

APOSTILA PARA O CURSO 6

**INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSAMENTO
DE IMAGENS**

**Dias: 16 e 17 de abril (sábado e domingo)
Horário: 8:00 às 12:00 e das 14:00 às 18:00 horas**

Autores/Instrutores:

Getulio T. Batista (UNITAU)

Nelson W. Dias (UNITAU)

Carga Horária: 16 horas

XII SBSR

XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto

SUMÁRIO

PREFÁCIO	8
INTRODUÇÃO	9
O que é Sensoriamento Remoto?	9
Descrição dos Componentes do SR - Exemplo do uso da Máquina Fotográfica	9
RADIAÇÃO	10
Espectro Eletromagnético	14
Influência da Atmosfera	15
INTERAÇÃO DA ENERGIA COM A SUPERFÍCIE DA TERRA	18
SENSORES	22
Características dos Satélites: Órbitas e Faixa Coberta no Solo	23
Resolução Espacial, Tamanho do Pixel, e Escala	25
Resolução Espectral	26
Resolução Radiométrica	28
Resolução Temporal	29
SATÉLITES	30
Landsat	30
Spot	32
Cbers	35
<i>Imageador de Largo Campo de Visada (WFI - Wide Field Imager)</i>	35
<i>Câmara CCD de alta resolução (CCD - High Resolution CCD Camera)</i>	36
<i>Câmara de varredura no infravermelho (IR-MSS - Infrared Multispectral Scanner)</i>	37
Outros Satélites	37
RECEPÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS	38
	39

INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS	39
Interpretação de Imagens	40
Interpretação visual	45
Composição colorida	46
Interpretação Digital de Imagens	50
COMENTÁRIOS FINAIS	50
CITAÇÃO	51
APÊNDICES	51
Conceito de Processamento Digital	51
Registro de Imagens	54
EXERCÍCIOS DISCUTIDOS EM AULA	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Passos para o estudo do Sensoriamento Remoto	9
Figura 2. Radiação eletromagnética, onde c =velocidade de propagação (velocidade da luz), E = campo elétrico e M =campo magnético.	10
Figura 3. Comprimento de onda (λ) e frequência.	11
Figura 4. Diagrama de ondas de diferentes frequências que correspondem ao número de cristas de um mesmo comprimento de onda que passam por um ponto em um segundo.	11
Figura 5. A luz ou a REM ao passar por um prisma se dispersa em diversos comprimentos de onda.	13
Figura 6. A combinação das três cores primárias (azul, verde e vermelho) produzem todas as outras cores (milhares de cores), correspondentes à luz branca.	13
Figura 7. Regiões do espectro eletromagnético mais frequentemente usadas no SR.	14
Figura 8. O espectro eletromagnético com as principais faixas espectrais conhecidas.	15
Figura 9. Efeito atmosférico: absorção e espalhamento.	16
Figura 10. Radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. Notar que a radiação ao nível do mar é bem menor em função da absorção atmosférica.	16
Figura 11. Observar que a camada atmosférica pela manhã e ao entardecer é bem maior do que ao meio dia e isso está relacionado com o céu vermelho que vemos ao entardecer.	17
Figura 12. Janelas atmosféricas nos principais comprimentos de onda de interesse para o SR.	17
Figura 13. A reflectância pode ser difusa quando difunde-se em todas as direções, como ao atingir um pinheiro ou especular (na forma de espelho) quando atinge uma superfície lisa.	18
Figura 14. Reflectância de uma folha de vegetação. Baixa reflexão no visível, pequeno pico no verde, alta reflectância no infravermelho próximo e picos invertidos de absorção devido à água no infravermelho médio.	19
Figura 15. Reflectância de grama obtida com espectrorradiômetro de campo na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias em 2002.	20
Figura 16. Reflectância da água em diferentes localidades do Lago Paranoá, DF. Observar que ela é menor do que 10% em todos os comprimentos de onda do visível.	20
Figura 17. Resposta espectral de diversos tipos de solos.	20
Figura 18. Diferentes níveis de coleta de dados em SR. O nível orbital é hoje o mais usado, mas os demais níveis são importantes para calibração dos dados.	23

Figura 19. Exemplos de imagens de diferentes resoluções espaciais. Quanto melhor a resolução menor será a área coberta. NOAA AVHRR (1,1km), CBERS WFI (260m), Landsat TM (30m), e IKONOS (1m).	27
Figura 20. Resolução espectral. O filme colorido tem uma resolução espectral três vezes melhor do que o filme preto e branco. Hoje temos sensores hiperspectrais com centenas de bandas o que aumenta o poder discriminatório desses sensores.	27
Figura 21. Ilustração do efeito da resolução radiométrica na aparência dos dados. É óbvio que enxergamos mais detalhes (mais tons) na imagem de 8 bits (à direita).	29
Figura 22. Faixas espectrais do Landsat sensor ETM ⁺ .	31
Figura 23. Composição colorida de 3 bandas da imagem Landsat 7 ETM ⁺ , reamostrada para 15 m de resolução espacial da região de São José dos Campos, SP.	32
Figura 24. Imagens SPOT com diferentes resoluções. (© das imagens da SPOT Image).	34
Figura 25. Exemplos de produtos SPOT	34
Figura 26. Imagem CBERS WFI da Represa de Itaipu, PR	35
Figura 27. Imagem CCD do CBERS-2 de São José dos Campos, SP obtida em 30/01/2004. Ressalta-se parte da represa de Paraibuna a oeste e cavas de areia no município de Jacareí (manchas escuras ao longo do rio Paraíba).	36
Figura 28. Estação Terrena de Rastreo e Comando de Satélite em Cuiabá, estado do Mato Grosso, Brasil. Essas antenas são de grande diâmetro e com capacidade de rastreo.	39
Figura 29. A imagem é formada por <i>pixels</i> , que é o cruzamento da linha e coluna e tem coordenadas (linha - coluna ou longitude – latitude quando a imagem é georreferenciada) e um valor de brilho (ND) associado com sua reflectância ou emitância. Quanto maior o ND mais claro o <i>pixel</i> . Observar que visualmente não se distingue o ND=59 do ND=61, mas para o computador são totalmente distintos.	40
Figura 30. Interpretação visual de imagens de satélite. Com o <i>overlay</i> (papel transparente) sobreposto à imagem, traça-se as principais feições (áreas homogêneas) que conhecimento da área podem ser identificadas e rotuladas (e.g. área desmatada).	41
Figura 31. Resposta espectral do solo, vegetação e água versus as bandas do Landsat TM. Notar que as bandas foram estrategicamente escolhidas para maximizar a distinção entre as principais feições terrestres	42
Figura 32. Características ou parâmetros associados à fotointerpretação ou interpretação visual de imagens.	45
Figura 33. Exemplo de uma “chave de interpretação” para o mapeamento de áreas sujeitas a diferentes tipos de danos causados pelo incêndio florestal de Roraima de 1998.	46
Figura 34. Composição colorida da imagem CBERS-2, obtida em 30/01/2004 das bandas do sensor CCD-2, bandas 2 (faixa espectral do verde) exibida na cor azul; 3 (faixa espectral do vermelho) exibida na cor vermelha; e, 4 (faixa do infravermelho próximo)	47

exibida na cor verde. Todas as bandas sofreram um realce de contraste.

Figura 35. A interpretação digital ou classificação de imagens requer o uso de um computador com pacotes de software especialmente desenvolvidos para análise de imagens. 47

Figura 36. Ilustração da regra de decisão do MAXVER. As classes **A** e **B** têm distribuição gaussiana (curvas normais). O ponto **d** pertence à classe **B** (maior probabilidade, o ponto **c** poderá pertencer a qualquer uma das classes e, embora, o ponto **e** tenha maior probabilidade de pertencer à classe **B** do que a **A**, a probabilidade é tão pequena que é melhor classificar o ponto **e** como não pertencente a nenhuma das classes. 49

Figura 37. Integração de dados através de SIG. O SPRING também tem essa função e trata tanto dados vetoriais quanto matriciais. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas espectrais das bandas do sensor TM do Landsat.	31
Tabela 2. Características do ETM+.	31
Tabela 3. Características do SPOT	33
Tabela 4. Sensores e suas faixas espectrais do SPOT-1,2,3 e 4.	33
Tabela 5. Características do ETM+	35
Tabela 6. Características do Sensor CCD do CBERS 1 e 2	36
Tabela 7. Características do Sensor IRMSS do CBERS.	37
Tabela 8. Fotointepretação vs. análise quantitativa de imagens.	43
Tabela 9. Características das imagens no processo de fotointepretação	44

PREFÁCIO

O objetivo desse curso é ampliar os conhecimentos básicos de sensoriamento remoto e compreender como os dados de sensores são gerados e quais suas características (sensores passivos); compreender como diferentes alvos interagem com a energia incidente e que tipo de resposta espectral produzem; e compreender como informações temáticas podem ser extraídas das imagens através de diferentes métodos de interpretação e classificação. Os participantes sairão do curso com o conhecimento básico das técnicas de sensoriamento remoto e com uma visão ampla das possibilidades de aplicação desta tecnologia.

O curso será ministrado em 16 horas com exercícios de interpretação em grupo com imagens analógicas e exercícios simultâneos com todo o grupo utilizando software de interpretação de imagens e dados digitais de diferentes sensores orbitais.

O programa do curso será ministrado em quatro partes: 1) Apresentação e discussão das características da energia eletromagnética e como que esta é utilizada pelos sensores para produzirem as imagens; Características das diferentes resoluções dos sensores existentes e suas implicações; Os diferentes tipos de interação da energia incidente sobre os alvos mais comuns da superfície terrestre. 2) Apresentação e discussão das diferentes formas de se extrair informações das imagens através de técnicas de realce para análise visual; Pré-processamento dos dados para a classificação; Técnicas de classificação e de interpretação visual. 3) Discussão das diferentes aplicações do sensoriamento remoto e suas relações com as características dos dados e as técnicas de processamento apresentadas anteriormente. 4) Exercício prático em grupo utilizando software de processamento de imagens para demonstrar processos típicos de extração de informações digitais para algumas aplicações selecionadas.

Esta apostila deve ser complementado com o material didático a ser utilizado em aula com apresentações em PowerPoint em projetor multimídia, com exercícios interativos via analógica e via computador. Cada aluno receberá um conjunto de CD-ROMs contendo um livro digital, interativo, sobre Sensoriamento Remoto e Preservação e Conservação (<http://www.dsr.inpe.br/cdrom>). Terá prática de interpretação visual de imagens com base em impressões de imagens em papel.

INTRODUÇÃO

O principal objetivo do Sensoriamento Remoto (SR) é expandir a percepção sensorial do ser humano, seja através da visão sinóptica (panorâmica) dada pela visão aérea ou espacial seja pela possibilidade de se obter informações em regiões do espectro eletromagnético inacessíveis à visão humana. O SR expande a oportunidade, o acesso, uma visão sinóptica do terreno permitindo a análise de um modelo da superfície trazido para ser analisado dentro do laboratório.

O que é Sensoriamento Remoto?

Inclui uma série de equipamentos, técnicas e procedimentos de análise que podem ser estudados através dos passos apresentados na Figura 1.

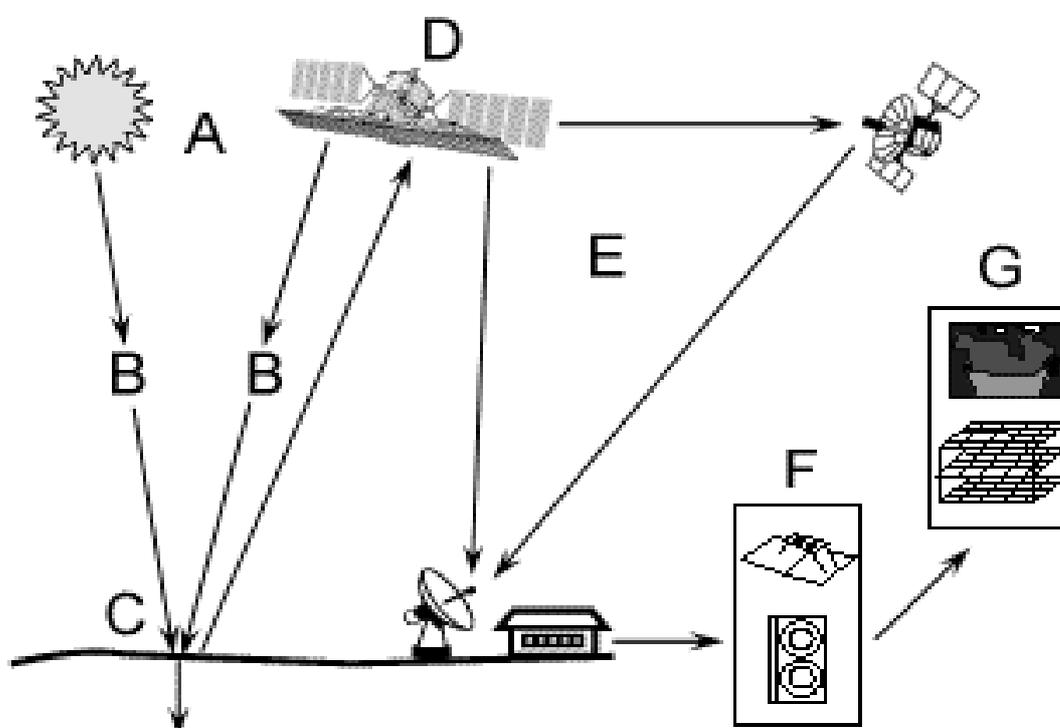


Figura 1. Passos para o estudo do Sensoriamento Remoto.

Fonte: CCRS (2005)

Descrição dos Componentes do SR - Exemplo do uso da Máquina Fotográfica

Cada uma dos componentes do SR pode ser especificado e exemplificado com uma tomada de fotografias até a elaboração de um álbum:

A – Radiação - Fonte de Energia ou Iluminação (Sol ou outra fonte luminosa e.g. lâmpada);

B - Interação entre a Radiação e a Atmosfera

(Meio 1- entre a fonte e o alvo - Ar (atmosfera))

Meio 2- entre o alvo e o sensor - Ar (atmosfera)

C - Interação com o Objeto (Pessoa ou uma paisagem)

D - Registro da Energia pelo Sensor (Máquina fotográfica - filme)

E – Transmissão, Recepção, e Processamento (Aparelhos do laboratório de revelação)

F - Interpretação e Análise (Pessoa que observa -analisa a foto)

G – Modelagem e Aplicação (Integração - Organização do álbum)

RADIAÇÃO

A primeira exigência do Sensoriamento Remoto é a existência de uma fonte de energia para iluminar o objeto (a menos que a energia detectada esteja sendo emitida pelo objeto). A esta energia dá-se o nome de radiação eletromagnética, ou simplesmente REM.

A radiação eletromagnética se comporta de acordo com os fundamentos de teoria de onda e consiste de um campo elétrico (E) que varia em magnitude em uma direção perpendicular à direção na qual a radiação está viajando, e um campo magnético (M) orientado em ângulo reto com o campo elétrico. Ambos os campos viajam à velocidade da luz (c) (Figura 2).

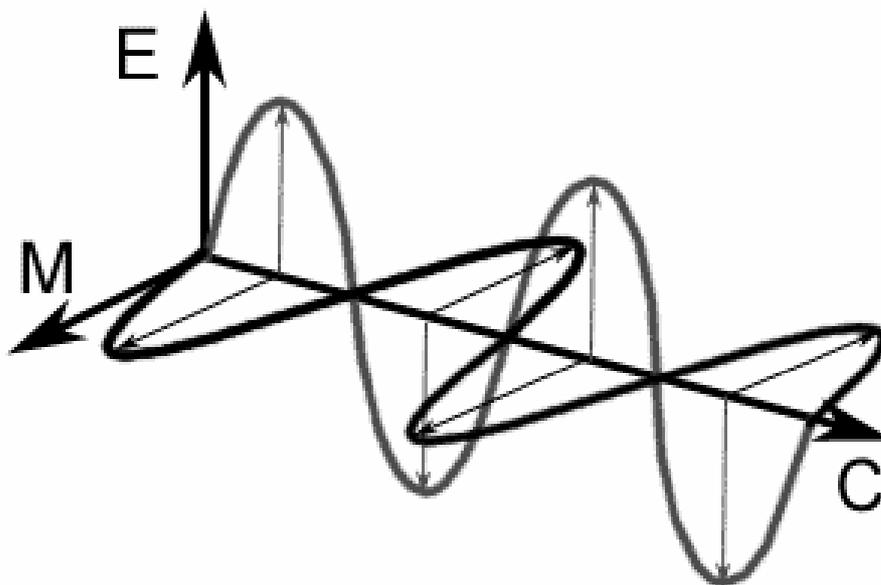


Figura 2. Radiação eletromagnética, onde c =velocidade de propagação (velocidade da luz), E = campo elétrico e M =campo magnético.

Fonte: CCRS (2004).

Duas características da REM são particularmente importantes para se entender SR. Elas são o comprimento de onda e a frequência.

O comprimento de onda é a duração de um ciclo de onda que pode ser medido como a distância entre cristas de ondas sucessivas (Figura 3). Comprimento de onda normalmente é representado pela letra grega Lambda (λ). Comprimento de onda é medido em metros (m) ou para comprimentos de onda menores em centímetros (cm, 10^{-2} metros), micrômetros (μm , 10^{-6} metros) ou nanômetros (nm, 10^{-9} metros). Frequência, representada pela letra **f** se refere ao número de ciclos de uma onda que passa por um ponto fixo por unidade de tempo (Figura 4). Frequência normalmente é medida em hertz (Hz), o que equivale a um ciclo por segundo.

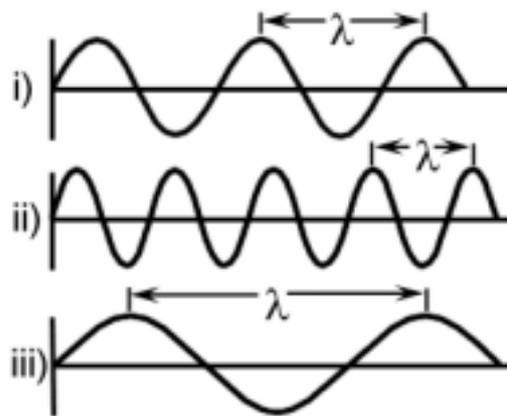


Figura 3. Comprimento de onda (λ) e frequência.
Fonte: Tutorial de Fundamentos do SR do CCRS (2004).

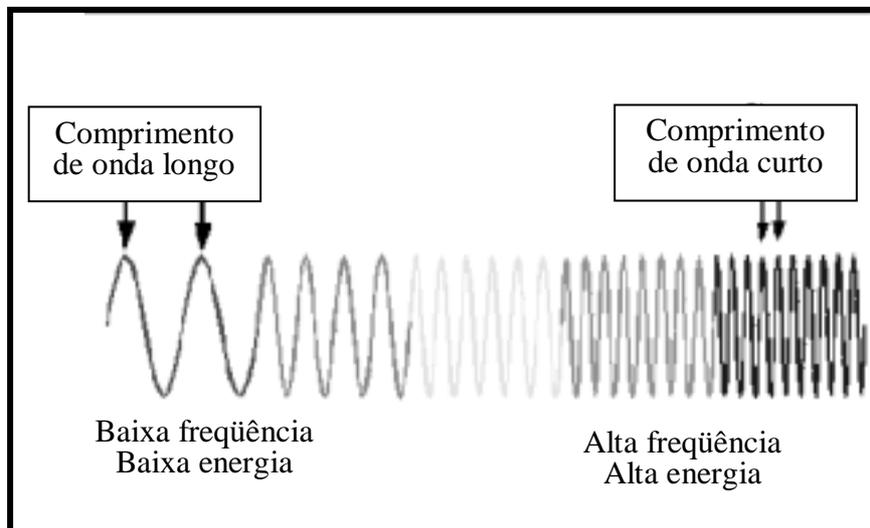


Figura 4. Diagrama de ondas de diferentes frequências que correspondem ao número de cristas de um mesmo comprimento de onda que passam por um ponto em um segundo.
Fonte: Tutorial de Fundamentos do SR do CCRS (2004).

Comprimento de onda e frequência estão relacionados pela fórmula seguinte:

$$c = \lambda f$$

Onde,

λ = comprimento de onda (m)

f= frequência (ciclos por segundo, Hz)

c= velocidade da luz (constante em um meio e igual a 3×10^8 m/s no vácuo)

Então, os dois são relacionados inversamente a um ao outro. Quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência. Um comprimento de onda longo corresponde a uma frequência baixa.

A luz que nossos olhos - nossos "sensores" remotos - pode detectar é parte do espectro visível. É importante reconhecer quão pequeno é a porção visível do espectro em relação ao resto do espectro. Há muita radiação ao redor de nós que é "invisível" aos nossos olhos, mas que pode ser detectada através de outros instrumentos de sensoriamento remoto.

Examinemos como os comprimentos de onda são produzidos e como se descrevem os principais tipos de radiação eletromagnética. Qualquer objeto com temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin) emite radiação. Nossa principal fonte de radiação é o sol. Reações nucleares que acontecem internamente ao Sol produzem ondas de alta energia que incluem raios gama, raios x e muita radiação ultravioleta que é radiada em direção à Terra. Felizmente, muita dessa radiação de alta energia é absorvida pelos gases presentes na alta atmosfera, principalmente o ozônio e não atinge a superfície da Terra. Muita da radiação de baixa energia que é emitida pelo Sol é produzida próximo da sua superfície. Isso inclui a radiação das regiões do visível e do infravermelho, bem como do ultravioleta. Uma vez que uma porção dessa radiação nesses comprimentos de onda atinge a superfície da Terra, ela pode ser refletida, tornando-se o principal objeto do sensoriamento remoto. Os comprimentos de onda de menor energia são emitidos pela própria Terra. Esses comprimentos de onda incluem as regiões do infravermelho termal e microondas.

A radiação da região do visível é a porção do espectro mais familiar para nós, uma vez que pode ser detectada pelos nossos olhos. Há que se ressaltar que é também na região do visível em que o sol emite mais radiação. Como a natureza é perfeita!

Pode-se verificar que a radiação do visível é composta por vários comprimentos de onda (cores - Figura 5). O azul, verde e o vermelho são denominados cores primárias porque todas as outras cores são produzidas pelas várias combinações destas três cores ou destes comprimentos de onda. (Figura 6).

As cores que vemos num objeto são dependentes dos comprimentos de onda que são refletidos por ele. Por exemplo, quando toda ou a maior parte da radiação referente à região do visível que atinge um objeto é refletida de volta, sua aparência será de cor branca. É por isso vemos areias claras em imagens ou fotografias aéreas. Quando a maioria da radiação, que atinge um objeto for absorvida por ele, este aparecerá de cor preta i.e., ausência de cor. Por isso que florestas naturais

ou mesmo o oceano aparecem escuros nas imagens (refletem pouco o visível). Nossos olhos vêem a cor ou cores principais refletidas por um objeto. Por exemplo, uma folha verde reflete duas vezes mais verde do que a radiação azul. Uma casca de banana reflete tanto vermelho quanto verde em grandes quantidades, mas não reflete muito a radiação referente ao azul, a combinação do vermelho

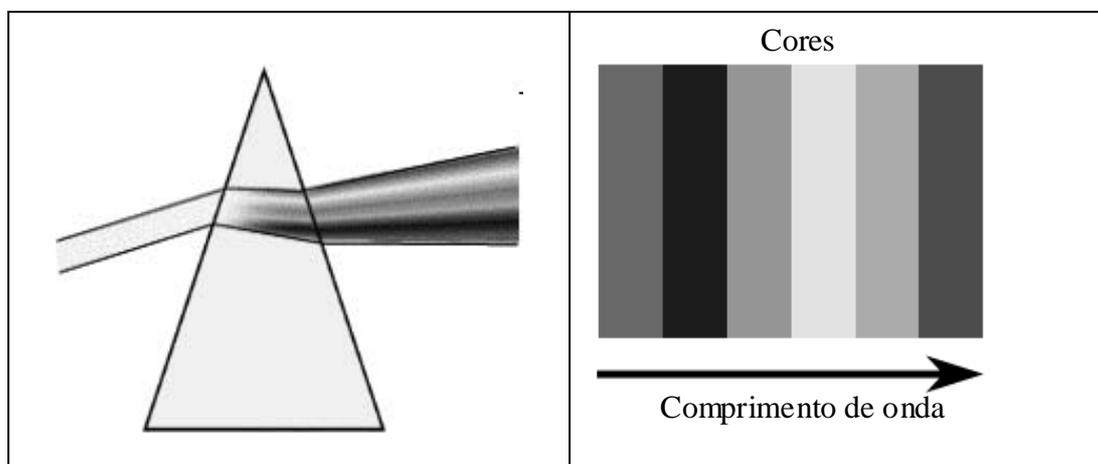


Figura 5. A luz ou a REM ao passar por um prisma se dispersa em diversos comprimentos de onda.

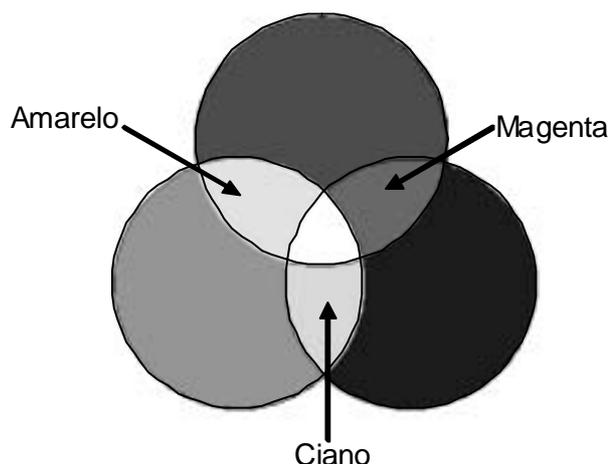


Figura 6. A combinação das três cores primárias (azul, verde e vermelho) produzem todas as outras cores (milhares de cores), correspondentes à luz branca.

e verde formam a cor amarela. Adicionalmente à radiação do visível que pode ser detectada por nós, o sensoriamento remoto utiliza ainda outros comprimentos de onda que não podemos detectar com nossos olhos, mas são igualmente importantes.

A região do infravermelho pode ser dividida em infravermelho próximo, médio e termal. O infravermelho está fora do alcance da nossa observação visual quando observado diretamente com nossos olhos. Entretanto, ele pode ser medido por diversos sensores. O infravermelho próximo inicia exatamente após a porção do espectro eletromagnético referente ao vermelho. O infravermelho médio tem comprimentos de onda maiores do que o infravermelho próximo, mas

pode ser ainda considerado como pertencente à porção óptica do espectro eletromagnético. O infravermelho termal tem os maiores comprimentos de onda da região do infravermelho e não faz parte mais da porção óptica e sim daquilo que chamamos de calor. Tanto a porção óptica, quanto a do calor são exploradas pelas técnicas de sensoriamento remoto.

Muitos instrumentos podem ser concebidos com o objetivo de coletar radiação infravermelha, bem como referente à região do visível. Utilizando ambas as porções do espectro, podemos obter informação que nos seria impossível obter se utilizássemos somente nossos olhos. Conhecendo como a radiação interage com certas feições da Terra e especialmente como é refletida, podemos obter informação dessas feições através da coleta e da análise dessa radiação refletida. Esse é basicamente o princípio do SR.

Espectro Eletromagnético

A luz solar ao passar por um prisma, deflete a luz em função do λ conforme ilustrado na Figura 18.

Após a região do visível, os comprimentos de onda maiores do que $0.7 \mu\text{m}$ até $100 \mu\text{m}$ são chamados de infravermelho (IV) que correspondem a mais de 100 vezes a largura da faixa espectral do visível e pode ser dividido em IV refletido e IV emitido ou térmico. (Figura 7). O IV refletido vai de $0.7 \mu\text{m}$ até $3.0 \mu\text{m}$. O IV térmico vai de $3.0 \mu\text{m}$ até $100 \mu\text{m}$ e é bastante diferente do visível e do IV refletido. Nessa região do espectro, a radiação é emitida da superfície da Terra na forma calor.

Tem-se ainda a porção espectro de interesse recente sensoriamento remoto, a chamada **região das microondas** de aproximadamente 1mm até 1m que são os comprimentos de onda mais longos em sensoriamento remoto. A Figura 8 apresenta o espectro eletromagnético em toda sua extensão.

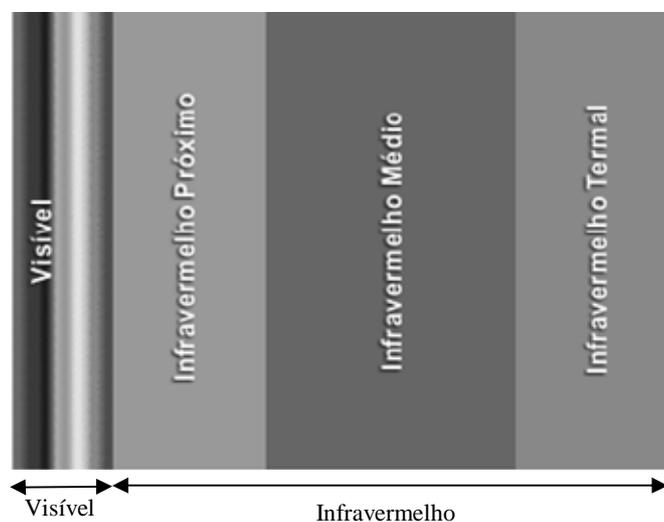


Figura 7. Regiões do espectro eletromagnético mais freqüentemente usadas no SR.

Fonte: Dias et al. (2003).

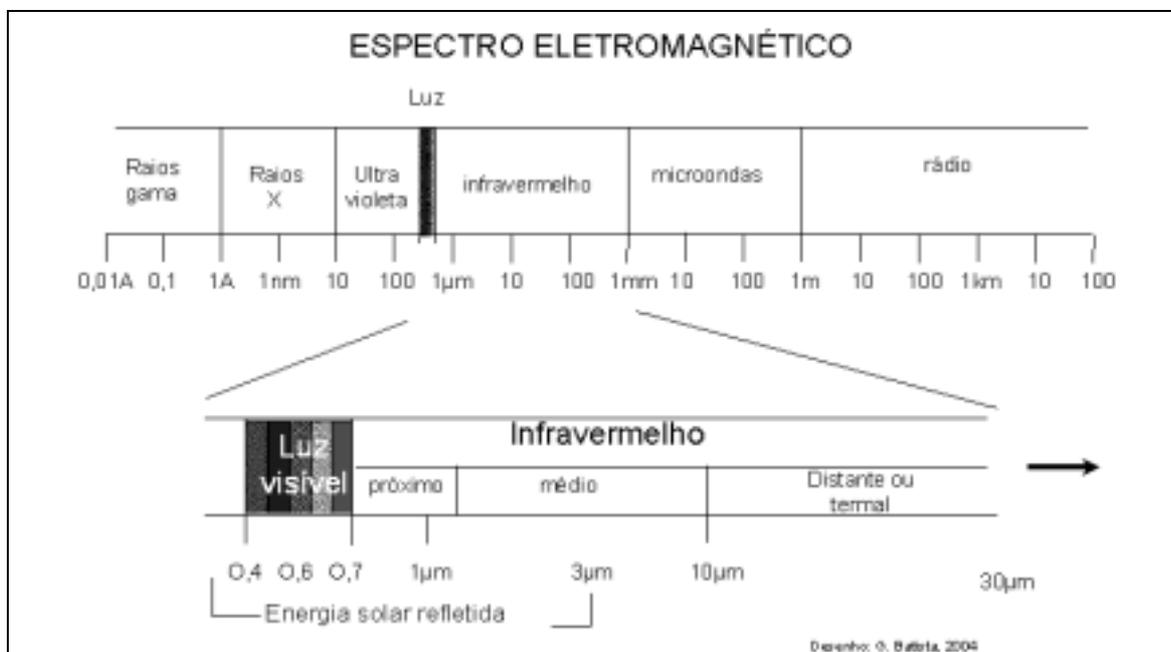


Figura 8. O espectro eletromagnético com as principais faixas espectrais conhecidas.

Qualquer corpo que esteja acima do zero absoluto (0K) emite radiação por vibração molecular. Quanto maior a temperatura do objeto, maior a quantidade de radiação que ele emitirá. De fato, existe uma lei que diz que a radiação emitida é proporcional a quarta potência da temperatura, sendo ainda dependente da emissividade que é uma característica própria de cada alvo. Essa lei é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann e é exatamente por ela que podemos com o SR estimar a temperatura da superfície do mar ou da terra via satélite. De fato, na área da oceanografia isso é uma rotina e temos hoje rotineiramente informações sobre a temperatura da superfície do mar sendo usadas em tempo real para orientar barcos de pesca.

Um outro aspecto relativo à emissão da radiação em função da temperatura é que quanto maior a temperatura, o pico de emissão máxima se desloca para comprimentos de onda menores, ou seja o comprimento de onda correspondente à emissão máxima será menor. Esse fato é conhecido como lei de deslocamento de Wien. Dessa forma o sol emite o máximo de radiação em 0,5 μm, enquanto a terra a uma temperatura bem menor emite o máximo em 10 μm. A Figura 23 ilustra bem a lei de Wien.

Influência da Atmosfera

A atmosfera interfere de forma significativa nos dados de SR. Ela absorve ou espalha a radiação de forma diferenciada em função dos comprimentos de onda (Figura 9). Somente uma pequena parte da radiação que é emitida pelo Sol chega até a Terra. De toda a radiação solar que chega à Terra, somente 50% atinge a superfície devido, principalmente, ao efeito atenuante do ozônio e de outros gases ionizados presentes na atmosfera.

As partículas presentes na atmosfera, como aerossóis, poeiras, moléculas de diversos gases, com diferentes tamanhos interferem na radiação que chega aos alvos terrestres ou ao sensor. A Figura 10 mostra a diferença entre a radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar.

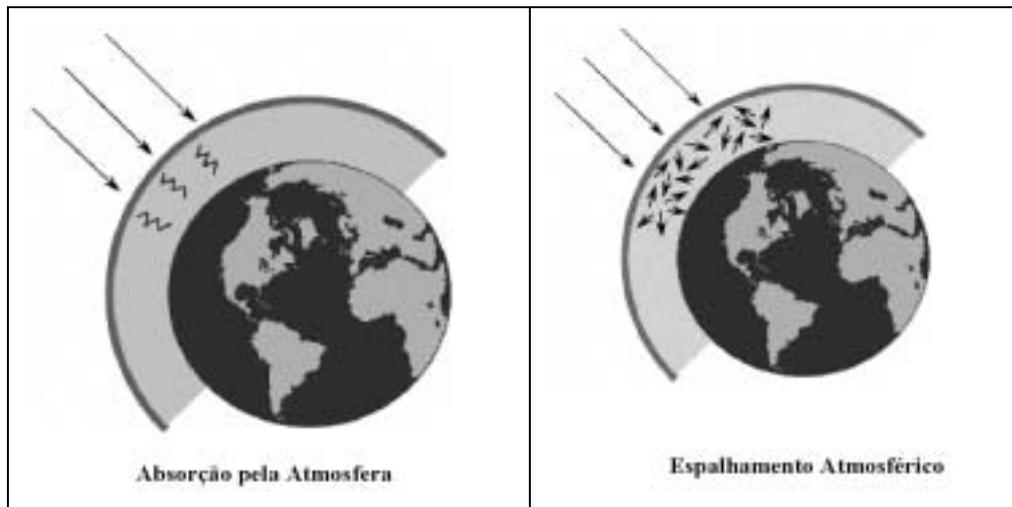


Figura 9. Efeito atmosférico: absorção e espalhamento.

Fonte: Tutorial de Sensoriamento Remoto do CCSR (2004).

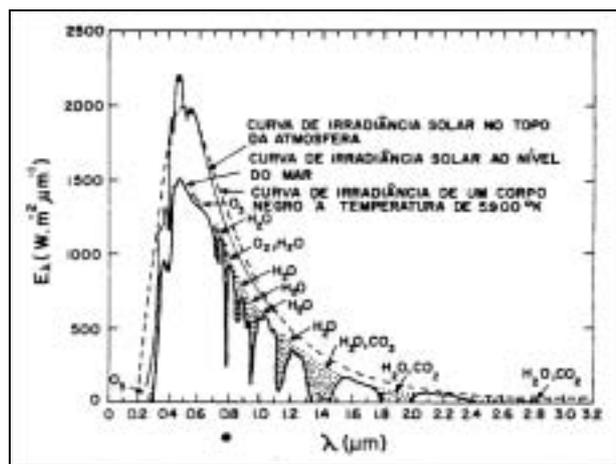


Figura 10. Radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. Notar que a radiação ao nível do mar é bem menor em função da absorção atmosférica.

Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

Quanto maior a camada atmosférica a ser atravessada e quanto mais partículas presentes nela maior será o efeito atmosférico. A Figura 11 ilustra este aspecto.

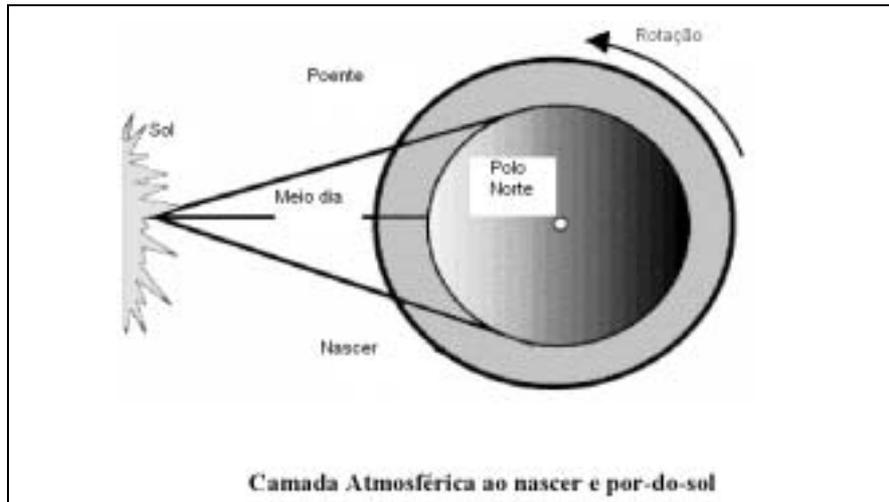


Figura 11. Observar que a camada atmosférica pela manhã e ao entardecer é bem maior do que ao meio dia e isso está relacionado com o céu vermelho que vemos ao entardecer.

Os diferentes gases presentes na atmosfera absorvem a radiação em comprimentos de onda específicos. As faixas de comprimento de onda onde a radiação é menos absorvida são chamadas de janelas atmosféricas. A Figura 12 ilustra de forma mais clara as janelas atmosféricas importantes em SR.

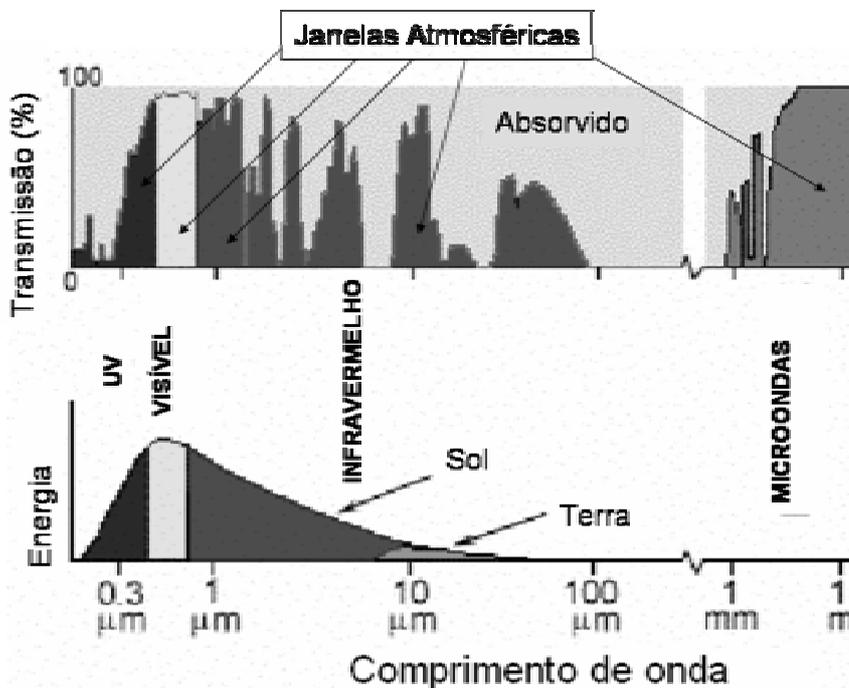


Figura 12. Janelas atmosféricas nos principais comprimentos de onda de interesse para o SR.

Comprimentos de onda menores são afetados de forma mais severa pelo espalhamento atmosférico do que comprimentos de onda maiores. Isso faz com que, por exemplo, pouca radiação ultravioleta e azul atinja a terra, uma vez que é absorvida pela atmosfera. Por isso é importante manter a camada de ozônio na atmosfera responsável por absorver a radiação ultravioleta que pode ser altamente danosa para os seres vivos. De fato, a luz azul é espalhada quatro vezes mais do que o vermelho, e o ultravioleta (UV), é 16 vezes mais espalhado do que o vermelho. Por isso, embora tenha aplicações importantes, o UV é pouco usado em SR.

Agora se pode ver como que a radiação que atravessou a atmosfera interage com o alvo ou superfície terrestre.

INTERAÇÃO DA ENERGIA COM A SUPERFÍCIE DA TERRA

A radiação solar ao atingir a superfície terrestre interage com as diversas feições, podendo ocorrer: reflexão, absorção, ou transmissão.

A reflexão ocorre quando a radiação que incide sobre um objeto é refletida por ele. Ela pode ser difusa ou especular (Figura 13). A característica de reflexão difusa é importante, pois várias leis físicas ficam mais simplificadas quando os alvos são perfeitamente difusos, pois independente dos ângulos de incidência e de observação a radiação não variará. Alvos perfeitamente difusos são chamados de Lambertianos.

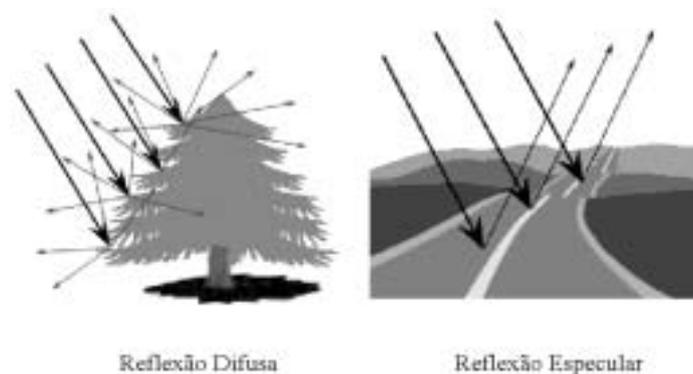


Figura 13. A reflectância pode ser difusa quando difunde-se em todas as direções, como ao atingir um pinheiro ou especular (na forma de espelho) quando atinge uma superfície lisa.

Fonte: Tutorial de Sensoriamento Remoto do CCRS (2004).

A absorção ocorre quando a radiação não é refletida, mas sim absorvida ou, de alguma forma, transformada pelo objeto. É o que ocorre com as plantas verdes que absorvem a energia fotossinteticamente ativa para realizar o processo da fotossíntese e para os processos de respiração.

A energia que é absorvida é usada para aumentar a temperatura do objeto e posteriormente emitida e também pode ser detectada por SR. A emissão ocorre quando a radiação é originada no próprio objeto. A ocorrência mais comum desta radiação é na forma de calor, mas microondas fracas também podem ser emitidas por objetos da superfície terrestre. A transmissão ocorre quando a radiação atravessa parcial ou inteiramente um objeto.

As várias feições da Terra interagem com a radiação de diferentes formas. Analisemos a interação de algumas delas com a radiação incidente.

A vegetação absorve muito da radiação visível que incide sobre ela, principalmente o azul e o vermelho. Parte da radiação verde também é absorvida, mas em menor quantidade do que as duas outras regiões. Como uma parte da radiação verde é refletida pela vegetação, nós vemos a vegetação na cor verde. Mas na verdade a vegetação reflete uma quantidade bem maior da radiação infravermelha, principalmente do infravermelho próximo. Na forma gráfica, podemos ilustrar a reflectância da folha e os fatores dominantes dessa reflexão, conforme Figura 14.



Figura 14. Reflectância de uma folha de vegetação. Baixa reflexão no visível, pequeno pico no verde, alta reflectância no infravermelho próximo e picos invertidos de absorção devido à água no infravermelho médio.

A Figura 15 é uma medida real da reflectância de grama onde se observa o comportamento típico da reflectância da folha.

A água absorve e transmite muito da radiação incidente, especialmente o infravermelho. A água em geral, tem aparência escura em fotografias e imagens orbitais, uma vez que reflete muito pouca radiação. O comportamento da água permite se estabelecer correlações entre alguns parâmetros indicadores da qualidade da água e as suas características espectrais. Pufal (2001) realizou um trabalho experimental em lagos do Distrito Federal e obteve os seguintes coeficientes

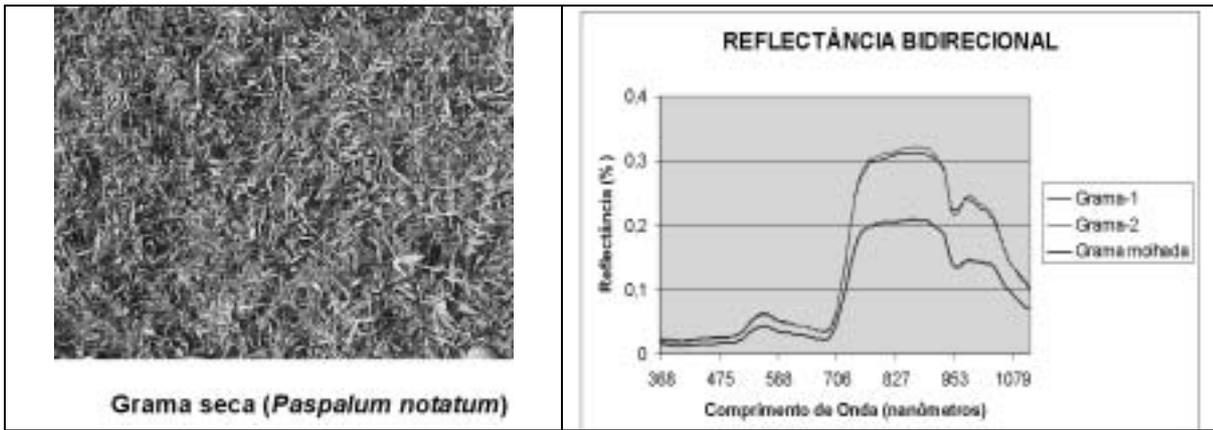


Figura 15. Refletância de grama obtida com espectrorradiômetro de campo na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias em 2002.

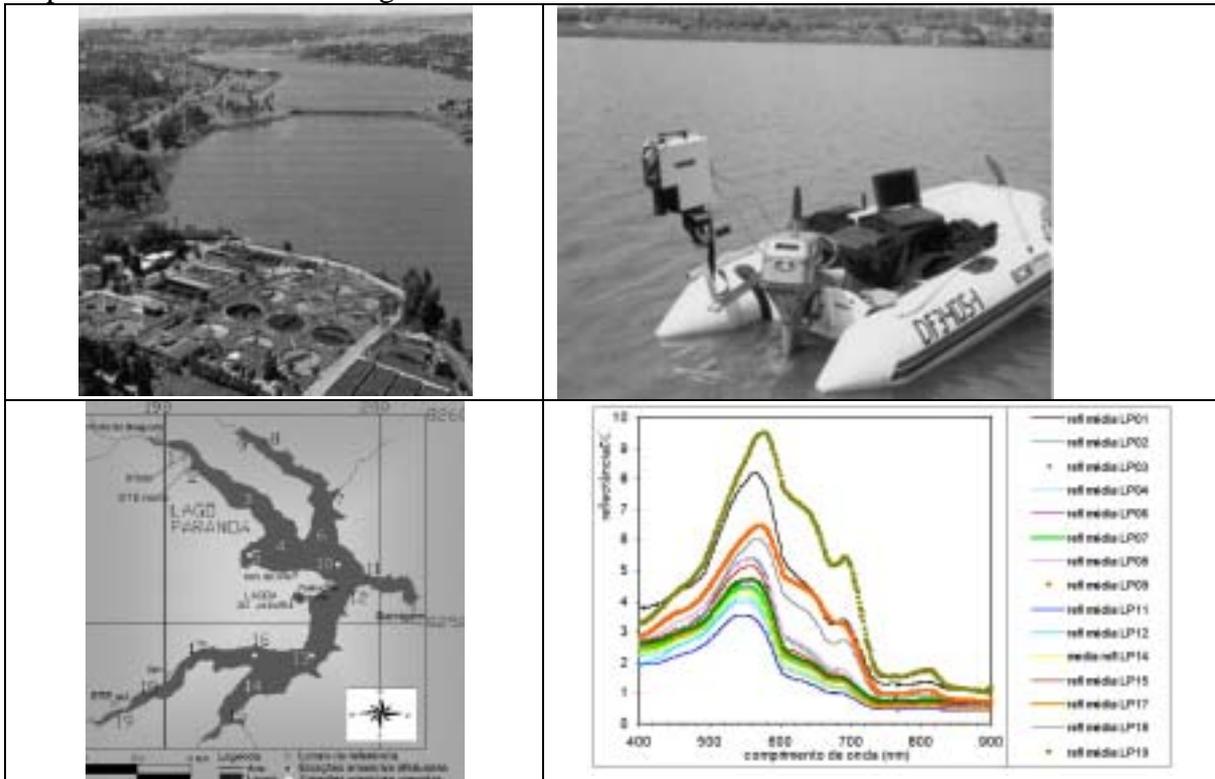


Figura 16. Refletância da água em diferentes localidades do Lago Paranoá, DF. Observar que ela é menor do que 10% em todos os comprimentos de onda do visível. Fonte: Pufal (2001).

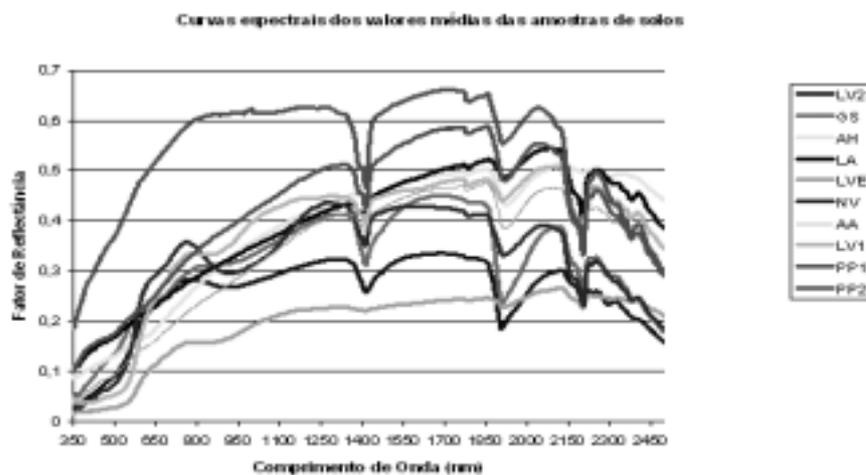


Figura 17. Resposta espectral de diversos tipos de solos. Fonte: Alvarenga et al. (2003).

de correlação: 0,81, 0,91, 0,83, e 0,85, para Clorofila, turbidez, sólidos totais, e profundidade do disco de Secchi, respectivamente. (Figura 16).

Outra feição expressiva na superfície terrestre é o solo. Existe uma variedade de tipos de solos e cada um reflete a radiação de forma diferenciada. Solos claros tendem a ter melhor drenagem e refletir grandes quantidades de radiação do visível e do infravermelho próximo. Solos menos claros ou escuros tendem a ter altos níveis de matéria orgânica e são frequentemente mais úmidos devido à deficiência da drenagem e, portanto, aparecem mais escuros em fotografias e imagens orbitais.

De forma geral, a reflectância do solo e outros materiais não cobertos pela vegetação aumenta à medida que o comprimento de onda aumenta (visível e infravermelho). (Figura 17).

Segundo Alvarenga et al. (2003) nas curvas apresentadas na Figura 17 verifica-se que os óxidos de ferro (Fe_2O_3) tiveram influência nos solos NV, GS e LV1, na faixa espectral próxima a 900nm. Os seguintes valores para Fe_2O_3 foram observados nesses solos: NV = 17,8 %, LV1 = 1,8 % e GS = 1,5%. Os solos LV2 e LVE, embora, sem a análise, demonstraram comportamento característico de solos com presença de óxidos de ferro. Na faixa entre 1400 e 1500nm pode-se verificar a influência da água e das hidroxilas (OH) na absorção da radiação, exceto, para os solos LVE e AH na faixa centrada em 1400 nm. O solo LVE apresentou esta feição na faixa de aproximadamente 1900 nm. Solos com baixos valores de reflectância não apresentaram bandas de absorção referentes à água (1400 nm e 1900 nm) de forma marcante (LA). Segundo ainda Alvarenga et al. (2003), na faixa entre 2100 e 2200 nm verificou-se em todos os solos, uma forte absorção pela caulinita, com exceção do solo AH, que mostrou valores não significativos na análise pedológica para o Al_2O_3 e SiO_2 . Verifica-se que na faixa de 1900nm (Figura 17) pode ter ocorrido absorção em função da presença de vermiculita, pois o comportamento espectral para a maioria dos solos analisados apresentou característica típica de absorção deste constituinte mineralógico.

De acordo com a curva espectral dos solos PP1, PP2 e AH pode-se deduzir que são solos arenosos, uma vez que a areia (quartzo) no solo aumenta a reflectância em todo o espectro estudado. Além disso, os baixos teores de matéria orgânica diminuem a absorção e em consequência aumentam a reflectância. Em relação ao constituinte mineralógico gibbsita, pode-se afirmar que os solos apresentaram feições deste mineral, vistas na faixa de 2300 nm, com exceção do AH e LVE que não apresentaram a absorção característica deste mineral. A curva espectral do solo PP2 mostrou a presença de quartzo, notado pela variação da curva na faixa de 1000nm.

Feições que aparecem “misturadas”, como no caso de solos cobertos por vegetação esparsa, apresentarão uma resposta espectral combinada com parte da reflectância de cada um dos objetos presentes, neste caso, vegetação e solos.

Conhecendo como a radiação interage com cada feição da superfície terrestre, e especialmente como elas refletem a radiação incidente, podemos obter informação sobre a superfície da Terra coletando e analisando as características da radiação refletida. Por exemplo, sabendo-se que a vegetação reflete muito mais radiação do infravermelho próximo do que os solos, pode-se utilizar este conhecimento para distinguir estas duas feições entre si em grandes extensões de terra através de dados orbitais.

Para viabilizar a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, a radiação refletida deve ser coletada e registrada por algum tipo de sistema sensor. Portanto, iremos agora conhecer como as diversas formas de radiação, já discutidas anteriormente, são coletadas pelos satélites e outros equipamentos, a letra D – Sensores, da Figura 1.

SENSORES

Nos capítulos anteriores nós aprendemos alguns dos conceitos fundamentais do SR. Estudou-se os primeiros três componentes deste processo: a fonte de energia, interação da energia com a atmosfera, e interação da energia com a superfície (alvos). Neste capítulo será examinado em maior detalhe, as características de plataformas para o sensoriamento remoto e sensores, assim como, os dados que eles coletam. Para que um sensor possa coletar e registrar a energia refletida ou emitida por um objeto ou superfície, ele tem que estar instalado em uma plataforma estável à distância do objeto ou da superfície que esteja sendo observada. Plataformas de sensores remotos podem estar situadas no solo, em uma aeronave ou balão ou numa plataforma ao redor da Terra (satélite). (Figura 18). Sensores baseados no solo são usados para registrarem freqüentemente informação detalhada sobre a superfície que pode ser comparada com informação coletada a bordo de aeronaves ou sensores a bordo de satélites. Em alguns casos, esta informação de plataformas terrestres tem sido usada para caracterizar melhor o objeto que está sendo imageado por outros sensores, em plataformas mais altas, tornando possível entender melhor a informação na imagem. Sensores podem ser colocados em uma escada de mão, andaime, torres ou colhedeiros de frutas, etc. Plataformas aéreas são principalmente aeronaves de asas estáveis, embora helicópteros sejam ocasionalmente usados. Aeronaves freqüentemente coletam dados e imagens muito detalhadas e facilitam a obtenção de dados virtualmente, em qualquer parte da superfície da Terra a qualquer hora. No espaço, o sensoriamento remoto às vezes utiliza nave espacial ("Space Shuttle") ou, mais

comumente, satélites. Satélites são objetos que revolvem ao redor de outro objeto - no caso, da Terra. Por exemplo, a lua é um satélite natural, enquanto que satélites artificiais incluem plataformas lançadas para sensoriamento remoto, comunicação, e telemetria (localização e navegação, como, por exemplo, o Sistema de Posicionamento por Satélite - GPS). Por causa de suas órbitas, satélites permitem cobertura repetitiva da superfície da Terra em base continuada. Custo é freqüentemente um fator significativo na escolha das várias opções de plataforma.

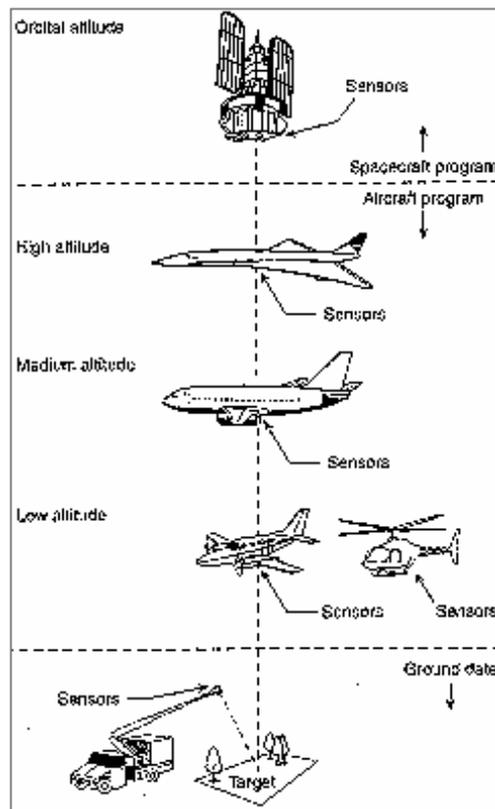


Figura 18. Diferentes níveis de coleta de dados em SR. O nível orbital é hoje o mais usado, mas os demais níveis são importantes para calibração dos dados.

Características dos Satélites: Órbitas e Faixa Coberta no Solo

Embora plataformas terrestres e a bordo de aeronaves podem ser usadas, os satélites provêm a maioria das imagens de sensoriamento remoto usadas hoje. Satélites têm várias características especiais que os tornam particularmente úteis para o sensoriamento remoto da superfície da Terra. O caminho seguido por um satélite é chamado de sua órbita. Satélites são projetados em órbitas específicas para atender às características e objetivo do(s) sensor(es) que eles levam. A seleção da órbita pode variar em termos de altitude (altura sobre a superfície da Terra), orientação e rotação em relação à Terra. Satélites em altitudes muito altas, que observam a mesma

porção da superfície da Terra continuamente são de órbita geostacionária. Estes satélites geostacionários situam-se em altitudes de aproximadamente 36.000 quilômetros, circundando à mesma velocidade da rotação da Terra, assim eles parecem estacionários, em relação à superfície da Terra. Isto permite a esses satélites observarem e coletarem informação continuamente de áreas específicas. Satélites de comunicações e de observação do tempo (satélites de aplicação meteorológica) têm comumente este tipo de órbita. Devido à alta altitude, satélites de órbita geostacionária podem monitorar o tempo e padrões de nuvens de todo um hemisfério da Terra de uma só vez.

As órbitas de muitas plataformas são projetadas para seguirem uma órbita (basicamente norte-sul) que, junto com a rotação da Terra, (oeste-leste), permitem cobrir a maior parte da superfície da Terra durante um certo período de tempo. Estas órbitas são **quase-polares**, assim denominadas devido à inclinação da órbita em relação à linha que une os pólos Norte e Sul. Muitas destas órbitas de satélite são também sol-síncronas o que permite que elas cubram as diversas áreas da terra à aproximadamente mesma hora local do dia chamada hora solar local. A uma latitude determinada, a posição do sol no céu será a mesma quando o satélite passar diretamente sobre o local (nadir) dentro da mesma estação. Isto assegura iluminação consistente mesmo quando se adquire imagens em uma estação específica durante anos sucessivos, ou sobre uma área particular durante uma série de dias. Este é um fator importante para o monitoramento de mudanças entre imagens ou para a mosaicagem de imagens adjacentes uma vez, que elas não têm que ser corrigidas para condições de iluminação diferentes. A maioria das plataformas de satélite em sensoriamento remoto hoje, são em órbitas quase-polares o que indica que os satélites viajam em direção ao norte em um lado da Terra e em direção ao sul na segunda metade de sua órbita. São chamadas de órbitas ascendentes e descendentes, respectivamente. Se a órbita é também sol-síncrona, a passagem ascendente é provável de ficar do lado sombreado da Terra enquanto a passagem descendente é do lado iluminado pelo sol. Sensores que registram a energia solar refletida só imageam a superfície nas passagens descendentes, quando a iluminação solar está disponível. Sensores ativos que provêm a sua própria iluminação ou sensores passivos que registram radiação emitida (por exemplo, térmica) podem também imagear a superfície em passagens ascendentes. Quando um satélite revolve ao redor da Terra, o sensor "vê" uma certa porção da superfície da Terra.

A área imageada na superfície é chamada de "faixa de cobertura da órbita" ("path" ou "swath"). A faixa de cobertura de imageamento para sensores espaciais (satélites) geralmente varia entre dezenas a centenas de quilômetros de largura. Com o deslocamento das órbitas do satélite ao redor da Terra; de polo a polo, parece que o satélite está se deslocando para o oeste devido ao fato

da Terra estar girando (de oeste para leste) embaixo dele. Este movimento aparente permite que a órbita do satélite cubra uma área nova a cada passagem sucessiva. A órbita do satélite e a rotação da Terra em conjunto permitem completar a cobertura total da superfície da Terra, depois de um ciclo completo de órbitas. Um ciclo de órbita será completado quando o satélite repassa seu caminho, passando diretamente em cima do mesmo ponto na superfície da Terra abaixo do satélite (chamado nadir) por uma segunda vez. A duração exata de um ciclo orbital variará com cada satélite. O intervalo de tempo requerido para um satélite completar seu ciclo de órbita não é igual ao "período de revisita". Sensores direcionáveis permitem reduzir o tempo de "revisita". O período de revisita é uma consideração importante para várias aplicações de monitoramento, especialmente quando um imageamento freqüente é requerido (por exemplo, para monitorar a expansão de um derramamento de óleo, ou a extensão de inundação). Em órbitas quase-polares, áreas situadas em altas latitudes serão imageadas mais freqüentemente que a zona equatorial devido ao aumento da sobreposição das faixas de cobertura das órbitas adjacentes uma vez que as órbitas são mais próximas à medida que se aproximam dos pólos.

Resolução Espacial, Tamanho do Pixel, e Escala

Para alguns instrumentos de sensoriamento remoto, a distância entre o objeto a ser imageado e a plataforma, tem um papel importante para determinar o nível de detalhe da informação obtida e a área total imageada pelo sensor. Sensores a bordo de plataformas distantes dos objetos, tipicamente observam uma área maior, mas não podem prover grande detalhe dos objetos imageados. O detalhe discernível em uma imagem é dependente da resolução espacial do sensor e se refere ao menor tamanho de objetos possível de ser detectado. Resolução espacial de sensor passivo (nós examinaremos o caso especial de sensor ativo de microondas depois) depende principalmente do Campo Instantâneo de Visão deles (IFOV). O IFOV é o cone angular de visibilidade do sensor e determina a área na superfície da Terra que é "vista" a uma determinada altitude em um momento particular. O tamanho da área vista é determinado multiplicando-se o IFOV pela distância do solo até o sensor. Esta área no solo é chamada de elemento de resolução e determina a resolução espacial máxima do sensor. Para um objeto homogêneo a ser detectado, seu tamanho geralmente tem que ser igual ou maior que o elemento de resolução. Se o objeto é menor que ele, pode não ser detectável uma vez que o brilho médio de todos os objetos no elemento de resolução é o que será registrado. Porém, objetos menores podem as vezes ser detectáveis se a reflectância deles dominar dentro de um elemento de resolução particular e nesse caso, pode ocorrer a detecção ao nível de sub-*pixel*. *Pixels* de imagem normalmente são quadrados e representam uma certa área em uma imagem.

A palavra *pixel* é derivada do termo em inglês “picture element” (elemento de foto). Um exemplo comum de *pixels* pequenos pode ser observado em um monitor de computador ou na tela de televisão. As imagens nestas telas não são “sólidas”, mas sim compostas por milhares de pontos muito pequenos chamados *pixels*, que vistos à distância nos dão a impressão de formarem uma imagem sólida. É importante distinguir entre tamanho do *pixel* e resolução espacial - eles não são intercambiáveis. Se um sensor tem uma resolução espacial de 20 metros e uma imagem daquele sensor é exibida com resolução total, i.e., sem degradação da imagem, cada pixel representa uma área de 20m x 20m no solo. Neste caso o tamanho do *pixel* e a resolução são o mesmo. Porém, é possível exibir uma imagem com um tamanho de *pixel* diferente da resolução. Muitos cartazes ou *posters* de imagens de satélite da Terra têm o tamanho dos *pixels* calculados para representar áreas maiores, embora a resolução espacial original do sensor que gerou a imagem permaneça a mesma. Imagens em que só objetos grandes são visíveis são ditas de resolução grossa ou baixa. Em imagens de resolução alta ou fina, podem ser detectados objetos pequenos. Sensores militares, por exemplo, são projetados para “verem” o máximo de detalhe possível, e têm, portanto, resolução muito boa. Satélites comerciais provêm imagem com resoluções que variam de alguns metros a vários quilômetros (Figura 19). Falando de modo geral, quanto melhor a resolução, menor a área de terreno que pode ser vista. A razão entre a distância em uma imagem ou mapa, para distância real no terreno é chamada *Escala*. Se você tivesse um mapa com uma Escala de 1:100.000, um objeto de 1cm de tamanho no mapa seria de fato um objeto de 100.000cm ou de 1km de tamanho no solo. Mapas ou imagens com relações “mapa-para-solo pequenas” são chamados de pequena escala (por exemplo, 1:100.000), e os com relações maiores (por exemplo 1:5.000) são chamados de grande escala.

Resolução Espectral

Resolução espectral descreve a habilidade de um sensor definir intervalos de comprimento de onda estreitos. Quanto melhor a resolução espectral, mais estreita será o intervalo de comprimento de onda para um canal particular ou faixa. Filmes branco e preto registram comprimentos de onda que se estendem ao longo de toda a porção visível do espectro eletromagnético. Sua resolução espectral é bastante grossa (ou baixa), os vários comprimentos de onda, do espectro visível, não são distinguidos individualmente e a reflectância média (integrada) na porção visível inteira é registrada. Filmes coloridos também são sensíveis à energia refletida da porção visível do espectro, mas têm resolução espectral mais alta, uma vez que eles são sensíveis individualmente à energia refletida no azul, verde, e no vermelho do espectro. (Figura 20). Assim, podem representar as diferentes feições de várias cores com base na reflectância delas em cada comprimento de onda distinto da luz visível. Muitos sistemas de sensoriamento remoto registram

energia ao longo de intervalos separados de comprimentos de onda com várias resoluções espectrais distintas. Desta forma, são chamados sensores multi-espectrais e serão descritos nas seções seguintes. Atualmente existem sistemas bastante avançados em termos multi-espectrais são os chamados sensores hiperespectrais, que cobrem centenas de faixas espectrais muito estreitas ao

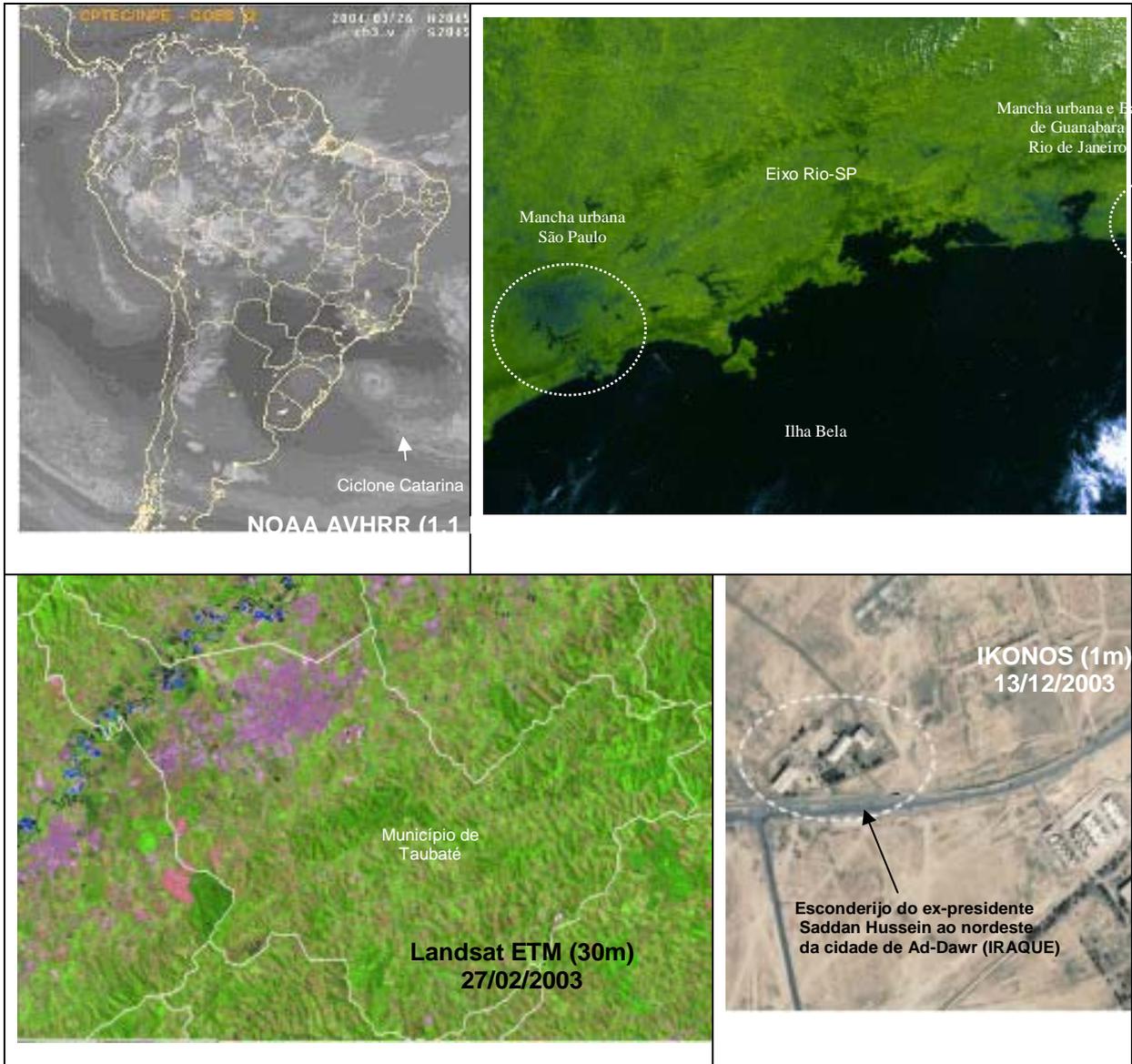


Figura 19. Exemplos de imagens de diferentes resoluções espaciais. Quanto melhor a resolução menor será a área coberta. NOAA AVHRR (1,1km), CBERS WFI (260m), Landsat TM (30m), e IKONOS (1m).

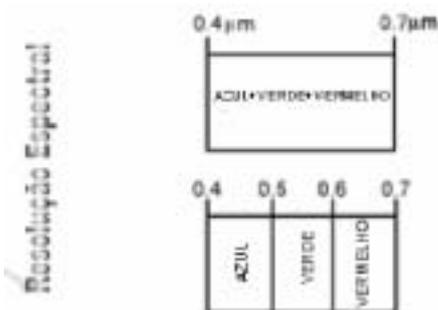


Figura 20. Resolução espectral. O filme colorido tem uma resolução espectral três vezes melhor do que o filme preto e branco. Hoje temos sensores hiperespectrais com centenas de bandas o que aumenta o poder discriminatório desses sensores.

Fonte: Tutorial de Sensoriamento Remoto do CCRS (2004).

longo do visível, infravermelho próximo, e porções do infravermelho médio do espectro eletromagnético. A resolução espectral alta facilita a discriminação entre objetos diferentes com base nas suas respostas espectrais em cada faixa estreita.

Resolução Radiométrica

Enquanto o arranjo de pixels descreve a estrutura de espaço de uma imagem, as características radiométricas descrevem o conteúdo real de informação em uma imagem. Toda vez que uma imagem é adquirida por um filme ou por um sensor, sua sensibilidade à energia eletromagnética determina a resolução radiométrica. A resolução radiométrica de um sistema de imageamento descreve sua habilidade em separar diferenças muito pequenas de energia. Quanto melhor a resolução radiométrica de um sensor, mais sensível a pequenas diferenças de energia refletida ou emitida ele será. A resolução radiométrica final do sensor após geração da imagem corresponde ao número de bits usados para codificar números em formato binário. Cada bit registra um expoente da potência de 2 (por exemplo 1 bit = $2^1 = 2$). O número máximo de níveis de brilho (ou de cinza) disponível depende do número de bits usados para representar a energia registrada. Assim, se um sensor usasse 8 bits para registrar os dados, haveria $2^8 = 256$ valores digitais disponíveis, variando de 0 a 255. Porém, se só 4 bits fossem usados, então só $2^4 = 16$ valores variando de 0 a 15 estariam disponíveis. Assim, a resolução radiométrica seria muito menor. Geralmente são exibidos dados de imagem em um intervalo de tons de cinza, onde o negro representa um número digital, de valor igual a 0 e o branco representa o valor máximo (por exemplo, 255 em dados de 8 bits). Comparando uma imagem de 2 bits com uma imagem de 8 bits, nós poderíamos ver que há uma grande diferença no nível de detalhe em função das suas resoluções radiométricas. (Figura 21).

Resolução = 2 bits = $2^2 = 4$ níveis de cinzaResolução = 8 bits = $2^8 = 256$ níveis de cinza

Figura 21. Ilustração do efeito da resolução radiométrica na aparência dos dados. É óbvio que enxergamos mais detalhes (mais tons) na imagem de 8 bits (à direita).

Fonte: Tutorial de Sensoriamento Remoto do CCRS (2004)

Resolução Temporal

Além de resolução espacial, espectral, e radiométrica, o conceito de resolução temporal é também importante em um sistema de sensoriamento remoto. O período de revisita de um sensor de satélite normalmente é de vários dias. Então, a resolução temporal absoluta de um sistema de sensoriamento remoto imageador é igual ao período entre a primeira e a segunda tomada de imagem da mesma área com o mesmo ângulo. Porém, por causa da sobreposição entre órbitas adjacentes para a maioria dos satélites e devido ao aumento da sobreposição à medida que a latitude cresce, algumas áreas da Terra são imageadas mais frequentemente. Também, alguns sistemas de satélite são capazes de apontar o sensor para imagear a mesma área entre diferentes passagens do satélite separadas por períodos de um a cinco dias. Assim, a resolução temporal atual de um sensor depende de uma variedade de fatores, inclusive a capacidade do satélite/sensor, a sobreposição de cobertura da órbita, e latitude. A habilidade de se obter imagens da mesma área da Terra em períodos diferentes de tempo é um dos mais importantes elementos em aplicações de dados de sensoriamento remoto. Características espectrais de feições podem mudar com o passar do tempo e estas mudanças podem ser detectadas obtendo-se e comparando-se imagens multi-temporais. Por exemplo, durante a estação de crescimento, a maioria das espécies vegetais está em um estado contínuo de mudança e nossa habilidade para monitorar essas mudanças sutis usando sensoriamento remoto é função de quando e quão frequentemente nós obtemos imagens da área monitorada. Pelo imageamento em base contínua, em diversos momentos nós somos capazes de

monitorar as mudanças que acontecem na superfície da Terra, sejam elas de natureza natural (como mudanças na cobertura natural da vegetação ou inundação) ou induzidas pelo homem (como desenvolvimento urbano ou desmatamento). O fator tempo para o imageamento é importante quando:

- nuvens persistentes limitam a possibilidade de visões claras da superfície da Terra (freqüentemente nas regiões tropicais);
- fenômenos de vida curta (inundações, vazamentos de óleo, etc.);
- quando imageamentos freqüentes para comparações multi-temporais (por exemplo a expansão de uma doença de floresta de um ano para o outro);
- separação entre feições ou alvos similares, quando mudam através do tempo, exemplo, trigo / milho.

Tendo visto os principais parâmetros para caracterização dos sensores, examina-se agora alguns sensores principais.

SATÉLITES

Em função do sistema de coleta de dados os sensores podem ser ativos ou passivos. Os sensores passivos medem a radiação refletida ou emitida por um objeto enquanto que os sensores ativos emitem radiação própria e medem o retorno dessa radiação após ser modificada pelos objetos, exemplos são os sistemas de radar, hoje amplamente utilizados em plataformas aéreas e orbitais. Outro exemplo é o LIDAR, a base de laser que tem um potencial enorme para o estudo de ecossistemas terrestres. Nesse curso, trataremos dos principais sensores passivos a bordo de satélites.

Landsat

O primeiro satélite destinado ao estudo dos recursos naturais, denominado Landsat 1, foi lançado pelos Estados Unidos em 1972. Este satélite carregava um sensor chamado MSS ou Multispectral Scanner Subsystem. Este sensor possuía 4 bandas, sendo uma na região do verde, outra na região do vermelho e duas outras bandas no infravermelho próximo. O MSS possuía uma resolução espacial de 80 x 80 m. Atualmente o valor destes dados é apenas histórico, de suma importância para estudos de mudanças de longo prazo. O Landsat 4 foi lançado em 1982 e adicionalmente ao MSS, ele carregava ainda outro sensor, então denominado Thematic Mapper, ou TM. Devido a problemas com os componentes elétricos, o Landsat 4 foi desativado logo após o lançamento e substituído pelo Landsat 5. O Landsat 5 também levava a bordo o MSS e o TM.

O Landsat-7 ETM⁺, lançado em abril de 1999 é o sétimo de uma série de satélites para monitoramento e observação da Terra. Este satélite possui as mesmas características de seus

antecessores, mas com algumas inovações: uma banda pancromática com resolução espacial de 15 metros; um canal infravermelho termal com resolução espacial de 60 metros e uma calibração radiométrica absoluta de 5 % “on board”.

A plataforma do Landsat-7 ETM⁺ opera a uma altitude de 705 Km, em órbita quase-polar, sol-síncrona, imageando uma faixa de 185Km com repetição a cada 16 dias. O sensor ativo a bordo é o *Enhanced Thematic Mapper* (ETM⁺), com 6 bandas ópticas (azul, verde, vermelho, Tabelas 1 e 2).

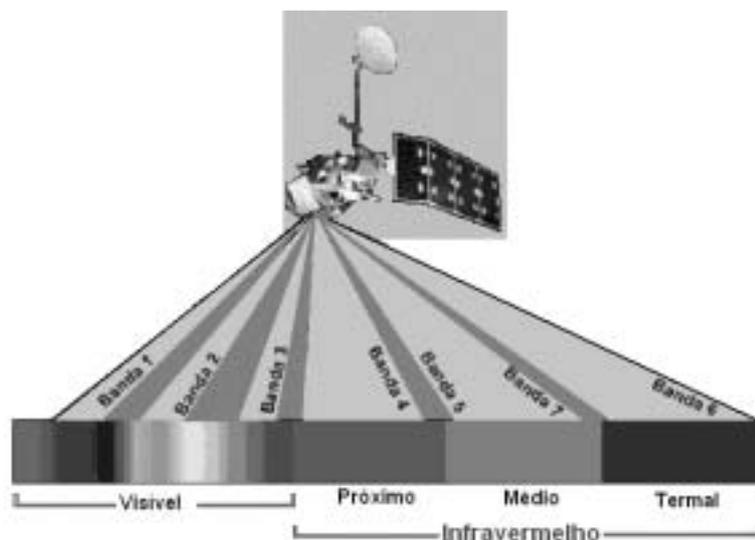


Figura 22. Faixas espectrais do Landsat sensor ETM⁺.

Tabela 1. Faixas espectrais das bandas do sensor TM do Landsat.

Banda	Faixa espectral
1	0,45 a 0,52 μm - azul
2	0,52 a 0,60 μm - verde
3	0,63 a 0,69 μm - vermelho
4	0,76 a 0,90 μm - infravermelho próximo
5	1,55 a 1,75 μm - infravermelho médio
6	10,4 a 12,5 μm - infravermelho termal
7	2,08 a 2,35 μm - infravermelho distante

Tabela 2. Características do ETM⁺.

LANDSAT ETM ⁺	
RESOLUÇÃO NO SOLO	30 m, 60m (termal) e 15m (pan)
DIMENSÃO DE UMA CENA	185 km x 185 km

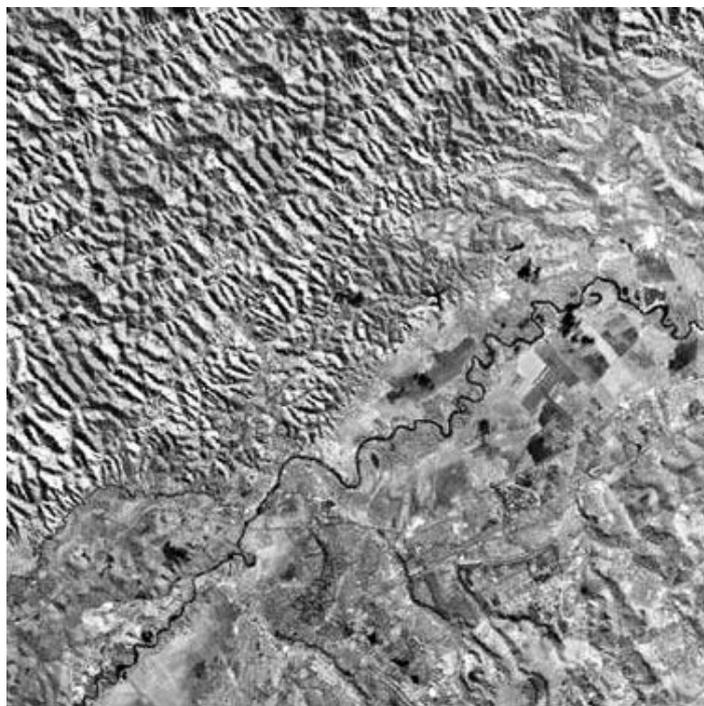


Figura 23. Composição colorida de 3 bandas da imagem Landsat 7 ETM⁺, reamostrada para 15 m de resolução espacial da região de São José dos Campos, SP.

infravermelho próximo e duas no infravermelho médio; 0,45-2,35 μm), de resolução espacial de 30 metros, uma outra banda no infravermelho termal 10,4-12,5 μm , com 60 metros de resolução, e uma terceira banda pancromática (0,52-0,90 μm) com 15 metros de resolução. (Figuras 22 e 23,

Spot

O programa francês **SPOT** já lançou cinco satélites que possuem dois sensores idênticos, um ao lado do outro e que podem ser operados independentemente. Com o **SPOT** é possível a observação estereoscópica de dados através da orientação programável dos sensores, que pode ser usada para produção de cartas topográficas e modelo digital do terreno. A revisita pode não estar restrita a 26 dias do ciclo de revolução, mas diminui na dependência da latitude geográfica e da programação flexível da visada (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Características do SPOT.

	SPOT 4 - MULTIESPECTRAL	SPOT 4 - PANCROMÁTICO
RESOLUÇÃO NO SOLO	20 m	10m
DIMENSÃO DE UMA CENA	60 Km x 60 Km	60 Km x 60 Km
PROPRIEDADES ESPECTRAIS	3 canais espectrais visíveis + infravermelho	1 canal pancromático

Tabela 4. Sensores e suas faixas espectrais do SPOT-1,2,3 e 4.

Sensores	Bandas Espectrais	Resolução
HRV-XS : Multiespectral 3 bandas no SPOT 1-2-3	Banda-1: 0.50 ~ 0.59 μm Verde	20m
	Banda 2: 0.61 ~ 0.68 μm Vermelho	
	Banda 3: 0.79 ~ 0.89 μm Infravermelho Próximo	
	Banda 4: 1.58 ~ 1.75 μm Infravermelho Médio	
HRVIR-XI : Multiespectral 4 bandas no SPOT-4		
HRV-PAN : Pancromático no SPOT 1-2-3	Banda única: 0.51 ~ 0.73 μm Visível (menos Azul) Dados comprimidos a bordo (DPCM $\frac{3}{4}$)	10m
HRVIR-M : Monoespectral no SPOT 4	Banda única: 0,61 ~ 0,68 μm igual à Banda 2 Dados comprimidos a bordo (DPCM $\frac{3}{4}$)	

O SPOT-5 lançado em 2003 apresenta um sensor de baixa resolução espacial e alta resolução temporal, denominado *Vegetation* e um sensor com uma banda pancromática de alta resolução espacial 2,5m, com faixa larga de cobertura (60km x 60km). Imagens multiespectrais (coloridas) apresentam a resolução de 5m. A *SPOT Image*, firma que comercializa os produtos

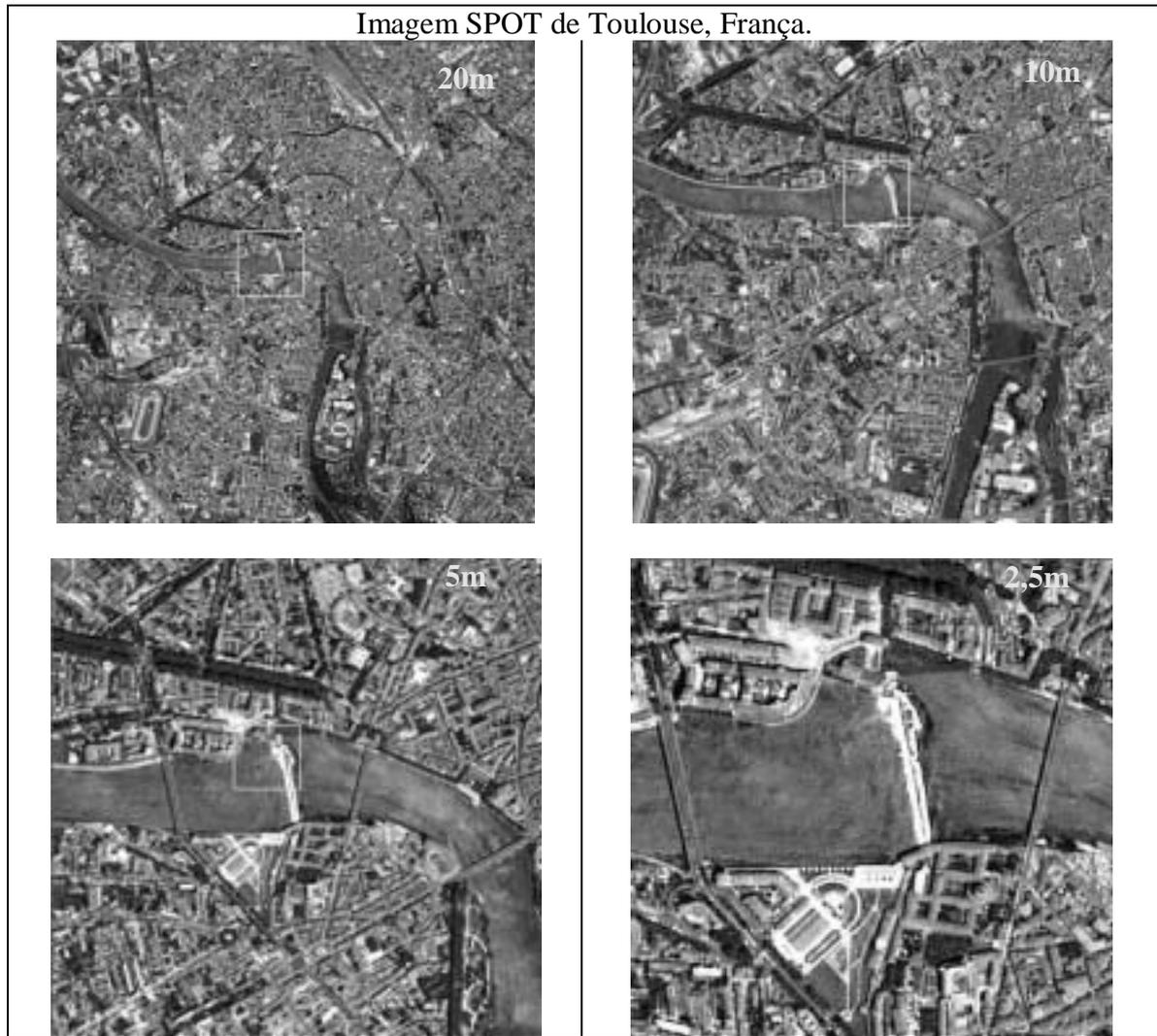


Figura 24. Imagens SPOT com diferentes resoluções. (© das imagens da SPOT Image).

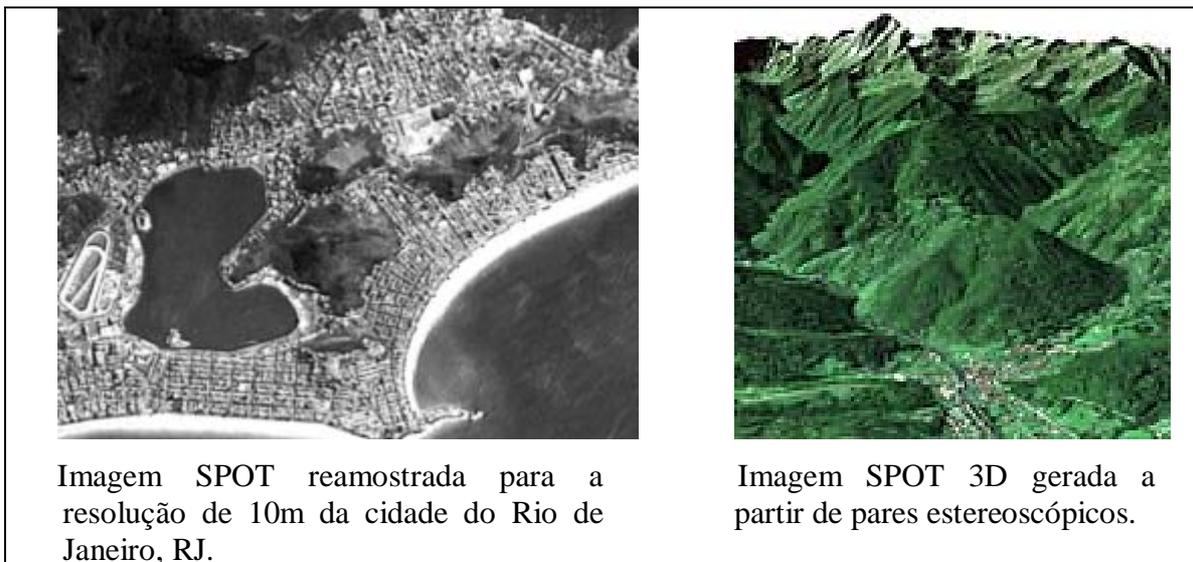


Figura 25. Exemplos de produtos SPOT.

SPOT, está atualmente comercializando dados de Modelos Numéricos de Terreno (MNT ou DEM) por km². As Figuras 24 e 25 apresentam diversos produtos SPOT.

Cbers

O satélite CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*) é fruto da cooperação entre Brasil e China. Ele foi lançado em 1999, projetado para cobertura global contendo câmaras para observação óptica e um sistema de coleta de dados ambientais. Ele possui três tipos de sistemas sensores de coleta de dados de sensoriamento remoto para recursos naturais: o sensor CCD, o IR-MSS e o WFI.

Imageador de Largo Campo de Visada (WFI - Wide Field Imager)

O WFI, sensor sob a responsabilidade brasileira, imageia uma faixa de 890 km de largura, fornecendo uma visão sinótica com resolução espacial de 260 x 260 m. Em cerca de 5 dias obtém-se uma cobertura completa do globo em duas bandas espectrais centradas em: 0,66μm (vermelho) e 0,83μm (infravermelho próximo). (Tabela 5 e Figura 26).

Tabela 5. Características do ETM+.

Características do WFI	
Bandas Espectrais	0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infra-vermelho)
Campo de visada	60°
Resolução espacial	260 x 260 m
Largura da faixa imageada	890 km
Resolução temporal	5 dias

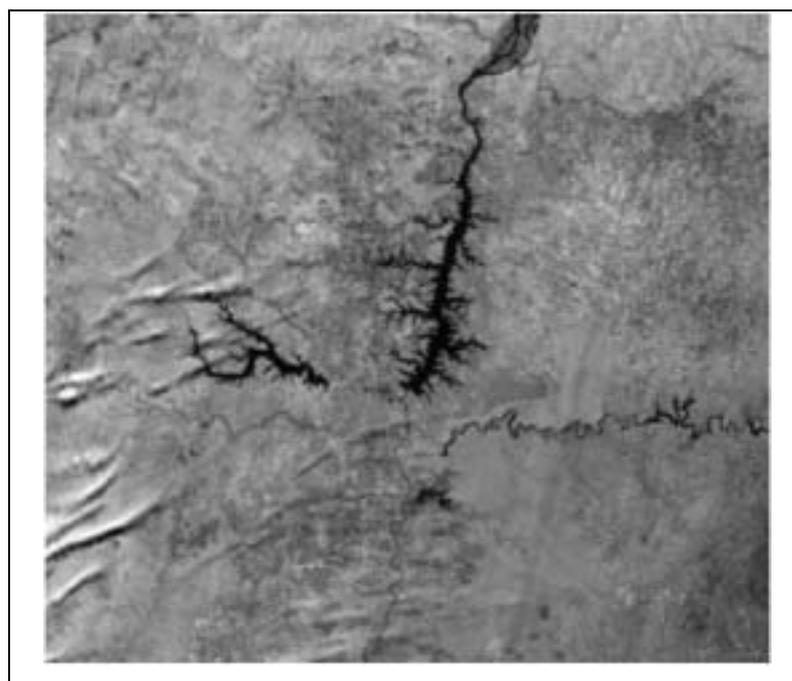


Figura 26. Imagem CBERS WFI da Represa de Itaipu, PR.

Câmara CCD de alta resolução (CCD - High Resolution CCD Camera)

A câmara CCD fornece imagens de uma faixa de 113km de largura, com uma resolução de 20m. Esta câmara tem capacidade de orientar seu campo de visada dentro de ± 32 graus, possibilitando a obtenção de imagens estereoscópicas de uma certa região, similar ao satélite SPOT.

Além disso, qualquer fenômeno detectado pelo WFI pode ser focalizado pela Câmara CCD através do apontamento apropriado de seu campo de visada, no máximo a cada 3 dias.

Opera em 5 faixas espectrais incluindo uma faixa pancromática de 0,51 a 0,73 μm . As duas faixas espectrais do WFI são também empregadas na câmara CCD para permitir a combinação dos dados obtidos pelas duas câmaras. São necessários 26 dias para uma cobertura completa da Terra com a câmara CCD. (Tabela 6 e Figura 27).

Tabela 6. Características do Sensor CCD do CBERS 1 e 2.

Características do Instrumento Imageador CCD	
Bandas espectrais	0,51-0,73 μm (pan) 0,45-0,52 μm (azul) 0,52-0,59 μm (verde) 0,63-0,69 μm (vermelho) 0,77-0,89 μm (infravermelho próximo)
Campo de Visada	8,3°
Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Capacidade de apontamento do espelho	$\pm 32^\circ$
Resolução temporal	26 dias com visada vertical (3 dias com visada lateral)

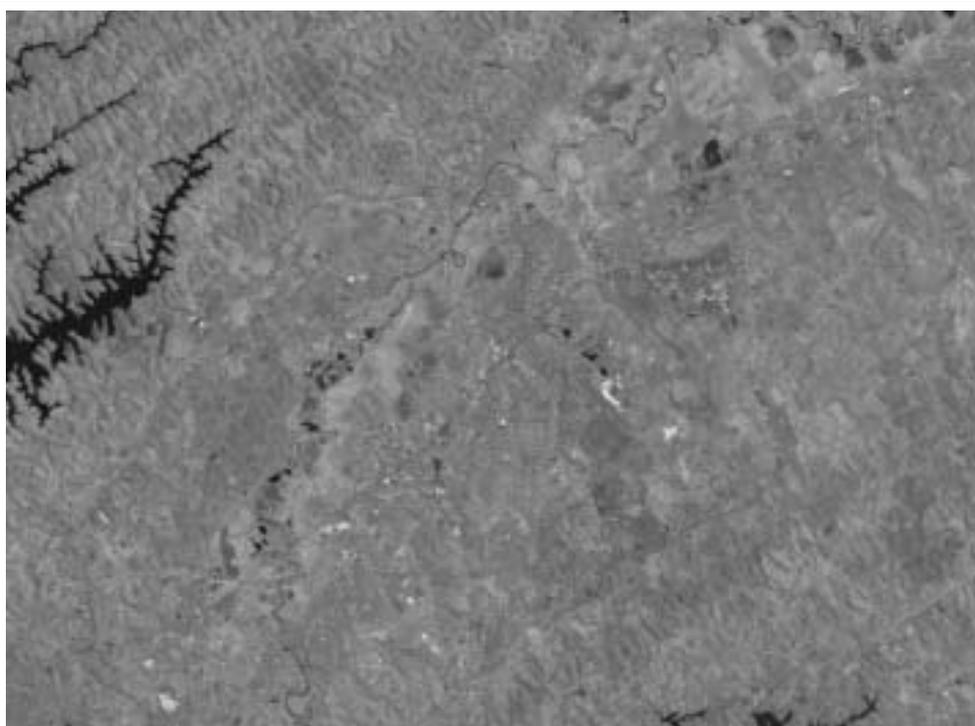


Figura 27. Imagem CCD do CBERS-2 de São José dos Campos, SP obtida em 30/01/2004. Ressalta-se parte da represa de Paraibuna a oeste e cavas de areia no município de Jacareí (manchas escuras ao longo do rio Paraíba).

Câmara de varredura no infravermelho (IR-MSS - Infrared Multispectral Scanner)

A câmara de varredura IR-MSS tem 4 faixas espectrais e estende o espectro de observação do CBERS até o infravermelho termal. O IR-MSS produz imagens de uma faixa de 120 km de largura com uma resolução de 80 m (160 m na banda termal) (Tabela 7). Em 26 dias obtém-se uma cobertura completa da Terra que pode ser correlacionada com aquela obtida através da câmara CCD.

Tabela 7. Características do Sensor IRMSS do CBERS.

Características do Instrumento Imageador IRMSS:	
Bandas espectrais	0,50 - 1,10 μm (pancromática) 1,55 - 1,75 μm (infravermelho médio) 2,08 - 2,35 μm (infravermelho médio) 10,40 - 12,50 μm (infravermelho termal)
Campo de Visada	8.8°
Resolução espacial	80 x 80 m (160 x 160 m termal)
Largura da faixa imageada	120 km
Resolução temporal	26 dias

Em outubro de 2003 foi lançado o CBERS-2 com as mesmas características do CBERS-1, porém com imagens de muito melhor qualidade. A inovação mais importante que o CBERS trouxe foi o sistema de distribuição de dados para o Brasil. A disponibilização gratuita dos dados (http://www.dgi.inpe.br/pedidos_CBERS/licenca-CBERS.htm) aumentou de forma significativa o uso de seus dados e essa atitude tem atraído a atenção mundial dos distribuidores de dados de satélites, como uma nova abordagem a ser refletida.

Outros Satélites

Existe uma outra família de sensores orbitais que cobrem áreas mais extensas da superfície terrestre, mas que possui uma resolução espacial bem menor, normalmente maior do que 1 km. Estes sensores são denominados sensores globais, ou regionais, e têm órbitas muito mais altas do que as dos satélites discutidos até o momento. Estes sensores são capazes de mapear grandes porções da superfície terrestre em curtos períodos de tempo, desde 30 minutos até alguns dias. O GOES é um satélite meteorológico utilizado para previsão climática, o SeaWiFS é usado no monitoramento de oceanos e de ventos marítimos e o NOAA AVHRR é usado no mapeamento dos recursos naturais em geral.

Vários países, como os Estados Unidos, Canadá, Japão, Alemanha, França, China, Brasil, Índia e Rússia têm ou terão seus próprios sensores orbitais. Estes satélites, coletivamente,

permitirão a coleta de dados em novas bandas espectrais, com diversas resoluções espaciais e espectrais e, também, uma maior frequência de coleta de dados. Por exemplo, nos Estados Unidos satélites muito pequenos estão sendo construídos para atender a comunidade agrícola no monitoramento do crescimento de culturas e na maximização da produtividade agrícola.

O **Ikonos** foi o primeiro satélite comercial a produzir imagens orbitais com resolução espacial de um metro. Este satélite foi lançado em setembro de 1999 e tornou-se operacional em janeiro de 2000. O desenvolvimento do Ikonos é fruto da decisão do governo americano em transferir tecnologia, até então exclusivamente militar, para a iniciativa privada a partir de 1994.

O sensor a bordo do Ikonos possui cinco bandas, sendo uma pancromática, três no visível e uma no infravermelho próximo. Sua resolução espacial é de 1m (pancromática) e 4 m (multiespectral). Sua frequência de observação varia de acordo com o ângulo de visada, que pode variar entre 60° e 90°, fazendo assim com que sua resolução temporal varie entre 2 e 3 dias.

Em função da sua alta resolução espacial, existem inúmeras aplicações para dados do Ikonos, que vão desde a gestão do espaço geográfico complexo, até a análise pontual de ambientes. De forma mais específica, as imagens produzidas por este satélite podem ser utilizadas para a elaboração de mapas urbanos, cadastro, mapeamento de uso e cobertura do solo em grandes escalas e aplicações integradas com SIG's (por exemplo: redes, telecomunicações e planejamento).

O primeiro satélite comercial de sensoriamento remoto a produzir imagens com resolução espacial abaixo de 1 m é o chamado **QuickBird**. Este satélite foi lançado em outubro de 2001 e gerou suas primeiras imagens no final daquele ano.

Da mesma forma que o Ikonos, o QuickBird permite inúmeras aplicações, principalmente com relação a trabalhos em áreas urbanas, que exigem maior nível de detalhe. Por exemplo, mapeamento de ruas, mapeamento do uso e cobertura do solo em escalas grandes e aplicações integradas com SIG. As aplicações desses satélites de alta resolução são usados em substituição às fotografias aéreas de média escala. Para cadastro de imóveis urbanos eles ainda são limitados em termos de resolução espacial.

RECEPÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos pelos sensores são em geral transmitidos diretamente para uma estação receptora que rastreia o satélite desde que ele aponta no horizonte a partir de 5° de altura. Outras vezes os dados são armazenados no próprio satélite e descarregados quando passam por uma estação receptora terrestre. Esse procedimento passa a ser mais usado à medida que gravadores de estado sólido passam a ser mais confiáveis e disponíveis. No Brasil, as estações de recepção de dados de satélites de alta resolução são operadas pelo INPE e localizam-se em Cuiabá, MT, que é o

centro geodésico da América do Sul, maximizando dessa forma, a área de cobertura dessas estações. (Figura 28).

Uma vez gravados em fitas magnéticas de alta densidade de gravação, são gerados *quick looks* para uma avaliação da qualidade dos dados, principalmente percentagem de cobertura de nuvens. Essas fitas são transportadas para a Estação Terrestre de Tratamento de Dados que no caso

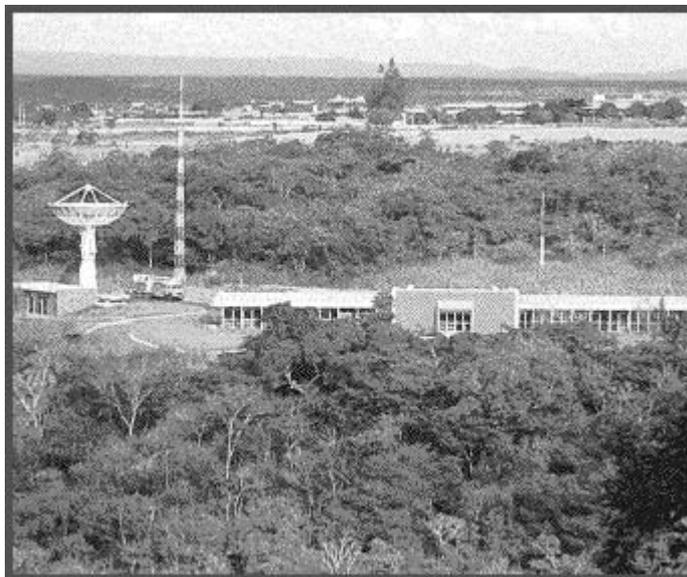


Figura 28. Estação Terrena de Rastreo e Comando de Satélite em Cuiabá, estado do Mato Grosso, Brasil. Essas antenas são de grande diâmetro e com capacidade de rastreo.

do Brasil fica nas instalações do INPE, em Cachoeira Paulista, SP. Nesta estação os dados são calibrados em termos de radiometria (calibração dos sensores devido diferenças entre os diversos detetores usados em um mesmo sensor e/ou degradação dos mesmos ao longo do tempo). São também feitas correções geométricas do sistema nesses dados com base nos dados de efemérides do satélite e/ou correções adicionais com base em pontos de controle em função do nível de correção solicitado. Nessa estação, então são gerados os produtos para os usuários finais, ou seja, os intérpretes e analistas que extraem informações temáticas a partir dos dados originais. Esses produtos são basicamente imagens em papel, em diversas escalas ou disponibilizados na forma digital, atualmente, em CD-ROMs contendo dados no formato Geotiff que já vêm com informações das coordenadas geográficas dos dados e podem ser lidos por diversos *softwares* projetados para trabalharem com imagens.

INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Interpretação de Imagens

Nesta seção examinaremos como os dados digitais são convertidos em imagem fotográfica e como podemos interpretar a imagem gerada.

A radiação emitida pelo Sol é refletida pela Terra e é coletada pelo sensor a bordo do satélite. No sensor, a radiação refletida é convertida em um número digital ou ND, em função da intensidade desta reflexão (brilho). Quanto maior for o brilho, ou mais refletiva for uma feição, mais altos serão os valores digitais registrados.

O sensor Landsat TM, com 8 bits de resolução radiométrica, possui valores de NDs compreendidos entre 0 e 255. Um *pixel* com ND = 240 representa uma reflectância ou emitância (no caso da banda termal, banda 6 do TM) muito alta, enquanto um *pixel* com valor ND =10 representa reflectância ou emitância muito baixa.

Um computador tem a capacidade de analisar estes números e extrair informações sobre a superfície terrestre, mas a visualização da imagem, como se fosse uma fotografia, é comumente usada para a análise visual. De fato, a análise visual é muito importante quando as características típicas do objeto que queremos analisar for espacial e não puramente espectral. Em outras palavras quando a forma for mais importante do que a cor ou tonalidade. Para criar uma imagem, um programa de computador deve associar uma escala de níveis de cinza para cada valor de ND em cada *pixel*. Valores altos de ND receberão tonalidades claras, enquanto valores baixos receberão tonalidades escuras, como mostrado na Figura 29.

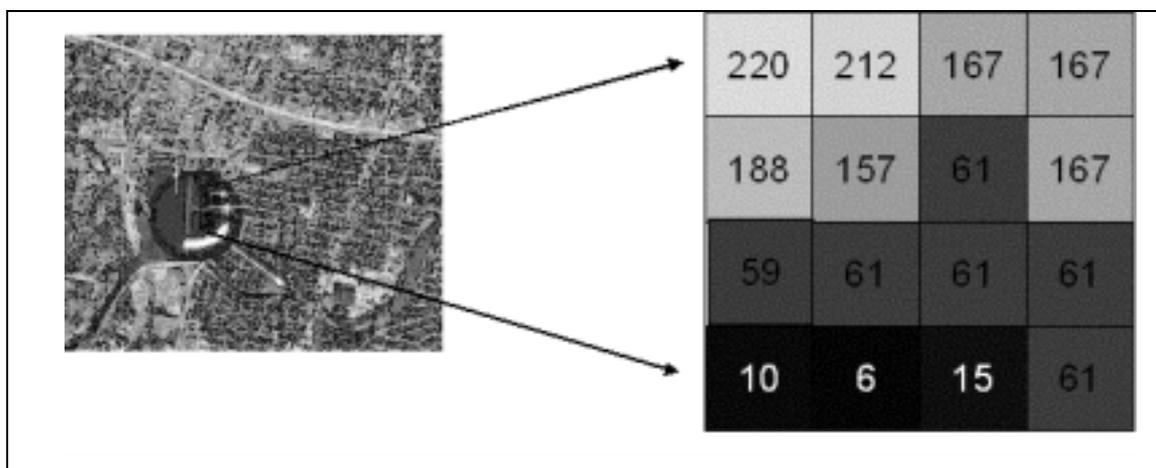


Figura 29. A imagem é formada por *pixels*, que é o cruzamento da linha e coluna e tem coordenadas (linha - coluna ou longitude - latitude quando a imagem é georreferenciada) e um valor de brilho (ND) associado com sua reflectância ou emitância. Quanto maior o ND mais claro o *pixel*. Observar que visualmente não se distingue o ND=59 do ND=61, mas para o computador são totalmente distintos.

Interpretação visual

Existem duas abordagens principais para a interpretação de uma imagem ou fotografia: digital e visual. No sensoriamento remoto o procedimento mais comum inclui a integração destas duas formas.

A interpretação de uma imagem permite a extração de informações sobre os objetos existentes na cena, sem necessidade de se ir ao local. (Figura 30). A visão panorâmica das imagens cobre uma grande área e permite melhor visualização de fenômenos e dos alvos a serem analisados. A interpretação visual é uma metodologia prática e mais barata e permite ainda uma análise temporal do ambiente.

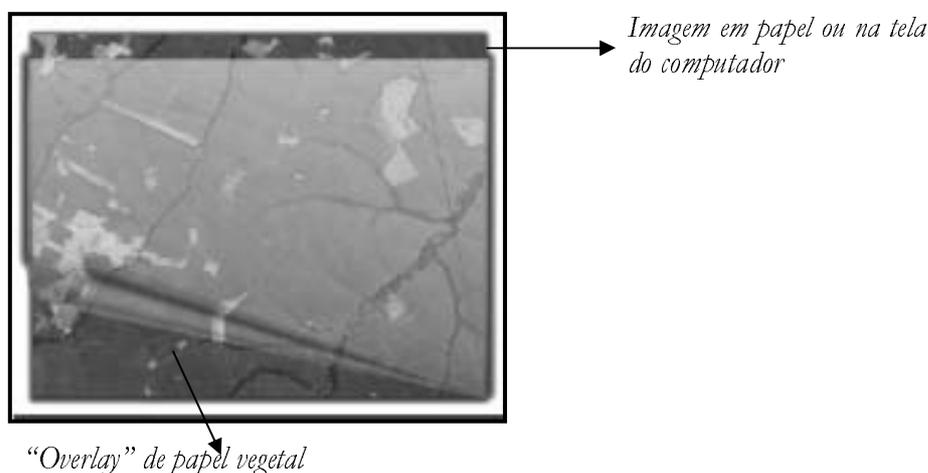


Figura 30. Interpretação visual de imagens de satélite. Com o *overlay* (papel transparente) sobreposto à imagem, traça-se as principais feições (áreas homogêneas) que conhecimento da área podem ser identificadas e rotuladas (e.g. área desmatada).

A legenda é um dos primeiros passos a serem realizados em função do objetivo do trabalho e do sensor a ser utilizado. Por exemplo, com o Landsat TM, que possui resolução de 30m pode-se realizar:

- *mapeamento e monitoramento dos remanescentes de Mata;*
- *avaliação do grau de fragmentação;*
- *estudos de expansão urbana;*
- *análise dos agentes do desmatamento.*

Com o NOAA AVHRR de resolução de 4 km, pode-se realizar:

- *mapeamento e monitoramento dos grandes biomas brasileiros (Floresta Tropical, Cerrado e Caatinga);*
- *avaliação do grau de vigor da vegetação (variação fenológica sazonal);*
- *estudos de expansão urbana em larga escala;*
- *processos de antropização na Amazônia.*

Na interpretação propriamente dita é fundamental se rever as características do sensor utilizado e a resposta espectral dos alvos a serem analisados. A Figura 31 ilustra a resposta da vegetação, água e solos com a indicação da localização das bandas do Landsat TM.

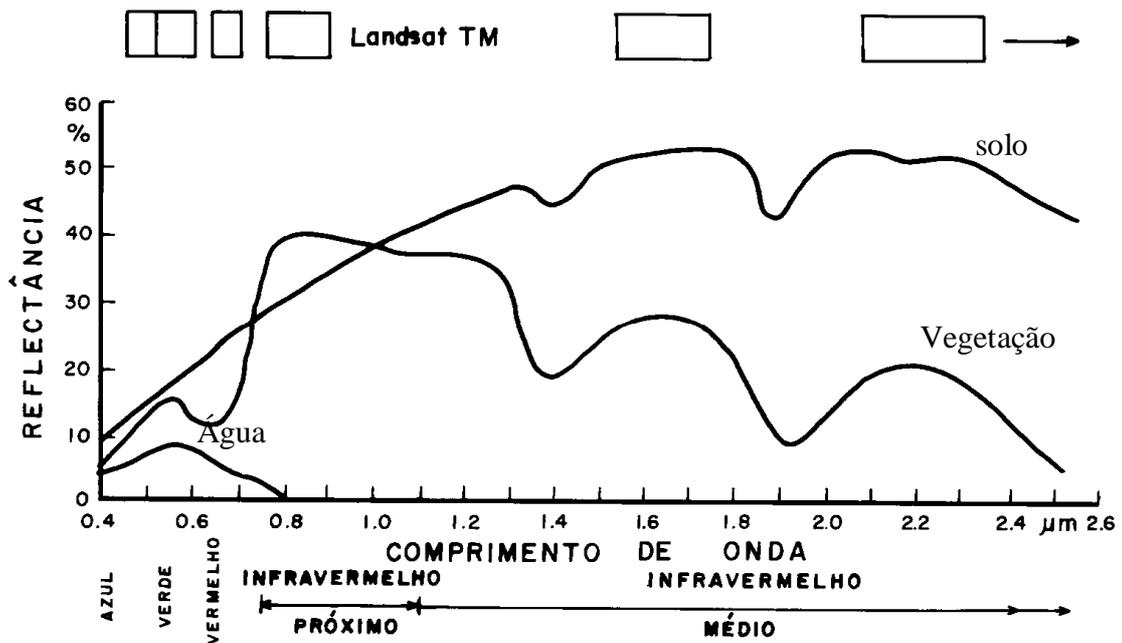


Figura 31. Resposta espectral do solo, vegetação e água versus as bandas do Landsat TM. Notar que as bandas foram estrategicamente escolhidas para maximizar a distinção entre as principais feições terrestres.

A fotointerpretação pode ser facilitada, se as imagens a serem submetidas à análise visual forem previamente processadas de modo a realçar aspectos relevantes da cena. É o que chamamos de pré-processamento da imagem.

Numa seqüência lógica, a interpretação de imagens orbitais deve passar pelos seguintes passos:

- Definição do objetivo da interpretação;
- Definição do nível de detalhe (regional, local...);
- Definição da legenda;
- Escolha do produto a ser utilizado;
- Definição e adaptação da Legenda em função do sensor a ser utilizado;
- Obtenção da imagem orbital (em papel ou digital). No Brasil, o INPE é o grande provedor de dados, embora, hoje várias empresas estão também no mercado. Pode-se encontrar na Internet os contatos;
- Preparação de uma base cartográfica no “*overlay*” (em papel, Figura 30);
- Registro e contraste da imagem (digital). Fase de pré-processamento que garante que a imagem esteja numa projeção cartográfica conhecida e que tenha coordenadas para localização das feições no campo. O contraste permite um realce da imagem para ressaltar os alvos de interesse;

- Ajustar a base à imagem em cada quadrante (em papel). A conformação local da imagem com um sistema de projeção funciona melhor para pequenas áreas;
- Ajustar a escala da imagem na tela para a escala de mapeamento definida quando a interpretação for diretamente no monitor do computador (delineamento digital). Esta prática está cada vez mais freqüente;
- Interpretação da cena;
- Delimitação das feições em um papel vegetal ou diretamente na tela do computador (Figura 30);
- Ajuste do “*overlay*” na mesa digitalizadora e digitalização dos polígonos, quando o trabalho for feito utilizando papel apenas;
- Geração do mapa temático através da designação de uma classe para cada polígono.

A análise quantitativa, por sua vez, depende de informações fornecidas pelo analista. Os dois métodos, portanto, dependem do conhecimento do usuário sobre os objetos pesquisados: seu comportamento espectral, sua fenologia, estrutura, no caso da vegetação, a composição mineralógica e a textura, no caso dos solos e rochas, etc.

A **interpretação visual** é mais eficiente no “reconhecimento de padrões” de objetos caracterizados por distintos arranjos espaciais.

Por exemplo, pode-se facilmente distinguir entre uma cidade e um campo preparado para cultivo através de interpretação visual de imagens porque o olho humano integra informação de forma, textura, contexto, etc. O mesmo não ocorre numa interpretação digital convencional. Uma comparação entre a interpretação visual e a digital pode ser apreciada na Tabela 8.

Tabela 8. Fotointerpretação vs. análise quantitativa de imagens.

Fotointerpretação (analista humano)	Análise Quantitativa (amplamente baseada em algoritmos implementados em computadores)
A análise é feita em escalas muito grandes em relação ao tamanho do pixel.	A análise é feita ao nível do pixel.
As estimativas de área são imprecisas.	Estimativas precisas de área são possíveis desde que os pixels estejam classificados corretamente.
Limitada a análise simultânea de apenas três faixas espectrais.	Permite analisar simultaneamente tantas faixas espectrais quantas existirem nos dados originais.
Permite a distinção de um número limitado de níveis de brilho ou níveis de cinza (no máximo 16).	Permite fazer a análise quantitativa de diferentes ranges de níveis digitais (imagens de 8 bits, 16 bits e 32 bits).
Permite a extração de informação espacial para ser utilizada de modo qualitativo.	Existem poucos algoritmos operacionais que permitam a extração de informações espaciais.
Permite fácil determinação de formas.	Determinação de forma envolve operações complexas e nem sempre bem sucedidas.

Fonte: Richards (1993).

A fase final do processo de interpretação visual é a avaliação da precisão de classificação. Para isto, pode-se, por exemplo, identificar uma série de pontos a serem visitados no campo para confirmar ou refutar a interpretação, ou pode-se ainda, utilizar dados a partir de mapas de referência ou de outros sensores.

A interpretação propriamente dita, é baseada em características das imagens que podem ser descritas conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Características das imagens no processo de fotointerpretação.

Características da Imagem	Definição
Tonalidade/Cor	Representa o registro da radiação que foi refletida ou emitida pelos objetos da superfície. Tonalidades claras estão associadas a área de elevada radiação, emitância ou retro-espalhamento em imagens de sensores óticos, termais e ativos de microondas, respectivamente. Tonalidades escuras indicam áreas de baixa radiação ou emitância em imagens óticas e termais, e áreas de sombra ou de reflexão especular em sensores ativos de microondas. As cores mais claras e mais escuras, e suas combinações são derivadas da combinação de tonalidade das bandas individuais.
Textura	A textura de imagem representa a frequência de mudanças tonais por unidade de área dentro de uma dada região. A textura da imagem depende da resolução espacial do sistema, do processo de imageamento e da escala da imagem utilizada. O significado da textura também varia com o tipo de imagem utilizada.
Padrão	O padrão define o arranjo espacial dos objetos na cena. O significado do padrão também depende do tipo de imagens analisadas, de sua escala e sua resolução espacial. Um exemplo de padrão regular é um pomar ou um conjunto de casas de um bairro planejado.
Localização	A localização representa a posição relativa do objeto ou feição dentro da cena. Muitas vezes, em imagens TM-Landsat não se pode identificar diretamente o rio, mas pela localização da mata galeria, e levando em conta o conhecimento de que esta acompanha o curso do rio, este pode ser mapeado, indiretamente.
Forma	Forma refere-se aos contornos que as feições assumem em uma imagem ou fotografia e pode ser utilizada para descrever a natureza do objeto. Por exemplo, rios, estradas e campos agrícolas têm formas distintas e podem ser facilmente distinguidos uns dos outros. Representa a configuração espacial do objeto. Esta forma pode ser observada em duas dimensões em imagens que não possuem o atributo de estereoscopia, ou em três dimensões em imagens estereoscópicas (visão tri-dimensional).
Sombra	A sombra dos objetos pode ser utilizada como fonte de informação sobre limites de unidades geológicas, dimensões relativas de escarpas ou árvores. O significado das sombras também é afetado pelo tipo de sensor utilizado, pela resolução espacial do sensor, pela escala da imagem e pela posição do Sol. É especialmente importante quando se trabalha em áreas montanhosas, uma vez que deverá ocorrer um grande número de <i>pixels</i> sombreados ao longo da imagem.
Tamanho	O tamanho dos objetos é função da resolução do sistema e da escala das imagens. O tamanho do objeto pode ajudar em sua identificação.

(Adaptado de Curran (1985)).

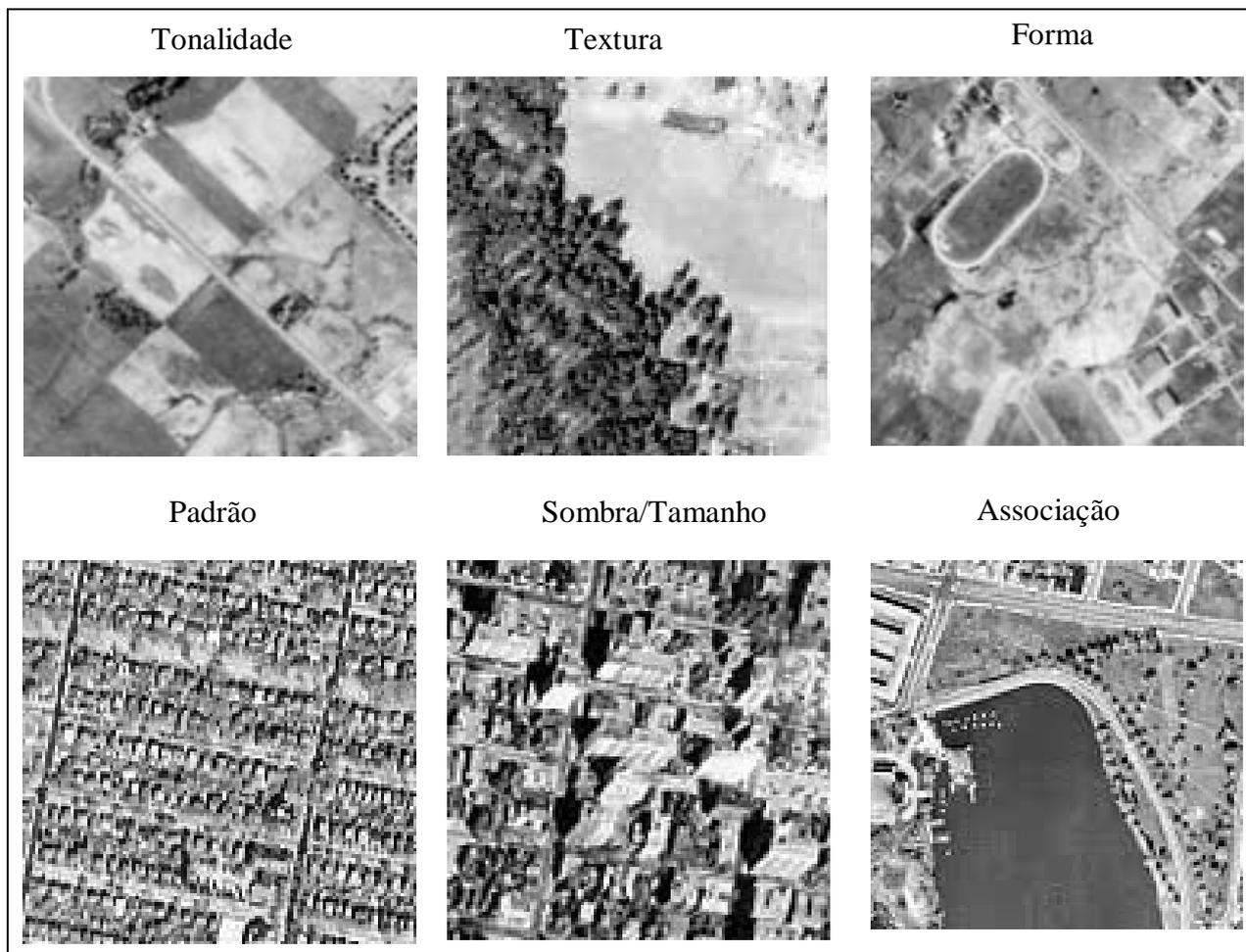


Figura 32. Características ou parâmetros associados à fotointerpretação ou interpretação visual de imagens.

A Figura 32 apresenta imagens que correspondem às características descritas na Tabela 9.

Uma forma simplificada de se interpretar dados é através da construção de uma “chave de interpretação”. A Figura 33 sugere a estrutura de uma “chave de interpretação” utilizada para avaliar os impactos do incêndio florestal de Roraima a partir de imagens videográficas.

Este é um exemplo de uma chave bastante genérica. Quanto mais específica for a chave, menos subjetiva se torna a interpretação das informações. Observe que o significado das cores é dependente do produto utilizado e da combinação de filtros utilizada. Esta chave não tem validade geral, colocada aqui somente para ilustrar como usar sistematicamente os diversos parâmetros da fotointerpretação.

Composição colorida

A análise visual de imagens em bandas individuais é muito trabalhosa. Portanto, uma forma de examinar imagens de satélite é através da combinação de bandas individuais das imagens em

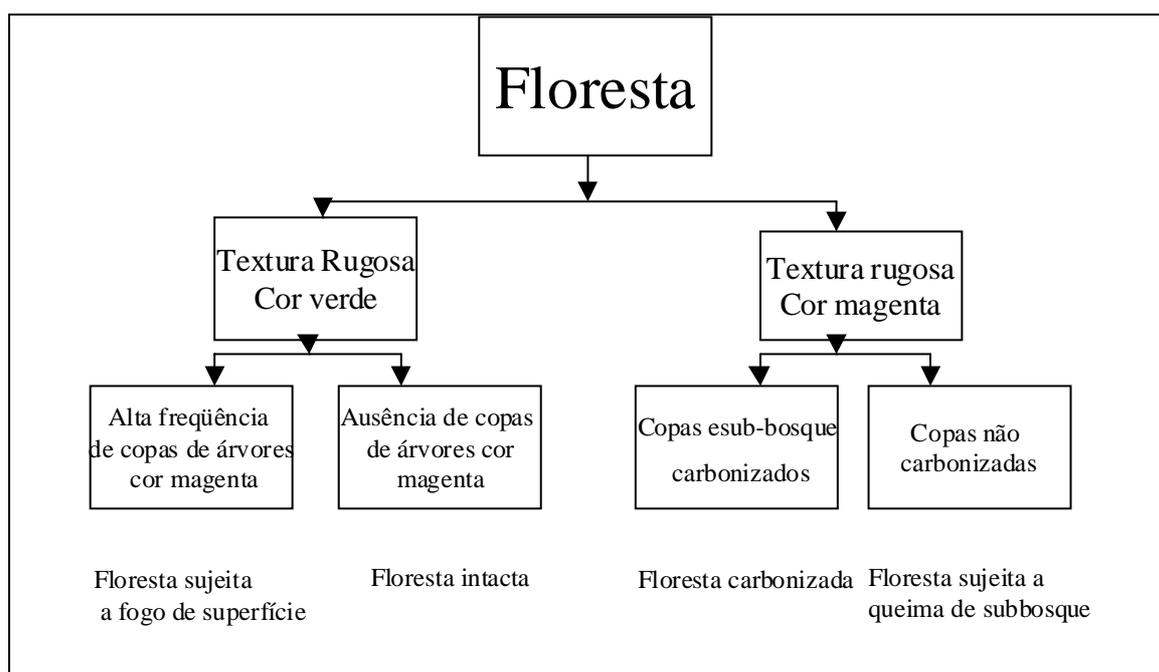


Figura 33. Exemplo de uma “chave de interpretação” para o mapeamento de áreas sujeitas a diferentes tipos de danos causados pelo incêndio florestal de Roraima de 1998.

composições de bandas, corriqueiramente denominadas “composições coloridas”. Este tipo de imagem permite realçar as feições através das cores.

Combinando três bandas de dados em uma única imagem, a composição colorida contém mais informação sobre as feições terrestres do que uma única imagem de uma única banda. Ela torna o trabalho de interpretação mais fácil porque o olho humano pode distinguir melhor cores do que tonalidades de cinza. A Figura 34 é uma composição colorida de uma imagem CBERS da região do Vale do Paraíba, mostrando as áreas urbanas na cor magenta. A vegetação densa é mostrada em tonalidades de verde escuro, enquanto áreas de pastagem aparecem em verde claro.

Os monitores de computador utilizam três canhões coloridos, um azul, um verde e outro vermelho. Estes canhões “pintam” a tela com diferentes intensidades de azul, verde e vermelho, de acordo com o brilho de cada *pixel* para produzir as imagens que vemos. Como os monitores têm somente três canhões de cores, nós somente podemos combinar três bandas espectrais de cada vez para fazer as composições coloridas. Entretanto, podemos usar qualquer banda espectral e associar com qualquer canhão do monitor do computador e observar que cada combinação irá ressaltar certas feições da superfície. Usando-se comprimentos de onda do infravermelho é possível se obter informação que não se poderia perceber com nossos olhos.

Interpretação Digital de Imagens

A interpretação de dados de sensoriamento remoto, através do uso de computadores, requer o conhecimento dos padrões da radiação refletida e emitida pelas várias feições da superfície

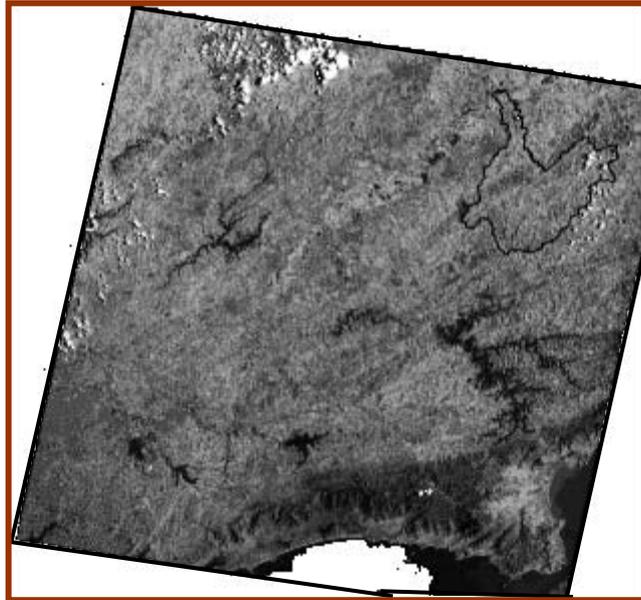


Figura 34. Composição colorida da imagem CBERS-2, obtida em 30/01/2004 das bandas do sensor CCD-2, bandas 2 (faixa espectral do verde) exibida na cor azul; 3 (faixa espectral do vermelho) exibida na cor vermelha; e, 4 (faixa do infravermelho próximo) exibida na cor verde. Todas as bandas sofreram um realce de contraste.

terrestre. Como já vimos, diferentes feições apresentam diferentes padrões de refletância e emitância. A forma como a energia é refletida em cada banda forma um padrão chamado de resposta espectral. Os sistemas computacionais de processamento de imagem auxiliam na tarefa de analisar as imagens e identificar as diferenças em reflectância e, dessa forma, permitir a identificação das feições terrestres.

Programas computacionais apropriados facilitam em muito a identificação e análise de séries complexas de dados espectrais, em muitos casos de regiões vastas e complexas. (Figura 35).

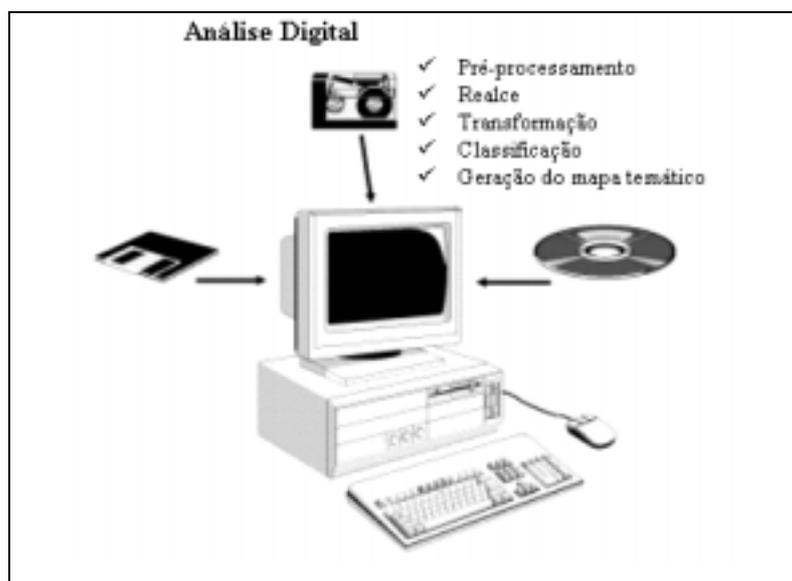


Figura 35. A interpretação digital ou classificação de imagens requer o uso de um computador com pacotes de software especialmente desenvolvidos para análise de imagens.

O principal *software* que usamos para analisar imagens no Brasil é o SPRING – Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas, desenvolvido pelo INPE (Câmara et al., 1996). Os dados (imagens) entram principalmente através de um CD-ROM e saem na forma de um mapa temático correspondente à imagem classificada. Temos também um sistema bastante flexível para análise de imagens disponibilizado de forma gratuita pela Internet que é o MultiSpec (<http://dynamo.ecn.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>).

O SPRING ou outro sistema qualquer de análise de imagem envolve várias fases de pré-processamento como o realce das imagens para análise prévia da imagem para seleção de amostras, transformações envolvendo filtragem ou correções da imagem, registro da imagem, i.e. tornar a imagem conforme a uma projeção cartográfica definida, etc. A fase final será a classificação propriamente dita e geração do mapa temático.

Existem diversos algoritmos para classificação de imagens. Uma distinção importante é se o classificador analisa *pixels* individuais da imagem nas diversas bandas ou analisa regiões. Classificadores por regiões são mais recentes e mais promissores, pois imitam de certa forma, a análise humana. Outra distinção importante é se o classificador é supervisionado ou não-supervisionado. No primeiro caso o analista tem conhecimento prévio da área e instrui o computador através de amostras de treinamento como cada classe se comporta espectralmente e o classificador classifica o restante da imagem com base no que ele “aprendeu” com o analista. No caso do não-supervisionado, o computador separa a imagem em classes espectrais distintas, por conta própria, através de um algoritmo de agrupamento, e, posteriormente, o analista decide a qual classe informacional pertence cada classe espectral que o computador identificou. O analista pode controlar o número de classes que deseja e qual a regra e número de iterações que ele deseja do classificador. Existem ainda, regras de decisão usadas em diversos classificadores que podem ser probabilísticas ou determinísticas. Ou seja, você instrui o computador e solicita a ele que classifique os *pixels* de uma imagem que sejam exatamente iguais às amostras de treinamento (determinístico) ou que ele classifique os *pixels* que sejam mais prováveis de pertencerem a uma determinada classe de treinamento, mas não necessariamente iguais às áreas de treinamento. A Figura 36 ilustra a regra de decisão de um classificador probabilístico mais tradicionalmente utilizado em SR, conhecido como classificador de máxima verossimilhança ou simplesmente MAXVER.

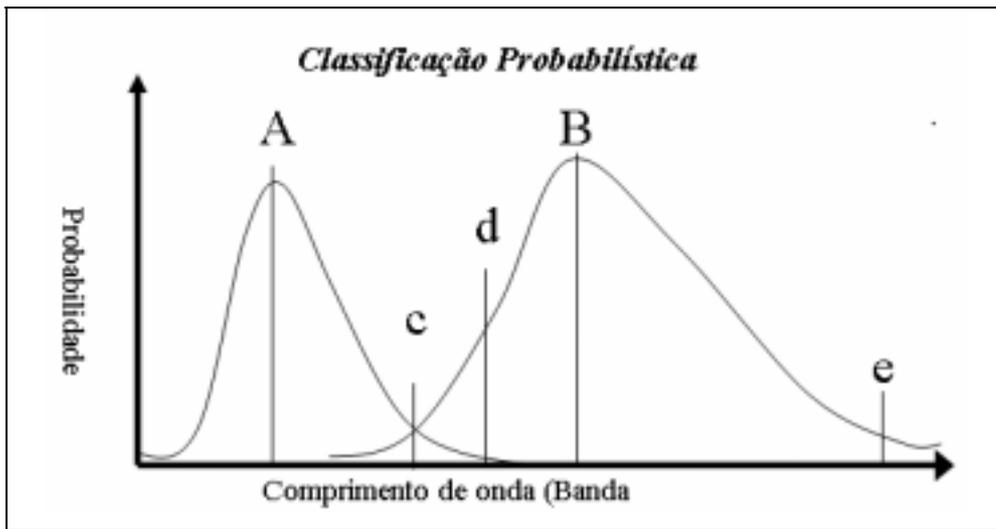


Figura 36. Ilustração da regra de decisão do MAXVER. As classes **A** e **B** têm distribuição gaussiana (curvas normais). O ponto **d** pertence à classe **B** (maior probabilidade, o ponto **c** poderá pertencer a qualquer uma das classes e, embora, o ponto **e** tenha maior probabilidade de pertencer à classe **B** do que a **A**, a probabilidade é tão pequena que é melhor classificar o ponto **e** como não pertencente a nenhuma das classes.

Com o aparecimento das imagens de alta resolução (e.g. SPOT, IKONOS, etc.) vários novos algoritmos de classificação têm sido desenvolvidos usando inteligência artificial, classificadores neurais, regras de decisão *fuzzy*, entre outros.

Após a classificação é gerado um mapa temático, ou seja, o resultado da classificação que no SPRING é gerado pelo módulo SCARTA, esse deve normalmente, ser integrado com diversos outros dados para ampliar ou adicionar valor interpretativo a essa informação. Essa etapa entra então, nos conceitos de Geoprocessamento ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG), conforme ilustrado na Figura 37.

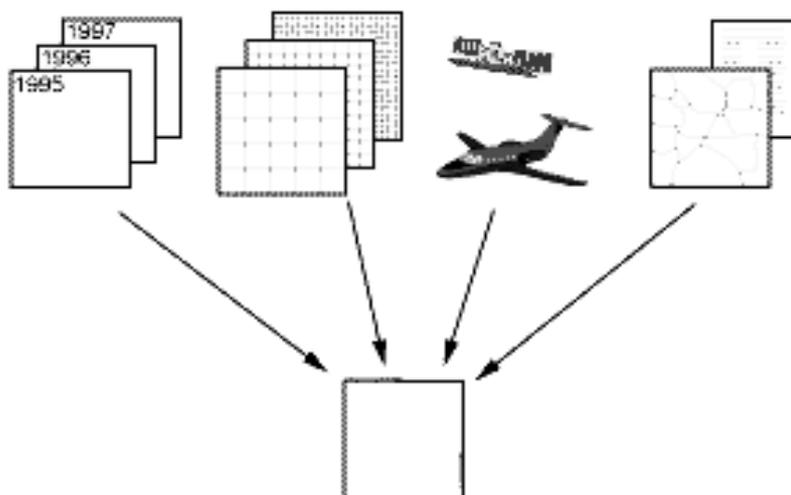


Figura 37. Integração de dados através de SIG. O SPRING também tem essa função e trata tanto dados vetoriais quanto matriciais.

COMENTÁRIOS FINAIS

A leitura desta apostila deve ser complementada com exercícios de aula, à medida que o curso vai sendo desenvolvido e complementada também com leituras adicionais, especialmente com o CD-ROM educacional em **Sensoriamento Remoto: Aplicações para a Preservação, Conservação e Desenvolvimento Sustentável da Amazônia**, do INPE (<http://www.dsr.inpe.br/cdrom/>). Assim como, poderão ser consultadas no *site* http://www.agro.unitau.br/sensor_remoto/ várias outras apostilas, publicações e referências bibliográficas complementares.

CITAÇÃO

Batista, G. T.; Dias, N. W. **Introdução ao sensoriamento remoto e processamento de imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005-04-02. (INPE ePrint sid.inpe.br/ePrint@80/2005/04.01.14.06).

APÊNDICES

Conceito de Processamento Digital

O pré-processamento de imagens antecede normalmente à interpretação dos dados. O mais freqüentemente usado é o esticamento de contraste (Figura A1). Como os satélites são normalmente projetados para imagearem o globo terrestre inteiro (desertos, oceanos, gelo, neve, florestas, etc.) para uma área específica normalmente tem-se que fazer um esticamento de contraste para a imagem ficar visível.

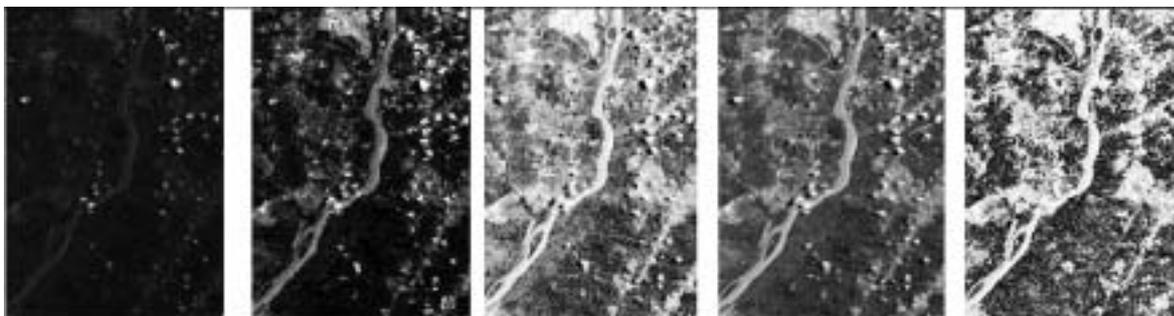


Figura A1. Pré-Processamento: Esticamento de contraste.

O que ocorre no esticamento de contraste é uma mudança (linear no caso) dos valores (ND) menores e maiores que aparecem na cena específica e proporcionalmente nos demais pixels, conforme Figura A2.

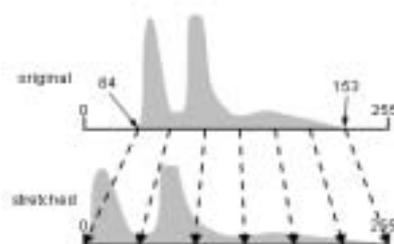


Figura A2. Contraste Linear.

Outras transformações da imagem original comuns no pré-processamento envolvem a “Equalização de Histogramas”, eliminação de Striping (ruído na imagem devido a diferenças de resposta dos detetores no sensor), ou perda de linhas.

Registro de Imagens

O registro envolve a transformação geométrica de uma imagem para se conformar a uma outra imagem da mesma cena, por exemplo, obtida em uma data diferente ou se conformar a um mapa, equivalendo nesse caso, a uma correção geométrica da imagem para corrigir distorções do sistema de imageamento ou para georreferenciar a imagem (adicionar coordenadas aos pixels da imagem). A Figura A3 ilustra esse processo, onde os pontos A1, A2, .. A4 (pontos na imagem) correspondem aos pontos B1, B2, ...B4 (no mapa) e são chamados pontos de controle que permitem se estabelecer uma equação para mapear os pixels da imagem aos pixels correspondentes no mapa.

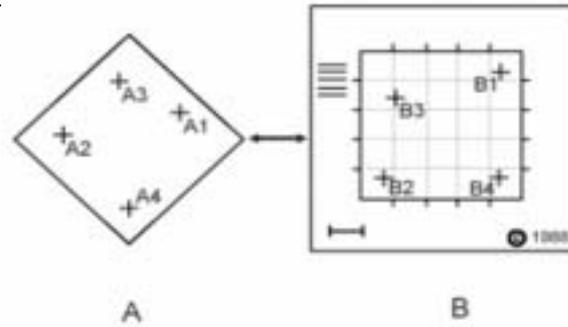
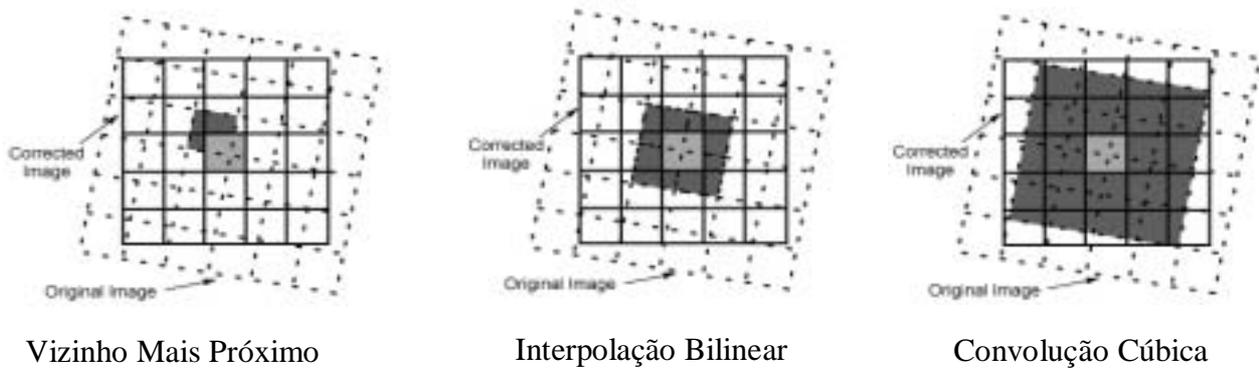


Figura A3. Pontos de controle para georreferenciamento da imagem (A) ao mapa (B).

Para combinar uma imagem de um sensor com uma outra obtida por um sensor com resolução espacial diferente ou mudar o tamanho de uma imagem, ou mesmo mudar a posição de um pixel (registro ou correção geométrica) uma prática comum é a **“Reamostragem”** que pode ser realizada com diferentes opções para definição do novo valor (ND) do pixel, conforme ilustrado na Figura A4.



Vizinho Mais Próximo

Interpolação Bilinear

Convolução Cúbica

Figura A4. Reamostragem.

Outra técnica de pré-processamento é a **“Filtragem”** que envolve a análise de diversos pixels vizinhos para a definição do ND do pixel central, conforme ilustrado na Figura A5.

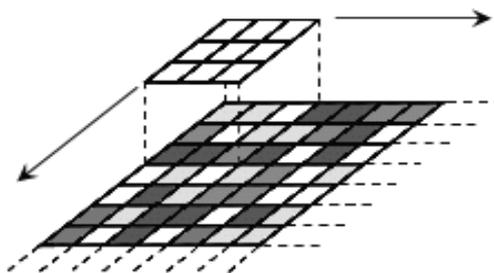


Figura A5. Filtragem.

Várias técnicas envolvendo a **“Transformações de Imagens”** são utilizadas, como **“Subtração de Imagens”** que pode ser útil para detecção temporal de mudanças. (Figura A6).

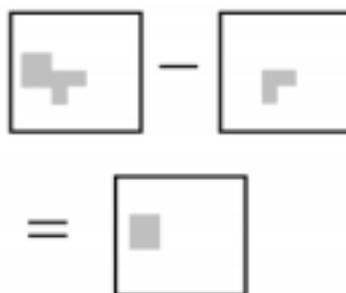


Figura A6. Subtracao de imagens.

Outra transformação comum é de “Principais Componentes” muito usada para redução da dimensionalidade dos dados, sem perder informação relevante. (Figura A7).

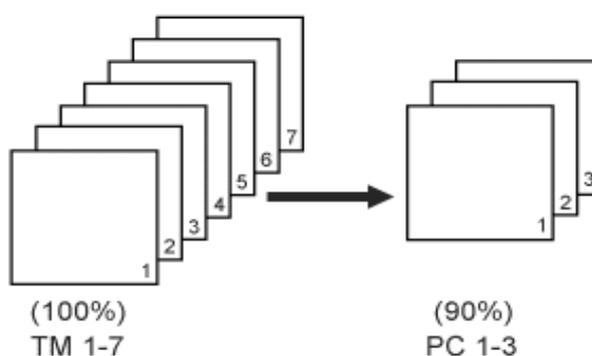


Figura A7. Principais componentes.

Outro exemplo de pré-processamento é a transformação de imagens através da técnica de “Modelo de Mistura” que permite transformar as bandas originais em bandas que têm sentido físico, como, imagens **sombra, vegetação, e solo**. Da mesma forma, diversos índices têm sido utilizados, como por exemplo o NDVI ou IVDN (índice de vegetação) ou o MSAVI que minimiza o efeito do solo na análise da vegetação.

EXERCÍCIOS DISCUTIDOS EM AULA**I) Com base na leitura da apostila e aulas responda:**

1. Explique as diferenças entre a interpretação visual de imagens e a interpretação quantitativa (Interpretação Digital ou Classificação Digital) de imagens.
2. Quais os elementos de “foto-interpretação” utilizados no processo de extração de informações a partir de análise visual de imagens.
3. Quais as fases da “foto-interpretação”.
4. Quais as vantagens e desvantagens das chaves de identificação? Que cuidados devem ser tomados ao utilizar chaves pré-existentes.

II) Exercício de Fotointerpretação

Distribuir uma imagem do Landsat da região de Taubaté, SP, em diferentes bandas e composição colorida. Fazer uma análise geral da imagem (região, localização, sensor, resolução, bandas espectrais, composição colorida, data de aquisição, escala, qualidade (ruído, nuvens, névoa), dados auxiliares (mapas, informação climática, censos agropecuário, etc.)

1. Identificar 4 alvos e descrever como eles aparecem em cada um dos produtos (usar os elementos de interpretação para a descrição)
2. Identificar uma cava de areia inativa e uma ativa e explicar como as identificou
3. Cobrir a legenda dos mapas e explicar como separar (identificar) a banda 3 da banda 5
4. Como apareceria uma área de reflorestamento se a combinação de cores fosse 4R, 5G, 3B?
5. Qual a distância entre o centro de Taubaté e o centro de Pindamonhangaba?
6. Qual o comprimento da pista do aeroporto do BAVEX?

III) Exercício de Avaliação da Exatidão de uma Classificação

Apresentamos um exemplo de Matriz de Erro, ou Matriz de Contingência. Com base nessa matriz, calcular a exatidão global da classificação, exatidão para uma classe específica e os erros de inclusão e omissão na classificação de cada classe. (Obs.: a solução desse exercício depende de orientação em aula).

DADOS CLASSIFICADOS	DADOS DE REFERÊNCIA				TOTAL DA LINHA
	CANA	MILHO	FEIJÃO	BATATA	
CANA					115
MILHO	65	4	22	24	100
FEIJÃO	6	81	5	8	115
BATATA	0	11	85	90	104
TOTAL DA COLUNA	75	103	115	141	434