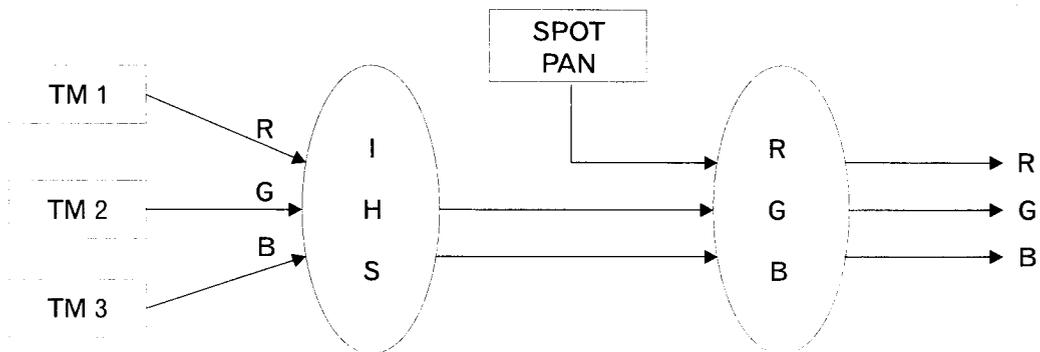
te, por exemplo, realçar apenas a intensidade (I). Tal procedimento não é possível no modelo RGB.

A transformação IHS é feita em múltiplas etapas, representadas pela Figura 37. Primeiramente, nas três bandas selecionadas, o programa faz a transformação matemática para IHS, representando intensidade, matiz e saturação do triplete original. A seguir, aplica-se um aumento linear de contraste e faz-se a reversão das três imagens para o espaço RGB.

Esta técnica é utilizada para duas finalidades: melhorar a utilização do espaço de cores, principalmente quando a correlação interbandas é alta; e combinar diferentes tipos de imagens ou mesmo imagens de natureza diferente. Exemplos:

- fusão de imagem SPOT pancromática (composta por apenas uma banda) com imagem TM (Figura 38), para produzir uma imagem colorida com a resolução espacial de 10 metros.
- fusão de imagem de radar com imagem ótica, para produzir uma composição colorida que apresente as estruturas e relevo presentes na imagem de radar.
- fusão de imagem classificada com duas bandas espectrais para produzir uma visualização das classes superposta aos tons da imagem.

Figura 38 - Fusão de três bandas de imagem TM com SPOT



O procedimento envolve:

- calcular os componentes **IHS** das bandas originais;
- aplicar o aumento de contraste nos componentes **H** e **S** e na imagem a ser fundida (SPOT, radar ou classificada);
- substituir o componente **I** pela imagem a ser fundida; e
- aplicar a transformação inversa **IHS** → **RGB**.

Operações aritméticas com imagens

O processamento digital permite operações aritméticas entre imagens. As mais importantes são:

- adição;
- subtração;
- multiplicação; e
- divisão (razão espectral).

As operações aritméticas são utilizadas em **análises multiespectrais** (diferentes canais espectrais de uma mesma cena) e em **análises multitemporais** (a mesma imagem em diferentes datas). As operações são efetuadas entre os NCs dos pixels correspondentes nas diversas imagens. O requisito básico para estas operações é que as imagens estejam *registradas*, ou seja, que haja uma perfeita superposição de pixels correspondentes.

As operações aritméticas visam:

- a) à **redução da dimensionalidade** dos dados que é obtida através das técnicas de compressão;
- b) ao **realce das similaridades** (adição e multiplicação); ou
- c) ao **realce das diferenças** (subtração e divisão).

Adição

Consiste na soma, pixel a pixel, dos NCs e na divisão pelo número de imagens somadas. É utilizada para:

Redefinir uma nova banda, formada pela média de bandas adicionadas. Exemplo: soma das bandas 1,2,3 do LANDSAT/TM para produzir uma única banda da faixa do visível, que seria expressa pela equação $B_v = (b_1 + b_2 + b_3) / 3$. Neste caso o objetivo seria sintetizar toda a informação das bandas situadas nos intervalos do azul, verde e vermelho do espectro eletromagnético por uma única banda (B_v).

Combinar imagens originais com imagens processadas. Exemplo: soma de imagem filtrada (*realce de borda*) com a imagem original para combinar a informação tonal da imagem original com a informação textural da imagem filtrada.

Subtração

• Subtração de imagens de diferentes datas

A análise temporal baseia-se nas diferenças da resposta espectral, em diferentes datas, devido a alterações ocorridas na superfície da terra. A subtração de imagens é utilizada para a detecção de alterações ocorridas na superfície da terra, tais como: desmatamento, mudanças no uso do solo, expansão de áreas urbanas ou agrícolas e diferenças sazonais na vegetação.

Para a análise multitemporal, alguns cuidados devem ser tomados:

- as imagens devem ser registradas no mesmo Sistema de Projeção, Elipsóide e *Datum*;
- as imagens devem ser tomadas em horário solar próximo, para minimizar os efeitos causados pelo ângulo de inclinação do Sol; e
- para os sensores com apontamento lateral como o SPOT, as imagens devem ter o mesmo ângulo de visada.

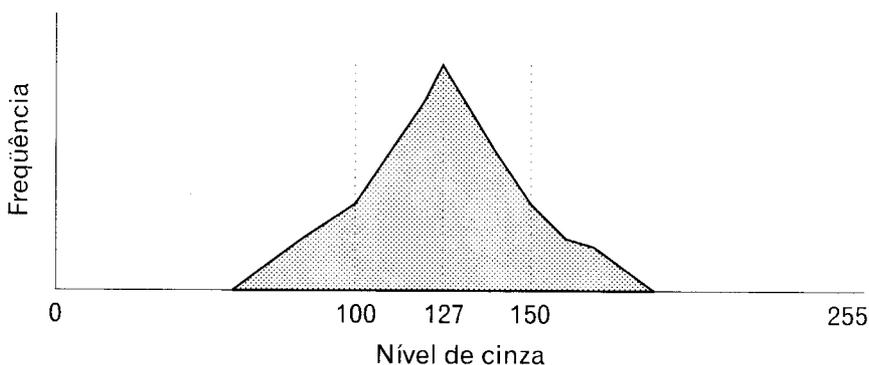
• Subtração de bandas de imagens da mesma data

É usada para a identificação de diferenças com base no comportamento espectral dos materiais. Exemplos:

- a) em estudos de vegetação e meio ambiente, a subtração do canal 7 ($0.8-1.1\mu\text{m}$) pelo canal 5 ($0.6-0.7\mu\text{m}$) do LANDSAT/MSS poderá realçar diferenças na cobertura vegetal; e
- b) em pesquisa mineral a subtração do canal 3 ($0.63-0.69\mu\text{m}$) pelo canal 1 ($0.45-0.52\mu\text{m}$) do LANDSAT/TM serve para realçar minerais formados por óxidos de ferro e formações lateríticas, os quais apresentam alta reflectância no vermelho e baixa reflectância no azul.

A subtração de imagens com resolução radiométrica de oito bits produz resultados no intervalo -255 a +255. Como somente os valores no intervalo de 0 a 255 podem ser representados, é necessário fazer um ajuste. Um método de ajuste é adicionar 255 ao resultado da subtração para transformar os valores para o intervalo 0 a 510, que são então divididos por dois.

Figura 39 - Histograma de uma imagem de saída de subtração



Modificado de Crosta de 1993.

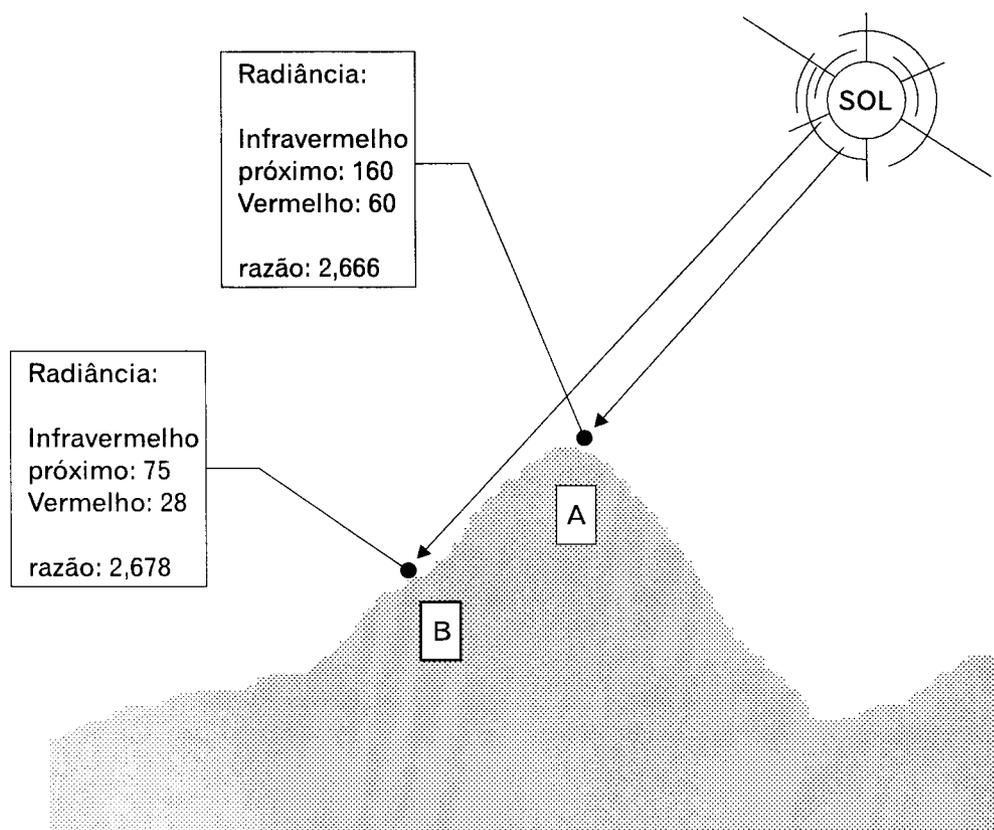
Numa imagem assim processada, os pixels, nos quais não houve alteração significativa dos NCs, ficarão situados em torno do valor 127 (Figura 39). As diferenças são detectadas pelo afastamento para cima ou para baixo deste valor central.

Razão espectral (*ratio*)

Produz imagens geradas pela divisão de canais da mesma cena. O resultado é uma imagem que melhor reflete as verdadeiras características da superfície. As principais vantagens da razão espectral são:

- minimizar as diferenças nas condições de iluminação de uma cena. O resultado é a redução do efeito da topografia sobre a resposta espectral (Figura 40).

Figura 40 - Redução do efeito da topografia



O mesmo material possui radiância em A muito superior à radiância em B devido à posição em relação ao Sol. A transformação dos pixels em valores de razão entre bandas elimina a distorção.

- ressaltar a reflectância espectral de determinados alvos. Por exemplo, para ressaltar corpos de água, uma banda do *visível*, onde a reflectância da água é maior, seria dividida pela banda do *infravermelho*, onde a reflectância da água é menor. Na imagem produzida os pixels que representam água teriam NCs mais elevados, destacando os corpos d'água.
- muito utilizada nos estudos de vegetação, para determinação de índices de biomassa, área foliar, detecção de fitopatologias, fenologia, etc. Para isso foram desenvolvidos **índices de vegetação**, baseados no fato de que a clorofila apresenta intensa absorção na região do visível (particularmente na faixa do vermelho) e intensa reflectância na região do infravermelho próximo. Portanto, o índice de vegetação mais simples seria dado pela subtração do canal do infra-

vermelho próximo pelo canal do vermelho (Exemplo: MSS7-MSS5 ou TM4-TM3). Os valores mais elevados seriam indicativos de vegetação sadia. As áreas de vegetação sadia são ressaltadas (NCs mais altos) na imagem resultante.

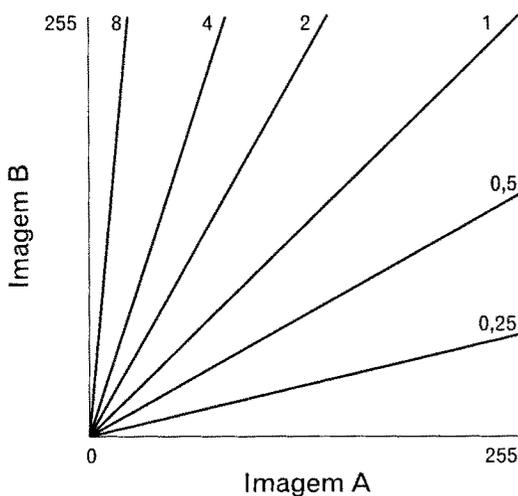
- em prospecção mineral, a razão de canais pode ser utilizada para identificação de zonas de alteração hidrotermal (minerais argilosos relacionados a concentrações minerais), que são realçados pela razão TM5/TM7. Presença de óxidos de ferro (limonita) associados a minérios sulfetados podem ser detectados pela razão TM3/TM1.
- o tipo mais comum de índice de vegetação é o *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI - que é obtido pela equação:

$$NDVI = \frac{B_{iv} - B_v}{B_{iv} + B_v}$$

onde B_{iv} e B_v são as bandas situadas no infravermelho e no visível, respectivamente, de um determinado sensor. Assim, para o LANDSAT/MSS a equação será traduzida para $MSS \Rightarrow NDVI = \frac{MSS7 - MSS5}{MSS7 + MSS5}$, e para o NOAA/AVHRR será $\Rightarrow NDVI = \frac{B2 - B1}{B2 + B1}$.

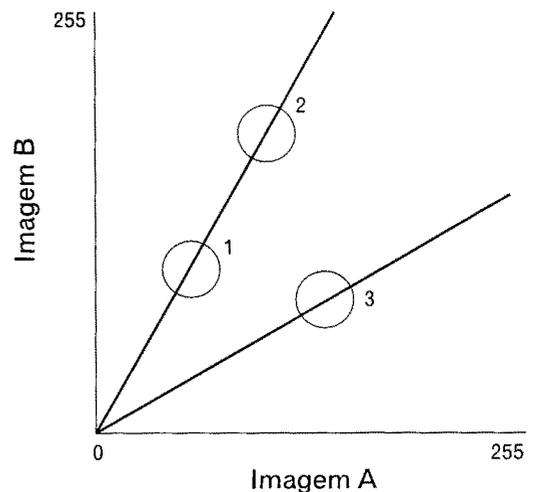
A razão de canais produz uma concentração dos valores em torno de linhas de mesma razão (Figura 41). São números decimais, em geral situados entre 0 e 5. Estes valores devem ser convertidos para números inteiros e escalados para o intervalo compatível (por exemplo, 0 a 255) para evitar a extrema compressão dos NCs. Mesmo com a redistribuição dos valores para a escala de 0 a 255, é possível que haja uma redução da variabilidade das respostas espectrais. Isto ocorre quando objetos distintos são concentrados na mesma linha de razão, tornando-se deste modo indistinguíveis, como ilustra a Figura 42. A razão de canais deve, portanto, ser utilizada com cautela para evitar efeitos indesejáveis.

Figura 41 - Linhas de mesma razão



Áreas homogeneizadas pela razão de canais.

Figura 42 - Perda de informação na razão de canais



Os círculos 1 e 2 representam materiais distintos que ficaram situados em linhas de mesma razão.

Multiplicação

Realça as feições comuns às bandas que são multiplicadas. Como geralmente as zonas de sombras são comuns a todas as bandas, deduz-se que esta operação realça as feições morfológicas, sendo útil para a geologia estrutural, cartografia e geomorfologia.

A multiplicação de imagens pode ser usada para combinar o primeiro principal componente (PC1), o qual contém a maior parte da informação morfológica (textural), com os componentes PC2, PC3 e PC4, que possuem informações predominantemente tonais. A PC1 é chamada de componente **acromática** e as outras são denominadas componentes **cromáticas**. Ao se combinar estas quatro imagens através da multiplicação do PC1 pelos três outros, obtém-se uma imagem de quatro dimensões: uma dimensão textural, com informação morfológica, e três dimensões tonais.

Da mesma forma pode-se combinar uma imagem SPOT com três imagens TM não correlacionadas (Exemplo: três componentes principais ou três razões de bandas). A composição colorida resultante conterá a informação textural/morfológica (dimensão acromática) com resolução espacial de 10 metros do SPOT e a informação espectral das três imagens (cromáticas) TM.

Filtragem de imagens

Freqüência espacial

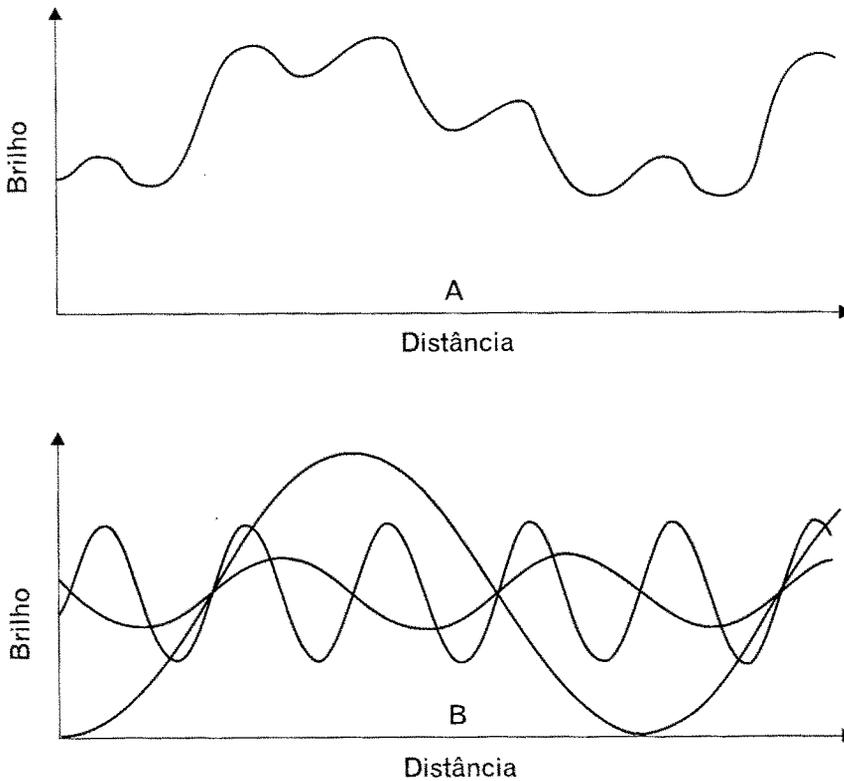
As imagens apresentam áreas com diferentes respostas à energia eletromagnética que são expressas pela **tonalidade**. O padrão de arranjo dos elementos tonais é chamado de **textura**. O elemento textural é a menor superfície contínua e homogênea distinguível na imagem.

A **freqüência espacial** de uma imagem é dada pelas variações de intensidade (brilho) por unidade de distância. Se numa determinada área da imagem há pouca variação de brilho, a freqüência espacial é considerada baixa. De modo inverso, a alta freqüência espacial é revelada pela grande variação de tonalidades por unidade de distância. Portanto, a freqüência espacial descreve as variações de brilho de uma imagem.

Numa imagem digital, os valores discretos dos NCs podem ser linearmente ajustados segundo curvas. Ao se plotar em um gráfico as variações lineares dos níveis de cinza de uma imagem, obtém-se, geralmente, uma curva complexa. A Figura 43A mostra uma curva representando as variações de NC ao longo de uma linha da imagem. Esta pode ser decomposta em um conjunto de componentes senoidais, com diferentes freqüências e amplitudes (Figura 43B).

Os limites entre diferentes materiais (expressos pela tonalidade) podem ser bruscos ou suaves. Os limites são representados graficamente por gradientes tanto mais inclinados quanto maiores forem as diferenças e mais bruscos os contatos. Os limites com acentuado gradiente são denominados **bordas**.

Figura 43 - Curvas de frequência espacial



(A) Curva representando as variações de NC ao longo de uma linha da imagem.

(B) Decomposição em curvas senoidais com diferente comprimento de onda e amplitudes. A adição do brilho das curvas superpostas em cada ponto reproduz a curva original.

As bordas são mais frequentes e nítidas em áreas com alta frequência espacial (cenas heterogêneas: áreas agrícolas com alta diversidade de cultivos, limites entre áreas sombreadas e iluminadas, áreas urbanas, malha rodoviária e contatos litológicos). Cenas com estas características produzem curvas com baixo comprimento e alta frequência. As cenas homogêneas (vegetação natural e monoculturas), por outro lado, apresentam variações gradacionais e podem ser vistas como ondas de grande comprimento e baixa frequência.

A filtragem espacial de frequência consiste de operações espaciais que "filtram" determi-

nadas frequências no sentido de suavizar (**filtros de passa-baixas** ou *low-pass filter*) ou realçar a diversidade (**filtros de passa-altas** ou *high-pass filter*). As filtragens são muito usadas para realçar bordas, feições lineares e padrões de textura. Isto é feito através da supressão ou realce de determinadas frequências espaciais.

As filtragens podem ser implementadas através de dois processos denominados:

a) **Convolução;** e

b) **Análise de Fourier.** A análise de Fourier consiste de operações matemáticas complexas para separar os vários componentes das frequências espaciais. A convolução opera no domínio espacial da imagem e, apesar de mais simples, é satisfatória para os objetivos mais comuns em PDI.

Convolução

Define-se uma janela composta por um número ímpar de linhas e colunas que é referida como **máscara** (*kernel*). Chama-se **convolução** ao processo de filtragem efetuado pelo deslocamento da máscara sobre a imagem pelo avanço de um pixel por vez (Figura 44). Chama-se de **operador** ao tipo de processo matemático ou estatístico característico de um determinado filtro, o qual define, para cada pixel

da máscara, um coeficiente ou peso representativo de alguma relação matemática. A filtragem envolve o cálculo do valor do pixel central, em função do conjunto de pixels da área da imagem coberta pela máscara. O processo é repetido através da convolução, resultando na transformação dos NCs da imagem original.

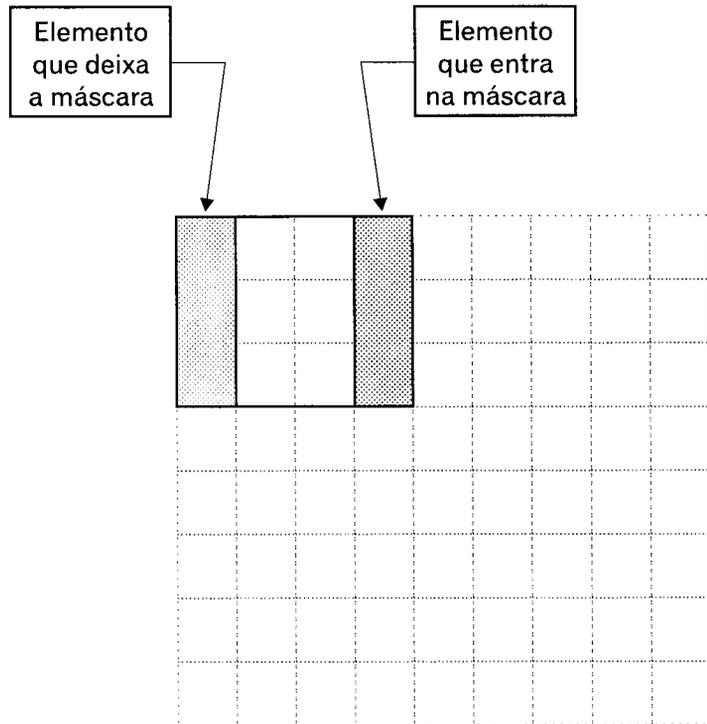
As filtragens são operações de área ou vizinhança e não-pontuais (como os realces de contraste). Por isso, o NC de um pixel p após a transformação depende do NC original de p e dos seus vizinhos na máscara e do operador utilizado. Quanto maior a máscara utilizada, maior o efeito da filtragem.

Tipos básicos de filtros de convolução:

Filtros de passa-baixas (*low-pass filter*)

Eliminam as altas frequências, retirando detalhes, suavizando e homogeneizando a imagem. Por outro lado, produzem um efeito indesejável que é o borramento ou perda da nitidez. Quanto maior o tamanho da máscara, maior a suavização. São também utilizados na remoção de ruídos eletrônicos. Os ruídos são valores anômalos causados por falhas no sistema de transmissão ou recepção de sinais.

Figura 44 - Convolução



Filtro de média

Substitui o NC do pixel original pela média aritmética do NC dos pixels da máscara, produzindo uma suavização.

Filtro de média ponderada

É aquele que atribui pesos aos pixels em função de sua distância do pixel central. Aumentando-se o peso do pixel central, reduz-se o efeito da suavização.

Filtro de moda

O pixel central é substituído pelo valor de DN mais comum dentro da máscara. É bastante usado como processo de pós-classificação, para limpar pixels isolados dentro de uma determinada classe.

Figura 45 - Filtro de média

(a) Máscara quadrada

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

(b) Máscara "+"

	1/5	
1/5	1/5	1/5
	1/5	

Figura 46 - Efeitos do filtro passa-baixas

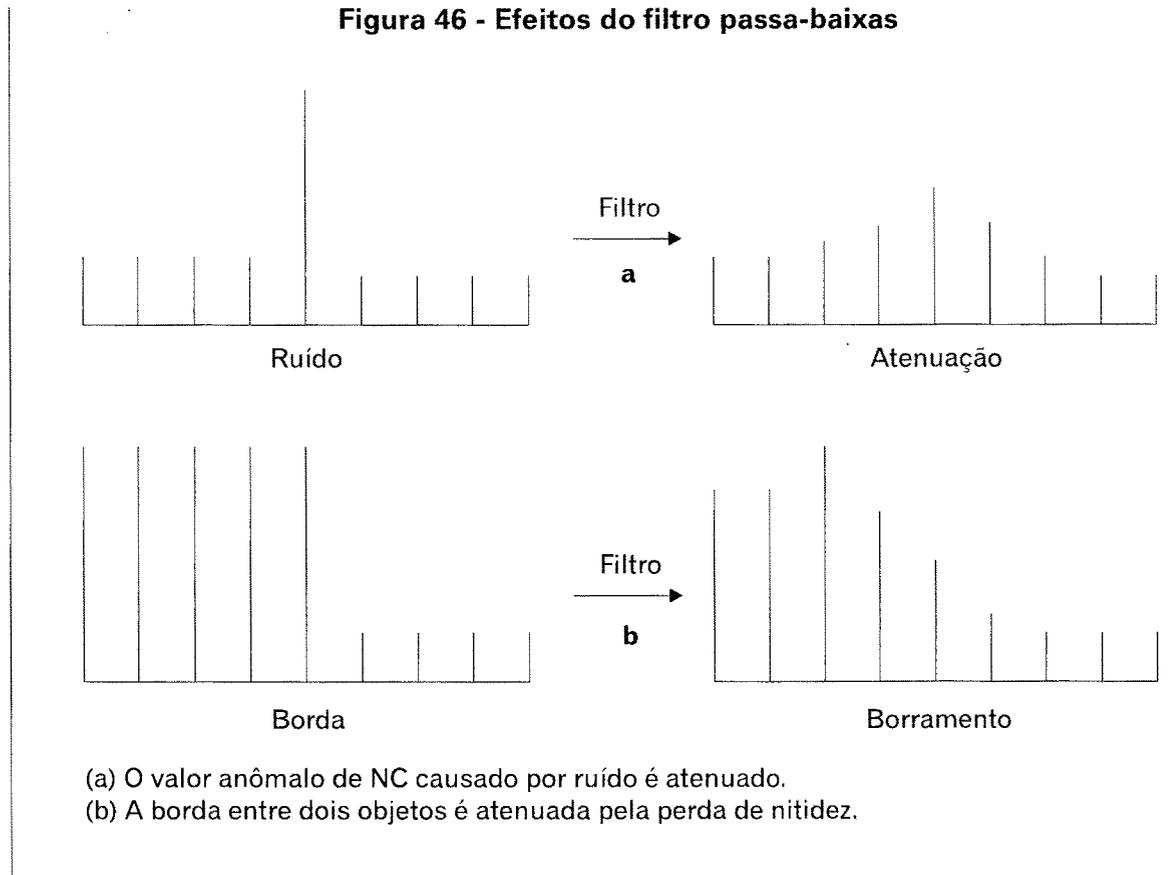


Figura 47 - Filtro de média ponderada

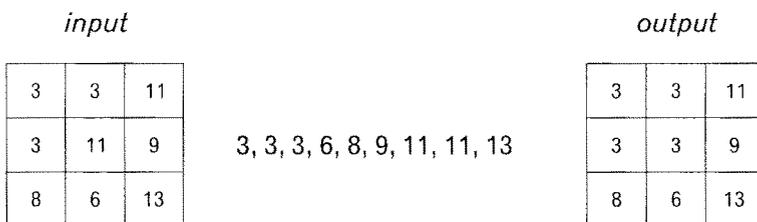
(a) Máscara quadrada

1/16	1/8	1/16
1/8	1/4	1/8
1/16	1/8	1/16

(b) Máscara "+"

	1/6	
1/6	1/3	1/6
	1/6	

Figura 48 - Exemplo de aplicação de filtro de moda



Filtro de mediana

O pixel central é substituído pela mediana dos pixels da máscara, ou seja, o pixel de NC intermediário.

Este filtro pode ser usado para eliminar os *drop-outs* (NCs anômalos causados por ruídos da imagem).

Filtros de passa-altas (*high-pass filter*)

Eliminam as feições de baixa frequência, realçando as de alta frequência. São usados para realçar bordas, detalhes, contatos, lineamentos, etc.

Filtros Laplacianos

Caracterizam-se por operadores cuja soma dos pesos da máscara é igual a zero.

Filtros Laplacianos + imagem original

Os produtos das filtrações de passa-altas são ricos em informação textural, mas pobres em informação tonal, dificultando a interpretação. Entretanto, é possível resgatar a informação tonal adicionando-se a imagem original à imagem filtrada. Isto

pode ser obtido numa única etapa de filtragem, adicionando-se, nos operadores da Figura 50, a unidade ao valor central da máscara. Resultados interessantes podem ser obtidos ao se atribuir um peso maior ainda à imagem original em relação à imagem filtrada, o que pode ser implementado pela adição de mais unidades ao pixel central do operador.

Figura 49 - Exemplo de aplicação de filtro de mediana

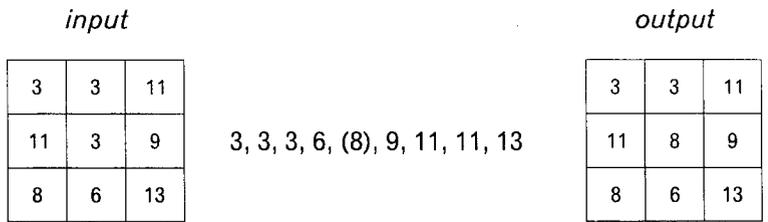


Figura 50 - Exemplos de operadores de Laplace

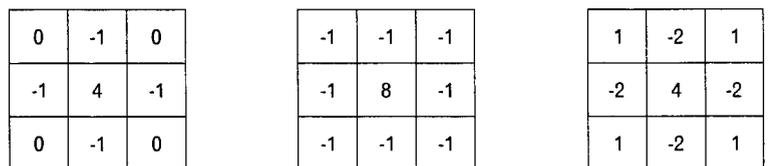
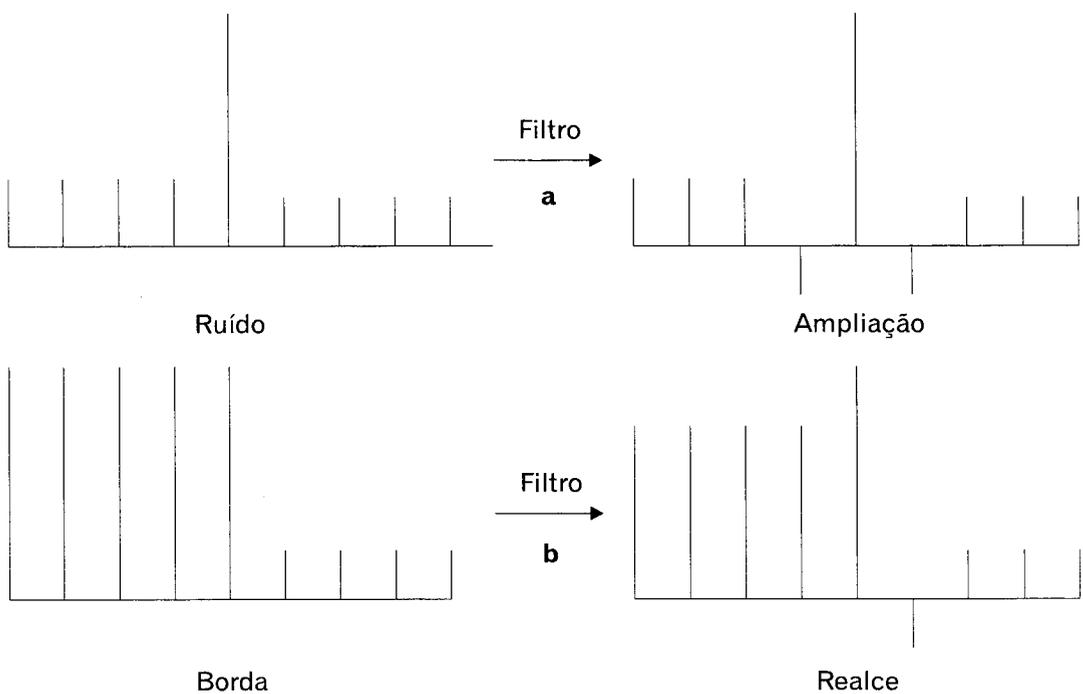


Figura 51 - Efeitos do filtro de passa-altas



- (a) ampliação do valor anômalo.
- (b) realce de borda.

Filtros direcionais

São tipos especiais de filtros de passa-altas destinados a realçar lineamentos, segundo direções predeterminadas (Figuras 52 e 53).

Figura 52

Filtros de Sobel

N - S			NE - SW			E - W			NW - SE		
1	2	1	0	1	2	-1	0	1	-2	-1	0
0	0	0	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	-2	-1	-2	-1	0	-1	0	1	0	1	2

Figura 53

Filtros de Prewitt

N - S			NE - SW			E - W			NW - SE		
1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
1	-2	1	-1	-2	1	-1	-2	1	-1	-2	1
-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1

Subtração dos componentes de baixa frequência

O realce de bordas (*edge enhancement*) é uma das operações utilizadas com frequência para realçar feições lineares e contatos entre diferentes objetos. O realce de borda pode ser alternativamente obtido pela subtração dos componentes de baixa frequência da imagem original.

Análise de principais componentes - APC

Variância e covariância de imagens

A **variância** é uma medida de dispersão que expressa a variabilidade dos dados em torno da média. Quanto maior a variância, maior o espalhamento e portanto maior o contraste da imagem. O procedimento para calcular a variância de uma propriedade pode ser estendido para a variabilidade mútua de duas propriedades. A **covariância** é a variação conjunta de duas ou mais variáveis em torno da média. Variáveis diretamente relacionadas apresentam uma elevada covariância. Variáveis independentes mostram baixa covariância. A covariância dá a medida de quanto de informação contida em um par de bandas é comum a ambas.

Correlação

O grau de inter-relação entre variáveis é geralmente expresso pelo **coeficiente de correlação**. A correlação indica o grau de associação estatística entre as variáveis expressas no intervalo de 0 a 1. É dada pela razão da covariância pelo produto dos desvios padrões das variáveis. Corresponde a uma standardização da covariância. A correlação pode ser positiva ou negativa (intervalo 1 a -1).

Gráfico de dispersão

O **gráfico de dispersão** (*scatterplot*), também denominado de **espaço de atributos**, é um histograma bidimensional que representa as componentes de duas bandas de uma imagem multi-dimensional e permite verificar a relação entre as mesmas. A Fi-

Figura 54 - Gráfico de dispersão de duas variáveis altamente correlacionadas

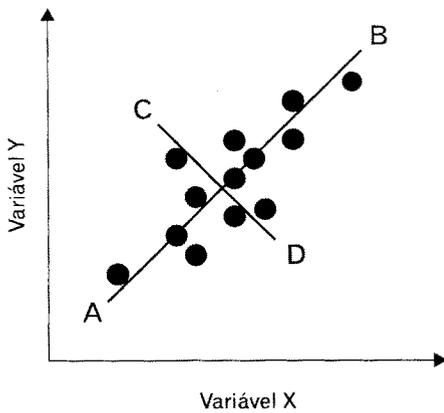


Figura 55 - Gráfico de dispersão de duas variáveis com baixa correlação

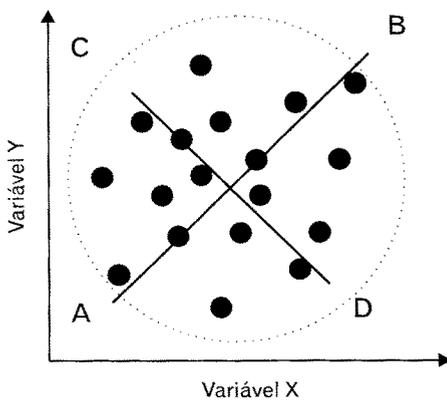
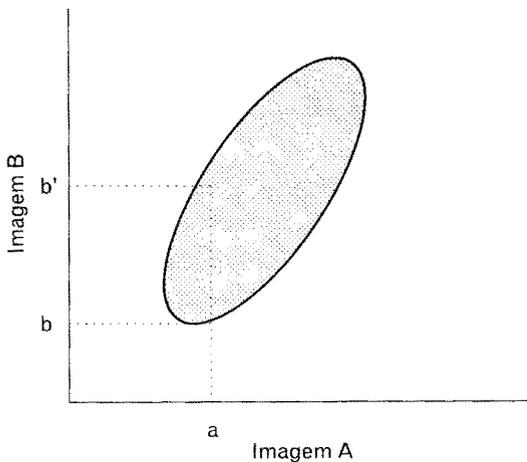


Figura 56 - Imagens correlacionadas



A partir de um valor de NC da Imagem A pode-se deduzir um valor na Imagem B.

Figura 54 representa duas variáveis (X,Y) altamente correlacionadas, cujos dados se posicionam próximos ao eixo diagonal principal AB. Quanto mais valores localizados próximos a este eixo, maior a correlação entre as variáveis. A correlação próxima de 100% seria representada por uma linha reta. Por outro lado, dados que se afastam do eixo AB são menos correlacionados e podem definir um outro eixo (CD), perpendicular ao primeiro. Os eixos AB e CD da Figura 54 configuram uma elipse. A representação de uma terceira variável (Z), perpendicular a X e Y, resultaria em um terceiro eixo, definindo um elipsóide.

A Figura 55 mostra o gráfico de dispersão de duas variáveis pouco correlacionadas. A dispersão dos dados definem um eixo CD, quase tão importante quanto o eixo AB, e a figura se aproxima do círculo.

Correlação de imagens

O gráfico de dispersão é utilizado para representar a correlação entre imagens. Duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente à outra imagem. Isso é ilustrado pela Figura 56, na qual um determinado valor *a* da imagem A vai corresponder a um valor no intervalo entre *b* e *b'* na imagem B. Este intervalo é inversamente proporcional à correlação. Assim sendo, bandas altamente correlacionadas fornecem basicamente as mesmas informações, enquanto bandas pouco correlacionadas fornecem informações diferentes.

A correlação entre imagens costuma ser representada através de uma matriz de correlação como a do Quadro 18.

O Quadro 18 mostra que a correlação entre a banda 6 (canal termal) e as bandas refletivas é de modo geral baixa. Entre os canais refletivos, as bandas do visível (1,2 e 3) são as que possuem maior correlação entre si, e a banda 4 (infravermelho próximo) é a que exibe a mais baixa correlação com as demais.

Banda	1	2	3	4	5	6	7
1	1,000						
2	0,954	1,000					
3	0,932	0,952	1,000				
4	0,729	0,795	0,697	1,000			
5	0,843	0,877	0,892	0,819	1,000		
6	0,365	0,390	0,416	0,459	0,582	1,000	
7	0,840	0,862	0,908	0,673	0,948	0,552	1,000

Causas da existência de correlação

- Bandas que apresentam respostas espectrais semelhantes aos objetos presentes na cena.

- Sombreamento topográfico. Nos sensores multiespectrais que dependem da iluminação solar, poderá haver um sombreamento devido ao relevo do terreno, o qual afeta todas as bandas da mesma maneira, contribuindo para a correlação interbandas. O sombreamento dificulta o processamento digital, especialmente a classificação.

- A correlação de imagens devido ao sombreamento deverá ser menos expressiva com banda termal que expressa a energia emitida (banda 6 do TM).

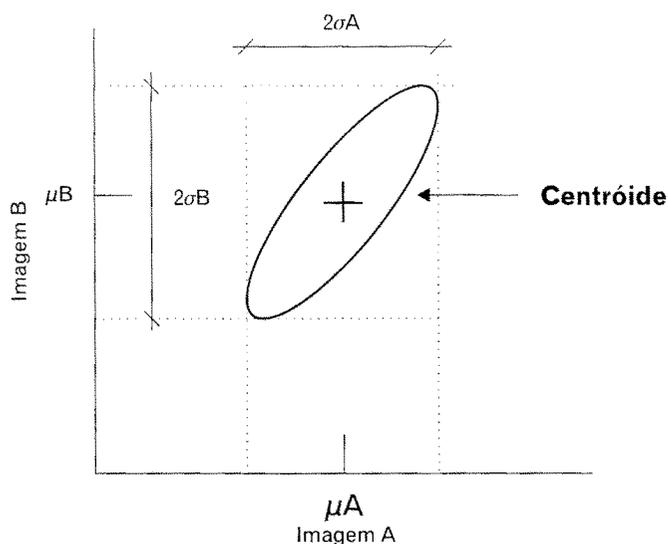
A análise multiespectral baseia-se na peculiaridade do comportamento espectral dos materiais. Todavia, se as bandas são altamente correlacionadas, a informação contida nas mesmas será similar e a capacidade de discriminação dos alvos será reduzida. Além disso o processamento de dados altamente correlacionados representa desperdício de tempo e recursos computacionais, já que se trata de informação redundante.

A transformação por principais componentes

A principal função da Análise de Principais Componentes - APC - é determinar a extensão da correlação e removê-la. Um conjunto N de imagens de entrada vai produzir, quando processadas através da APC, um outro conjunto de imagens de saída, sem nenhuma correlação entre si.

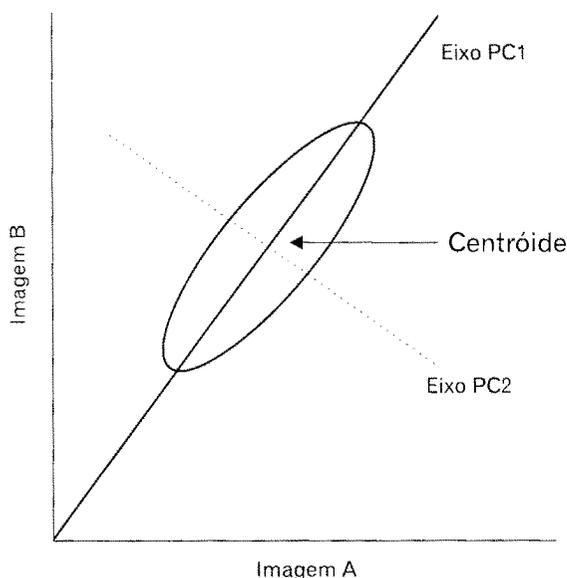
O método para melhorar a separação dos dados é o da redistribuição, segundo um outro conjunto de eixos no espaço multidimensional que maximize a separação dos dados. A APC é uma técnica estatística que rotaciona os eixos de uma imagem no espaço multidimensional na direção dos eixos de maior variância. Tem a função de definir a dimensionalidade dos dados e identificar os principais eixos de variação. Estes eixos vão definir, no espaço multidimensional, o **elipsóide de distribuição** dos dados.

Considerando o gráfico de dispersão de duas imagens A e B, o parâmetro mais simples de especificação é a posição do **centróide de distribuição** (Figura 57). O centróide representa o centro de gravidade da distribuição, definido pela

Figura 57 - Parâmetros do elipsóide de distribuição

$\mu(A,B)$ = intensidade média das imagens A e B.
 $\sigma(A,B)$ = desvio padrão das imagens A e B.

Modificado de Crosta, 1993.

Figura 58 - Determinação dos eixos das PCs

Modificado de Crosta, 1993.

média dos dois conjuntos de dados. O tamanho da distribuição é determinado através do cálculo do espalhamento, ao longo de cada eixo, que é dado pela **variância**.

Primeiro determina-se a direção relativa ao centróide que possui máxima variância ou espalhamento, atribuindo-se a ela o eixo da 1ª **Principal Componente (PC)**. Na Figura 58 essa direção é representada pelo eixo principal da elipse. Em seguida, determina-se a direção relativa ao centróide que possui a segunda maior variância, com a condição de que ela seja ortogonal em relação à primeira. Atribui-se a esta o eixo da 2ª PC. Na Figura 58 (bidimensional), há apenas uma possibilidade para a 2ª PC. No espaço multidimensional, porém, examinam-se outras direções ortogonais à 1ª PC para determinar a 2ª PC. Este processo é então repetido tantas vezes quanto for o número de bandas, até que todos os eixos sejam determinados. Por último rotaciona-se os eixos em volta do centróide, até que cada uma das direções encontradas fique paralela a um dos eixos originais (Figura 59).

Através deste processo, a partir de N imagens brutas é produzido um novo conjunto de N imagens sem correlação nenhuma (eixos ortogonais). A PC1 irá conter a informação que é comum a todas as bandas originais; a PC2 irá conter as feições mais relevantes do conjunto restante e assim sucessivamente.

Autovetores e autovalores

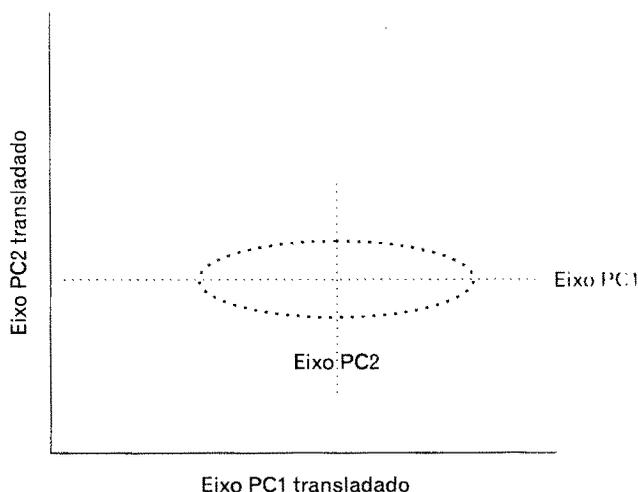
Os principais componentes são derivados da matriz de correlação ou da matriz de variância-covariância. Se existem p bandas, a matriz será simétrica e composta de p linhas e p colunas. A APC produz uma transformação da matriz de modo que a covariância entre as bandas é igualada a zero. Este processo de

correlação ainda redistribui os dados entre os novos (principais) componentes. O comprimento dos eixos das PCs, dado pela variância, é chamado de **autovalor** (*eigenvalue*). Os *eigenvalues* representam a proporção relativa da variância de toda a cena representada em cada componente, ou seja, a quantidade de informação contida em cada PC. São medidos em unidades de variância ou em porcentagem da variância total (Quadro 19).

O maior autovalor define o primeiro componente principal, e assim sucessivamente. O primeiro principal componente geralmente contém a maior parte da variância (geralmente mais de 90%) e o maior contraste. Este é, portanto, o componente que contém mais informação. O Quadro 19 mostra que, nesta imagem, 96% da variância está contida nos três primeiros PCs. Por isso, teoricamente, as sete bandas podem ser substituídas por estes três PCs, com muito pouca perda de informação. Nas PCs subseqüentes, a quantidade de informação decresce. Qualitativamente, porém, qualquer PC pode ser importante, uma vez que muitas vezes não são as feições comuns, mas as anômalas, que precisam ser ressaltadas.

Associados a cada autovalor, existe um conjunto de coordenadas chamadas de **autovetores** (*eigenvectors*), que representam as direções dos eixos das PCs. As *p* bandas originais são projetadas para *n* novos principais componentes como combinações lineares aditivas, através dos autovetores. Cada um destes é um fator do peso da contribuição de cada banda para o PC. Portanto, os autovetores refletem a importância relativa das

Figura 59 - Rotação dos eixos das PCs



Modificado de Crosta, 1993.

Quadro 19 - *Eigenvalues* da imagem de Derbyshire

Principal componente	<i>Eigenvalue</i>	% Variância
1	5,5324	79,03
2	0,7978	11,40
3	0,3886	5,55
4	0,1774	2,53
5	0,0534	0,76
6	0,0310	0,44
7	0,0193	0,28

Quadro 20 - Eigenvalues da imagem de Derbyshire

Banda	Principais componentes						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,93	-0,24	-0,06	-0,21	0,16	-0,03	-0,01
2	-0,96	-0,21	0,01	-0,13	-0,07	0,10	0,07
3	0,95	-0,18	-0,17	-0,05	-0,14	-0,08	-0,04
4	0,84	0,03	0,54	0,04	-0,01	0,00	-0,04
5	0,97	0,08	0,01	0,21	0,03	-0,07	0,09
6	0,57	0,81	-0,06	-0,14	-0,01	0,00	0,00
7	0,94	0,04	-0,23	0,22	0,04	0,08	-0,06

bandas no componente principal. São estandardizados de modo que a soma dos autovetores ao quadrado é igual a 1.

O Quadro 20 mostra que o primeiro PC é formado pela contribuição de todas as bandas, com predominância das bandas reflexivas. O segundo PC é dominado pela informação da banda termal e no terceiro PC, a contribuição maior é da banda quatro.

Interpretação de imagens PCs

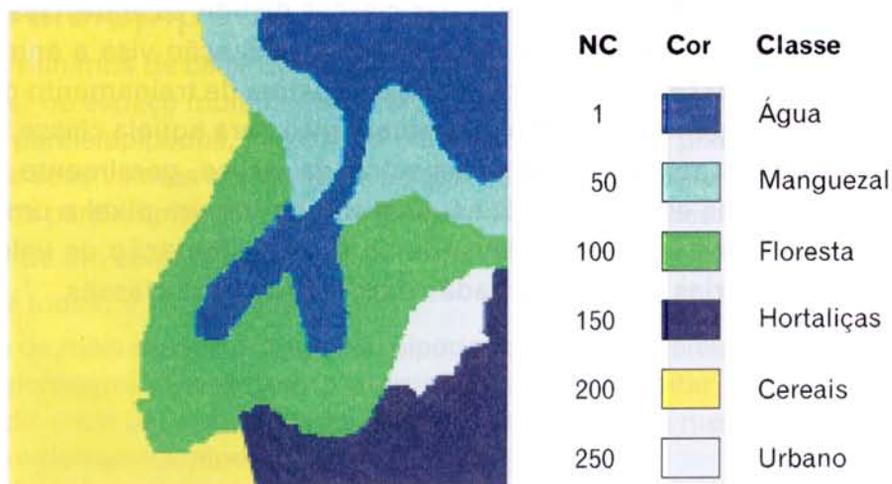
A 1ª PC é muito semelhante à vista pancromática da cena. Todas as demais PCs são desprovidas de informação topográfica devido à ausência de sombreamento. O ruído e outras informações anômalas são removidas das primeiras e tendem a aparecer nas últimas PCs. Este efeito pode ser explorado pelo analista, tanto para "limpar" certos ruídos como para detectar feições anômalas de interesse para certos temas.

O contraste de cada PC é dado pela variância do respectivo eixo. Pode-se, entretanto, submeter as imagens PCs a aumentos de contraste (realces), no sentido de utilizar todo o espaço possível de NC. Quando combinadas em cores, a ausência de correlação entre PCs faz com que as cores resultantes das composições coloridas sejam muito vivas, com ausência de tons de cinza. São cores puras e intensamente saturadas, que necessitam atenção especial na hora de associá-las às feições de interesse.

Classificação

A **classificação** automática dos pixels de uma imagem envolve a associação de cada pixel da imagem com um nome que descreve um objeto real. Se a classificação é executada para todos os pixels de uma imagem, o resultado é um mapa temático mostrando a distribuição de categorias (vegetação, solo, uso da terra, etc.) que são denominadas de **classes**. Uma imagem classificada é, portanto, um mapa temático digital, que, se for georreferenciado, pode ser incorporado a um SIG.

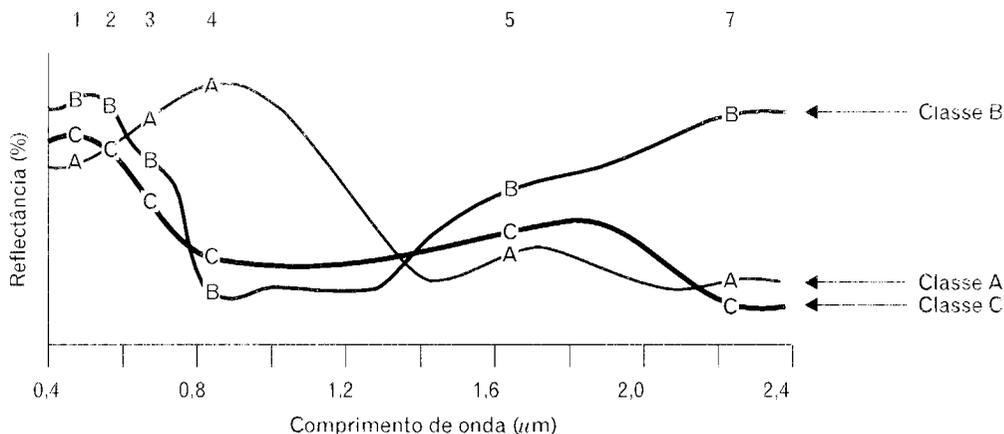
Figura 60 - Imagem classificada



A classificação é implementada com base nas diferenças de comportamento dos materiais ao longo do espectro eletromagnético. A Figura 61 mostra a assinatura espectral das classes A, B

e C, que são captadas nos intervalos correspondentes aos seis canais refletivos do LANDSAT/TM. Verifica-se que a classe A seria facilmente separável das classes B e C na banda quatro, enquanto a classe B seria separável das classes A e C na banda sete. Estas duas bandas seriam, portanto, essenciais para a separação destas classes.

Figura 61 - Assinatura espectral



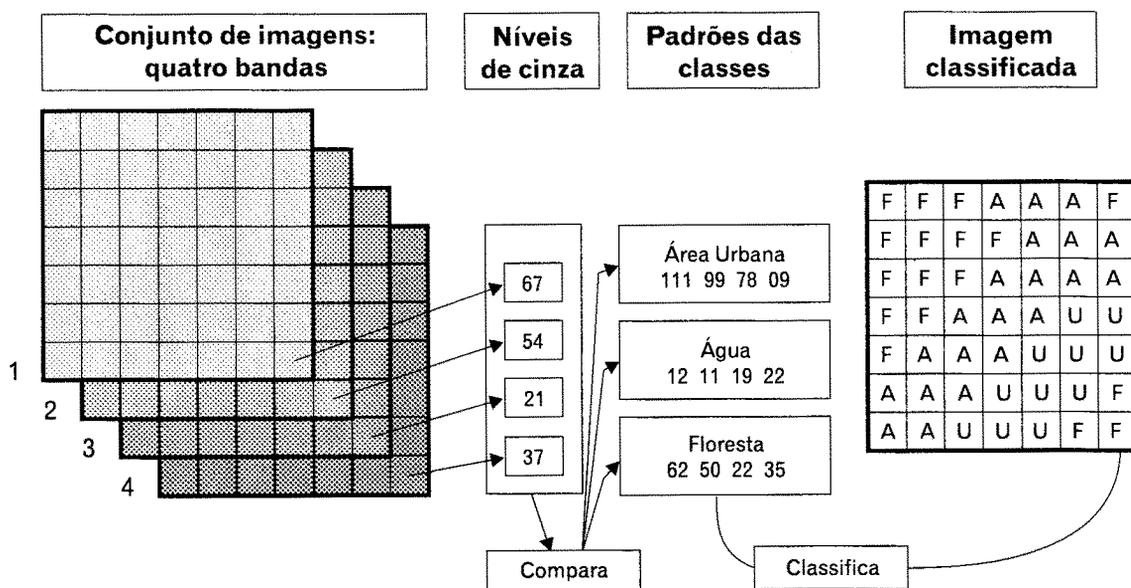
Classes A, B e C nos seis canais reflexivos do LANDSAT/TM.

Fonte: PCI, 1997.

Classificação supervisionada

Para implementação da **classificação supervisionada** o analista, a partir do conhecimento da área ou por inferências, relaciona áreas da imagem com as **classes** de cobertura da terra que deseja separar. Nestas áreas são selecionadas **amostras de treinamento** que são um conjunto de pixels considerados mais representativos das classes de interesse. As classes são, portanto, definidas *a priori* e o processo de classificação visa a enquadrar cada pixel a uma classe. Todos os pixels das amostras de treinamento de uma dada classe constituem o **conjunto de treinamento** para aquela classe, o qual define um padrão de comportamento espectral da classe, geralmente expresso pelos parâmetros estatísticos. O enquadramento de um pixel a uma das classes é feito por vários métodos, levando-se em consideração os valores de NC do pixel nas várias bandas utilizadas e os padrões das classes.

Figura 62 - Modelo da classificação supervisionada



Modificado de PCI, 1997.

Método da mínima distância

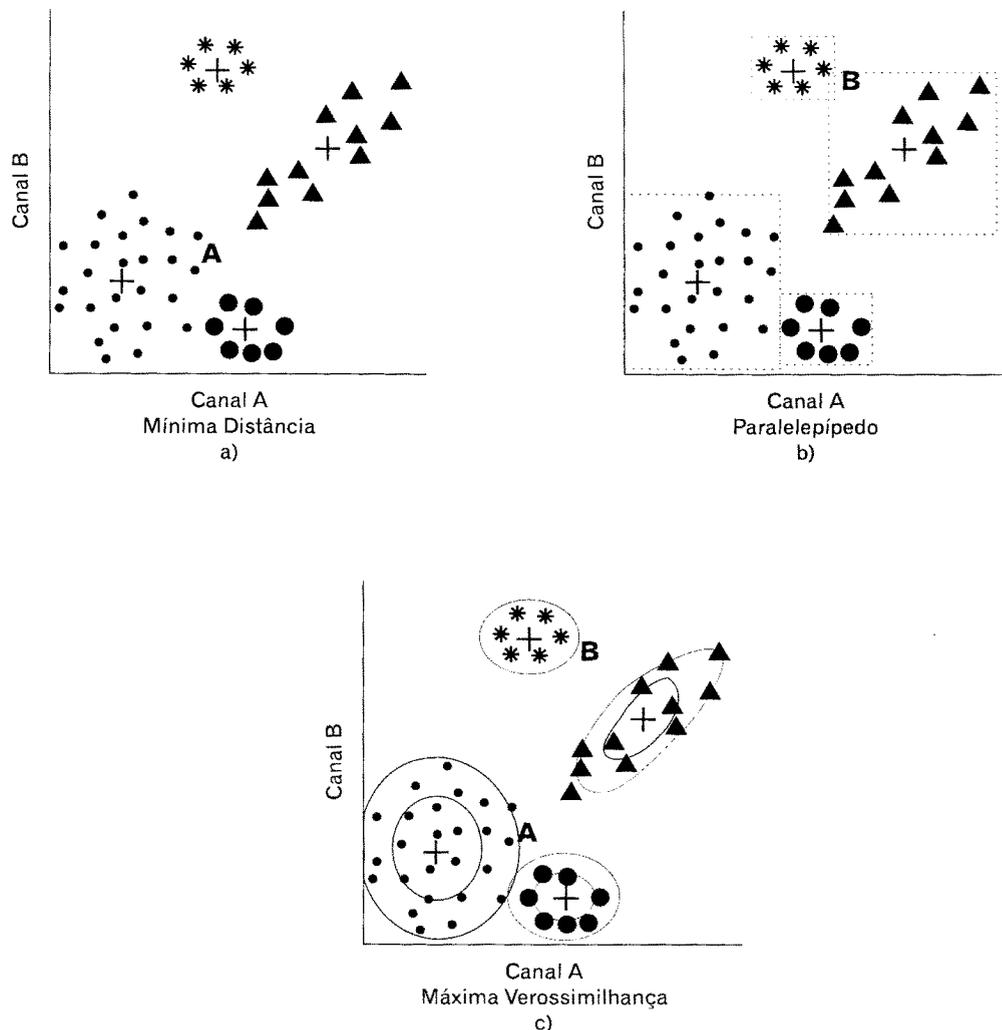
Este método toma como referência, para cada classe, um ponto no espaço multidimensional definido pela média estatística em cada banda espectral considerada. O algoritmo associa cada pixel desconhecido à classe cuja média está mais próxima (Figura 63a).

Método do paralelepípedo

Os NCs máximos e mínimos de cada classe em cada vetor (banda utilizada) definem "paralelepípedos" no espaço multidimensional. A Figura 63b ilustra a formação de uma face dos paralelepípedos, no espaço bidimensional. Cada pixel é escolhido em seqüência e seus valores nas diversas bandas são testados para ver se caem dentro de um dos paralelepípedos. Aí ocorrem várias possibilidades:

- o pixel cai dentro de um só paralelepípedo;
- o pixel cai fora de todos; e
- o pixel cai dentro de mais do que um paralelepípedo (caso dos paralelepípedos que se superpõem). Neste caso o programa deve apresentar um critério para decidir entre os "concorrentes". Esta regra deve ser a menor distância do centro do paralelepípedo.

Figura 63 - Técnicas de classificação supervisionada



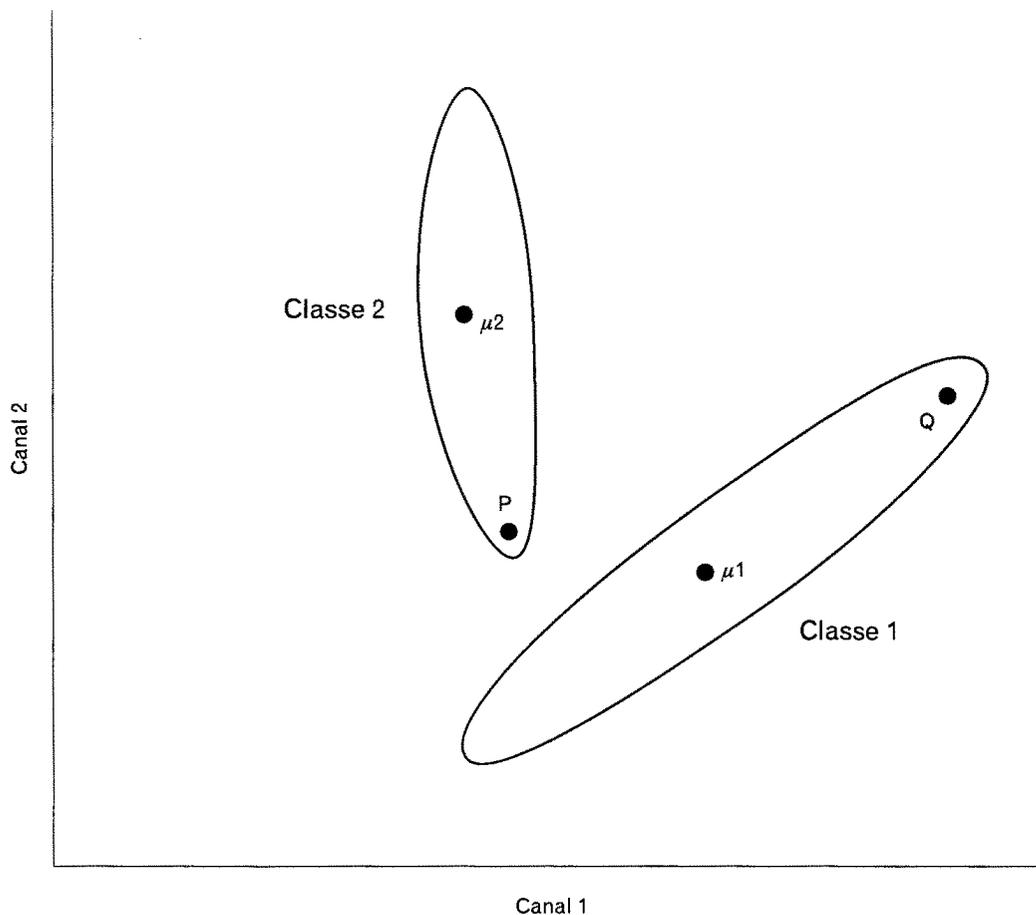
Fonte: PCI, 1997.

Método da máxima verossimilhança (MAXVER) ou *maximum likelihood* (ML)

A forma geométrica de um conjunto de pontos representando os pixels de uma classe de interesse pode ser descrita, num gráfico de dispersão bidimensional, por uma elipse. A localização, forma e tamanho da elipse, portanto, reflete a média, variância e covariância das duas variáveis, e a idéia pode facilmente ser estendida para três ou mais dimensões. Portanto, considerando-se apenas duas bandas, pode-se pensar no diagrama de dispersão como uma família de elipses concêntricas centradas na média (Figura 63c). Estas elipses representam linhas de equi-probabilidade de um pixel desconhecido pertencer à classe. Para um conjunto de três bandas, deve-se pensar em termos de elipsóides concêntricos de equi-probabilidade. Definidos os parâmetros estatísticos, o algoritmo enquadra o pixel na classe para a qual apresenta a mais alta probabilidade.

O **MAXVER** é uma técnica mais robusta do que o **paralelepípedo** e **mínima distância** por levar em conta a covariância na definição das elipses de equi-probabilidade. Isto é demonstrado pela Figura 64, na qual a probabilidade de pertencer

Figura 64 - Critérios para classificação pela técnica ML



Modificado de Mather, 1987.

às classes 1 e 2 é representada pelas respectivas elipses. O pixel de posição **Q**, mais próximo da média da classe 1, seria corretamente classificado por qualquer um dos três métodos, mas o pixel **P** seria enquadrado na classe 2 apesar de estar mais próximo da média da classe 1. Pelos outros dois métodos este pixel seria erroneamente classificado.

Classificação não-supervisionada (exploratória)

A classificação não-supervisionada agrupa os pixels segundo as suas características espectrais, organizando-os em agrupamentos denominados de *clusters* (enxame, aglomeração). Os parâmetros mais utilizados para definir os *clusters* são a média variância e covariância, pelos quais a proximidade espectral dos pixels no espaço multidimensional é definida. Os *clusters* constituem, portanto, **classes espectrais**. Esta é uma importante diferença em relação à classificação supervisionada, já que nesta cabe ao analista definir *a priori* as classes que deseja separar (**classes de interesse**), enquanto na classificação não-supervisionada o analista fornece apenas alguns parâmetros como o número mínimo e máximo de classes desejadas e número de iterações. As classes espectrais geradas numa classifica-

ção não-supervisionada podem ou não coincidir com as classes de interesse. Trata-se, portanto, de uma operação exploratória para verificar o que é estatisticamente separável ou não, quais as classes mais evidentes e sua relação com o que se deseja discriminar. Os padrões ou assinaturas geradas na classificação não-supervisionada podem ser aproveitados para uma posterior classificação supervisionada. A **Isodata**, uma das técnicas de classificação não-supervisionada mais empregadas, é ilustrada pelas Figuras 65, 66 e 67.

Isodata

Figura 65 - Isodata (iteração I)

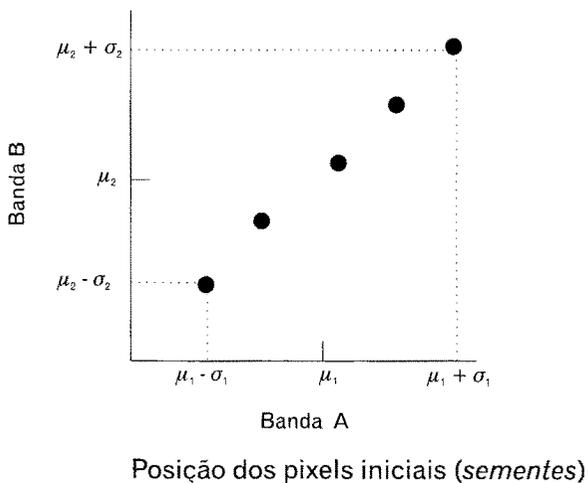
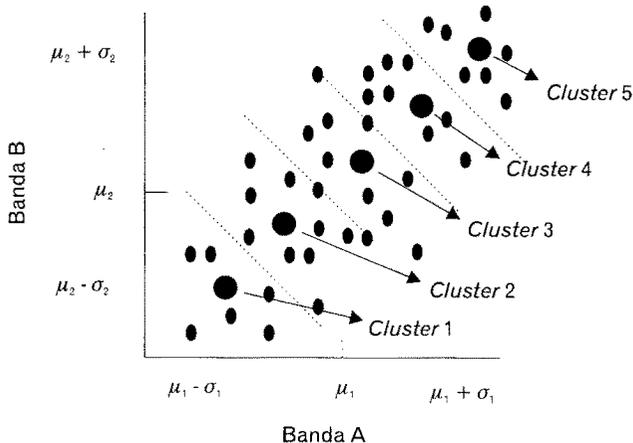


Figura 66 - Isodata (iteração II)



O **isodata** funciona através de iterações, nas quais a imagem é sucessivamente varrida e os *clusters* vão sendo modificados, com modificação dos parâmetros estatísticos, agregação de novos pixels, divisão ou fusão de *clusters*. Na primeira iteração são determinados um número N de pixels (*sementes*) em torno dos quais começam a ser gerados os primeiros *clusters* (Figura 65).

As *sementes* funcionam como média em torno das quais vão se formar os agrupamentos iniciais. Cada pixel da imagem é então agrupado ao *cluster* cuja média está mais próxima (Figura 66).

Na iteração seguinte as médias dos *clusters* são recalculadas e os pixels reagrupados, como ilustra a Figura 67.

Todo o processo é repetido tantas vezes quantas forem as iterações programadas, nas quais cada pixel pode ser reenquadrado em novos *clusters*, em função da proximidade estatística. O processo pode ser interrompido, porém, quando, numa determinada iteração, não ocorrer modificação alguma em relação à iteração anterior, indicando que a **convergência** foi atingida.

Após cada iteração os seguintes critérios são aplicados:

- *Clusters* com desvio padrão muito grande são subdivididos para formar *clusters* menores;
- *Clusters* que estão estatisticamente muito próximos são fundidos; e
- *Clusters* com um número pequeno de pixels são eliminados.

Operações pós-classificação

Agregação de classes

Se, ao analisar o resultado da classificação, o analista observar confusão entre classes espectralmente próximas, é possível fundi-las em uma só através do processo de agregação de classes.

Destaque de classe

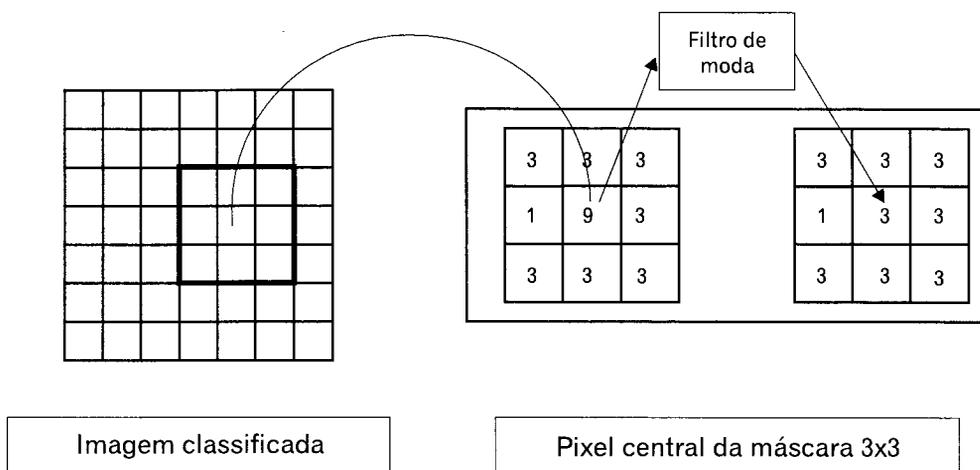
Esta técnica consiste em destacar uma classe das demais, exibindo-a isoladamente. A classe pode ser representada na forma de *bitmap* (arquivo raster de 2 bits), no qual só os pixels que representam a classe são evidenciados.

Homogeneização

É comum uma imagem classificada apresentar heterogeneidades como:

- áreas maldefinidas (pixels contíguos assinalados a várias classes); e
- pixels isolados e fora de contexto (*island theme*). Estes prováveis erros de classificação são corrigidos através de **filtro de moda**, que promove o agrupamento dos pixels isolados à classe predominante na sua circunvizinhança. Este processo de homogeneização poderá corrigir erros de classificação e melhorar a apresentação.

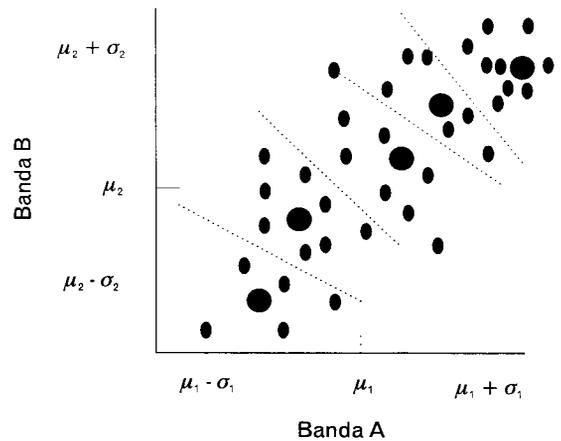
Figura 68 - Homogeneização por filtro de moda



Avaliação da classificação

Uma avaliação qualitativa da classificação pode ser feita visualmente, mas para a quantificação do nível de acerto geralmente utiliza-se a **matriz de confusão** ou **matriz de erro** (Quadro 60), a qual expressa, tomando como referência áreas de

Figura 67 - Isodata (iteração III)



teste previamente selecionadas ou as próprias áreas de treino, (i) na diagonal, o número de pixels corretamente classificados (pixel que pertence a i e é classificado como i), nas linhas os erros de **omissão** (pixels que pertencem à classe i , mas são classificados como outra classe) e nas colunas os erros de **comissão** (pixels classificados como i , mas que pertencem à outra classe). **Acurácia geral** é dada pela proporção de pixels corretamente classificados em relação ao total.

Quadro 21 - Matriz de erro ou de confusão
(Linha: referência/colunas: resultado da classificação)

	1	2	3	4	5	6	a	b	c	d
1	50	3	0	0	2	5	60	83,3	10	21
2	4	62	3	0	0	1	70	88,5	8	10
3	4	4	70	0	8	3	86	81,4	19	6
4	0	0	0	64	0	0	64	100,0	0	3
5	3	0	2	0	71	1	78	91,0	6	10
6	10	3	1	3	0	33	50	66,0	17	10
Soma							408		60	60

- a) número de pixels;
- b) percentagem de acertos (pixel que pertence a i e é classificado como i);
- c) pertence à classe i (referência), mas classificado como outra classe (**erro de omissão**); e
- d) pixel classificado como i , mas que pertence à outra classe (**erro de comissão**).

Correções geométrica e radiométrica

Correção radiométrica

A energia eletromagnética, ao atravessar a atmosfera, é parcialmente absorvida, refletida ou espalhada. O **espalhamento** ou **dispersão** (*scattering*) é a re-irradiação da energia em todas as direções pelas partículas da atmosfera. Por isso, o sinal registrado pelo sensor para cada pixel pode não corresponder à verdadeira radiância da respectiva área, porque o sinal é atenuado pela absorção ou desviado pela dispersão causada pela atmosfera. No processo de espalhamento a imagem ganha brilho, enquanto a absorção subtrai brilho. A absorção é causada principalmente pelo vapor de água.

A Figura 69 mostra, de forma simplificada, os componentes do sinal recebido pelo sensor acima da atmosfera. O espalhamento em S_2 e parte da reflectância do ponto Q, que é redirecionada em S_1 , interferem no sinal captado pelo sensor, o qual deveria provir exclusivamente de P.

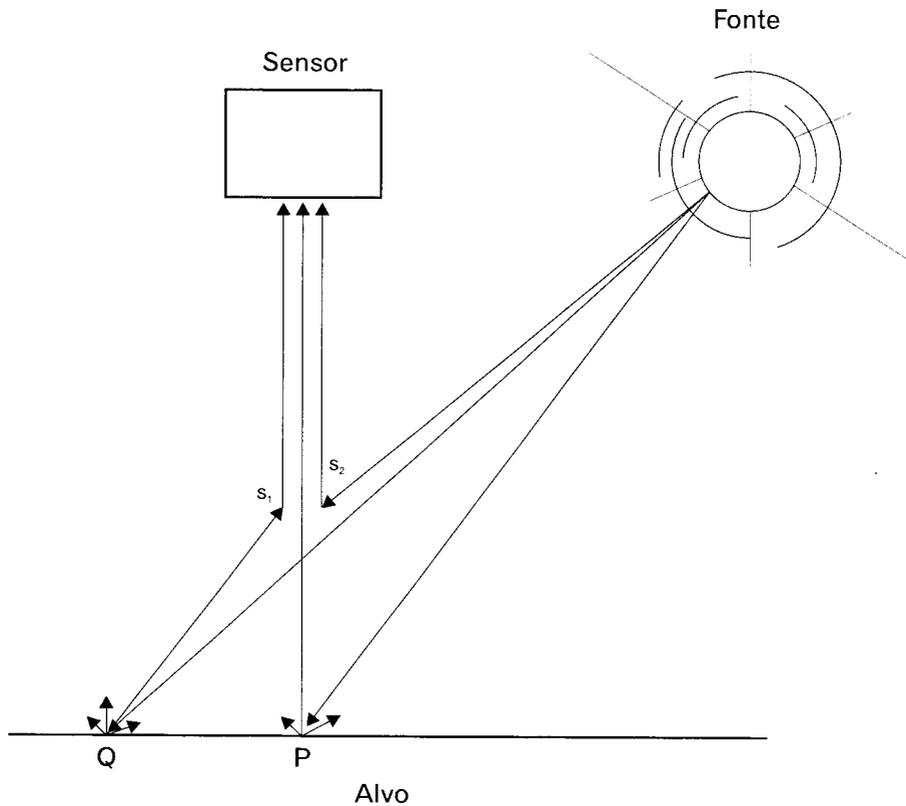
Distorções adicionais podem ocorrer devido à geometria da iluminação (elevação e azimute do Sol), declividade do terreno e direção das cristas de serras. As correções radiométricas são importantes para várias aplicações:

Razão de canais

As imagens compreendidas na região do visível são altamente sensíveis ao erro de espalhamento, enquanto as bandas do infravermelho são praticamente livres de tais interferências. Os efeitos da atmosfera aumentam inversamente ao comprimento de onda. Assim sendo, a banda um do LANDSAT/TM é mais

afetada do que a banda três, enquanto a banda cinco é muito pouco afetada. A razão entre estes canais, sem a correção radiométrica, produzirá resultados tendenciosos.

Figura 69 - Componentes do sinal recebido pelo sensor



Modificado de Mather, 1987.

Estudos multitemporais

As condições da atmosfera variam de uma data para outra. Por isso, a correção radiométrica é importante nos estudos multitemporais.

Compensação pela dispersão atmosférica (*haze compensation*)

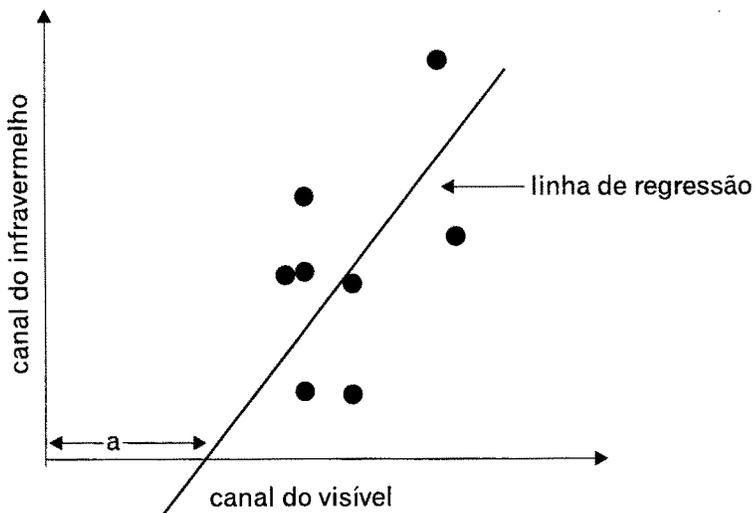
O aumento generalizado na radiância produzida pelo espalhamento resulta no aspecto difuso da imagem, referido em inglês como *haze* (neblina, bruma), prejudicando a nitidez e o contraste. Este fenômeno ocorre com mais intensidade nos canais situados na faixa de comprimento de onda do azul (canal 1 do LANDSAT/TM).

Vários métodos podem ser utilizados para estimar o aumento de radiância causado pelo efeito atmosférico. Para isso, geralmente utiliza-se comparação entre os NCs de materiais que se caracterizam pela baixa reflectância, tanto no infravermelho quanto no visível. Os mais típicos são as zonas de sombra e os corpos d'água profundos. A comparação entre os NCs de pixels destas feições no visível

(por exemplo, banda um do TM) e no infravermelho (por exemplo, banda quatro do TM) fornece um indicativo do efeito atmosférico. A simples comparação dos histogramas destas duas bandas fornece uma medida do efeito da atmosfera sobre a resposta espectral.

Ainda com base na resposta das zonas de sombra e corpos d'água pode-se construir um gráfico de regressão (Figura 70). Plotando-se os valores de uma banda da faixa do visível contra uma banda do infravermelho, o eixo de regressão, em imagens livres do efeito de espalhamento, tenderia para a origem. O afastamento da origem dá a medida da distorção causada pelo espalhamento atmosférico. A correção é feita pela subtração do valor correspondente ao deslocamento a .

Figura 70 - Gráfico de regressão



O efeito da atmosfera é proporcional ao deslocamento a .

Correção geométrica

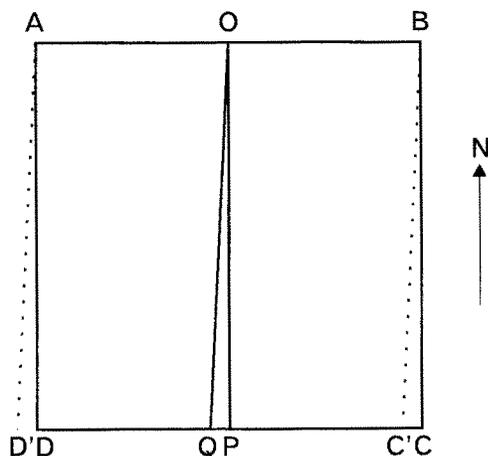
As imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções que podem ser corrigidas através de técnicas denominadas de **correção geométrica**. Existem dois níveis de correção:

- correção dos erros sistemáticos; e
- correção de precisão.

Correção de erros sistemáticos (*bulk or system correction*)

Os erros sistemáticos são aqueles devidos às características próprias do sensor, instabilidade da plataforma, distorção panorâmica e à distorção causada pela curvatura e rotação da Terra. A distorção panorâmica é aquela devida ao afastamento do ponto da superfície da Terra diretamente abaixo do satélite e proporcional à abertura angular do sensor. A distorção causada pela rotação da Terra é ilustrada pela Figura 71. Todas estas correções são feitas na estação de recepção do satélite, usando dados de efemérides e as especificações do sensor e da órbita.

Figura 71 - Efeito da rotação da Terra



Área da cena (ABCD) e área efetivamente coberta pelo satélite (ABC'D').

Correção de precisão

Esta é a **correção geométrica** propriamente dita, que remove os erros residuais, depois que os erros sistemáticos forem corrigidos. A correção geométrica produz o **georreferenciamento** da imagem, ou seja, estabelece uma relação geométrica entre os pixels da imagem e as coordenadas cartográficas da área correspondente. Através da correção de precisão a imagem adquire propriedades de um mapa, com todos os pixels referenciados a um sistema de Projeção Cartográfica. O **registro** é o ajuste de uma imagem ao sistema de coordenadas de outra imagem.

A correção de precisão é necessária para:

- superposição de dados de imagens e mapas em Sistemas de Informações Geográficas;
- ajuste de imagens obtidas em diferentes datas;
- integração de imagens obtidas por diferentes sensores; e
- composição de imagens tomadas em posições diferentes para obtenção de estereoscopia.

O processo de correção geométrica compreende:

- determinação das relações entre os sistemas de coordenadas de um mapa ou de imagem corrigida (**imagem de referência**) e da imagem a ser corrigida (**imagem de ajuste**);
- determinação de uma nova malha de linhas e colunas, orientadas segundo um Sistema de Projeção Geográfica. Este processo envolve a determinação de uma nova posição para centros dos pixels na imagem corrigida (**interpolação espacial**); e
- determinação da intensidade dos pixels na imagem corrigida (**interpolação de intensidade**).

O método mais utilizado para a correção geométrica é por meio de pontos de controle do terreno (GCP). Os GCPs são feições bem definidas e claramente identificáveis que podem ser locados no mapa ou imagem de referência e na imagem de ajuste. Na falta de mapas ou imagens de referência, a alternativa é a tomada das coordenadas dos GCPs diretamente no terreno, através de GPS.

Interpolação espacial

As coordenadas dos GCPs são expressas, na imagem de referência, pelas coordenadas cartográficas, e na imagem de ajuste pela posição do pixel em termos de **colunas** e **linhas**. Adotando-se as simbologias (x,y) para longitude e latitude, respectivamente, e (c,l) para colunas e linhas, respectivamente, usa-se o método dos polinômios para converter (x,y) para (c,l) e vice-versa. O relacionamento entre estes parâmetros é dado na sua forma mais simples pelo polinômio do 1º grau:

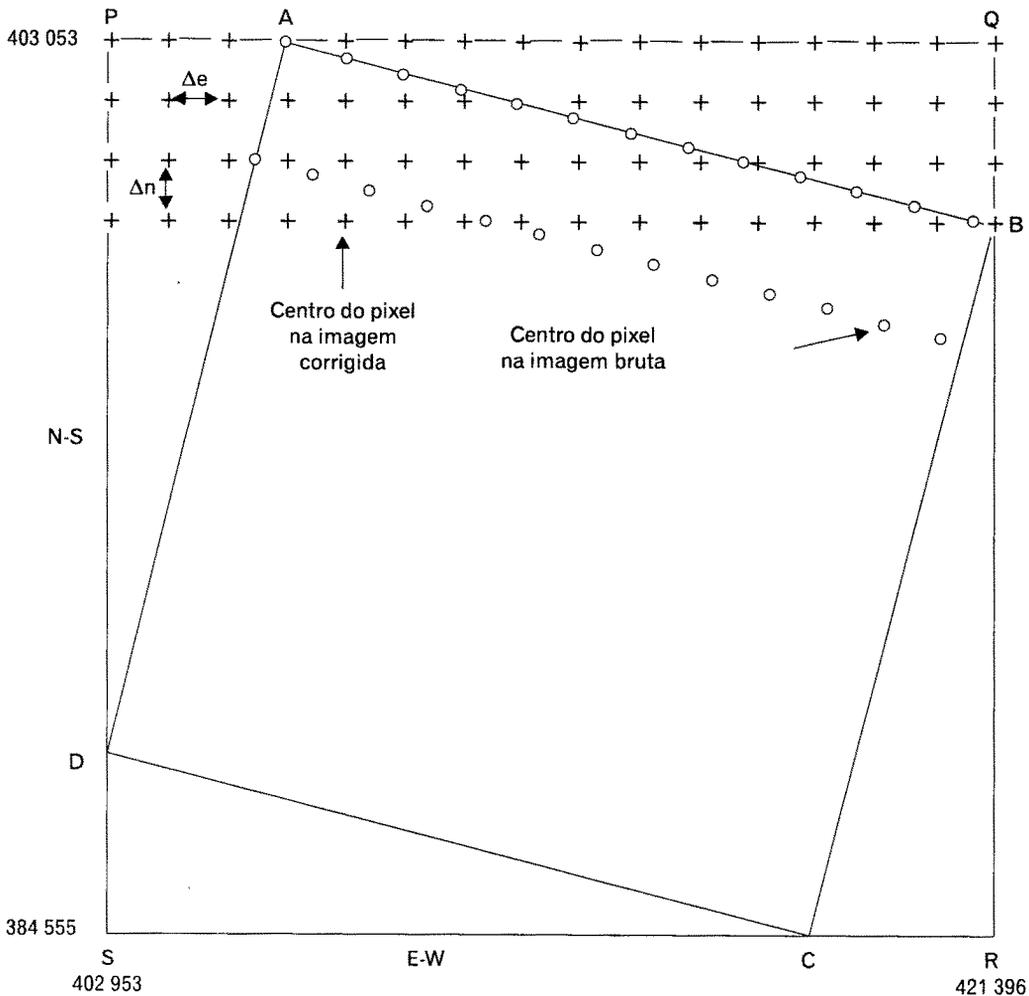
$$c = a_0 + a_1x + a_2y \quad (1)$$

$$l = a'_0 + a'_1x + a'_2y \quad (2)$$

A correção de 1º grau é adequada para distorções de translação e rotação e distorções de escala. Transformações com polinômio do 2º grau ou superiores

podem ser usadas para corrigir tipos mais complexos de distorção. O número mínimo de GCPs depende do grau do polinômio utilizado. Para o polinômio de grau N precisa-se de no mínimo $(N+1) \times (N+2) / 2$ GCPs.

Figura 72 - Transformação da imagem bruta (ABCD) para a imagem corrigida (PQRS)



Fonte: Mather, 1987.

Interpolação da intensidade (reamostragem)

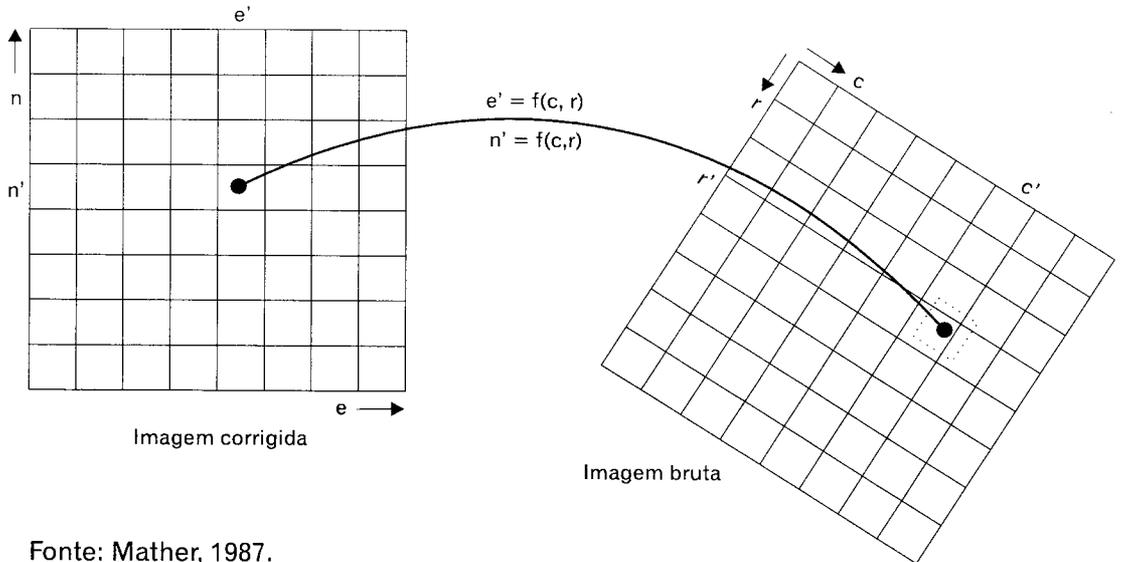
Quando os coeficientes de transformação forem computados, a imagem corrigida poderá ser produzida. Isso envolve a transferência do valor de intensidade (NC) dos pixels da imagem original para a imagem corrigida. Como geralmente há um rearranjo da posição dos pixels, com mudança na posição do centros, é necessário recalcular a intensidade dos mesmos.

As três técnicas mais comuns de reamostragem são:

1 - vizinho mais próximo

Adota o NC do pixel (na imagem de ajuste) mais próximo do novo centro (Figura 73).

Figura 73 - Reamostragem (vizinho mais próximo)

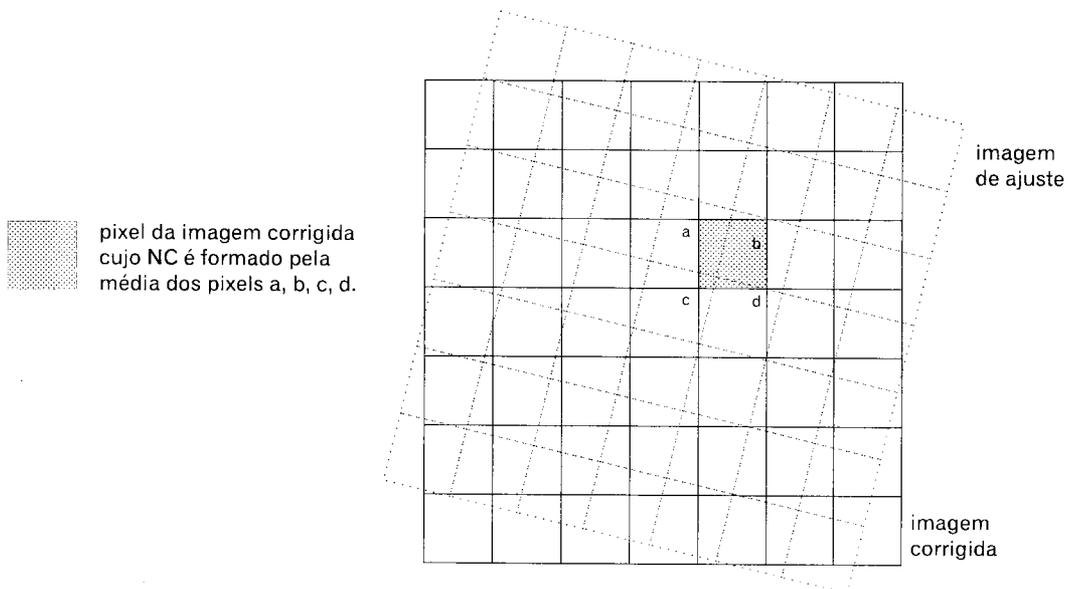


Fonte: Mather, 1987.

2 - interpolação bilinear

Adota o valor médio dos quatro pixels (janela de 2 x 2) mais próximos do novo centro (Figura 74).

Figura 74 - Reamostragem (interpolação bilinear)



Modificado de Curran, 1986.

3 - convolução cúbica

Usa o valor médio dos 16 pixels (janela de 4 x 4) mais próximos.

A vantagem do primeiro método é requerer menos tempo de computação e preservar os valores originais dos pixels. O segundo e terceiro métodos distribuem melhor o erro, porém exigem mais tempo de computação e produzem imagens suavizadas, retirando detalhes.

Acurácia da correção geométrica

A correção geométrica inicia com a leitura das coordenadas dos GCPs nas imagens e mapas e cálculo dos coeficientes dos polinômios da transformação de (x,y) para (c,l) , conforme equações 1 e 2.

Inspeção dos **resíduos**. Tendo calculado os coeficientes pode-se checar os valores esperados na imagem de ajuste em função das coordenadas de referência. A diferença entre as coordenadas originais (c,l) e as calculadas (c',l') é chamada de resíduo. O resíduo X é dado pela diferença $(c'-c)$ e o resíduo Y pela diferença $(l'-l)$. Um resíduo muito grande indica erro de leitura ou de identificação do ponto. Neste caso, o ponto deve ser substituído. Os resíduos são também afetados pela ordem de transformação.

O **resíduo** (X,Y) ou **distância** considera os resíduos nas duas direções (x,y) para informar, para cada pixel, a distância entre a localização original (c,l) e a localização calculada (c',l') .

$$\text{resíduo } (X,Y) = \sqrt{(c'-c)^2 + (l'-l)^2}$$

Os **resíduos** calculados para cada GCP são muito úteis para monitorar a transformação, refazendo ou rejeitando GCPs que não se enquadram na margem de erro aceitável. Estes parâmetros, expressos em pixels, são ainda importantes indicativos da acurácia da transformação.

O **RMSE** (*root mean square error*) fornece uma visão conjunta da acurácia da correção. É calculado pela equação:

$$RMSE (X) = \left(\sum (c'-c)^2 \right) / (n-k)^{\frac{1}{2}}$$

$$RMSE (Y) = \left(\sum (l'-l)^2 \right) / (n-k)^{\frac{1}{2}}$$

onde n é o número de GCPs e k é o número de termos da ordem do polinômio usado (três para a 1ª ordem, seis para a 2ª ordem, dez para a 3ª ordem). Da mesma forma que os resíduos, o RMSE (X,Y) considera o RMSE nas direções X e Y conjuntamente.

$$RMSE (X,Y) = \sqrt{(RMSE(X))^2 + (RMSE(Y))^2}$$

A última etapa é a criação da imagem corrigida usando uma das técnicas de interpolação de intensidade.

Referências bibliográficas

- BOWKER, D. E. et al. *Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies*. Hampton : NASA, 1985. (Reference publication).
- CANAS, A. C. *Geosciences image processing*. London : Imperial College, 1987. 136 p.
- CROSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas : UNICAMP, Instituto de Geociências, 1993. 170 p.
- DRURY, S. A. *Image interpretation in geology*. London : Allen & Anwin, 1987. 243 p.
- GOETZ, A. F. H., ROWAN, L. C. Geologic remote sensing. *Science*, Washington D.C., v. 211, n. 4484, p. 781-791, 1981.
- LIMA, M. I. C. de . *Introdução à interpretação radargeológica*. Rio de Janeiro : IBGE, 1995. 124 p. (Manuais técnicos em geociências, n. 3).
- MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images*. Chichester : J. Wiley, 1987. 352 p.
- NOVO, E. L. de M. *Sensoriamento remoto : princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo : E. Blücher, 1992. 308 p.
- SCHMIDLIN, D. Uma nova geração de imagens orbitais. *InfoGeo*, Curitiba, v. 1, n. 1, p.48-52, maio/jun. 1998.
- SCHOWENGERDT, R. A. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. New York : Academic Press, 1983. 249 p.
- STEFFEN, C. A., GAMA, F. F., NOVO, E. M. L. M. *Teste operacional de aquisição de dados aerotransportados - SADA : o experimento de Barra Bonita*. São José dos Campos : INPE, 1992. (INPE-5451 - NCT/305).

SWAIN, P. H., DAVIS, S. M. (Ed.). Remote sensing : the quantitative approach. New York : McGraw-Hill, 1978.

USING PCI software. Ontario : Richmond Hill, 1997.

VERONESE, V. F. *O uso de GPS para a correção geométrica de imagens de satélite : análise comparativa* [CD-ROM]. GISBRASIL'97. Curitiba : Sagres, 1997. 1 disco a laser ; 4 ¾ pol.

_____. *Acurácia da correção geométrica de imagens de satélite em função do método de aquisição dos pontos de controle* [CD-ROM]. GISBRASIL'98. Curitiba : Sagres, 1998. 1 disco a laser ; 4 ¾ pol.

Equipe técnica

Diretoria de Geociências

Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais

Primeira Divisão de Geociências do Nordeste

Coordenação

Valdir Francisco Veronese

Colaboradores

Maria Ivany Cardoso de Lima

Romel Reis

Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI

Gerência de Editoração - Departamento de Produção - DEPRO

Estruturação Textual e Tabular

Carmen Heloisa

Rosinéa Lucena Ervilha

Diagramação Tabular

LGonzaga

Copidesque e Revisão

Anna Maria dos Santos

Cristina Ramos Carlos de Carvalho

Iaraçy Prazeres Gomes

José Luís Nicola

Diagramação Tabular, Textual e Ilustrações

LGonzaga

Normalização Bibliográfica e de Glossário

Gerência de Documentação /CDDI

Ana Raquel Gomes da Silva

Aparecida Tereza Rodrigues Regueira

Diva de Assis Moreira

Impressão

Gráfica Digital - Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE, em 2 001.

INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Esta publicação apresenta, de forma sintética, os principais conceitos relacionados ao processamento digital de imagens de sensoriamento remoto para extração de informações sobre a superfície terrestre, com vistas, principalmente, ao mapeamento e avaliação de recursos ambientais. Abrange os diversos tipos de sensores utilizados e sua classificação, considerações sobre as características espectrais de alguns materiais, critérios para seleção de imagens, técnicas para melhoria da qualidade visual, operações aritméticas e outras transformações dos dados das imagens, bem como um breve histórico da evolução dos sistemas sensores a partir da primeira utilização de fotografias aéreas no início do século passado.

Inclui, ainda, a bibliografia consultada e inúmeras ilustrações.

Dado seu caráter didático, constitui importante fonte de informações para os estudos iniciais do processamento digital de imagens.

ISBN 85 240 0762 1



9 788524 007620