

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

APOSTILA DE SENSORIAMENTO REMOTO



Area agricultada	Area degradada	Area edificada	Area urbana	Café	Campo sujo
Capoeira	Corpos d'água	Estrada não pavimentada	Estrada pavimentada	Formação rochosa	Fragmento florestal
Pastagem	Reflorestamento	Reservatório	Solo exposto	Várzea	Vegetação rala

Autor: Alexandre Rosa dos Santos

**Alegre
Espírito Santo – Brasil
2013**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO

1.0. Introdução

Existem diversas definições referentes à tecnologia de sensoriamento remoto. Algumas são mais apropriadas que outras quando se olha do ponto de vista do usuário de imagens de satélite. Considerando que o sensoriamento remoto tem suas origens ligada à época de Galileu, em princípio pode-se definir sensoriamento remoto como:

“Tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos, sem contato físico com eles”

Esta definição peca pela amplitude, abrangendo um vasto campo de tecnologias. Por exemplo, um telescópio permite a aquisição de informações sobre objetos (ex: astros) sem que haja qualquer espécie de contato físico com eles. Por conseguinte, um telescópio seria um sensor remoto. Esta definição está muito apegada às origens do sensoriamento remoto, que deve boa parte de sua evolução aos avanços verificados na Astronomia. É interessante reparar, que seguindo a definição proposta, o olho humano também pode ser considerado um sensor remoto.

Entretanto, deseja-se vincular o termo sensoriamento remoto à aquisição de medidas nas quais o ser humano não é parte essencial do processo de detecção e registro dos dados. Neste caso, um telescópio não poderia ser considerado um instrumento sensor, visto que sua função é apenas ampliar a acuidade do observador através de sistemas ópticos. É óbvio concluir que o olho humano também deixa de ser considerado um sensor remoto. No entanto, diversos avanços tecnológicos verificados na óptica dos telescópios permitiram progressos consideráveis nos componentes ópticos dos modernos instrumentos sensores. Deve-se destacar que telescópios espaciais como “Hubble” pertencem à categoria de sensores remotos.

Considerando a restrição apresentada anteriormente, tem-se uma nova proposta para definição do termo:

“Tecnologia que utiliza sensores para extrair informações sobre objetos ou fenômenos, sem que haja contato direto entre eles, e sem que o homem seja parte essencial do processo de aquisição de dados”

Esta definição, mais restritiva, caracteriza-se como instrumento sensor os equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, converte-la em sinal passível de registro e apresenta-lo em forma adequada ao seu processamento. Tal definição permite, ainda, que se observe que a aquisição da informação se dá através da transferência de energia.

Embora mais restritiva, a definição continua ampla no sentido do tipo de

informação que se deseja registrar. É necessário especificar melhor o tipo de energia utilizada na transferência de informação do objeto ao sensor. Sem esta restrição, sismógrafos e sonares (energia acústica) e gravímetros (energia gravitacional) podem ser considerados instrumentos sensores.

Tendo em vista que a energia eletromagnética se propaga no vácuo com a velocidade de 3×10^8 m/s em direção ao sensor, ela se constitui num dos mais importantes campos de força para a atividade de sensoriamento remoto, permitindo um meio de transferência de informação entre objeto e sensor de alta velocidade. Dessa forma, acrescenta-se mais uma restrição à definição de sensoriamento remoto para considerar apenas os instrumentos que detectam energia ou radiação eletromagnética:

“Tecnologia que utiliza sensores para extrair informações sobre objetos ou fenômenos, a partir da radiação eletromagnética sem que haja contato direto entre eles, e sem que o homem seja parte essencial do processo de aquisição de dados”

Ainda assim, existem numerosas fontes de energia eletromagnética no Universo, mas, em função das aplicações abordadas no curso, limita-se o estudo às interações processadas na superfície terrestre. A utilização de sensores visando a observação e interpretação da radiação recebida das diversas partes componentes do Universo fica a cargo da Astronomia. Tais equipamentos, embora operem com energia eletromagnética, não serão objeto de estudo neste curso.

Mais que uma definição, o texto a seguir engloba todo o conceito que deve ser entendido sobre o que é sensoriamento remoto, quando do ponto de vista do usuário de imagens de satélite:

“Sensoriamento remoto consiste na utilização conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações.” (NOVO, 1989)

1.1. Origem e evolução do sensoriamento remoto

A história do sensoriamento remoto é assunto tão controvertido quanto à sua definição. E não poderia ser diferente, pois dependendo de como se veja o sensoriamento remoto, ver-se-á a história e a evolução do mesmo.

Diversos autores, escudados pela American Society of Photogrametry e seu “Manual of Remote Sensing” (1975), associam a origem do sensoriamento remoto com o surgimento dos sensores (câmeras) fotográficas. Dessa forma, a história pode ser dividida em dois períodos principais: o primeiro, que se inicia em 1860 e se estende até 1960, é totalmente dominado pelas fotografias aéreas

(inicialmente em balões e posteriormente em aviões), enquanto que o segundo, que se estende até os dias de hoje, é caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores.

A aerofotogrametria que reinou absoluta no primeiro período, experimentou grandes avanços por ocasião das duas grandes guerras mundiais. Mas durante os cem anos correspondentes ao período inicial do sensoriamento remoto, os produtos, os meios de obtenção e a forma de interpretação e análise destes produtos evoluíram de forma gradativa.

A corrida espacial foi um dos fatores relacionados ao início da segunda fase, o qual, apesar de ter cerca de quarenta anos, apresenta uma grande dinâmica quanto aos instrumentos, produtos, meios de obtenção e forma de interpretação e análise destes. Os significativos avanços obtidos nas áreas de telecomunicações, ciência da computação, mecânica fina de precisão, óptica de precisão, etc., são automaticamente incorporadas às tecnologias ligadas ao sensoriamento remoto. Exemplos podem ser vistos com sensores hiper-espectrais, sensores de alto poder resolutivo, sistemas especialistas para interpretação e análise de dados, comunicação via satélite a taxas de centenas de megabits por segundo.

Na verdade, a evolução do sensoriamento remoto se deve a um esforço multidisciplinar que envolveu e envolve avanços, entre outras áreas, na Física, Físico-Química, Biociências e Geociências, além das já citadas anteriormente. A complexidade das atuais técnicas de sensoriamento remoto faz com que, cada vez mais, um maior número de pessoas de áreas diferentes participem do processo de transformação da energia registrada pelo sensor em informação.

1.2. O sensoriamento remoto como sistema de aquisição de informações

O sensoriamento remoto pode ser visto como um sistema de aquisição de informações, que pode ser dividido em dois grandes sub-sistemas:

- Sub-sistema de coleta de dados de sensoriamento remoto;
- Sub-sistema de análise de dados de sensoriamento remoto./

O sub-sistema de coleta de dados, por sua vez, tem duas funções principais:

- a) Detecção da radiação proveniente da superfície;
- b) Transformação da radiação (energia), para posterior transmissão e registro.

A detecção da radiação depende de certos requisitos. Em primeiro lugar, deve haver uma fonte de radiação eletromagnética. Essa radiação deve ser propagar pela atmosfera (ou pelo meio físico entre a fonte e o objeto observado) até atingir a superfície terrestre (ou o objeto observado). Ao atingir a superfície terrestre sofrerá interações, produzindo uma radiação de retorno. Tal radiação propaga-se-á pela atmosfera (ou pelo meio físico entre o objeto observado e o sensor), atingindo o sensor. O que chega até o “sensor” é uma certa intensidade de energia eletromagnética (radiação) que será posteriormente transformada em um sinal passível de interpretação.

O sub-sistema de análise de dados encerra um sem número de funções, das quais pode-se destacar:

- a) Pré-processamento (correções radiométricas e geométricas);
- b) Processamento de realce (filtros e manipulações de histogramas);
- c) Fotointerpretação;
- d) Interpretação automática;
- e) Modelagem.

De forma resumida, o Tabela 1 apresenta os principais componentes de um sistema de aquisição de informações, e suas respectivas funções.

Tabela 1. Componentes de um sistema de aquisição de informações.

Componente	Função
Fonte	Gerar energia eletromagnética
Meio 1	Permitir a propagação da energia
Alvo	Receber, interagir e refletir a energia
Meio 2	Permitir a propagação da energia refletida
Sensor	Receber a energia refletida
Processador	Transformar a energia recebida em dados
Analista	Transformar os dados em informação

A título de exemplo, apresenta-se um paralelo com uma máquina fotográfica. O sensor é a máquina fotográfica e o detector é a emulsão fotográfica. A fonte de energia pode ser o Sol (ou uma lâmpada) e o alvo pode ser uma pessoa (ou uma região da superfície da Terra). O meio de propagação entre a fonte e o alvo é o ar (atmosfera), bem como é o meio de propagação entre o alvo e o sensor. Para que a energia captada pelo sensor se transforme num sinal passível de interpretação é necessário que o filme seja revelado, e deve-se gerar cópias em papel que serão interpretadas para obtenção de informações sobre o alvo (objeto de estudo). A Tabela 2 sintetiza o exemplo apresentado.

Tabela 2 Exemplo da máquina fotográfica como sistema de aquisição de informações.

Componente	Função
Fonte	Sol (ou qualquer fonte luminosa)
Meio 1	Ar (atmosfera)
Alvo	Pessoa (ou região da superfície da terra)
Meio 2	Ar (atmosfera)
Sensor	Máquina fotográfica
Processador	Aparelhos do laboratório de revelação
Analista	Pessoa que observa (analista) a foto

CAPÍTULO 2

AS INTERAÇÕES ENTRE A ENERGIA E A MATÉRIA

1.0. Introdução

No Capítulo 1 vimos que o sensoriamento remoto é o Ramo da ciência que retrata a obtenção e análise de informações sobre materiais (naturais ou não), objetos ou fenômenos que ocorrem na superfície dos planetas, estrelas, etc., utilizando a energia eletromagnética refletida e/ou emitida dos materiais estudados que são registrados por dispositivos situados à distâncias dos mesmos (sensores) (Figura 1).

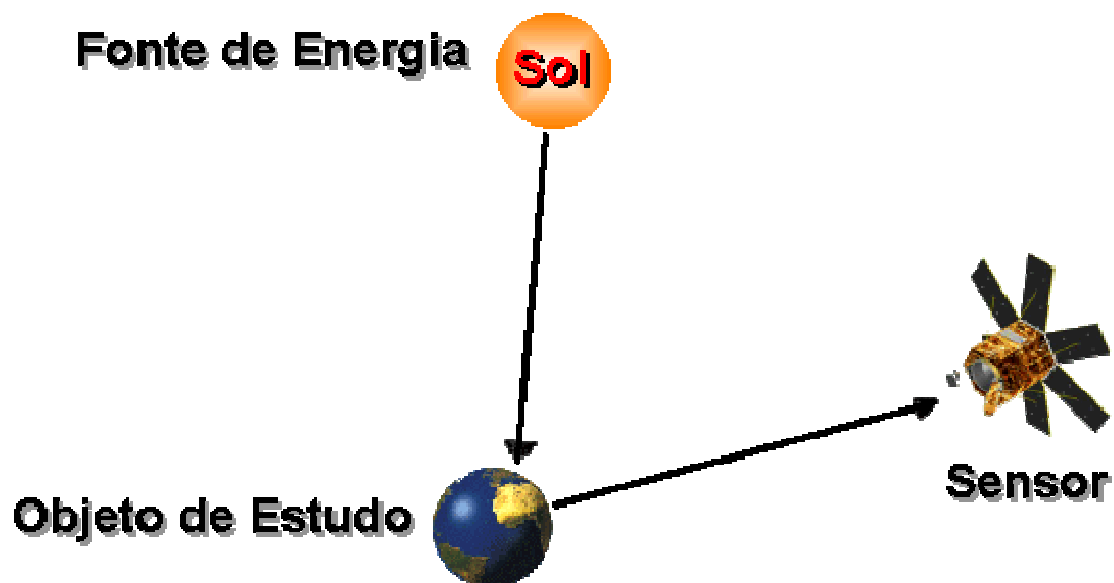


Figura 1. Fonte de energia, objeto de estudo e sensor.

O sensor é um dispositivo capaz de responder à radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada para ser interpretada pelo usuário (ROSA, 1992).

Os dados que podem ser registrados pelos sensores remotos são:

- Planimetria - Localização (X, Y);
- Topografia/ Batimetria - Elevação (z);
- Cor de objetos;
- Característica da absorção de REM pela clorofila na vegetação;
- Biomassa da vegetação;
- Conteúdo de umidade da vegetação;
- Temperatura;
- Textura ou rugosidade da superfície.

Segundo Alvaro Crósta (1993), as imagens originadas por sensores remotos estão presentes cada vez mais do nosso dia-a-dia. Estão presentes nos jornais e na televisão informando as informações meteorológicas (chuvas, estiagem, neve, furacões, deslocamento de tornados, etc)

A função principal de processar digitalmente as imagens de sensoriamento remoto é a de fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contidas nas imagens. O uso de sistemas computacionais é de fundamental importância para a análise e manipulação das imagens brutas. O resultado deste processamento é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

O objetivo principal do processamento de imagens é o de remover as barreiras como:

- Enorme volume de informação;
- Vários tipos de degradações e distorções, inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir de imagens.

1.1. Tipos de sistemas sensores:

Os sensores podem ser passivos ou ativos. A diferença existente entre os dois é a seguinte:

- **Sistema passivo:** Utilizam fonte de energia externa (Figura 2). Ex. Luz solar;
- **Sistema ativo:** fornece a energia para imagear (Figura 3). Ex. Radar (Microondas).

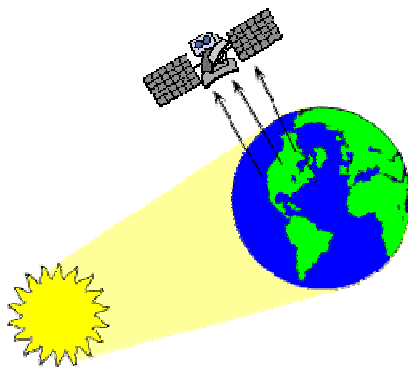


Figura 2. Sistema passivo. Ex: Landsat, Spot, Ikonos, etc

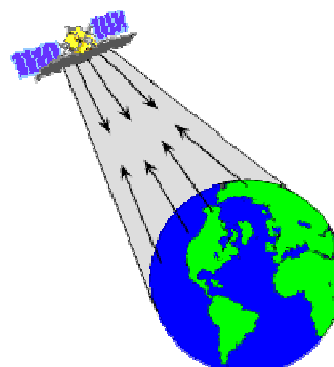


Figura 3. Sistema ativo. Ex: Radarsat, Jers-1, etc.

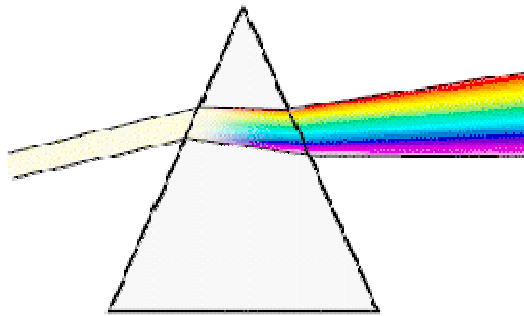
2.0. A natureza da radiação eletromagnética (REM)

Toda matéria a uma temperatura acima de zero absoluto (0° K) emite energia. Desta maneira, todo corpo negro com temperatura acima de zero absoluto pode ser considerado como uma fonte de radiação.

Existem duas teorias que explicam a propagação de energia a partir de uma fonte: a teoria do modelo corpuscular e a teoria do modelo ondulatório.

A teoria do modelo corpuscular considera que a energia se propaga pela emissão de um fluxo de partículas (fótons) que se movem à velocidade da luz. Já a teoria do modelo ondulatório considera que a propagação da energia ocorre através de um movimento ondulatório.

Segundo Maxwell, a aceleração de uma carga elétrica provoca perturbações no campo elétrico e magnético, que se propagam repetitivamente no vácuo. Estas perturbações são denominadas de ondas eletromagnéticas. A luz se propaga como uma série de ondas que explicam a refração da luz por meio de um prisma, lentes e difração.



A luz tem um comportamento natural dual contínuo e discreto. Segundo as teorias da propagação da luz de Newton e Planck, a luz se propaga como unidades discretas que viajam em "linha reta".

Onda eletromagnética é o resultado da oscilação dos campos elétrico (E) e magnético (M) segundo um padrão harmônico de ondas. Um padrão harmônico de ondas significa que as ondas são espaçadas repetitivamente no tempo.

A onda eletromagnética se propaga no vácuo à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s). O número de ciclos de onda que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo define a frequência (f) da radiação eletromagnética. O intervalo de tempo relativo à passagem de um ciclo representa o período (T) da onda eletromagnética.

A frequência (f) da onda é diretamente proporcional à velocidade da radiação, que por sua vez é constante para cada meio: quanto maior a velocidade, mais ciclos passariam por um dado ponto num certo intervalo de tempo. Já o período (T) é inversamente proporcional à velocidade de propagação da radiação: quanto maior a velocidade, menor o tempo para a passagem de um ciclo.

Uma onda eletromagnética é também caracterizada pelo comprimento de onda (λ), que se relaciona com a frequência (f), o período (T) e a velocidade da onda (c), segundo as equações 2 e 3, enquanto que a equação 1 mostra a relação entre a frequência (f) e o período (T).

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\lambda = c \cdot T \quad (\text{Eq. 3})$$

Pela análise das equações 2 e 3, nota-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência e diretamente proporcional ao período. Quanto maior for a frequência de aceleração de uma carga elétrica, menor será o comprimento de onda resultante (Figura 4).

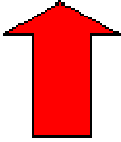
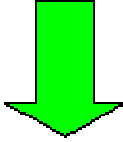
	
Aumento do comprimento de onda	Diminui a energia de um foton, ou vice-versa

Figura 4. Relação entre comprimento de onda e frequência.

É importante observar que uma onda eletromagnética representa a variação no tempo dos campos elétrico e magnético. Tais campos sempre ocorrem juntos. Assim sendo, quando as ondas eletromagnéticas interagem com a matéria, o resultado desta interação dependerá das propriedades elétricas e magnéticas da matéria.

2.1. Conceitos importantes

- **Radiação do corpo negro:** todo corpo com temperatura acima de zero graus Kelvin ($0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$) emite radiação eletromagnética. Para um dado comprimento de onda a quantidade de energia emitida atinge um máximo a uma dada temperatura do corpo negro. O comprimento de onda no qual a energia emitida é máxima pode ser determinada pela Lei do Deslocamento de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2.8983 \times 10^{-3} \text{ K}^\circ \text{ m}}{T} \quad (\text{eq. 4})$$

Em que:

T = Temperatura em graus kelvin.

- **Teoria quântica:** explica a interação da REM com a matéria. “A energia é composta por unidades discretas denominadas por Max Planck de Fótons ou Quanta”. A equação de Planck explica o efeito fotoelétrico. O impacto do quanta sobre uma determinada superfície metálica causa a emissão de elétrons. Planck descobriu que a luz é absorvida e emitida em unidades discretas denominadas de QUANTA ou FÓTONS (Figura 5). O tamanho de cada unidade é diretamente proporcional a frequência da energia da radiação. A equação de Planck explica o efeito fotoelétrico. O impacto do quanta sobre uma determinada superfície metálica causa a emissão de elétrons.

$$Q = h \cdot f \quad (\text{eq. 5})$$

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{eq. 6})$$

Em que:

Q = energia de um fóton;

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J/s);

f = frequência;

c = velocidade da Luz (3×10^8 m/s)

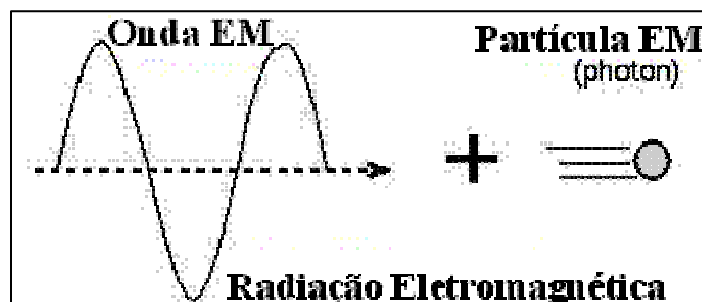


Figura 5. Esquema mostrando a emissão de fótons.

- **Radiação eletromagnética (ondas de rádio, luz, etc):** Consiste da interação, de campos elétrico e magnético que se propagam no vácuo com uma velocidade de 299.792 km por segundo. São gerados por meio de excitação termal, processos nucleares (fusão ou fissão) ou por bombardeamento através de outra radiação. A REM não necessita de um meio para se propagar.
- **Reações termonucleares:** responsáveis pelas cores das estrelas, incluindo o sol, fornece a energia das estrelas, primariamente na forma de REM. Essas ondas são emitidas e formadas por diferentes frequências e comprimentos de ondas de uma larga de faixa do espectro eletromagnético. O raio do sol é um exemplo de REM que é emitida naturalmente.
- **Teoria ondulatória:** a radiação eletromagnética se propaga na forma de onda, à velocidade da luz, segundo um campo elétrico e um campo magnético (M), ortogonais entre si, de modo harmônico e com uma trajetória senoidal (Figura 6).

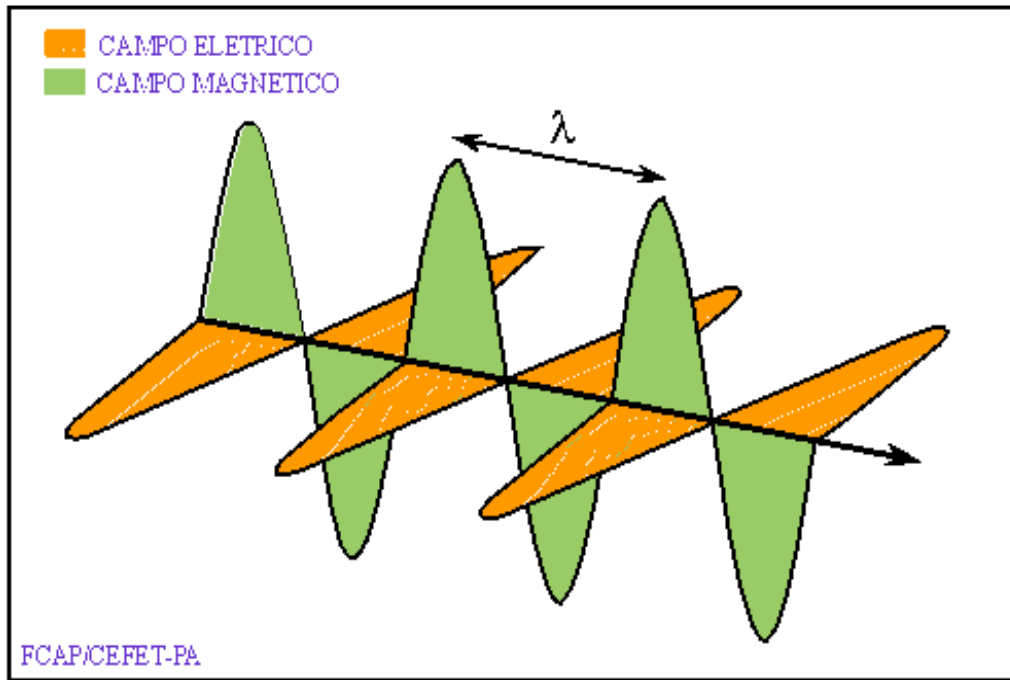


Figura 6. Esquema mostrando uma radiação eletromagnética, com a presença de 2 campos: um elétrico e outro magnético ortogonais entre si.

- **Fluxo radiante:** razão no qual os fótons chegam a superfície sendo medida em watts (quantidade de energia chegada na superfície em unidades de tempo). É o fluxo que deixa a superfície e é registrada pelos sensores.
- **Irradiância:** É o fluxo radiante por unidade de área (watts por metro quadrado) recebido.
- **Corpo negro:** hipoteticamente entende-se como um corpo que absorve toda energia, reflete nenhuma, emite energia com perfeita eficiência.
- **Leis de Stefan – Boltzmann:** define as relações entre o total da radiação emitida (E) em watts/cm² e a temperatura (T) expressa em graus kelvin (K) (Figura 7).

$$E = \sigma T^4 \quad (\text{eq. 7})$$

Em que:

E = radiação total emitida pela superfície (W/m²);
 σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$;
 T = temperatura em Kelvin emitida pelo material.

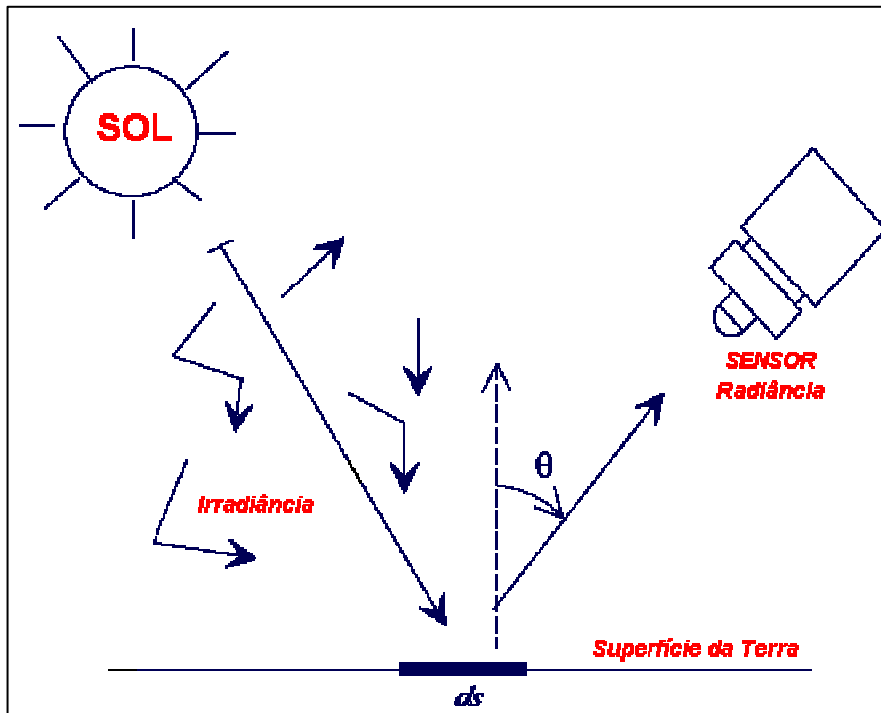


Figura 7. Esquema mostrando a radiação emitida pela superfície.

O Sol tem uma temperatura maior que a do planeta Terra, seu pico de emissão está entre $0,4$ e $0,7 \mu\text{m}$, que é a parte visível do espectro eletromagnético. A máxima emissão de energia eletromagnética da Terra encontra-se em torno de $9 \mu\text{m}$. Outras estrelas, como a Sirius e a Veja, tem emissão máxima na região do ultravioleta (Figura 8).

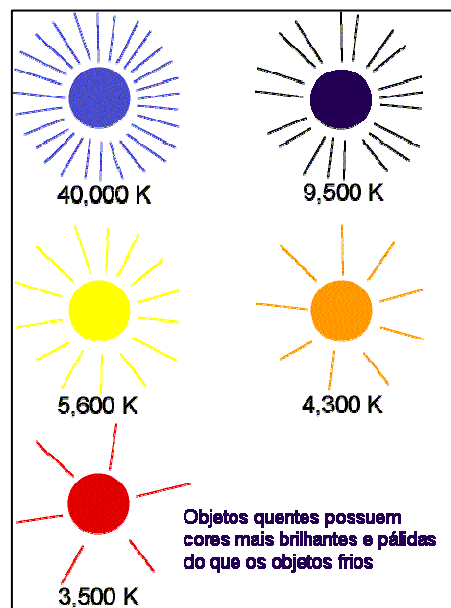


Figura 8. Emissão máxima de algumas estrelas.

3.0. O espectro eletromagnético

A radiação natural forma um espectro contínuo, que contém comprimentos de ondas de fenômenos até dezenas de quilômetros. Entretanto, divide-se o espectro em diversas faixas, denominadas de bandas espectrais (Figura 9 e 10).

A banda espectral do visível (VIS) representa apenas uma pequena janela do espectro. Se estende de 0,4 a 0,7 μm . Neste estreito intervalo se encontram as faixas relativas ao azul, verde e vermelho.

Em seguida vem o infravermelho (IV: IR – “Infra Red”), compreendendo uma larga faixa que cobre do 0,7 até 1.000 μm . O infravermelho pode ser dividido em duas faixas:

- **Infravermelho próximo ou reflexivo (IVP: NIR – “Near Infra Red”):** vai de 0,7 a 3,0 μm ;
- **Infravermelho distante ou emissivo (IVD: FIR – “Far Infra Red”):** vai de 3,0 a 1.000 μm .

Alguns autores dividem o infravermelho em três faixas: NIR, compreendendo a faixa de 0,7 a 1,3 μm , o infravermelho médio (IVM: MIR – “Mid Infra Red”), que vai do 1,3 a 3,0 μm e o FIR, cobrindo a faixa de 3,0 a 1.000 μm .

Sucedendo o infravermelho distante tem-se o intervalo das microondas, que cobrem a faixa de 1 a 1000 mm, incluindo as regiões correspondentes às bandas C, L e X.

A intensidade máxima de radiação solar ocorre próxima ao comprimento de onda de 0,47 μm (azul – visível), apresentando uma queda acentuada em direção à região do ultravioleta, enquanto que em direção à região do infravermelho a queda é bem atenuada.

Observando o espectro eletromagnético do ponto de vista do sensoriamento remoto, os sistemas ópticos passivos utilizam, com maior frequência, a faixa do espectro que se estende do ultravioleta (UV) até o infravermelho distante (IVD), correspondendo aos comprimentos de onda de 0,2 a 12 μm . Já os sistemas ativos de radar utilizam com maior frequência a faixa do espectro correspondente ao das microondas, variando de 1 a 50 cm.

4.0. Fontes de radiação eletromagnética

O Sol é a principal fonte de radiação eletromagnética disponível para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. Quando observado como fonte de energia eletromagnética, o Sol pode ser considerado como uma esfera de gás aquecido pelas reações nucleares de seu interior. A energia irradiada pela superfície aparente do Sol é a principal fonte de radiação eletromagnética no Sistema Solar. Tal energia é denominada fluxo radiante.

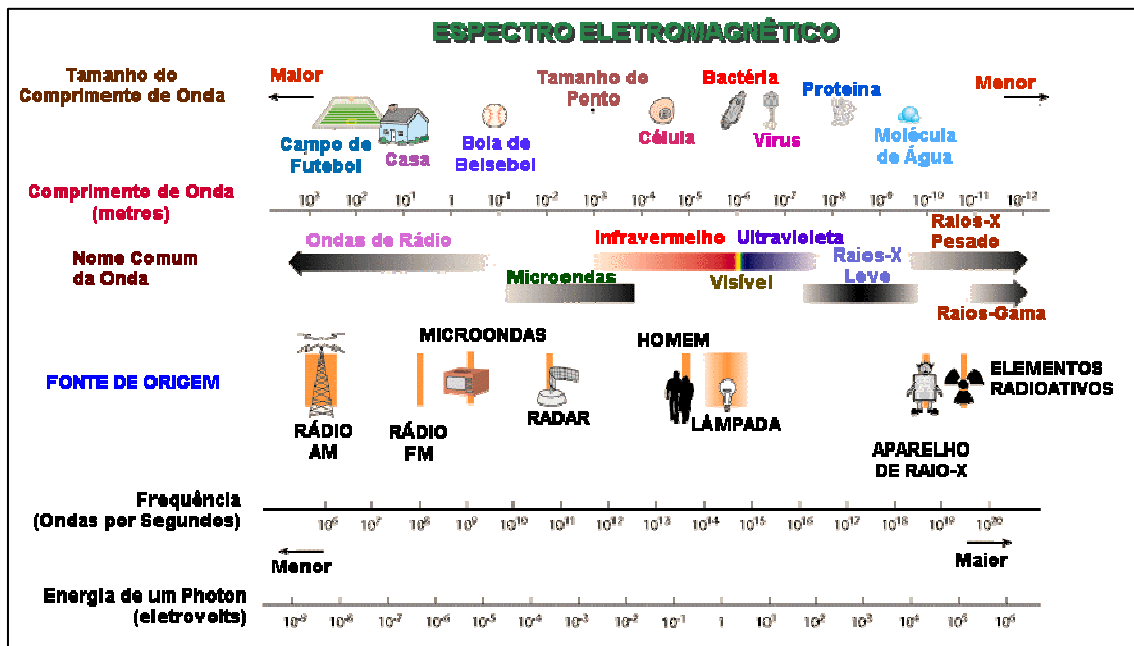


Figura 9. Esquema do espectro eletromagnético.

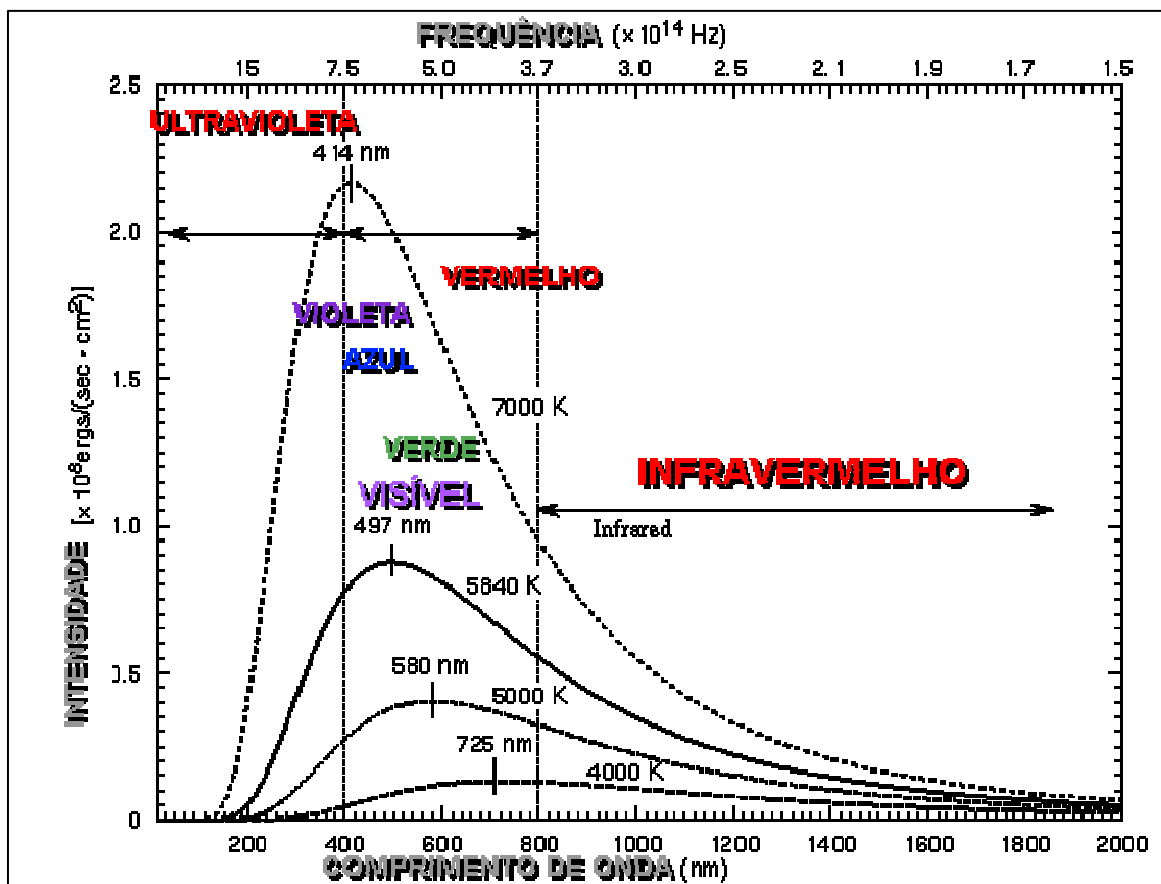


Figura 10. Relação do comprimento de onda com a intensidade de radiação.

Para fins de sensoriamento remoto, o Sol pode ser visto como um corpo negro com temperatura equivalente a 5.900°K . O conceito de corpo negro é de um objeto que irradia a uma taxa máxima por unidade de área, e por comprimento de onda, numa determinada temperatura. Da mesma forma que um corpo negro irradia toda energia que possui, ele é capaz de absorver toda energia que nele incide. É claro que na natureza não corpos negros. Este conceito é concebido para melhor compreensão do processo de radiação.

Conforme visto anteriormente, o máximo de energia disponível na superfície da Terra encontra-se na faixa de $0,4$ a $0,7\ \mu\text{m}$, correspondente à região do visível do espectro eletromagnético. Por outro lado, existem regiões do espectro eletromagnético para as quais a atmosfera é opaca, não permitindo a passagem da radiação eletromagnética. Estas regiões são conhecidas como “bandas de absorção da atmosfera”. Já as regiões transparentes à radiação eletromagnética são denominadas “janelas atmosféricas”.

As janelas atmosféricas têm grande importância porque possibilitam a reflexão da radiação pela Terra e podem ser aproveitadas pelos sistemas sensores passivos. Além de toda a faixa do visível, as janelas mais importantes localizam-se no infravermelho: de $0,7$ a $3,5\ \mu\text{m}$ (NIR); de $3,5$ a $4,0\ \mu\text{m}$ e de $8,0$ até $12,0\ \mu\text{m}$ (FIR).

Durante o percurso através da atmosfera, o fluxo radiante sofre dois tipos de alterações, quais sejam: o espalhamento e a absorção. Dessa maneira, se I_0 for a intensidade inicial do fluxo radiante e I_i a intensidade do fluxo após ter sofrido o espalhamento e a absorção pelo meio, é fácil verificar que $I_0 > I_i$. Esta redução, provocada tanto pela absorção quanto pelo espalhamento é chamada de atenuação atmosférica.

Esta atenuação da radiação solar pela atmosfera faz com que, em sensoriamento remoto, denomina-se a radiação eletromagnética acima de $6\ \mu\text{m}$ de fluxo termal emitido pela superfície da Terra, pois a partir desta região a atenuação atmosférica torna-se inviável a utilização do fluxo solar. O fluxo solar com comprimento de onda superiores a $6\ \mu\text{m}$ que atinge a superfície da Terra é desprezível. De modo semelhante, as regiões referentes a comprimentos de onda inferiores a $0,3\ \mu\text{m}$ (raios gama, X e ultravioleta) também se comportam como janelas opacas, com pouca energia chegando à superfície terrestre.

Os principais constituintes atmosféricos responsáveis pela absorção da radiação solar são gases e aerossóis. A Tabela 1 apresenta os principais gases e as bandas de absorção correspondentes.

Tabela 1. Bandas de absorção da atmosfera terrestre.

Gás	Bandas de absorção
O ₂ (oxigênio)	0 – 0,3 μm
O ₃ (ozônio)	5,0 – 9,5 μm
H ₂ O (vapor d'água)	0,7 – 0,8; 3,3; 5,5 – 7,5; 11,9 μm
C ₂ O (gás carbônico)	2,7 – 2,9; 4,1 – 4,2; 9,4; 12,6; 14,0 μm

5.0. Medidas radiométricas

Em sensoriamento remoto o que se registra, basicamente, é o fluxo radiante que deixa a superfície em direção ao sistema sensor. O que interessa é conhecer como esse fluxo radiante se modifica espectral e espacialmente numa determinada área. Como o fluxo que deixa uma superfície é medido durante um breve intervalo de tempo (intervalo de exposição ou integração), o que é realmente registrado é a energia (potência x tempo). Geralmente os intervalos de exposição ou integração são constantes, o que faz com que diferenças de cena para cena sejam devidas a modificações no fluxo radiante registrado. Os principais fatores causadores destas modificações são a condição atmosférica e o ângulo de incidência do fluxo radiante.

A Tabela 2 mostra as principais grandezas radiométricas e suas unidades de medida.

Tabela 2. Principais grandezas radiométricas e suas unidades de medida.

Grandeza Radiométrica	Unidade de Medida	Conceito
Energia Radiante	Joules (J)	Energia transportada em forma de REM
Fluxo Radiante	Watt (W)	Taxa de variação de energia radiante no tempo
Irradiância	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo incidente sobre uma superfície por unidade de área
Excitância	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo radiante deixando uma superfície por unidade de área
Emissividade	Adimensional	Razão entre a Excitância de um material pela excitância de um corpo negro à mesma temperatura
Absortância	Adimensional	Razão entre o fluxo absorvido e o fluxo incidente numa superfície
Reflectância	Adimensional	Razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente numa superfície
Transmitância	Adimensional	Razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente numa superfície
Energia luminosa (Quantidade de luz)	Lumen – segundo (talbot) lms	Energia na faixa do visível em função da eficácia luminosa da radiação
Iluminância	Lux ($lm\ m^{-2}$)	Fluxo luminoso incidente sobre uma superfície por unidade de área

6.0. Estudo das radiações de interesse para o sensoriamento remoto

6.1 Radiação ultravioleta

A radiação ultravioleta ou UV é a porção do espectro eletromagnético das radiações de comprimento de ondas pequenos, no qual são usualmente utilizados em sensoriamento remoto (Figura 11). Esta radiação antecede a porção violeta da radiação do visível, por este motivo tem esse nome. Alguns materiais na superfície da Terra, principalmente minerais e rochas, fluorescem e emitem luz visível quando expostos a radiação ultravioleta.

Ex: Luz negra nas casas de shows fluorescem as roupas de cor branca (principalmente).

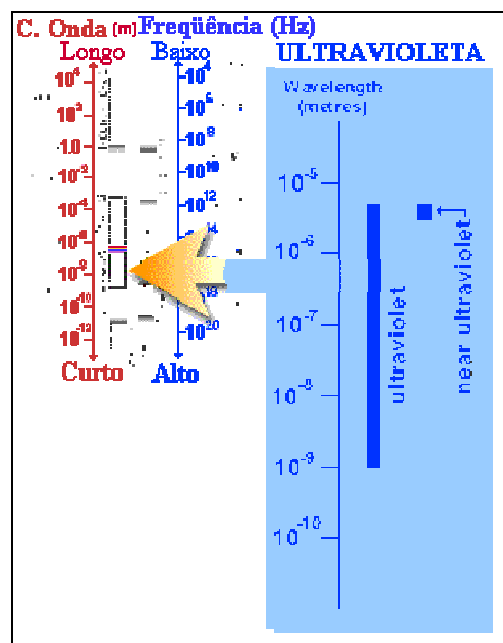


Figura 11. Localização da radiação ultravioleta.

6.2. Radiação visível

É a radiação que nossos olhos, ou melhor, nosso sensor pode detectar do espectro eletromagnético (EEM). Apesar de ser uma porção do EEM muito pequena, mais é a mais importante para o ser humano, já que as outras radiações são invisíveis para os nossos olhos, porém, as outras radiações podem ser detectadas através de outros sensores especiais produzidos pelo homem. A radiação visível cobre um faixa aproximada de 0,4 até 0,7 μm (Figura 12 e 13). A radiação do visível varia de um comprimento de onda pequeno (violeta) ao de maior comprimento (vermelho). Apenas uma parte da radiação do visível o homem é capaz de visualizar.

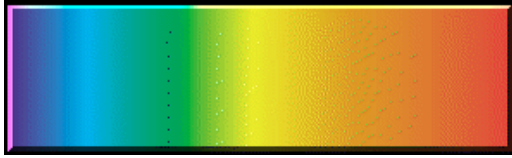
VIOLETA:	0.4 - 0.446 mm	
AZUL:	0.446 - 0.500 mm	
VERDE:	0.500 - 0.578 mm	
AMARELO:	0.578 - 0.592 mm	
LARANJA:	0.592 - 0.620 mm	
VERMELHO:	0.620 - 0.7 mm	

Figura 12. Cores correspondentes à radiação do visível.

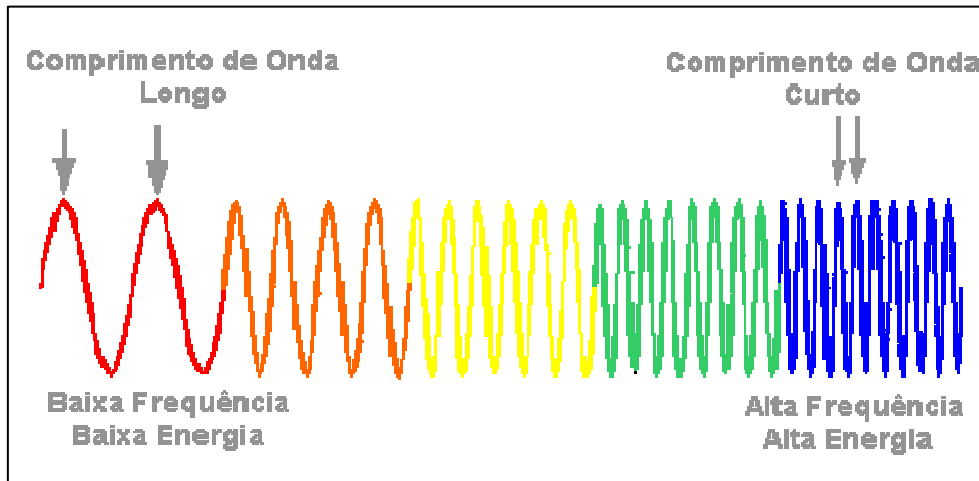


Figura 13. Comprimento de onda das cores do visível.

Azul, verde e vermelho são as cores primárias ou ondas de comprimentos do espectro do visível. São definidos pelo fato de não poderem ser criadas a partir de duas outras cores primárias, porém, todas as outras cores podem ser geradas a partir das 3 cores primárias.

A radiação proveniente do sol é composta por REM uniformes e homogêneas, na verdade a radiação que chega na superfície da Terra é formada principalmente por radiações ultravioleta, visível e infravermelho. A porção visível da radiação pode ser verificada quando a luz proveniente do sol atravessa um prisma onde a luz é diferenciada de acordo com seu comprimento de onda (Figura 14).



Figura 14. Decomposição da luz branca.

Esse fenômeno ocorre na natureza gerando o arco-íris (Figura 15). As gotas d'água funcionam como um prisma.



Figura 15. Formação do arco-íris.

A Figura 16 mostra a localização da radiação visível no espectro eletromagnético.

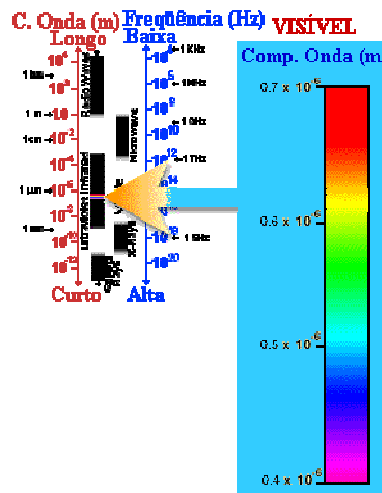


Figura 16. Localização da radiação visível no espectro eletromagnético.

6.3. Radiação infravermelho

A radiação infravermelho (IV) ou IR (infrared) cobre uma faixa de comprimento de onda que varia de 0,7 mm até 100 mm, representando uma faixa mais 100 vezes maior que a região do visível (Figura 17). A região do infravermelho pode ser dividida em duas categorias baseado nas propriedades de suas radiações: O Infravermelho Refletido e o Infravermelho Termal.

A radiação no IV Refletido é usada no sensoriamento remoto por ser muito parecida com a radiação do visível. Essa radiação cobre um faixa que vai de 0,7 mm até 3,0 mm

A radiação IV Termal é totalmente diferente da radiação do visível e da radiação do IR Refletido, pois como essa energia é essencialmente a radiação

que é emitida da superfície da terra na forma de calor. A radiação IV Termal é uma faixa de comprimento de onda de 3,0mm até 100mm.

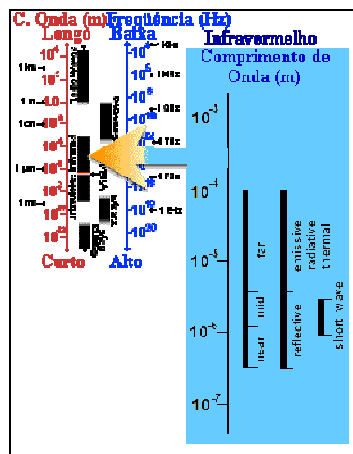
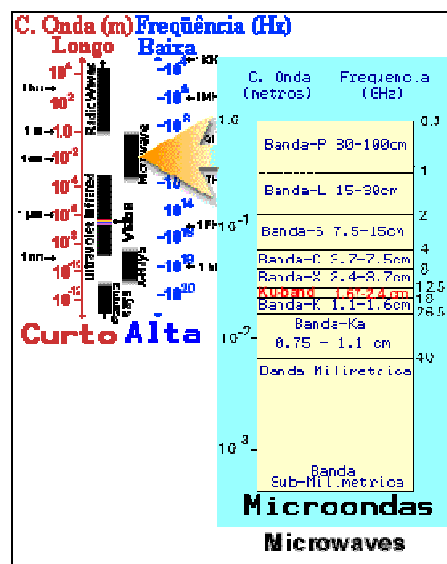


Figura 17. Localização da radiação infravermelho.

6.4. Radiação microrondas

Esta parte do espectro eletromagnético é a porção que está havendo um maior interesse para aplicações de sensoriamento remoto recentemente. As radiações de Microondas possuem comprimentos de ondas que variam de 1mm até 1 m (Figura 18). Essa faixa é usada em sensoriamento remoto. A porção desta radiação de comprimentos de ondas mais curtos possuem propriedades similar a radiação do infravermelho termal, enquanto, as de maiores comprimentos de ondas são usadas para transmissão de rádio e TV.



CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS

1.0. Introdução

Corpos terrestres quando observados com sensores remotos apresentam aparência que depende da relação deles com a energia incidente. Eles recebem e emitem energia, interagindo com outros corpos de maneiras complexas.

As principais propriedades dos corpos são:

- Temperatura (coeficiente de absorvidade);
- Coeficientes de emissividade, transmissividade e refletividade;

Já as propriedades importantes da energia são:

- Quantidade e qualidade (comprimento de onda).

As propriedades dos corpos dependem muito da aparência física (volume, forma, estrutura da sua superfície) e do ângulo do qual é observado pelo sensor.

A complexidade das interações é aumentada se as propriedades espectrais dos corpos mudam com a passagem do tempo; isto é assim tratando-se de organismos vivos; estes apresentam diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento produzindo alterações na aparência física e às vezes na composição material. Objetos inanimados têm propriedades espectrais mais estáveis, mas uma simples chuva, por exemplo, pode alterá-las.

Concluí-se então que as propriedades espectrais dos corpos podem mudar frequentemente, muitas vezes de maneiras não previsíveis.

2.0. Propriedades espectrais das plantas superiores

As propriedades espectrais das plantas superiores dependem da:

- Morfologia das folhas;
- Estrutura interna das folhas;
- Composição química;
- Estado fisiológico;
- Geometria das plantas (disposição espacial);
- Etapa de crescimento ou de desenvolvimento na qual encontra práticas culturais;
- Condições climáticas antes e durante o ciclo de vida das plantas.

As folhas absorvem, refletem e transmitem as radiações incidentes seguindo o padrão das células pigmentadas que contêm soluções aquosas.

A refletividade das folhas (plantas superiores) é atribuída à estrutura interna das mesmas.

- **Teoria de WILLSTATE & STOLL (1918):** baseia-se na reflexão crítica da r.e.m. nas paredes celulares (reflexão especular) (Figura 1):

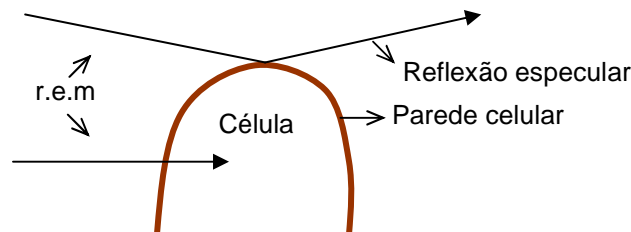


Figura 1. Esquema da teoria de WILLSTATER & STOLL.

Observação:

- ❖ **Cutícula:** difunde bastante e reflete pouco;
 - ❖ **Tecido palicádico:** contém pigmentos (clorofila) e absorve as radiações visíveis;
 - ❖ **Mesófilo esponjoso:** têm muitos espaços inter-celulares os quais refletem r.e.m. Nele acontecem trocas entre O_2 e CO_2 (fotossíntese e respiração).
- **Teoria de SINCLAIR:** a refletividade no IV próximo ($0,7 - 1,3 \mu m$) está relacionada com o número de espaços de ar existentes entre células. A refletividade é maior quanto maior é o número de espaços de ar porque as r.e.m. passam com maior freqüência das partes da folha que tem alto índice de refração para aquelas partes que têm baixo índice de refração (Figura 2).

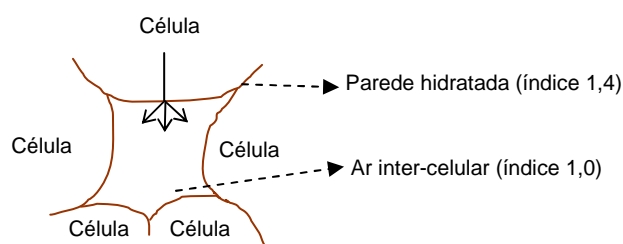


Figura 2. Esquema da teoria de SINCLAIR.

A r.e.m. atinge a parede celular e é difundida em todas direções na cavidade inter-celular.

Exemplo: As folhas de algodão durante o ciclo vital aumenta o número de espaços de ar, aumenta a refletividade e diminui a transmissão.

A Figura 3 mostra a seção transversal de uma folha mostrando possíveis trajetórias das radiações eletromagnéticas (GATES, 1970).

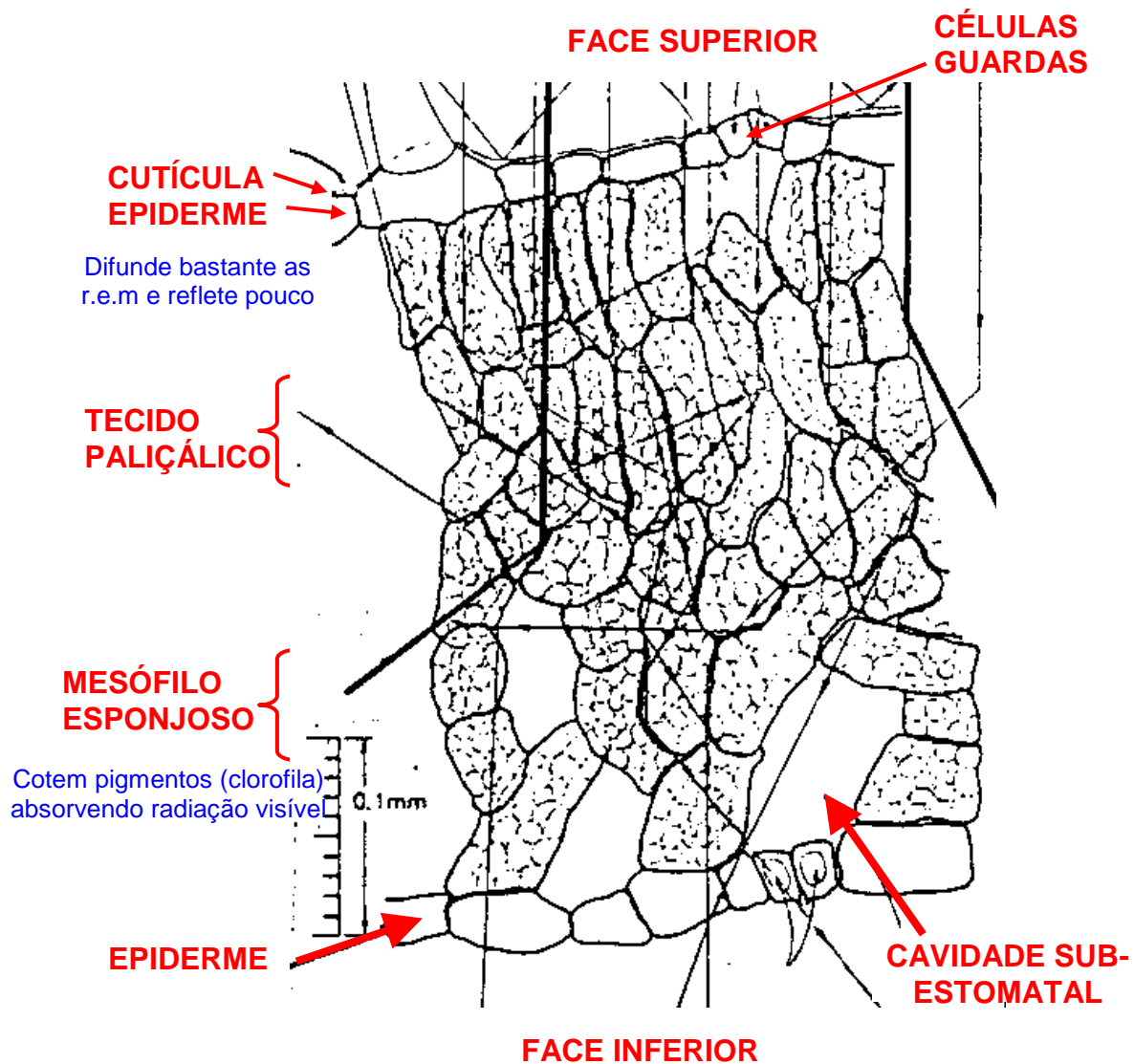


Figura 3. Seção transversal de uma folha mostrando possíveis trajetórias das radiações eletromagnéticas (GATES, 1970).

No VIS, o comportamento da reflexão é determinado pela clorofila, cuja absorção encontra-se no intervalo da luz azul (0,4 - 0,5 mm) e da luz vermelha (0,6 - 0,7 mm); enquanto reflete no intervalo da luz verde (0,5 - 0,6 mm). A radiação incidente atravessa, quase sem perda, a cutícula e a epiderme, onde as radiações correspondentes ao vermelho e ao azul são absorvidas pelos pigmentos do mesófilo, assim como pelos carotenóides, xantófilas, e antocianidas, que causam uma reflexão característica baixa nos comprimentos de onda supracitados. As clorofilas A e B regulam o comportamento espectral da vegetação e o fazem de maneira mais significativa em comparação com outros pigmentos. A clorofila absorve a luz verde só em pequena quantidade, por isso a reflectância é maior no intervalo da luz verde, o que é responsável pela cor verde das folhas para a visão humana (Figura 4).

A Figura 5 mostra a curva de reflectância de diferentes culturas.

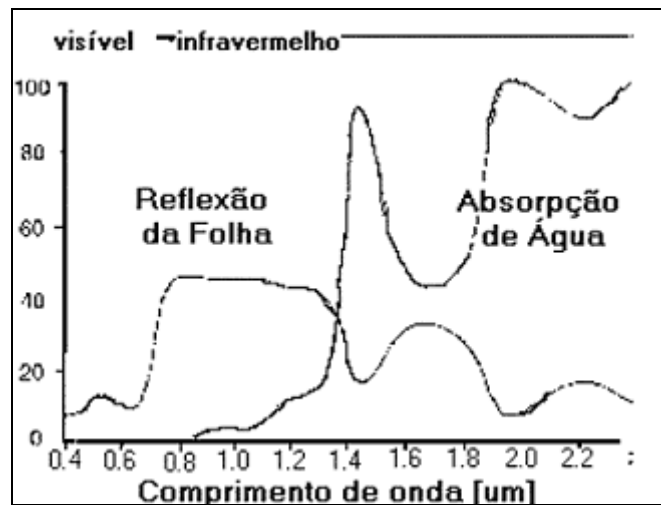


Figura 4. Refletividade espectral de uma folha verde e a capacidade de absorção de água e refletividade, absorvidade e transmissividade numa folha verde para a radiação no VIS e NIR.

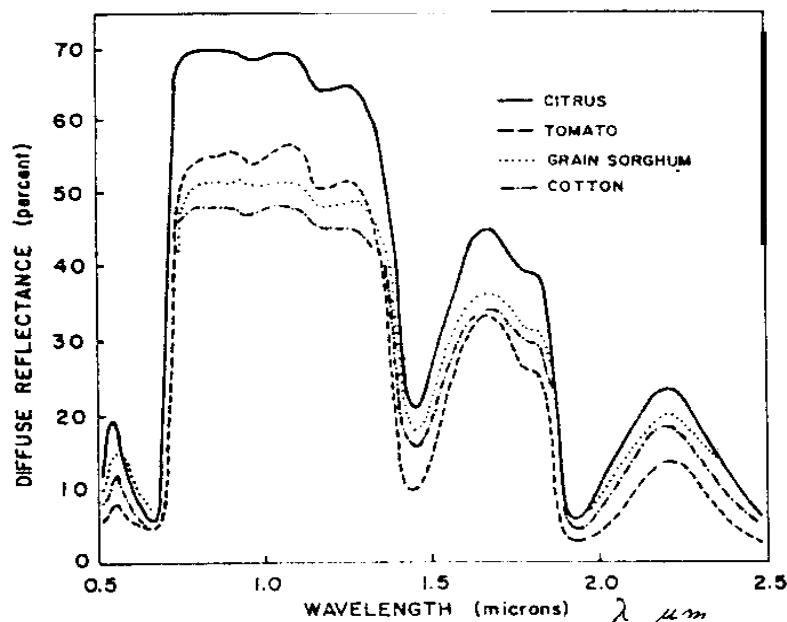


Figura 5. Curva de reflectância de diferentes culturas.

No NIR (0,7 - 1,3 μm), dependendo do tipo de planta, a radiação é refletida em uma proporção de 30 a 70% dos raios incidentes, ainda que as superfícies das folhas e os pigmentos sejam transparentes para esses comprimentos de onda. Todavia, os sistemas pigmentais das plantas perdem a capacidade de absorver fótons nesse espectro, que é caracterizado por uma subida acentuada da curva de reflexão. O mínimo de reflexão neste

comprimento de onda é causado pela mudança do índice de refração nas áreas frontais de ar/célula do mesófilo.

Nos comprimentos de ondas acima de 1,3 mm, o conteúdo de água das folhas influencia a interação com a radiação. A água dentro da folha absorve especialmente nas bandas em torno de 1,45 mm e 1,96 mm. Esta influência aumenta com o conteúdo de água. Uma folha verde caracteriza-se, nestas bandas, pela reflexão semelhante a de uma película de água. Por isso, estes comprimentos de onda, prestam-se à determinação do conteúdo hídrico das folhas. Folhas com conteúdo hídrico reduzido são caracterizadas por uma maior reflexão. A curva espectral depende do tipo de planta e, mais ainda, altera-se em função da estrutura e da organização celular.

3.0. Propriedades espectrais dos solos

As curvas espectrais dos solos sem vegetação apresentam, no intervalo espectral correspondente ao azul, valores de reflexão baixos, os quais aumentam continuamente em direção da luz vermelha, do NIR e do MIR ("mid infrared"). Por isso, as características de solos puros podem ser analisadas nestas bandas. Os parâmetros constantes, como tipo de mineral, granulação e conteúdo de material orgânico, assim como os parâmetros variáveis, como umidade do solo e rugosidade de superfície, influenciam a resposta espectral. Deve-se ressaltar a existência de elevada correlação entre os parâmetros constantes e os variáveis.

Uma alta umidade do solo é caracterizada, em todos os comprimentos de onda, por valores baixos de reflexão, pois o índice de refração nas áreas frontais da interface água/partícula é menor que o índice de refração nessas áreas em solos secos. Em aerofotos e imagens de satélite, os solos úmidos são caracterizados por tons de cinza mais escuros, o que significa uma reflectividade menor (Figura 6).

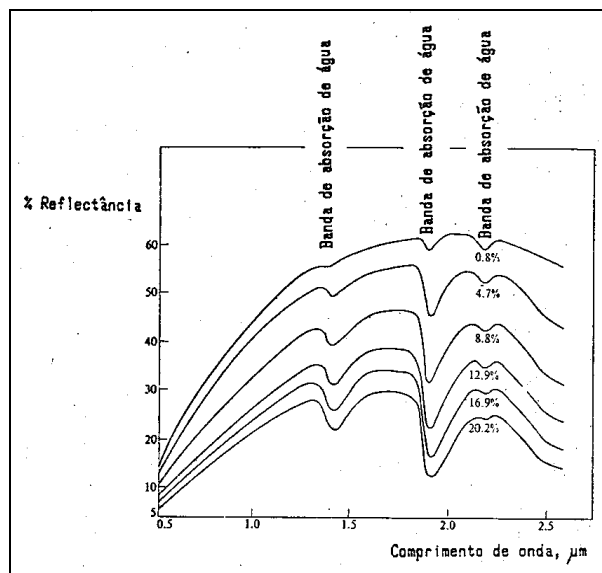


Figura 6. Curvas de reflectância de um mesmo solo com diferentes conteúdos de umidade.

No entender de Wittje (1979), as faixas de absorção da água (1,4 μm e 1,9 μm) servem para determinar a quantidade de água no solo. As bandas de absorção da água nas curvas espectrais dos solos úmidos são diferentes daquelas nas curvas dos mesmos solos no estado seco (Figura 7).

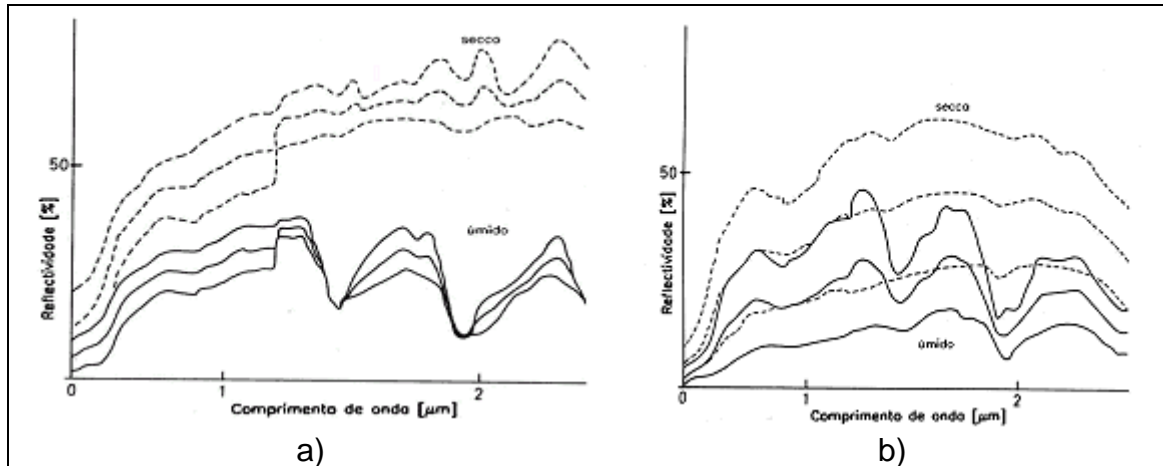


Figura 7. Refletividade de um solo argiloso (a) e um solo de arenoso (b) no VIS, NIR e MIR em dependência da umidade (Fonte: Kronberg, 1984, p. 50; Lowe, 1969).

As curvas de reflectância dos solos apresentam grandes contrastes entre 0,25 e 2,5 μm , responsáveis por tonalidades nas imagens.

As curvas diferem consideravelmente (não existe um único tipo como nos vegetais) (Figura 8).

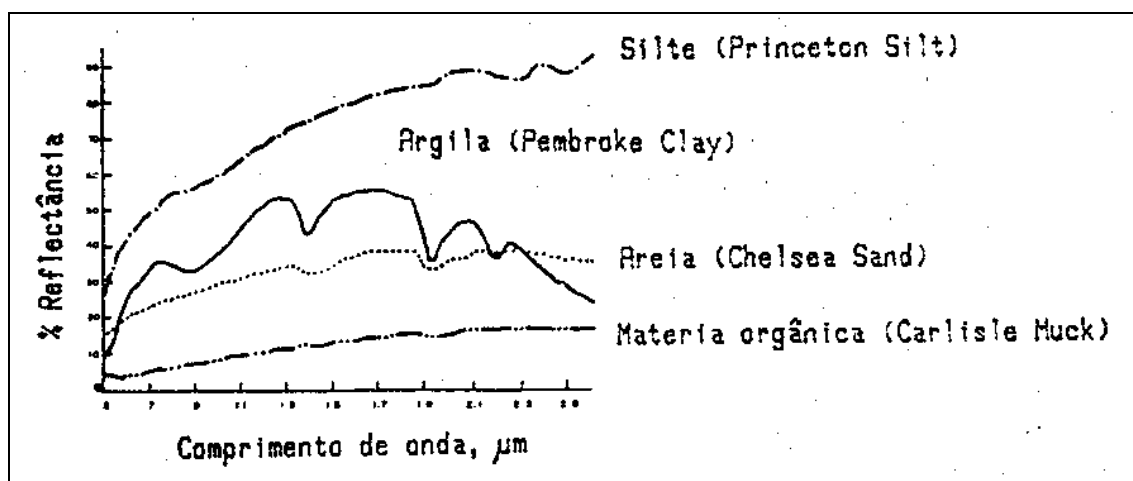


Figura 8. Solos com aproximadamente a mesma unidade, mas com diferente textura.

As bandas produzidas pela absorção a cargo da água às vezes estão presentes nas curvas (1,45 – 1,95 e 2,20 μm).

As propriedades dos solos que influenciam na refletividade ou emissividade são:

- Conteúdo mineral;
- Tamanho dos agregados;
- Textura;
- Cor;
- Conteúdo de matéria orgânica;
- Conteúdo de óxidos de ferro;
- Estrutura;
- Propriedades para a polarização das radiações eletromagnéticas.

a) Conteúdo mineral: a matéria reflete as r.e.m que recebe, em função de vibrações intermoleculares superficiais. A região espectral ótima para identificação de minerais está compreendida entre 8 e 14 μm (nesta porção do espectro acontece a vibração fundamental devida às uniões de átomos de silício e oxigênio).

A refletividade dos minerais a nível macromolecular é afetada por:

- Rugosidade da superfície do mineral;
- Tamanho dos agregados formados pelo mineral;
- Película de água que as vezes recobre os agregados (precipitações, orvalho, etc.);
- Descontinuidades físicas existentes entre os agregados;
- Presença de contaminantes (poeira, outros minerais, etc.).

Carbonatos, sulfatos, nitratos e silicatos apresentam curvas características no IV; em estado relativamente puro, eles podem ser facilmente identificados usando imagens. Outros minerais são mais facilmente identificados quando imageados na região do UV.

Comparando curvas de reflectância com curvas padronizadas armazenadas em computador, as vezes, é possível determinar a composição química geral dos solos.

b) Tamanho dos agregados: ORLOV (1966) observou em laboratório que aumentando-se o diâmetro dos agregados, ocorre um decréscimo da refletividade, gerando a seguinte equação:

$$R = k \cdot 10^{-\eta d} + R_{\infty}$$

Em que,

R = refletividade (%);

K = diferença entre frações finas e grossas;

n = mudança no agrupamento quando os agregados vão sendo mais grossos;
 R_{∞} = refletividade infinita.

Para cada solo são obtidos curvas semelhantes indicando que o fator determinante da refletividade é os diâmetros dos agregados e não suas composição química (Figura 9 e 10).

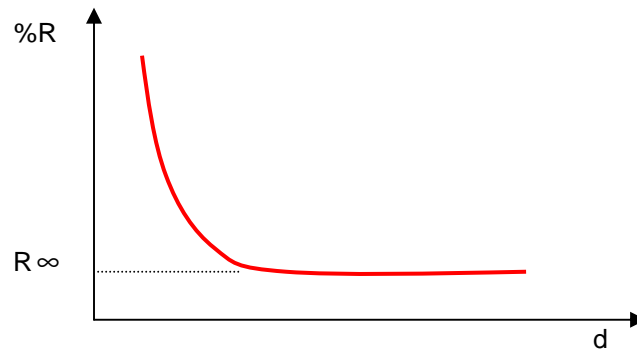


Figura 9. Relação entre refletividade e diâmetro dos agregados.

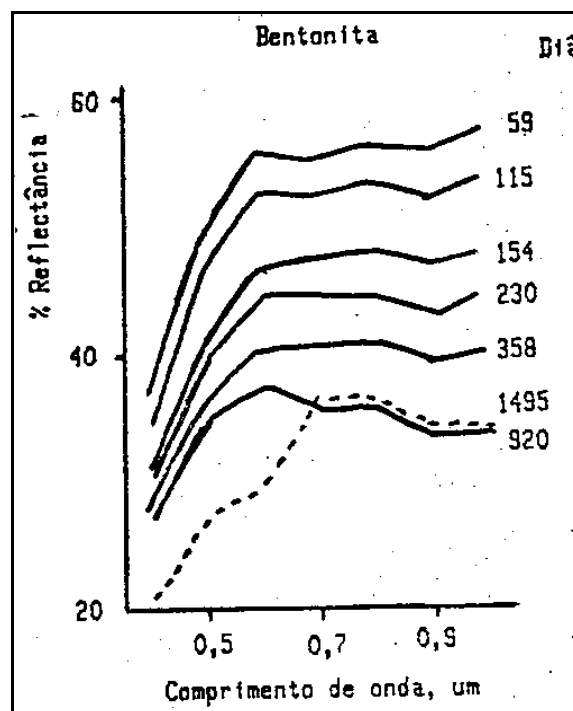


Figura 10. Relação entre diâmetro dos agregados e reflectância.

- c) **Cor do solo:** as regiões vermelha e IV próxima são mais favoráveis para a descrição qualitativa e quantitativa dos solos.
- d) **Conteúdo de matéria orgânica e de óxido de ferro:** influenciam a cor do solo, mas os efeitos mudam consideravelmente segundo condições

climáticas e de manejo do solo. Os óxidos e os hidróxidos de ferro reduzem a reflexão na banda do azul e aumentam no intervalo espectral do verde ao NIR. Os valores de reflexão da hematita diferem dessa regra: a reflexão diminui no NIR e especialmente no MIR (Figura 11). Uma grande parte das substâncias orgânicas reduz a refletividade dos solos, especialmente nos comprimentos de onda acima de 0,6 mm.

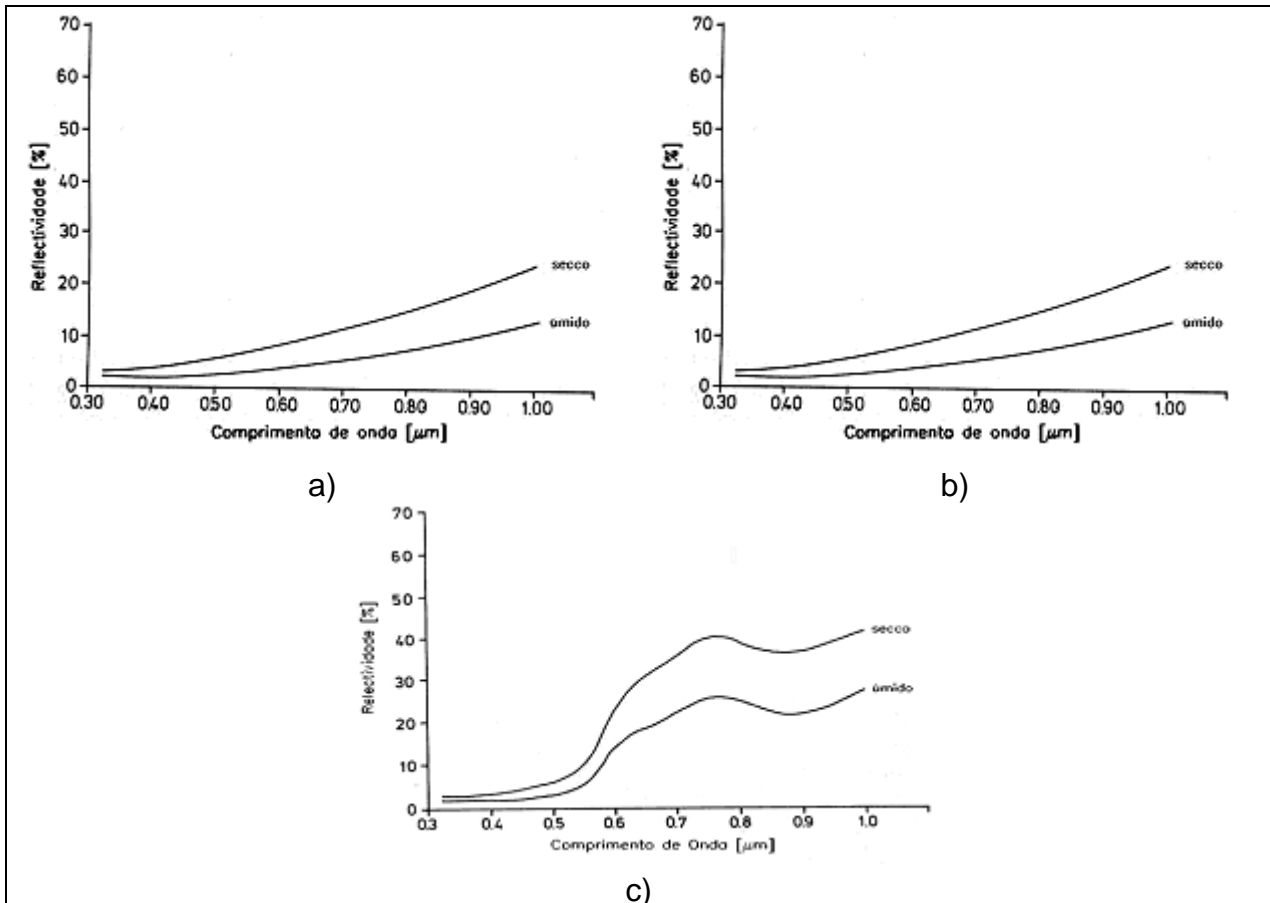


Figura 11. Refletividade de um solo chernozêmico (a), um solo argiloso (b) e um solo laterítico (c) no VIS e NIR em função da umidade (Fonte: Kronberg, 1984, p.38; Condit, 1970).

O conteúdo de matéria orgânica produz efeitos:

- Na cor;
- Na capacidade para retenção de água;
- Na capacidade para troca de cátions;
- Na estrutura;
- Na probabilidade de ocorrência de erosão.

Uma estimativa fácil e rápida deste parâmetro pode ser de grande utilidade para a classificação dos solos e o planejamento de uso da terra. OBUKHOV & ORLOV (1964) propuseram a seguinte equação (Figura 12):

$$R = 84 - 4,9 \cdot C$$

Em que,

R = reflectância (%) medida a $0,64 \mu\text{m}$, inversamente proporcional ao conteúdo de ferro;

C = conteúdo de Fe_2O_3 (%).

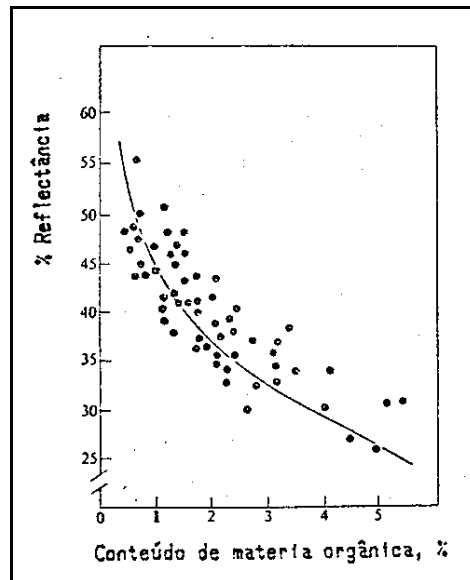


Figura 12. Relação entre Reflectância e conteúdo de matéria orgânica.

4.0. Propriedades espectrais da água

Lagos, rios, oceanos, etc., são relativamente fáceis de serem identificados nas imagens. Estes corpos são identificados para a realização de estudos hidrológicos e para a preparação de mapas ou interpretação de imagens (eles são usados como referências que permitem localizar outros corpos ou feições).

A refletividade da água, medida em comprimentos de onda relativamente pequenos permite identificar poluentes. O plâncton e outros tipos de vegetais e organismos alteram a natureza da refletividade da água (quando estão presentes acima da superfície da água alteram a refletividade em todos os comprimentos de onda; quando estão presentes debaixo da superfície, afetam somente os comprimentos de onda menores).

A profundidade das águas pode ser determinada mediante imagens obtidas entre $0,5$ e $0,58 \mu\text{m}$. Nesta região do espectro das r.e.m. é menor o coeficiente de extinção (atenuação) das radiações por metro de profundidade, segundo mostra a Figura 13.

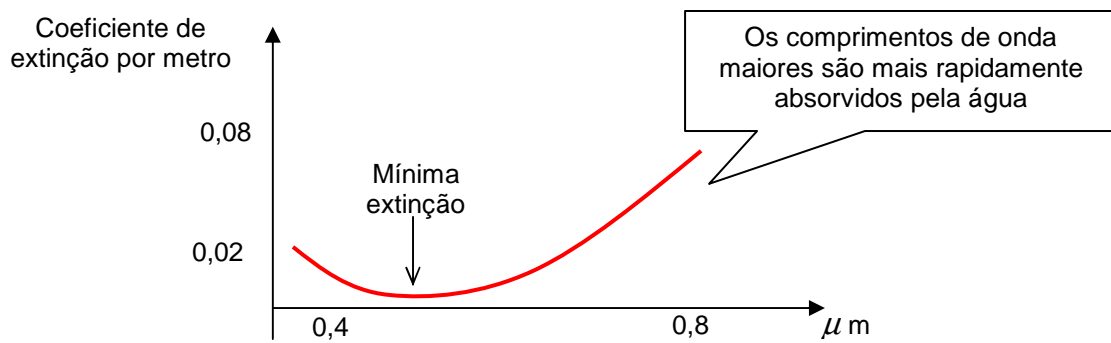


Figura 13. Relação entre o coeficiente de extinção por metro e comprimento de onda.

5.0. Propriedades espectrais do concreto

A refletividade do concreto é de 20% a $0,4 \mu m$ e é de 40% de $0,5$ a $0,6 \mu m$ (nesta última região, os vegetais refletem aproximadamente 20%, de modo que resulta fácil identificar cidades, pequenos povoados e ainda grandes prédios rodeados de vegetação).

6.0. Propriedades espectrais do asfalto

O asfalto, uma vez identificado, permite a localização de outras feições. Ele apresenta grande refletividade na região do ultravioleta e no azul da região visível.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS SENSORES E ORBITAIS

1.0. Resolução das imagens de sensoriamento remoto

Em sensoriamento remoto o termo resolução desdobra-se em três categorias independentes: a resolução espacial, a resolução espectral e a resolução radiométrica.

- a) **Resolução espacial:** a resolução espacial é determinada pela capacidade do detector em distinguir objetos na superfície terrestre. Em geral, a resolução espacial de um detector é expressa em termos do seu campo instantâneo de visada ou IFOV ("instantaneous field of view"). O IFOV define a área do terreno focalizada a uma dada altitude pelo instrumento sensor. De uma forma simplificada, o IFOV representa o tamanho do pixel. A resolução geométrica de um detector é determinada pela resolução do ângulo sólido do IFOV, em mrad (milirad), e pela altitude do sistema sensor e é expressa em metros na superfície terreno. Como exemplo, um IFOV de 1 mrad (1 mrad = 0,057°) significa que o elemento de terreno abrangido pelo detector, numa altitude nadir de 1000 m, tem o tamanho de 1 m.
- b) **Resolução espectral:** a resolução espectral é um conceito inerente às imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. É definida pelo número de bandas espectrais de uma sistema sensor e pela amplitude do intervalo de comprimento de onda de cada banda. O sistema óptico (espelhos e lentes) decide em que partes do espectro o sensor será capaz de receber a radiação refletida ou emitida pela superfície terrestre e o tipo do detector é responsável pela sensibilidade e pelo intervalo espectral de cada banda. A quantização das medidas radiométricas torna-se possível quando o sensor carrega dados de referência internos e calibrados.
- c) **Resolução radiométrica:** A resolução radiométrica é dada pelo número de valores digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica. A Figura A-5 mostra a comparação entre duas imagens. Uma de 2 níveis de cinza (1 bit) e outra com 32 níveis de cinza (5 bits). O número de níveis de cinza é comumente expresso em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência de 2. Assim, 5 bits significam $2^5 = 32$ níveis de cinza. Os satélites LANDSAT e SPOT têm resolução radiométrica de 8 bits, o que significa o registro de imagens em 256 níveis de cinza (Figura 1).



Figura 1. Comparação da resolução radiométrica de uma imagem com 1 bit (a esquerda) e a mesma imagem com uma resolução radiométrica de 5 bits.

2.0. Movimento Orbital

- a) **Elipse:** uma elipse é um conjunto de pontos tais que a soma das distâncias de qualquer ponto a dois pontos dados (os focos) seja uma constante (Figura 2).

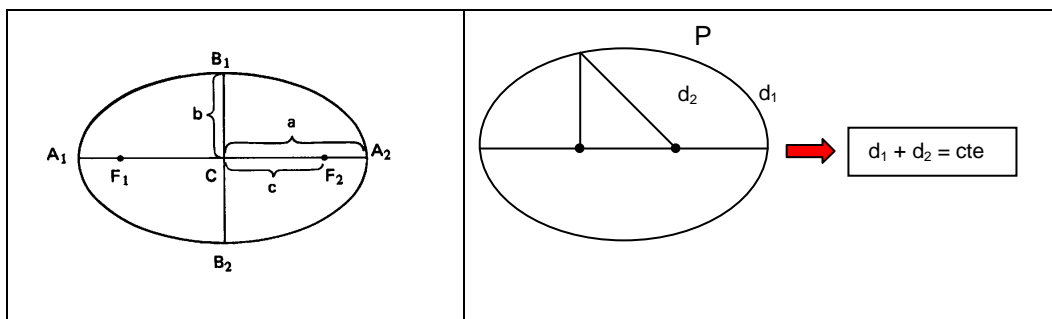


Figura 2. Elipse.

Nomenclatura:

- **Focos:** pontos F1 e F2 ;
- **Centro:** ponto médio C do segmento F1F2;
- **Distância focal:** distância entre os focos (igual a 2c);
- **Vértices:** pontos A1, A2, B1, B2;
- **Eixo maior:** segmento A1A2 (igual a 2a, onde a é o semi-eixo maior - responsável pelo tamanho da elipse);
- **Eixo menor:** segmento B1B2 (igual a 2b, onde b é o semi-eixo menor);
- **Excentricidade:** razão $e = c/a$ (responsável pela forma da elipse) (Figura 3).

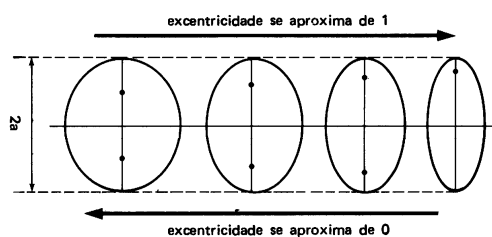


Figura 3. Relação da excentricidade com a forma da elipse.

- b) Movimento Circular Uniforme:** o movimento circular é um bom modelo para descrever o movimento dos satélites. Esse é um movimento que percorre uma circunferência com velocidade escalar constante. O ponto material percorre arcos de circunferência iguais em intervalos de tempo iguais.
- c) Leis de Johannes Kepler (1571-1630) para o Movimento Planetário:** leis empíricas que descrevem o movimento dos planetas em torno do Sol simplificada, sem qualquer explicação teórica. Não considera que as forças sejam as causas das regularidades do movimento orbital, pois o conceito de força ainda não estava formulado claramente. Forneceram forte apoio à teoria de Copérnico que o Sol e não a Terra era o corpo central do Sistema Solar.
- (1ª Lei) Lei da órbitas:** todos os planetas movem-se em órbitas elípticas com o sol localizando-se em um dos focos. As órbitas dos planetas, a menos de Mercúrio e Marte, desviam-se pouco da circularidade.
 - (2ª Lei) Lei das áreas:** a reta que une o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais (Figura 4). Quando um determinado planeta está mais próximo do Sol, ele aumenta de velocidade, quando mais distante, ele diminui. Ou seja, os planetas estão sempre caindo em direção ao Sol mas nunca atingindo-o.

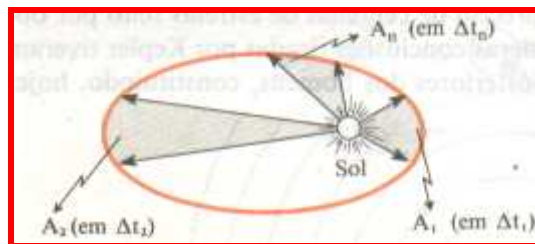


Figura 4. Esquema da lei da áreas.

$$\frac{A_1}{\Delta t_1} = \frac{A_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{A_n}{\Delta t_n}$$

- (3ª Lei) Lei dos períodos ou lei harmônica:** O quadrado do período de revolução (tempo despendido para completar uma órbita) de qualquer planeta é proporcional ao cubo da distância média do planeta ao Sol. Quanto mais distante do Sol mais lentamente ele se move, mas de acordo com uma precisa lei matemática:

$$P^2 = a^3$$

Em que,

P : é o período de revolução do planeta em torno do Sol medido em anos;

a : é a distância da Terra ao Sol medida em unidades astronômicas (distância da Terra ao Sol).

Exemplo: para o planeta Júpiter, temos:

$a = 5$ (Júpiter está a cinco unidades astronômicas do Sol);

Logo, $P = a^{3/2} = 5^{1,5} = 11,18$ anos.

No caso de um satélite artificial em torno da Terra tem-se que:

$$t^2 = a^3 / K$$

Em que,

a : semi-eixo maior da elipse (ou o raio no caso de uma órbita circular);

K : é a constante de Kepler em unidades SI ($= 10^{13}$).

Exemplos:

1) Calcular o período de revolução de um satélite com uma altitude de 832 km.

$a = 832.000 + 6.378.000$ (Raio da Terra) $= 7.210.000$ m

$K = 10^{13}$

$$t = \sqrt{\frac{a^3}{k}} = \sqrt{\frac{7210000^3}{10^{13}}} = 6.122,135 \text{ segundos} = 102,04 \text{ minutos.}$$

2) Calcular a altitude H que deve ficar um satélite para que o período de revolução seja de 86.164 segundos.

$t = 86.164$ segundos

$K = 10^{13}$

$$a = \sqrt[3]{k \cdot t^2} = \sqrt[3]{10^{13} \cdot 86164^2} = 42.029.146,24 \text{ m}$$

$a = R_t + H$, Logo:

$$H = a - R_t = 42.029.146,24 - 6.378.000 = 35.651.146,24 \text{ m} = 35.651,15 \text{ km}$$

d) Lei da Gravitação Universal de Newton: deduzida a partir de suas leis de movimento e das leis de Kepler sobre o movimento planetário. Enunciada em 1687 por Sir Isaac Newton em seu trabalho *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Esta lei é válida apenas para massas pontuais (pontos materiais), não sendo aplicada no caso de corpos de dimensões finitas.

"A força **F** entre duas partículas quaisquer, de massas **m₁** e **m₂**, separadas pela distância **r**, é atrativa e age ao longo da linha que une as partículas, e seu módulo vale **F = G . (m₁ . m₂) / r²**, onde **G** é a constante de gravitação gravitacional (**G=6,673x10⁻¹¹N.m²/kg²**), válida para todos os pares de partículas."

As forças gravitacionais entre duas partículas constituem um par ação e reação, ou seja, a primeira partícula exerce sobre a segunda uma força dirigida ao longo da linha que une as partículas e vice-versa. As forças têm o mesmo módulo e sentidos opostos.

e) Movimento dos satélites: seja um satélite **S** de massa m_S a uma altitude **H** acima da superfície terrestre, descrevendo uma órbita elíptica com velocidade escalar v_S em torno da Terra **T** (com raio $r_T = 6,371 \cdot 10^6$ m = 6.371km e massa $m_T = 5,976 \cdot 10^{24}$ kg).

Forças atuantes no sistema:

- **Força centrípeta F_{CP} :** força de ação exercida pela Terra sobre o satélite, necessária para manter o satélite em movimento sobre a órbita circular
- **Força gravitacional F_G :** força de reação, exercida sobre a Terra pelo satélite

$$F_G = F_{CP}$$

$$G \cdot (m_T \cdot m_S) / (r_T + H)^2 = m_S \cdot v_S^2 / (r_T + H)$$

$$v_S = [(G \cdot m_T) / (r_T + H)]^{1/2}$$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot (r_T + H) / v_S$$

Exemplo: Para o satélite Landsat 4, temos:

$$H = 705 \text{ km}$$

$$v_S = \left[\frac{G \cdot m_T}{r_T + H} \right]^{1/2} = \left[\frac{6,673 \times 10^{-11} \cdot 5,976 \cdot 10^{24}}{6,371 \cdot 10^6 + 705000} \right]^{1/2} = 7507,09 \text{ m/s} = 7,507 \text{ km/s}$$

$$T = 2\pi \frac{r_T + H}{v_S} = 2\pi \frac{6,371 \cdot 10^6 + 705000}{7507,09} = 5922,37 \text{ seg} = 98,7 \text{ min} = 1,645 \text{ h} =$$

$$14,6 \text{ voltas/dia}$$

f) Parâmetros orbitais

- **Apogeu:** ponto de altitude máxima da órbita (Figura 5);
- **Perigeu:** ponto de altitude mínima da órbita;
- **Nodos ascendente e descendente da órbita:** são os pontos de intersecção da órbita com o plano equatorial. Nodo ascendente é aquele que o satélite atravessa no Equador quando se dirige do Sul para o Norte. Nodo descendente é aquele que o satélite atravessa no Equador quando se dirige do Norte para o Sul. A “linha dos nodos” é aquela que liga os nodos ascendente e descendente, passando pelo centro da Terra.

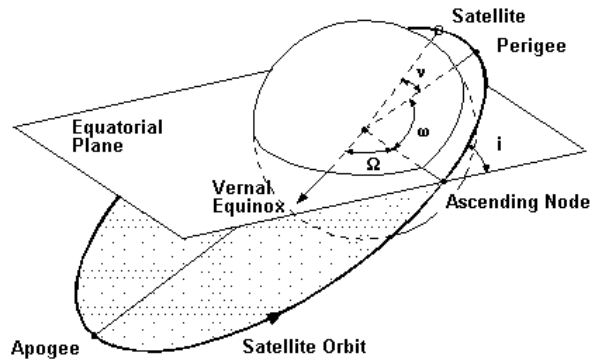


Figura 5. Esquema da órbita de um satélite.

- **Inclinação (I):** ângulo entre o plano orbital do satélite e o plano equatorial da Terra. Inclinações próximas a 0° correspondem às chamadas órbitas equatoriais. Inclinações próximas a 90° correspondem às chamadas órbitas polares pois cobrem os dois polos. Órbitas com inclinação entre 0° e 90° rodam no mesmo sentido que a Terra (Oeste - Leste) e por isso são denominadas de "progressivas". Órbitas com inclinação maior que 90° rodam no sentido contrário à Terra (Leste - Oeste) e por isso são chamadas de "retrógradas". Inclinações maiores que 50° e menores que 130° correspondem a órbitas "polares" pois atingem latitudes altas. Inclinações menores que 40° correspondem a órbitas próximas ao Equador, não podendo imagear em latitudes altas.
- **Ascensão reta do nodo ascendente (Right Ascension of Ascending Node - RAAN - Ω):** ângulo entre o primeiro ponto de Aires e o nodo ascendente. Segundo valor que alinha a elipse orbital no espaço, considerando que a inclinação é o primeiro.
- **Argumento do perigeu (Argument of perigee - ω):** é o ângulo medido no plano orbital, na direção do movimento, do nodo ascendente ao perigeu. É o ângulo entre o eixo maior da elipse (linha entre o perigeu e o apogeu) e a linha dos nós, medido no plano da órbita. Varia entre 0° e 360° , sendo igual a 0° quando o perigeu está no nodo ascendente, e 180° quando o satélite está mais longe da Terra (apogeu) cruzando o Equador em movimento ascendente. Determina a posição da elipse orbital no plano orbital, visto que a inclinação i e a ascensão reta Ω determinam a posição do plano orbital no espaço.
- **Excentricidade:** determina a forma da elipse orbital.
 - Círculo: Excentricidade = 0;
 - Elipse longa e estreita: Excentricidade = 1.

As órbitas circulares permitem visar a Terra a uma distância constante sendo utilizadas pelo satélite europeu ERS-1 e pelo satélite-radar canadense RADARSAT.
- **Movimentação média (Mean motion - n):** velocidade angular média do satélite (em revoluções por dia) em uma órbita elíptica: $n = 2 \cdot \pi / T$ onde T é

o período orbital. Parâmetro relacionado com o tamanho da órbita (distância do satélite à Terra).

- **Anomalia média (Mean anomaly - M):** especificação da posição do satélite na órbita em uma dada época. Ângulo medido a partir do perigeu na direção do movimento do satélite, que um satélite teria se movimentasse em velocidade angular constante.
- **Anomalia verdadeira:** ângulo no plano orbital do satélite entre o perigeu e a posição do satélite medido na direção do movimento do satélite.
- **Elementos keplerianos:** descrevem a forma e orientação de uma órbita elíptica em torno da Terra, bem como a posição de um satélite naquela órbita em uma dada época (data e hora de referência): argumento do perigeu, ascensão reta do nodo ascendente, anomalia média, semi-eixo maior, inclinação e excentricidade.
- **Perturbações:** existem os seguintes tipos de perturbações:
 - **Geopotencial:** devido ao achatamento terrestre, ou seja, ao desvio principal da Terra em relação à forma esférica; altera a orientação do plano orbital no espaço sem alterar a inclinação; altera a orientação da elipse no plano orbital.
 - **Atração lunissolar:** devido às ações atrativas do Sol e da Lua; afeta todos os elementos orbitais, diminuindo a altura do perigeu e, conseqüentemente, afetando o tempo de vida do satélite.
 - **Arrasto atmosférico:** devido ao atrito com a atmosfera; diminuição do semi-eixo maior, da excentricidade e do período de revolução.

2.1. Tipos de órbitas

- a) **Órbita geossíncrona:** é qualquer tipo de órbita que produz uma varredura terrestre repetitiva, sendo obtida quando o período orbital é um múltiplo inteiro ou sub-múltiplo de um dia sideral. Para um observador na Terra, um satélite na altitude geossíncrona traçará uma figura em forma de um oito (8) numa faixa de latitude de $\pm I$ (inclinação). Se a órbita for elíptica, a figura do oito será distorcida. O satélite deve ficar a aproximadamente 36.000 km (35.786 km) de distância da Terra.
- b) **Órbita geoestacionária:** é uma órbita geossíncrona, circular, progressiva, com inclinação nula ($I = 0$). A velocidade angular do Satélite é igual à da Terra em torno de seu eixo, de modo que o Satélite parece imóvel para um observador terrestre. Permite uma observação constante da superfície terrestre para os pontos situados entre as latitudes de $81,3^{\circ}$ Sul e $81,3^{\circ}$ Norte, sendo que a área de serviço cobre quase 1/3 da superfície terrestre. O período é de 86.164s.

- c) **Órbita heliossíncrona:** é uma órbita cujo plano guarda uma orientação constante em relação ao Sol, ou seja, o ângulo Sol-Terra-Satélite permanece constante, garantindo condições semelhantes de iluminação ao longo do ano na área imageada. Neste caso, o satélite cruza a linha do Equador e cada latitude sempre à mesma hora solar. O período de rotação da Terra em torno do Sol é de 365,25 dias. Logo, sua rotação média é de aproximadamente $0,986^{\circ}$.
- d) **Órbita terrestre baixa (Low Earth Orbit - LEO):** órbitas elípticas ou circulares (mais comum) a altitudes inferiores a 2000 km acima da superfície terrestre. O período orbital varia entre 90 min e 2 h. O tempo máximo que um satélite fica acima do horizonte local para um observador na Terra é de 20 minutos. O raio da área de serviço varia de 3000 a 4000 km. Sofrem arrasto atmosférico.
- e) **Órbitas circulares intermediárias (Intermediate Circular Orbits - ICO) ou Órbitas terrestres médias (Medium Earth Orbits - MEO):**
- altitude: 10000 km
 - Período orbital: 6h Tempo máximo: algumas horas
 - Sistemas de comunicação global: 2 a 3 satélites em órbitas planas
- f) **Órbitas altamente elípticas (Highly Elliptical Orbits - HEO)**
- Apogeu = 50000 km Perigeu = 500 km
 - Inclinação: $63,4^{\circ}$
 - Período orbital: 8 a 24 horas
 - Exemplo: Satélite Molniya (Rússia)

3.0 Foguetes

3.1. Introdução

No início os foguetes eram compostos de uma mistura de salitre, sulfura e charcoal para espantar maus espíritos na China no terceiro século antes de Cristo.

A decolagem é vertical para que o foguete livre-se da estrutura de lançamento. Após isso, através do seu sistema de direção, inicia uma inclinação e continua num caminho curvo até a altitude desejada. Neste ponto todo combustível deve ter sido consumido e o foguete entra num estado de "burnout". Se a velocidade atingida é adequada para a altitude atual, então ele permanecerá em órbita. Ou seja, para que um satélite permaneça em órbita circular ou elíptica, ele deve ser inserido na órbita com uma velocidade tangencial específica que depende apenas da altitude no caso de órbitas circulares. A velocidade tangencial deve ser a "burnout velocity". Uma grande quantidade de combustível deve ser queimada rapidamente para evitar gasto de energia no transporte de combustível não queimado em altitudes elevadas, produzindo altas velocidades de escapamento dos gases em um rápido processo de combustão.

3.2. Definições

É um motor a reação que contém dentro de si todo o necessário para a queima de seu combustível e que por isso não requer um meio externo de ar para a combustão e assim pode operar no vácuo.

É uma câmara que contém gás sob pressão. Uma pequena abertura no final da câmara permite o escape do gás e impulsiona o foguete na direção oposta.

Semelhante aos balões no modo de funcionamento mas diferente na forma de produção do gás. O gás é produzido através da combustão de propulsores sólidos e/ou líquidos. A propulsão é gerada pela diferença de pressão entre o gás expelido e o ambiente e pela alta velocidade de saída dos gases de combustão. As altas pressões e temperaturas de combustão são obtidas através de um combustível muito energético e de gases de exaustão com baixo peso molecular. Com isso é possível criar gases de exaustão de alta velocidade.

- Ação: saída de gás dos motores
- Reação: movimento do foguete na direção oposta
- Componentes: Propulsor + Câmara de combustão + Bocal
- Câmara de combustão: volume no qual a combustão ou Reação de liberação de energia acontece.

3.3. Tipos de acordo com o tipo de combustível utilizado

a) Propulsor sólido

- Usa uma mistura sólida de combustível e oxidante como propulsores.
- Vantagens: Não tem partes móveis e, portanto, é mais seguro. Fáceis de armazenar e manusear. Mais baratos.
- Desvantagem: A ignição não pode ser interrompida até que todo o combustível seja consumido após o seu início.

b) Propulsor líquido

- O combustível e o oxidante são combinados apenas no momento da combustão. Bombas são necessárias para levar o combustível e o oxidante ao motor suficientemente rápido para desenvolver a propulsão desejada.
- Vantagens: são controláveis e mais poderosos (até duas vezes).
- Desvantagem: mais complicados e difíceis de armazenar.

4.0. Sistemas Sensores

São sistemas que transformam a radiação eletromagnética (REM) em um sinal elétrico com informações sobre o ambiente visado

Configuração típica de um Sistema Sensor:

Radiação eletromagnética proveniente do alvo visado \Rightarrow sistema ótico \Rightarrow detector \Rightarrow amplificador \Rightarrow conversor analógico digital \Rightarrow Transmissão dos Dados (Telemetria)

- a) **Sistemas óticos:** são sistemas geralmente compostos por uma associação de espelhos e lentes, destinados à concentração da radiação proveniente da superfície terrestre sobre o detector. Os espelhos são mais leves que as lentes equivalentes e não introduzem aberrações cromáticas. Como os detectores utilizados têm, geralmente, dimensões da ordem de microns, a distância focal é relativamente curta.
- b) **Detectores fotoelétricos:** são componentes que produzem um sinal elétrico (analógico) em função da potência da energia incidente nele e da sua sensibilidade à radiação incidente numa faixa do espectro. Eles apresentam as seguintes características:
- Cobrem do ultravioleta ao infravermelho térmico;
 - Fornecem um sinal elétrico que pode ser transmitido à superfície terrestre em tempo real;
 - Permitem efetuar medidas radiométricas precisas, pois as características elétricas dos detectores são relativamente estáveis no tempo;
 - Os sinais podem ser tratados por uma série de métodos já conhecidos;
 - A resposta da maior parte dos detectores comumente utilizados é linear com a radiação incidente, o que facilita a interpretação dos sinais.
- **Visível e Infravermelho próximo (400 - 1.100 nm)**
- Detetores de fotodiodo de silício - apresentam resposta linear, grande sensibilidade, boa estabilidade em função da temperatura e pouco nível de ruídos. Podem ser isolados, reagrupados em uma barra ou uma matriz e associados a um dispositivo de transferência de carga (CCD: Charge Coupled Device)
 - Tubos vidicon;
 - Fotomultiplicadores - permite realizar medidas no ultravioleta.
- **Infravermelho médio (1.300 - 3.000 nm)**
- Fotodiodos de germânio - sensíveis até 1,7 μm
 - Fotodiodos de arsenato de índio InAs - sensíveis até 3,5 μm
 - Fotodiodos de antimoneto de índio InSb - sensíveis até 5,5 μm
 - Células fotocondutoras de sulfato de chumbo PbS - sensíveis até 3 μm
- **Infravermelho térmico (7.000 - 15.000nm)**
- Detetores de Telureto de Mercúrio-Cádmio (HgCdTe) na temperatura de 100K: o máximo de sensibilidade destes detectores fotovoltaicos, desde o infravermelho médio até o infravermelho térmico, é ajustado de acordo com as proporções de Mercúrio (Hg) e Cádmio (Cd).

- **Amplificação do sinal:** tem a finalidade melhorar o desempenho do conversor analógico digital (AD).
- **Conversor Analógico-Digital (AD):** responsável pela discretização ou digitalização do sinal analógico registrado.
- **Sistemas de Varredura:** são utilizados para gerar as linhas de uma imagem, sendo baseados em dispositivos eletrônicos ou mecânicos. A direção de varredura, neste caso, é perpendicular à direção da órbita do satélite na superfície.
 - **Varredura mecânica:** no caso dos satélites Landsat MSS e TM, por exemplo, consiste no acoplamento de um espelho na frente do radiômetro com uma inclinação de 45° , podendo oscilar de $\pm 2,9^\circ$ em torno desta posição. A rotação de $5,8^\circ$ do espelho corresponde a um campo de vista de $11,56^\circ$.
 - **Varredura eletrônica:** o satélite SPOT, por exemplo, possui uma barra com 3.000 ou 6.000 células fotoelétricas colocadas lado a lado para obter pixels de 20 ou 10m de lado. Uma varredura eletrônica é realizada durante alguns milionésimos de segundo cada vez que o satélite avança de 10 ou 20m.

As colunas, nos dois tipos de varredura, são obtidas através do deslocamento do satélite segundo sua órbita. Neste caso a direção de varredura é paralela à órbita do satélite na superfície.

4.1. Classificação dos Sistemas Sensores

- **Quanto à fonte de energia**
 - Ativos: produzem a própria radiação. Ex.: Radar.
 - Passivos: dependem de fonte externa que é comumente a radiação solar. Ex.: Landsat-TM, SPOT-HRV, AVHRR/NOAA
- **Quanto à região espectral**
 - Óticos: utilizam espelhos, lentes e prismas
 - i) Reflexão (0,38 a 3 μm): Visível (0,38 a 0,72 μm), Infravermelho próximo (0,72 a 1,3 μm) e Infravermelho médio (1,3 a 3 μm)
 - ii) Emissão (7 a 15 μm): Infravermelho termal
 - Microondas (1 mm a 1 m).
- **Quanto ao tipo de transformação da energia**
 - Não-imageadores: geram informações minuciosas e pontuais em forma de dígitos ou gráficos. Os equipamentos típicos são os radiômetros (que possuem algumas bandas largas) e os espectro-radiômetros (que contém várias bandas estreitas)

- **Imageadores:** geram imagens, ou seja, descrevem a variação espacial da resposta espectral dos alvos observados.
 - i) Quadro ou "Frame": formam a imagem em uma única operação
 - ii) Varredura ou "Scanning": formam a imagem através de operações sequenciais mecânicas (Ex.: Landsat-TM) ou eletrônicas (Ex.: SPOT-HRV).

4.2. Instrumentos fotográficos

Vantagens:

- Grande resolução espacial
- Costume de trabalho cotidiano

Desvantagens:

- Não reutilização dos filmes, implicando na necessidade de embarcar uma quantidade suficiente de filmes para a obtenção das imagens previstas ou de prever um recarregamento periódico;
- Não disponibilidade imediata e direta das informações registradas num filme;
- Sensibilidade limitadas ao infravermelho próximo (0,9 μm);
- Dinâmica limitada, não permitindo efetuar medidas fotométricas precisas, pois a densidade ótica é função da irradiância recebida, das características dos banhos de tratamento e da temperatura.

4.3. Principais componentes ou subsistemas dos sistemas sensores

a) Ajuste de órbita (Orbit Adjust Subsystems - OAS): o ajuste de órbita tem as seguintes funções:

- Corrigir a órbita do satélite após o lançamento;
- Manter ou reestabelecer a órbita durante seu período de vida útil;

b) Subsistema de controle de atitude (Attitude Control Subsystem - ACS): apresenta as seguintes funções:

- Controlar a posição do satélite em relação ao plano orbital;
- Manter estabilidade da base do satélite em relação ao plano horizontal para assegurar que os subsistemas sensores estejam em posição paralela à superfície visada;
- Garantir que os painéis solares estejam orientados para o mais próximo possível da posição perpendicular ao vetor Sol-Satélite.

Movimentos que interferem a aquisição de dados:

- Pitch (Arfagem): movimentação do satélite no plano horizontal, ou seja, oscilação de sua base em relação ao eixo longitudinal da espaçonave;

- Roll (Rolagem): movimentação do satélite no plano horizontal, ou seja, oscilação da base do satélite perpendicularmente à provocada pelo "pitch";
 - Yaw (Deriva): rotação da espaçonave em relação ao seu eixo vertical, ou seja, determina um desvio da direção da órbita.
- c) **Medição constante da posição do satélite**: através de sensores que observam a posição de corpos celestes como o Sol, a Terra e algumas estrelas.
- d) **Suprimento de energia**: tem as funções de gerar (através dos painéis solares), armazenar (através de baterias) e distribuir a energia elétrica necessária para operar todos os demais subsistemas que compõem a espaçonave.
- e) **Controle térmico**: tem as funções de manter a temperatura entre $20^{\circ} \pm 10$ °C para o perfeito funcionamento dos sensores e dos subsistemas de controle. Isto é feito através de um sistema de respiração nas paredes da espaçonave ou com tubos de aquecimento que podem transferir o excesso de calor de um ponto específico às paredes do equipamento.
- f) **Telemetria (Communications and Data-Handling Subsystems)**: tem as funções de controlar o fluxo interno e externo de informações, tais como, telemetria, armazenamento de dados a bordo, comunicação interna entre os diferentes subsistemas que compõem o satélite.
- Telemetria de banda larga: processamento e transmissão dos dados coletados pelos sensores RBV, MSS e TM;
 - Telemetria de banda estreita: coleta e transmissão dos demais dados do satélite para as estações de recepção; recebe comandos do STDN (Space Flight Tracking and Data Network); transmite os dados coletados pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs).
- g) **Subsistema RBV (Return Beam Vidicon)**: produz imagem instantânea da superfície, sendo semelhante a um sistema fotográfico ou a uma câmera de televisão. A energia proveniente da cena impressiona a superfície fotossensível do tubo da câmera. Durante um certo tempo, a entrada de energia é interrompida por um obturador, para que o tubo seja varrido por um feixe de elétrons gerando um sinal de vídeo que é transmitido telemetricamente
- h) **Subsistema de imageamento do terreno por varredura de linhas ("line scanner")**: composta por matriz de detectores.

5.0. Sistemas de satélites

As radiações do espectro visível e do infravermelho próximo podem ser registradas pelos sistemas passivos do sensoriamento remoto com métodos fotográficos, de TV e de varredura ("scanners"). Esses sistemas registram a

radiação eletromagnética que é refletida ou emitida pelos alvos terrestres. Enquanto os métodos fotográficos e de TV são limitados ao intervalo de 0,4 a 0,9 μm , a técnica de varredura permite o registro de imagens nos comprimentos de onda do ultravioleta até o infravermelho térmico (0,3 - 14,0 μm). A radiação refletida e/ou emitida pela superfície terrestre atravessa o sistema óptico do "scanner" e é focalizada sobre os detectores. Estes transformam a radiação em sinais elétricos que são gravados em fita magnética. Um "scanner" multiespectral pode gravar sinais provenientes de vários intervalos de comprimento de onda.

5.1. Satélite Landsat

No dia 23 de Julho de 1972, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) lançou nos Estados Unidos um primeiro satélite chamado ERTS 1 (Earth Resources Technology Satellites), no quadro do Programa Espacial "Earth Resources Technology Satellite".

Este Programa Espacial e os satélites que o compõe foi em seguida rebatizado "Landsat" para melhor sugerir o enfoque do seu esforço sobre Sensoriamento Remoto de Recursos Naturais Terrestres.

Foram lançados 7 satélites do Programa Landsat desde 1972, sendo que 6 deles forneceram imagens da Terra, como segue:

- Landsat 1: Lançado em 23/07/72 - Desativado em 06/01/78
- Landsat 2: Lançado em 22/01/75 - Desativado em 52/02/82
- Landsat 3: Lançado em 05/03/78 - Desativado em 31/03/83
- Landsat 4: Lançado em 16/07/82 - Não imageia, porém não está desativado
- Landsat 5: Lançado em 01/03/84 - Ativo até o momento
- Landsat 6: Lançado em 05/10/93 - Perdido após o lançamento
- Landsat 7: Lançado em 15/04/99 - Ativo até o momento

A primeira geração do programa Landsat, composta de 3 satélites, Landsat 1-2-3, tinha 2 instrumentos: a Camera RBV, Return Beam Vidicon (RBV) e o MSS (Multispectral Scanner). Em razão de problemas técnicos no RBV, e da superioridade técnica do instrumento MSS do ponto de vista espectral e radiométrico, o RBV foi muito pouco utilizado.

A segunda geração do programa Landsat foi iniciada em 1982 como lançamento do satélite Landsat 4, que já possuía o instrumento Thematic Mapper (TM) além do MSS.

O Landsat 5, de acordo com as previsões técnicas baseadas nas performances atuais do satélite, deverá ficar operacional por mais alguns anos após da virada do século.

O LANDSAT 6 foi infelizmente perdido logo após o seu lançamento.

A Figura 6 mostra o resumo das características dos Satélites Landsat 1-2-3-4-5.

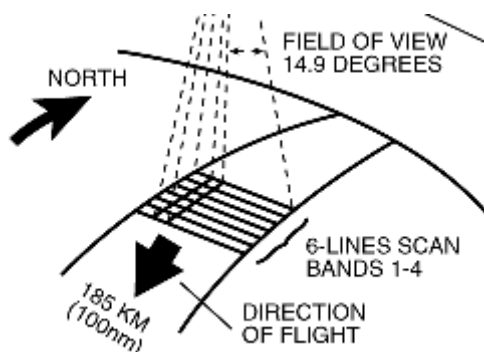


Figura 6. Resumo das características dos Satélites Landsat 1-2-3-4-5

A Tabela 1 mostra os sensores e bandas espectrais do satélite Landsat.

Tabela 1. Sensores e Bandas Espectrais - Comparativo MSS e TM.

Thematic Mapper - TM							
Bandas	1	2	3	4	5	6 IR Termal	7
Faixa (μm)	0.45 - 0.52	0.52 - 0.60	0.63 - 0.69	0.76 - 0.90	1.55 - 1.75	10.42 - 12.50	2.08 - 2.35
Resolução	30	30	30	30	30	120	30
Multi-Spectral Scanner - MSS							
Bandas	1	2	3	4			
Faixa (μm)	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	0.7 - 0.8	0.8 - 1.1			
Resolução (m)	80	80	80	80			

A tabela 2 mostra algumas orientação na escolhas das bandas espectrais do Landsat.

Tabela 2. Orientação na escolhas das bandas espectrais do Landsat

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha

		urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

As órbitas dos satélites Landsat 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam as seguintes características (Figura 7):

- Repetitivas
- Circulares
- Heliosíncronas, ou seja, sincronizadas com o sol, passando na mesma hora solar em qualquer ponto observado
- Quase polar, permitindo assim uma cobertura completa da terra entre 81°N e 81°S.
- Altitude: 705 km Velocidade : equivalente a 7,7 km/seg no solo.

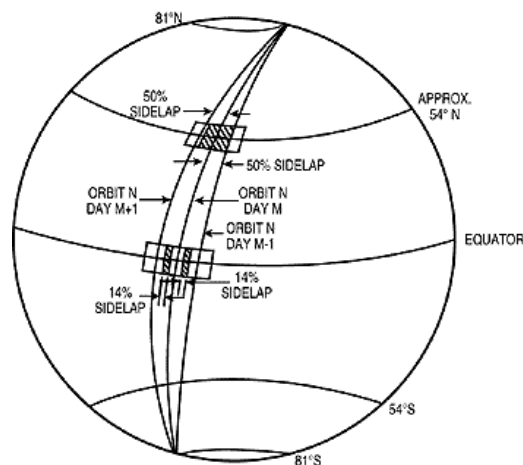


Figura 7. O ciclo orbital do LANDSAT 1-2-3 é de 18 dias. Para o LANDSAT 4, 5 e 7 é de 16 dias.

Atualmente, o Landsat 5 e o Landsat 7 estão com um intervalo de tempo para imagear a mesma área de 8 dias exatamente, ou seja, existe agora duas vezes mais dados Landsat do que antes do lançamento do Landsat 7.

A área imageada pelo Landsat, seja MSS ou TM é uma faixa de 185 Km, recortada em cenas de 185 km x 170 km . O satélite demora 24 s para imagear esta área (Figura 8).

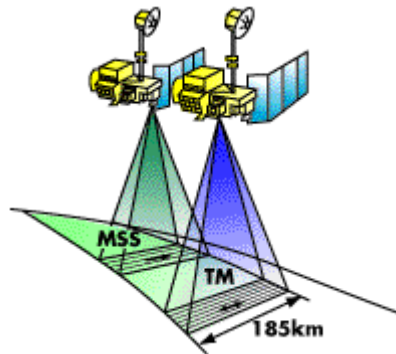


Figura 8. Área imageada pelo satélite Landsat.

O Landsat7 é o mais recente satélite em operação do programa Landsat, financiado pelo Governo Americano. O novo satélite foi lançado em abril de 1999, com um novo sensor a bordo denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). A operação do satélite em órbita é administrada pela NASA (National Space and Space Administration) e sua produção e comercialização de imagens fica sob os cuidados da USGS (United States Geological Survey) . A sua vida útil está prevista para ser superior a 5 anos em órbita.

Uma imagem LANDSAT 7 ETM+ é composta por 8 bandas espectrais que podem ser combinadas em inúmeras possibilidades de composições coloridas e opções de processamento. Entre as principais melhorias técnicas se comparado ao seu antecessor, o satélite Landsat 5, destacam-se a adição de uma banda espectral (banda Pancromática) com resolução de 15 m, perfeitamente registrada com as demais bandas, melhorias nas características geométricas e radiométricas, e o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 m. Esses avanços tecnológicos permitem qualificar o LANDSAT 7 como sendo o satélite mais interessante para a geração de imagens de satélites com aplicações diretas até a escala 1:25.000, em áreas rurais principalmente, mesmo em grandes extensões de território, como acontece frequentemente no Brasil.

As imagens geradas pelo Landsat7 adquiridas pelo sensor ETM+ apresentam a melhor relação custo/benefício entre os dados gerados por satélites de média resolução (15 a 30 metros) atualmente oferecidos no mercado. As imagens Landsat 7 ETM+ compõem os produtos e serviços com maior aceitação no mercado na América do Sul no momento e representa a maior parte das vendas da ENGESAT no continente.

a) A Órbita do Landsat 7

O Landsat7 pode adquirir imagens numa área que se estende desde 81° de latitude norte até 81° de latitude sul e obviamente, em todas as longitudes do globo terrestre.

Uma órbita do Landsat7 é realizada em aproximadamente 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas da Terra por dia, e a cobertura total do nosso planeta sendo completada em 16 dias. A órbita é descendente, ou seja de norte para sul, o satélite cruzando a linha do Equador entre 10:00 e 10:15 (hora local) em cada passagem. O Landsat7 é "heliosincronizado", ou seja sempre passa num mesmo local dado ao mesmo horário solar.

Outro fato importante é que o satélite LANDSAT 7 tem o mesmo período de revisita que o Landsat5 (16 dias), e a sua órbita é de tal maneira que resultou na mesma grade de referência do LANDSAT 5 (WRS2) e tem a mesma área imageada (185 x 185 km por cena). A conservação destes parâmetros técnicos facilita o processo de pesquisa de imagens pode ser feito com a mesma grade de referência e a perfeita integração no processamento das imagens do LANDSAT 7 com dados históricos do LANDSAT 5 existentes desde 1985, no caso de utilização dos dois tipos de dados simultaneamente no mesmo projeto para a mesma área como por exemplo em estudo multitemporal.

b) Diferenças notáveis entre o Landsat 7 e o Landsat 5

- Adição no Landsat7 de uma banda Pancromática com resolução espacial de 15m
- Aprimoramento no sistema de calibração radiométrica dos sensores, o que garante uma precisão radiométrica absoluta de +/-5%.
- Aprimoramento na geometria de imageamento, o que resulta numa maior precisão em imagens corrigidas apenas a partir de dados de efemérides de satélite geradas pelo GPS de bordo, muito próxima da precisão obtida com imagens georeferenciadas com pontos de controle cartográficos.

c) Bandas espectrais e Resolução Espacial

- As bandas do visível e do infra vermelho mantiveram a resolução espacial de 30 m do Landsat 5 (canais 1,2,3,4,5 e 7)
- As bandas do infra vermelho termal (canais 6L e 6H) passam a ser adquiridas com resolução de 60 metros, contra 120 m no Landsat 5.
- A nova banda Pancromática (canal 8) tem 15 m de resolução espacial.

A Tabela 3 abaixo ilustra as diferenças de resolução espectral entre o sensor TM do Landsat5 e o sensor ETM+ do Landsat 7. Os valores abaixo, em μm , representam os limites de comprimentos de onda de sensibilidade das bandas espectrais:

Tabela 3. Diferenças de resolução espectral (μm) entre o sensor TM do Landsat5 e o sensor ETM+ do Landsat 7

Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
TM	0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.08-2.35	-
ETM+	0.45-0.52	0.53-0.61	0.63-0.69	0.78-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.09-2.35	0.52-0.90

d) A banda Pancromática – (banda 8)

A banda Pancromática é a grande novidade no Landsat7 e o sensor ETM+. A sua resolução espacial de 15 m registrado com as demais bandas, facultam as imagens geradas pelo sensor ETM+ do satélite Landsat7 serem trabalhadas para ampliações até escala 1:25.000. Trabalha na faixa espectral de 0.52 - 0.90 (μ) gerando uma imagem de boa separabilidade dos alvos de interesse tanto em área rural como urbana.

e) A banda Termal – (banda 6)

O Landsat 7 gera a banda 6 com ganho baixo (Canal 6L) e ganho alto (Canal 6H). Isso permite várias opções de análise e aplicações, tais como a medição relativa de temperatura radiante ou o cálculo de temperatura absoluta.

5.2. Satélite SPOT

programa SPOT foi planejado e projetado desde o início como um sistema operacional e comercial de observação da Terra (SPOT – Satellite Pour l'Observation de la Terre) (Figura 1).



Figura 9. Satélite SPOT.

Estabelecido por iniciativa do governo francês em 1978, com a participação da Suécia e Bélgica, o programa é gerenciado pelo Centro Nacional de Estudos Espaciais - CNES, que é o responsável pelo desenvolvimento do programa e operação dos satélites. Já foram lançados com sucesso os SPOT 1, 2 e 3, 4 e 5.

a) As características Técnicas Gerais dos Satélites SPOT

Datas de lançamento:

SPOT 1	22 de Fevereiro de 1986, operacional
SPOT 2	22 de Janeiro de 1990, operacional
SPOT 3	26 de Setembro de 1993, perdido em 14 de Novembro de 97
SPOT 4	24 de Março de 1998
SPOT 5	previsto para início de 2001

Características do SPOT 1-2-3

Spot 1, 2, 3	Características
Peso Total Inicial em Início de Vida Útil	1870 kg
Potência dos Paineis Solares	1 kW
Largura dos Paineis Solares	8,032 m
Altitude média no Equador	822 km
Tamanho do Corpo do Satélite	2 m x 2 m x 4,5 m
Frequência da Telemetria da Imagem	8,253 GHz
Fluxo de Transmissão	2 x 25 Mbits/sec
Foguete Lançador	Ariane 2/3
Capacidade de Gravação a Bordo	2 x 22 minutos
Duração da Vida Útil Prevista	> a 3 anos
Ciclo Orbital	26 dias
Duração de uma órbita (nominal)	101,4 min
Inclinação da Órbita	98.7 Graus
Nó Descendente	10:39 Horas
Órbita	Circular e Heliosincronizada

Características do SPOT 4

Spot 4	Características
Peso Total Inicial em Início de Vida Útil	2 700 kg
Potência dos Paineis Solares	2,1 kW
Largura dos Paineis Solares	8,14 m
Altitude média no Equador	822 km
Tamanho do Corpo do Satélite	2 m x 2 m x 5.6 m
Frequência da telemetria da Imagem	8,253 GHz
Fluxo de Transmissão	2 x 25 Mbits/sec
Foguete Lançador	Ariane 4
Capacidade de Gravação a Bordo	2 x 40 minutos + 3 min
Duração da Vida Útil Prevista	> a 5 anos
Ciclo Orbital	26 dias
Duração de uma órbita (nominal)	101,4 min
Inclinação da Órbita	98.7 Graus
Nó Descendente	10:39 Horas
Órbita	Circular e Heliosincronizada

Faixa de varredura

Dois sensores idênticos (HRV - High Resolution Visible) estão a bordo do satélite e podem ser utilizados independentemente, tanto na geometria de

visada como no modo espectral. Cada instrumento tem uma faixa de varredura de 60 km. Quando os dois instrumentos operam em modo "geminado" imageando áreas contíguas, a área total coberta é de 117 km, ou seja, duas faixas de 60 Km de largura cada com 3 km de sobreposição (Figura 10)

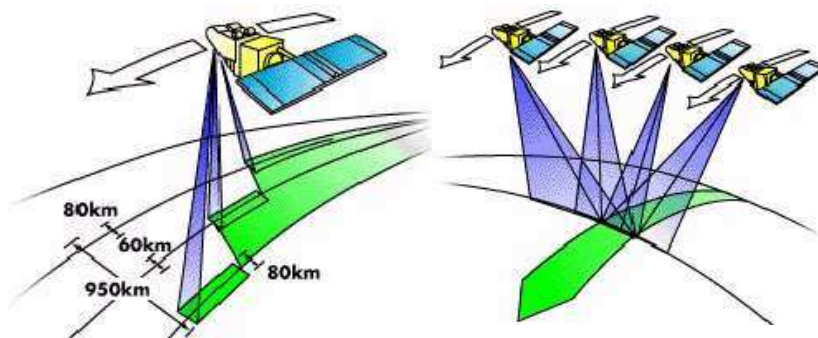


Figura 10. Faixa de varredura do satélite SPOT.

Os instrumentos HRV podem imagear ao nadir, ou na vertical do plano orbital do satélite ou, graças a um espelho móvel que pode ser orientado, apontando para as áreas de interesse num corredor que vai até 27 graus lateralmente com relação a vertical, para leste ou oeste, tendo acesso então a uma faixa de 950 Km de largura. Quando as cenas são adquiridas com algum ângulo de visada, o efeito de perspectiva faz com que a área imageada possa ser mais larga, até 80 Km com visada de 27 graus lateralmente.

Esta possibilidade confere aos satélites SPOT uma capacidade de revisita de uma área de interesse de alguns dias (3 a 4 dias em média), muito superior a periodicidade da órbita que é de 26 dias, e permite igualmente a aquisição de imagens em estereoscopia (Figura 11).

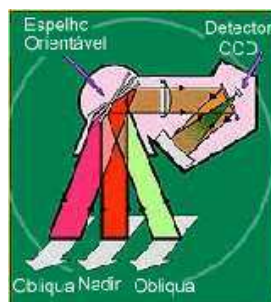


Figura 11. Espelho orientável do SPOT.

Uma das características tecnológicas mais inovadoras que o SPOT trouxe em 1986 e mantém até hoje é que os seus instrumentos HRV são providos de sensores eletrônicos usando a tecnologia de CCD (Charged Couple Device), que possibilitam maior fidelidade geométrica das imagens adquiridas por eliminarem a necessidade de usar um scanner com partes móveis que são geralmente uma fonte de degradação da qualidade das imagens quando o satélite envelhece ...

Modos de imageamento e Bandas Espectrais : PAN ou M, XS e XI, P+XS

O SPOT opera em 2 modos espectrais distintos que podem também serem programados simultaneamente para uma mesma área: Multiespectral XS ou XI, dependendo do satélite e Pancromático ou Monoespectral, dependendo do satélite. Todas as imagens do SPOT são codificadas em 8 bits.

Nos modos Multiespectrais, as observações são feitas em três bandas espectrais (modo XS) para o SPOT 1,2,3 e 4 bandas no SPOT 4 (modo XI), sempre com resolução de 20 metros.

No modo Pancromático ou Monoespectral, as observações são feitas por uma única banda, de 0,51 μm a 0,73 μm , no caso do SPOT 1-2-3, e de : 0,61 a 0,68 μm no SPOT 4, sempre com uma resolução de 10 metros.

Sensores	Bandas Espectrais	Resolução
HRV-XS : Multiespectral: 3 bandas no SPOT 1-2-3 HRVIR-XI : Multiespectral: 4 bandas no SPOT-4	Banda-1 : 0.50 ~ 0.59 μm Verde	20m
	Banda 2 : 0.61 ~ 0.68 μm Vermelho	
	Banda 3 : 0.79 ~ 0.89 μm Infra Vermelho Próximo	
	Banda 4 : 1.58 ~ 1.75 μm Infra Vermelho Médio	
HRV-PAN : Pancromático no SPOT 1-2-3 HRVIR-M : Monoespectral No SPOT 4	Banda única: 0.51 ~ 0.73 μm Visível menos Azul Dados comprimidos a bordo (DPCM ¾) Banda única: 0,61 ~ 0,68 μm Igual a Banda 2 Dados comprimidos a bordo (DPCM ¾)	10m

O modo Pancromático ou Monoespectral é aconselhado para aplicações que procuram precisão geométrica e resolução.

O Modo Multiespectral XS ou XI é recomendado para aplicações temáticas, para estudos de vegetação, uso e ocupação de solos, etc...

Os modos PAN e XS podem ser combinados rendendo uma imagem PAN+XS, colorida, com 3 bandas e 10 m de resolução. As imagens PAN e XS do SPOT 1-2-3, ainda que adquiridas simultaneamente, não estão registradas entre si, o que pode fazer este processamento ser trabalhoso.

Em 2002, a francesa CNES lançou o SPOT 5, para satisfazer ainda mais os usuários nas aplicações de cartografia, telecomunicações, planejamento urbano, defesa, agricultura, etc. , também imageando em 4 bandas espectrais.

As imagens do SPOT 5 vem com maior resolução, dado que o sensor possui agora um novo instrumento, o HRG (High-Resolution Geometric), que possibilita imagens de maior resolução na banda pancromática (5 metros) e no modo "supermode" (2,5 metros).

Características técnicas do sensor SPOT 5:

- Peso de 3.000 Kg
- Órbita na altitude de 832 km
- Precisão de localização da órbita e então dos produtos corrigidos sistematicamente de 50 m, graças a um sensor de estrela a bordo do SPOT 5 (contra 350 m anteriormente)
- Memória "Solid State" de 90 Gb.
- Downlink para as estações de 2 canais de 50 Mbps, garantido a transmissão de 5 canais de imageamento simultaneamente (2 Instrumentos HRS, 2 Instrumentos HRG e Vegetação).
- 2 Instrumentos HRG (High-Resolution Geometric) que imageiam com 5 m de resolução em Pancromático e 2.5 metros em "supermode". Cada um dos dois instrumentos recobre uma faixa de 60 Km no solo, dentro de um

corredor potencial de visibilidade de ± 420 km. Da mesma forma que os sensores dos antecessores do SPOT 5, os instrumentos HRG podem imagear igualmente em modo multiespectral em 4 bandas (faixa espectral da luz verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio).

- 2 instrumentos HRS (High-Resolution Stereoscopic) que fornecerão cobertura estereoscópica de amplas regiões, adquiridas pelos 2 telescópios que formam o conjunto, sendo um deles com visada dianteira e outro com visada traseira, e capazes de fornecer dados em esteresocopia adquiridos numa mesma órbita a alguns segundos de intervalo somente, e que uma vez processados, resultarão em Modelos Numéricos de Terreno de 10 m de precisão altimétrica, servindo a inúmeras e novas aplicações que exigem precisão altimétrica, tal como cartografia, base de dados militares e civis, telecomunicações (telefonia celular em particular), simuladores e vôo e sistemas de aproximação aeroportuária e para Sistemas de Informação Geográfica. O Instrumento HRS foi desenvolvido no quadro de uma parceria inovadora entre o CNES, ASTRIUM e a própria SPOT IMAGE
- 5 m e 2.5 m de resolução em P&B no modo Pancromático, contra 10m anteriormente
- 10 m de resolução em bandas multiespectrais contra 20 m anteriormente.
- Cobertura de 60 km x 60 km ou 60 km x 120 km quando os 2 instrumentos HRG serão usados simultaneamente
- Precisão absoluta de localização melhor que 50m sem uso de pontos de controle

5.3. Satélite KOSMOS (câmara KVR-1000)

A câmara de aerolevantamento KVR-1000 é instalada nas plataformas dos satélites russos da série KOSMOS, que giram a uma altitude de 220 km em torno Terra. Cada imagem cobre uma área de 40 por 40 km. As imagens registradas pelo KVR apresentam uma resolução de 2m e são das mais detalhadas que podem ser utilizadas no meio civil. Elas podem ser ampliadas até a escala 1:10.000 e são muito úteis para aplicações de planejamento urbano. Normalmente, o distribuidor russo, a companhia SOVINFORM SPUTNIK, fornece estas imagens na forma de cópias fotográficas, que podem ser transferidas para a forma digital por meio de um "scanner".

5.4. Satélite IKONOS

O satélite **IKONOS II** foi lançado no dia 24 de Setembro de 1999, e está operacional desde o início de janeiro de 2000. Ele é operado pela **SPACE IMAGING** que detém os Direitos de Comercialização a nível mundial. Ele gera imagens com até 1 m de resolução espacial: Nunca antes algum outro satélite comercial conseguiu atingir esse nível de detalhamento.

O que era usado como sendo imagens de alta resolução para fins militares está agora comercialmente para qualquer área da América Latina para os clientes da **ENGESAT** que é Distribuidora Autorizada da **SPACE IMAGING**.

Esta tecnologia para aplicações civis são consequência direta da liberação tecnológica iniciada em 1994 pelo Governo Americano. Tais imagens de alta resolução já são realidade e estão revolucionando o mercado de imagens de satélites, no Brasil e no exterior.

As principais características técnicas do satélite **IKONOS II** e de seus produtos estão resumidos nesta tabela abaixo:

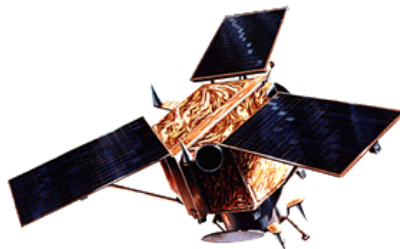


Figura 12. Satélite IKONOS.

Altitude	680 km
Inclinação	98,1°
Velocidade	7km / s
Sentido da Órbita	descendente
Duração da Órbita	98 minutos
Tipo de Órbita	Sol-síncrona
Resolução Espacial	Pancromática: 1m / Multiespectral: 4m
Bandas espectrais	Pan 0.45 - 0.90 μ Azul 0.45 - 0.52 μ Verde 0.52 - 0.60 μ Vermelho 0.63 - 0.69 μ Infra vermelho próximo 0.76 - 0.90 μ
Imageamento	13km na vertical (cenas de 13km x 13km)
Capacidade de Aquisição de imagens	Faixas de 11km x 100km até 11km x 1000km Mosaicos de até 12.000km ² 20.000km ² de área imageada numa passagem
Frequência de Revisita	2.9 dias no modo Pancromático 1.5 dia no modo Multiespectral <i>Esses valores valem para latitude de +/- 40°. A frequência de revisita para latitudes maiores será menor, e maior para as latitudes perto do Equador.</i>

5.5. Satélite Terra

O lançamento do satélite TERRA (formalmente conhecido como EOS-AM) marca uma nova era do monitoramento da atmosfera, oceanos e continentes da Terra fornecendo observações globais e esclarecimentos científicos da mudança da cobertura do solo, produtividade global, variação e mudança do clima, riscos naturais e o ozônio da atmosfera.

O TERRA opera numa órbita polar e síncrona com o Sol com uma inclinação de aproximadamente 98,2 graus, com período orbital de 98,88 minutos e hora do cruzamento na descendente às 10:30 am. A altitude média é de 705 Km e a velocidade no solo é 6,7 km/seg. A distância entre órbitas

adjacentes é de 172 km e o ciclo de recorrência é de 16 dias no equador (233 órbitas).

Os cinco instrumentos do TERRA (Figura 13) servirão para os seguintes propósitos:

- Fornecem medidas globais de cada estação climática do sistema da Terra, incluindo funções críticas como produtividade biológica do solo e oceanos, neve e gelo, temperatura da superfície, nuvens, vapor d'água e cobertura do solo;
- Aperfeiçoam nossa habilidade de detectar impactos humanos no sistema da Terra e no clima, identificam o impacto da atividade humana no clima e prevê mudanças no clima utilizando as novas observações globais;
- Ajudam a desenvolver tecnologias para prever desastres, caracterização, redução de riscos de grandes incêndios, vulcões, enchentes e secas;
- Disponibilizam monitoramento a longo-prazo da mudança do clima global e do ambiente.

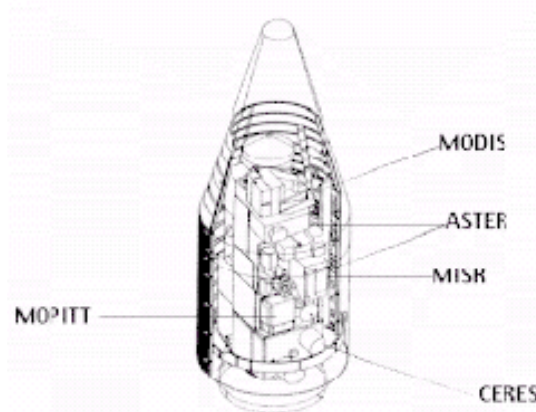


Figura 13. Cinco instrumentos do satélite Terra.

Veremos agora dois instrumentos do TERRA: MODIS e Aster.

a) MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é um dos cinco instrumentos do satélite TERRA. O MODIS visualiza toda a superfície da Terra a cada 1-2 dias, com uma varredura de 2.330 km (swath), adquirindo dados em 36 bandas espectrais distintas. Consequentemente, MODIS aperfeiçoa muito o patrimônio do NOAA Radiômetro Avançado de Alta Resolução (AVHRR) e rastreia um amplo conjunto de sinais vitais da Terra melhor do que qualquer outro sensor no TERRA. Por exemplo, o sensor mede o percentual da superfície dos planetas que estão cobertas por nuvens quase todos os dias. Esta ampla cobertura espacial irá permitir MODIS, juntamente com MISR e CERES, determinar o impacto das nuvens e aerossóis no orçamento de energia da Terra. O sensor possui um canal inovador (centralizado em 1,375 microns) para detecção de nuvens do tipo cirrus

(principalmente as mais "leves"), as quais acredita-se que contribuem para o aquecimento por refração de calor emitido pela superfície.

Reciprocamente, acúmulos de nuvens e aerossóis são consideradas a possuírem um efeito refrescante na superfície da Terra por reflectância e absorção da luz do Sol. Este efeito no clima irá provar algo significativo nesta longa corrida? MODIS, juntamente com MISR e CERES, irá nos ajudar a responder esta questão.

MODIS avalia:

- Temperatura da superfície (solo e oceano) e detecção de incêndio;
- Cor do oceano (sedimento, fitoplâncton);
- Mapas da vegetação global e detecção de mudanças;
- Características da nuvem;
- Concentrações de aerossóis e propriedades;

Características do MODIS	
Alcance Espectral	0.4-14.4 μm
Cobertura Espectral	$\pm 55^\circ$, 2330 km em fileira (scans contínuos em nadir no equador)
Resolução Espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) em nadir
Ciclo Obrigatório	100 %
Taxa de Dados	6.2 Mbps (avg), 10.8 Mbps (dia), 2.5 Mbps (noite)
Massa	274 Kg
Força	162.5 W (avg para uma órbita), 168.5 W (pico)

b) ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) obtém imagens de alta resolução (15 a 90 m) da Terra nas regiões dos espectros visíveis, near-infrared (VNIR), shortwave-infrared (SWIR) e thermal infrared (TIR).

O ASTER é constituído de três subsistemas de telescópio distintos: VNIR, SWIR e TIR. Possui alta resolução espacial, espectral e radiométrica, radiômetro de imagens de 14 bandas. Separação espectral é completada através de filtros de passagem de banda discretos e dicróicos. Cada subsistema opera numa região espectral diferente, possuem seu próprio telescópio(s). O instrumento ASTER opera por um tempo limitado em partes do dia e noite de uma órbita. A configuração completa (todas as bandas em stereo plus) coleta dados numa média de 8 minutos por órbita (Figura 14). Configuração reduzida (bandas limitadas, ganhos diferentes, etc) pode ser implementada como solicitação por investigadores. ASTER é o instrumento de resolução espacial mais alta do satélite EOS AM-1 e o único que não adquire dados continuamente. Os produtos de dados do ASTER incluem:

- Radiações e reflexões espectrais da superfície da Terra;
- Temperatura da superfície e emissividades;
- Mapas digitais de elevação de imagens stereo;
- Mapas da vegetação e da composição da superfície;
- Consequência das nuvens, gelo do mar e gelo polar;

- Observação de desastres naturais (vulcões, etc).

Características ASTER	
Alcance Espectral	
VNIR	0.5-0.9 μm
SWIR	1.6-2.5 μm
TIR	8-12 μm
Resolução Espacial	15 m (VNIR: 3 bandas), 30 m (SWIR: 6 bandas), 90 m (TIR: 5 bandas)
Ciclo Obrigatório	8%
Taxa de Dados	8.3 Mbps (média), 89.2 Mbps (pico)
Massa	450 Kg
Força	525 W (média), 761 W (pico)

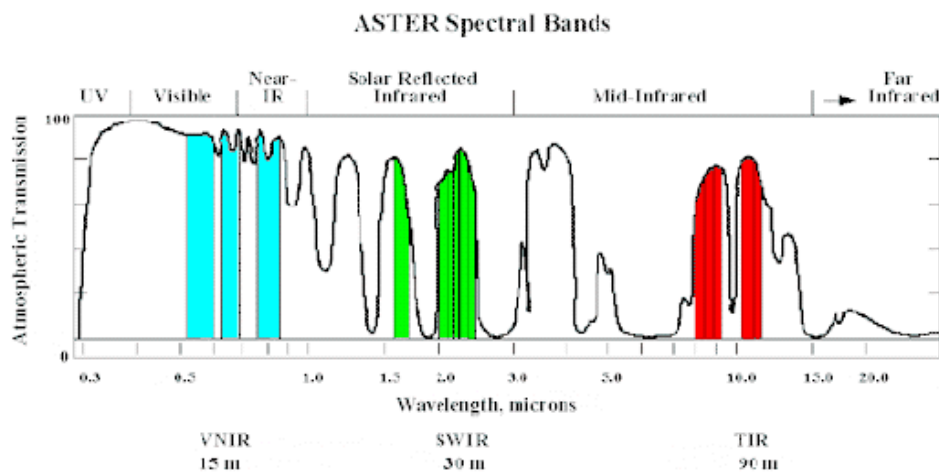


Figura 14. Bandas espectrais do instrumento ASTER.

5.6. Satélite AQUA

O foco do projeto Aqua (formalmente conhecido como EOS-PM) é o estudo multi-disciplinar dos processos inter-relacionados da Terra (atmosfera, oceanos e superfície do solo) e seus relacionamentos com as mudanças do sistema da Terra.

A acentuada pesquisa das mudanças globais com os dados do instrumento Aqua inclui: temperatura da atmosfera e perfil da umidade, nuvens, precipitação e balanço radioativo; neve terrestre e gelo oceânico; temperatura da superfície do mar e produção do oceano; umidade do terreno; e melhoramento da previsão numérica do tempo.

Estatísticas:

- Peso: 6.468 libras;
- Força: 4.444 watts na média orbital;
- Tamanho: 260 polegadas de comprimento e 102 polegadas de diâmetro;
- Objetivo do tempo de vida da missão: 6 anos;

Órbita:

- Polar e síncrona com o Sol;

- Altitude: 705 km nominais;
- Inclinação: 98,2 +/- 0,1 graus;
- Nodo ascendente: 13:30 +/- 15 minutos;
- Período: 98,8 minutos;

Uma propriedade interessante do AQUA é que ele passa no Equador 6 horas depois do TERRA. E possui os mesmos instrumentos MODIS e CERES, do TERRA. AQUA possui, ainda, os instrumentos AMSR/E - Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS , AMSU - Advanced Microwave Sounding Unit , AIRS - Atmospheric Infrared Sounder e o HSB - Humidity Sounder for Brazil , que é um instrumento brasileiro , um sensor de umidade aplicado à previsão do tempo, sendo o HSB concebido de um acordo entre a Agência Espacial Brasileira e a NASA. Com o HSB, vai ser permitido ter previsões de tempo mais precisas, dado que o hemisfério sul é coberto por oceanos, dificultando análises precisas.

5.7. QUICKBIRD

Este sensor (Figura 15), lançado recentemente pela empresa Digital Globe, é o que produz as imagens de mais alta resolução em âmbito civil, tendo uma resolução de 61 centímetros na banda pancromática e de 2,44 metros na multiespectral. Ele também é composto de 4 bandas espectrais, sendo uma que opera no Infravermelho. Abaixo, algumas características do sensor:

<i>Função</i>	<i>Característica</i>
Altitude	Cerca de 450 km
Inclinação da órbita	98 graus, heliossíncrona
Velocidade	7,1 km/s
Área de Cobertura	16,5 km por 16,5 km
Passagem	10h30min
Dados	11 bits
Formatos	GeoTIFF, NITF
Resolução	(NADIR) = 61 cm no PAN e 2,44 m MULTI.



Figura 15. Satélite QUICKBIRD.

5.8. ENVISAT

O ENVISAT (Figura 16) é um satélite europeu que é usado principalmente para aplicações ambientais. É considerado o maior satélite de observação ambiental já feito na Europa. A bordo dele, existem dez instrumentos científicos que auxiliam na detecção de índices de poluição nos oceanos e em Terra, mudanças climáticas, análise de calotas polares, detecção de rastro de petróleo por navios petroleiros, etc. Os dez instrumentos são:

- ASAR (Advanced Synthetic-Aperture Radar)
- MERIS (Medium-Resolution Imaging Spectrometer)
- AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer)
 - RA- O 4a MWR (Microwave Radiometer)
 - 4b DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)
 - O 4c LRR (Laser Retro Reflector)
- 2 (Radar Altimeter 2) que consiste de:
- MIPAS (Michelson Interferometric Passive Atmospheric Sounder)
- GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)
- SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography)



Figura 16. Satélite ENVISAT.

5.9. CBERS

O CBERS (Figura 17) é o primeiro satélite de produção brasileira que está em órbita. Foi lançado em 1999, e o projeto é em parceria com a China.

A característica singular do CBERS é sua carga útil de múltiplos sensores, com resoluções espaciais e frequências de observação variadas. Os três sensores imageadores a bordo são o imageador de visada larga (WFI), a câmara CCD de alta resolução e o varredor multiespectral infravermelho (IR-MSS). O WFI tem uma visada de 900 km no solo, que dá uma visão sinótica com resolução espacial de 260 m e cobre o planeta em menos de 5 dias. Já os sensores CCD de alta resolução e IR-MSS fornecem informações mais detalhadas em uma visada mais estreita, de 120 km. A câmara CCD de alta resolução tem a capacidade adicional de apontamento lateral de $\pm 32^\circ$, que dá frequência de observações aumentada ou visão estereoscópica para uma dada região. Os dados de múltiplos sensores são especialmente interessantes para

acompanhar ecossistemas que requerem alta repetitividade. Veja abaixo algumas características do módulo CCD de alta resolução:

<i>Função</i>	<i>Característica</i>
Resolução	20 metros
Altitude Média	778 km
Inclinação	98 graus
Massa	1450 kg
Bandas	5, sendo uma pancromática
Tempo de Vida	2 anos

Dados do CBERS extraídos diretamente do setor de geração de imagens (DGI).



Figura 17. Satélite CBERS.

CAPÍTULO 5

PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

1.0. Introdução

A relação entre os valores digitais das imagens de satélite e a reflectância ou a radiância das superfícies observadas é afetada pelas perturbações próprias do sensor, incluindo a resolução radiométrica e dinâmica dos dados, pelos efeitos devidos à presença da atmosfera e, também, pelo perfil do relevo terrestre. O conhecimento destes fatores é relevante para que seja possível distinguir as variações relacionadas com a captura dos dados pelos satélites, das variações referentes às próprias grandezas medidas, e que realmente interessam às diversas aplicações de interesse, como os Sistemas de Informações Geográficas, por exemplo. Serão descritas, a seguir, cada uma das quatro classes principais de perturbações existentes nas imagens de satélite que são:

- Efeitos do captor;
- Calibração absoluta;
- Efeitos atmosféricos
- Efeitos topográficos)

2. Efeitos do captor

Os efeitos do captor são as perturbações que afetam a qualidade radiométrica dos dados provenientes das limitações tecnológicas em todas as partes do sensor (tais como sistema ótico, detector e eletrônica de amplificação), bem como da metodologia de medidas utilizada pelo equipamento. Dentre as principais perturbações, destacam-se as seguintes:

- a) **Efeito estriado:** Estrias horizontais ou verticais causadas pela diferença de resposta dos detectores e do sistema de varredura utilizado, podendo atingir até três unidades digitais sobre os valores numéricos das imagens.
- b) **Diminuição da resposta após a passagem sobre um alvo bastante refletivo:** provoca o aparecimento de sombras no sentido da varredura. A correção desta perturbação é difícil, devendo haver uma melhora da qualidade radiométrica dos instrumentos para que ela não apareça.
- c) **Efeito da FTM (Função de Transferência de Modulação) do captor:** Diminuição do contraste da radiância do pixel com seus vizinhos. A função de transferência de modulação de um sensor remoto corresponde à atenuação da amplitude de variação do sinal que entra no sensor em função de sua frequência. O efeito da FTM afeta a qualidade radiométrica e a resolução espacial das imagens, diminuindo a sua nitidez principalmente para alvos de pequenas dimensões que apresentem um forte contraste com o ambiente no qual estão inseridos.

3.0. Calibração absoluta

A etapa da calibração absoluta corresponde à conversão dos valores digitais da imagem em reflectância ou unidades de radiância aparente medidas ao nível do satélite. Os coeficientes de calibração utilizados neste caso determinam a resolução radiométrica e dinâmica dos dados obtidos a partir das imagens, sendo que a sua variação temporal é de grande importância no tratamento de imagens multitemporais. Os métodos de determinação dos coeficientes de calibração normalmente utilizados podem ser classificados em quatro classes principais (Gu, 1991):

- a) **Antes do lançamento:** Utilizando-se uma fonte de luz-padrão, estável e uniforme. Os coeficientes determinados deste modo têm pouca duração, tendo apenas função qualitativa.
- b) **Sistemas embarcados:** Visam a uma fonte-padrão cuja radiância espectral é conhecida, como o sol, a lua ou uma lâmpada interna.
- c) **Alvos terrestres sem verdade terrestre:** No caso dos comprimentos de onda mais curtos (entre 400 e 500nm), pode-se utilizar o oceano como superfície-teste de calibração sem que haja necessidade de medidas radiométricas de superfície.
- d) **Alvos terrestres com verdade terrestre:** Os coeficientes de calibração são obtidos comparando-se os valores numéricos registrados nas imagens com os valores da radiância da superfície terrestre recebida pelo satélite, fornecidos por um modelo de transferência radiativa a partir de dados atmosféricos e de reflectância e/ou radiância medidos em terra.

3.0. Efeitos atmosféricos

Os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio, ozônio e dióxido de carbono) e os aerossóis (pequenas partículas materiais, distintas da água e do gelo, em suspensão com raio variando de 0,1µm a 10µm) absorvem e espalham a radiação solar desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo.

Atualmente, já existem programas computacionais desenvolvidos especificamente para a remoção dos efeitos atmosféricos nas imagens de satélite, como o SCORADIS, por exemplo, apresentado por Zullo Jr. et al. (1993).

4.0. Efeitos topográficos

O efeito topográfico corresponde à mudança das propriedades direcionais da reflectância e da radiância de uma superfície ocasionada pela variação do seu relevo. Isto é importante, por exemplo, no caso dos reflorestamentos ligados à indústria de papel em que se plantam eucaliptos em regiões com relevo acidentado e que, por causa do efeito topográfico, têm dificuldade de estimar a área plantada e o montante de madeira disponível. A correção dos efeitos topográficos nas imagens pode ser feita através de dois tipos principais de métodos, que são classificados de acordo com a necessidade, ou não, de fornecimento de dados extra-imagem para a sua execução. Dentre os métodos que se baseiam exclusivamente nos dados existentes nas imagens, destacam-se o da divisão de bandas e o das principais componentes, cuja descrição pode ser encontrada em Crósta (1992). Os dados extra-imagem, geralmente requeridos pela outra série de métodos, são a declividade e a exposição da vertente da superfície obtidas através do modelo digital de elevação (MDE); como exemplo tem-se o método de Cavayas (1984), onde a correção topográfica é feita através da normalização do efeito da rugosidade do terreno.

CAPÍTULO 6

NOÇÕES BÁSICAS DE FOTOGRAMETRIA E FOTOINTERPRETAÇÃO

Notas de Aula, Disciplina Aerofoto e Fotointerpretação, Turma Geografia 1998 UNIFAP (2000) (JOHANSSON, 2000)

1.0. Conceitos e aplicações

A fotogrametria é a ciência ou a arte da obtenção de medições fidedignas por meio da fotografia.

Esta definição pode ser perfeitamente ampliada com a inclusão de interpretação de fotografias, como uma função de importância quase igual, vez que a capacidade de reconhecer e identificar uma imagem fotográfica é, com frequência, tão importante quanto a capacidade de deduzir a sua posição a partir de fotografias. É que a fotogrametria passa a atender, não apenas, ao cartógrafo, mas a uma extensa série de técnicos ou especialistas, no amplo campo da fotointerpretação, dentro do qual, o engenheiro, o urbanista, o geólogo, o geógrafo, o oceanógrafo, o meteorologista, o agrônomo, o militar, o economista, etc.

1.1. Noções básicas sobre fotogrametria

A fotografia aérea é o resultado de um grande número de especificações, normas e cuidados relativos:

- a) ao avião, ou ao vôo em si;
- b) à câmara aérea e à lente;
- c) ao filme;
- d) às condições atmosféricas.

Em suma, o avião procurará manter-se, durante o vôo fotográfico, na mesma altura relativa, seguir direção reta e uma velocidade uniforme. A câmara terá que estar orientada no sentido de que o eixo ótico permaneça vertical (no caso geral, da fotografia vertical) e que os disparos sejam uniformes; o filme deve possuir estabilidade dimensional; o tempo deve apresentar as melhores condições de vôo fotográfico, sobretudo no que toca a nuvens (Figura 1 e 2).

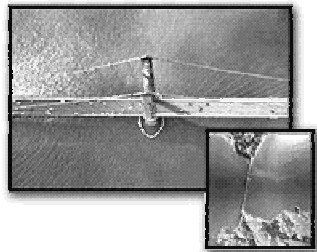


Figura 1. Detalhe de foto aérea em pb.



Figura 2. Detalhe de foto aérea colorida.

1.2. Classificação das aerofotos

A fotografia aérea recebe uma classificação decorrente de alguns critérios como: a orientação do eixo da câmara (vertical e oblíqua), o sistema ótico (simples ou múltiplo), além de outras particularidades (em preto e branco, colorida, infravermelha, a radar, etc.)

A fotografia vertical, isto é, a que foi tirada com o eixo ótico na posição em que se deve aproximar o mais possível da verticalidade, é a fotografia normal. As outras são as oblíquas, que variam, entre si, conforme o grau de inclinação usado.

Quanto à ótica, ela pode ser simples, e é o sistema mais largamente utilizado na fotografia aérea. Há também o sistema múltiplo, que consiste de duas ou mais câmaras isoladas, montadas no sentido de serem obtidas imagens simultâneas em decorrência de ângulos entre os respectivos eixos óticos.

A fotografia colorida tem, atualmente, um desenvolvimento incomum, não apenas devido à precisão, aliada a uma qualidade mais fiel possível das cores da natureza, mas ao processo desenvolvido da "cor-falsa", que as cores apresentadas, na fotografia, são convencionais, a fim de se conseguir uma separação nítida de elementos, como a vegetação, a água, o solo etc. São de notável aplicação na fotointerpretação.

A imagem a radar resulta de uma combinação do processo fotográfico e de técnicas de radar. Impulsos elétricos são enviados a direções predeterminadas, e os raios refletidos ou devolvidos são utilizados para a apresentação de imagens em tubos de raios catódicos. Em seguida a fotografia é obtida da informação exposta nos tubos.

A fotografia, oriunda duma câmara moderna traz, ao ser revelada, várias informações posteriormente indispensáveis, as quais são registradas, automaticamente, pela própria câmara, no instante da exposição: data e hora da exposição, o código do projeto fotogramétrico, o número do rolo, o número da imagem, a escala aproximada e o órgão responsável pelo projeto. Além disso, verificam-se as quatro marcas que se determina, através de duas linhas que se podem traçar, entre cruzadas, o ponto principal da fotografia.

As dimensões de uma fotografia aérea variam, mas a que mais se usa é a que mede 23 cm X 23 cm.

Obs.: fotografias verdadeiramente verticais devem ser consideradas "acidentes felizes", motivados por inúmeros fatores que agem de modo que a verticalidade absoluta seja praticamente impossível, ainda que muitos progressos tenham sido conseguidos no desenvolvimento de montagens de estabilidade verticais.

2.0. Câmara aérea

As primeiras fotografias aéreas foram tiradas de balões, os quais traziam a câmara amarrada à nacela, ou dela suspensa. Na atualidade, a concepção duma câmara aérea se torna muito complexa, visando aperfeiçoamento no sentido de se conseguir o máximo, tecnicamente, economizando custos. Duma

câmara aérea exigem-se inúmeras especificações visando às normas de precisão.

Câmara métrica: designação tanto da câmara aerofotográfica, quanto da câmara de restituição. No primeiro caso ela tem que apresentar as marcas fiduciais. O mesmo que câmara aérea (Figura 3).

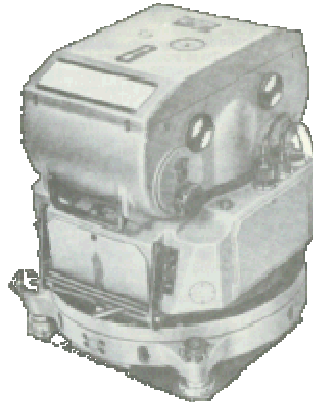


Figura 3. A câmara aérea RMK 21/18, cuja lente de 210 mm quase não tem distorção, e de extraordinária resolução das imagens

2.1. Vôo fotogramétrico

Um avião fotográfico só decola para a execução duma missão de cobertura fotográfica depois de um planejamento da operação, a qual, por sua vez, resulta dum estudo detalhado com todas as especificações sobre o tipo de cobertura a ser executado.

O tempo é fator importante. Conforme o país, ou a região, existem áreas em que as características atmosféricas são propícias ao vôo na maior parte dos meses do ano. Outras há, entretanto, que raramente favorecem a execução de um vôo, como é o caso da região da floresta amazônica ou da região cacauzeira da Bahia, quase sempre cobertas por nuvens (Figura 4).



Figura 4. Avião e seus equipamentos.

A altura a ser voada varia com a escala da fotografia, com o intervalo de curvas a ser usado e com a distância focal da câmara. A posição do Sol é, igualmente, levada em consideração, uma vez que o excesso de sombra irá prejudicar detalhes importantes que vão ser restituídos. É inconveniente, também, o vôo com Sol a pino, porque não haverá suficiente contraste entre muitos objetos do terreno.

Fator de muita relevância é o avião para cobertura fotográfica. Tem que possuir a velocidade prevista para o projeto, o teto de voo suficiente, uma boa estabilidade durante o voo, assim como o raio de ação necessário, a fim de ser evitada uma interrupção inútil de uma missão, o que resultaria em perda de tempo e de dinheiro. Uma vez preenchidas todas as exigências, terá que ser adequadamente equipado, inclusive quanto ao conforto da tripulação e do operador fotogramétrico.

Devido à condição de que cada linha de voo fotográfico tem que perseguir a mesma direção, isto é, todas as faixas de fotografias resultantes têm que ser paralelas entre si, a determinação da direção de um voo é resultante:

- Do tipo de relevo da área a ser fotografada;
- D configuração dessa área;
- Da capacidade de produção por parte da tripulação;
- Da orientação dos estereomodelos em relação à topografia e à posição do Sol.

2.3. Cobertura fotográfica

Trata-se da representação do terreno por meio de fotografia aéreas, as quais são expostas sucessivamente, ao longo de uma direção de voo, formando uma faixa de voo. Para se obter estereoscopia, as fotos são expostas em intervalos de tempo tais que, entre duas fotos sucessivas de uma faixa, haja uma superposição de cerca de 60%. Nas faixas expostas, paralelamente, para compor a cobertura de uma área é mantida uma distância entre os eixos de voo que garanta uma superposição de cerca de 30% entre duas faixas adjacentes. Deste modo, as faixas podem ser “amarradas” pelos pontos de ligação determinados na área comum e devem formar um bloco. A direção das faixas de voo e a superposição variam com a forma do terreno (Figura 5).

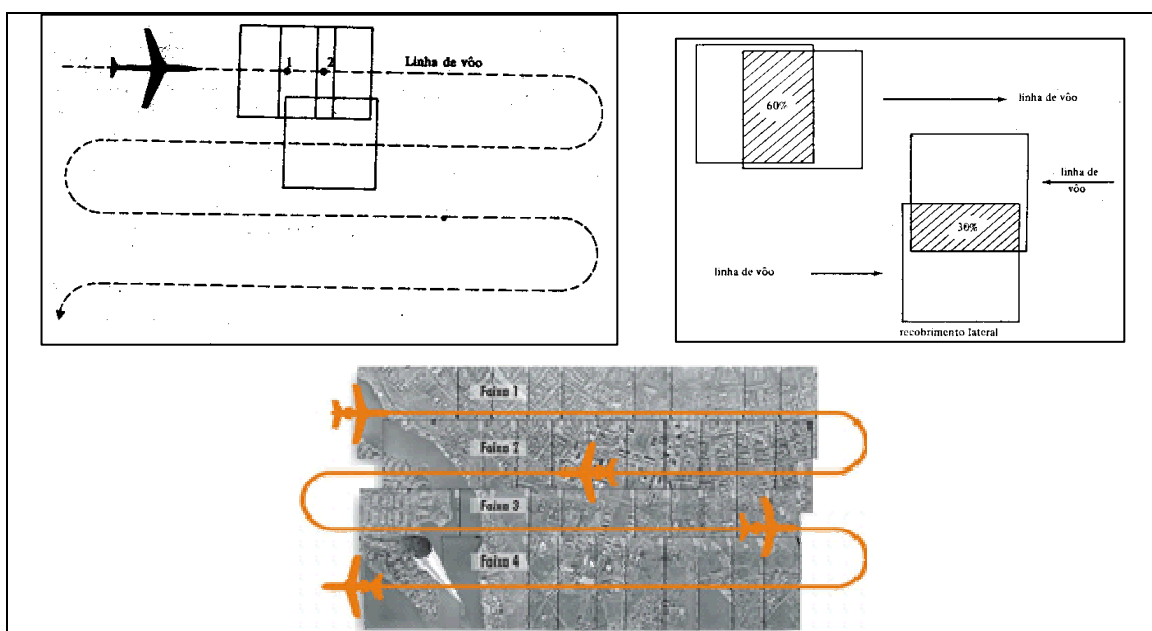


Figura 5. Linhas de vôo e as faixas de aerofotos.

O resultado duma missão fotográfica é constituído de imagens em negativo, a partir dos quais são geradas cópias em positivos. Isto constitui um processo importante, uma vez que estes positivos, para serem utilizados em fotogrametria, precisam estar de acordo com: a orientação do sistema ótico da câmara, bem como as propriedades especiais do original, isto é, em preto e branco, em cores, em infravermelho, etc.

Uma etapa indispensável no processo que resulta duma cobertura fotográfica é a preparação dos fotoíndices, os quais constituem a reunião de fotografias aéreas individuais, nas suas posições relativas, fotografadas, em seguida, numa escala reduzida.

2.4. Irregularidades convencionais

Suponhamos que uma fotografia aérea tenha sido exposta com o eixo ótico verdadeiramente vertical. Nestas condições, somente o ponto central está livre de qualquer deslocamento. Fora daí, porém, e quanto mais longe deste ponto, maiores serão os deslocamentos. Como a fotografia aérea é uma projeção cônica, os detalhes do terreno representados numa fotografia, salvo o ponto central, estão fora das suas posições relativas.

Outro tipo de anormalidade que pode ocorrer, sobretudo em conexão com as condições meteorológicas, resulta de uma faixa que passa a não apresentar uma direção reta regular, formando, em consequência, uma curva, a qual poderá causar, entre uma faixa e outra, uma descontinuidade na superposição, o que é conhecido como “buraco”, tipo de anormalidade que, muitas vezes, obriga a um novo vôo, a fim de sanar aquele defeito.

3.0. Origem da fotografia comum

A fotografia comum tem a sua origem em época muito remota. Em 350 A.C., Aristóteles descreveu a produção de imagens através da passagem da luz por um pequeno orifício. Entre outros franceses como Joseph Niepce, o francês Louis Daguerre, desenvolveu em 1839 um processo de fixação da imagem produzida pela luz (descoberta da fotografia) que foi reconhecido pela Academia Francesa de Ciências.

3.1. Fotografias no mapeamento

O primeiro registro de uso de imagens fotográficas para auxiliar o mapeamento foi em 1842 quando Francis Arago, diretor do Observatório de Paris, demonstrou a possibilidade de utilização de fotografias para auxiliar levantamentos topográficos.

3.2. Fotos aéreas com auxílio de balões

Em 1849, o Coronel Aimé Laussedat, um oficial do exército francês, utilizou um sistema fotográfico desenvolvido por Daguerre embarcado em um balão para obter fotos cuja finalidade era o mapeamento topográfico (Figura 6).

A partir daí, desenvolvimentos sucessivos aconteceram na área da fotografia aérea motivados principalmente pelo próprio desenvolvimento da fotografia convencional. Destacam-se nesta evolução, o uso de uma base de nitrocelulose para as imagens substituindo a base frágil e pesada de vidro desenvolvida em 1889 por George Eastman.



Figura 6. Primeiras fotos aéreas obtidas com balões.

Acompanhando o desenvolvimento de equipamentos, técnicas e materiais no âmbito da fotografia aérea, vários equipamentos curiosos surgiram.

Entre eles, destaca-se uma câmara desenvolvida e patenteada por Julius Neubronner em 1903 cuja particularidade era de ser acoplada a um pombo, pois pesava apenas 70 g (Figura 7).

Em contrapartida, nesta mesma época, o americano G.R. Lawrence desenvolvia uma câmara que pesava mais 450 kg com um negativo de 1,35 x 2,40 m que de tão pesada nunca pode ser aerotransportada (Figura 8).



Figura 7. câmara acoplada a um pombo



Figura 8. Câmara antiga.

3.4. Fotografias aéreas

Os próximos registros de uso intenso de fotografias aéreas foi no período da I e II Guerras Mundiais explicado pela grande arma que a fotografia aérea para reconhecimento, detecção de posições inimigas e estratégia militar como um todo.

O primeiro registro de fotografia aérea obtida por um avião com uso em mapeamento foi do Capitão Tardivo, oficial britânico, que em 1913 apresentou um trabalho descrevendo o processo em uma reunião da Sociedade Internacional de Fotogrametria em Viena, Áustria (Figura 9 e 10).



Figura 9. Aeronave preparada para obter aerofotos.



Figura 10. Cobertura antiga.

Durante a década de 30, várias empresas americanas e canadense de aerolevantamento surgiram e alavancaram um desenvolvimento muito grande deste mercado nestes países.

Empresas como a Eastman-Kodak passaram a desenvolver produtos específicos para a obtenção de fotografias aéreas como filmes com resposta espectral para comprimento de onda infra-vermelho (1930) e filmes coloridos com múltiplas bases (Kodachrome, 1935).

A partir da década de 50, todos os progressos obtidos foram oriundos de evolução de técnicas e equipamentos da aerofotografia. Destaca-se o uso de plataformas orbitais como a inserida na espaçonave russa Sputnik I (1957) e na americana Mercury MA-4 que obteve centenas de fotos orbitais de 70 mm de lado (1961).

Atualmente, com o avanço das imagens digitais, discute-se muito o futuro uso de filmes aéreos. Apesar dos progressos desta área, alguns problemas relativos à aquisição de imagens digitais permanecem em estudo. Entre eles, estão os sensores digitais de tamanho limitado (CCD lineares ou em matriz), a velocidade de obtenção de imagem imposta pela tecnologia, os sistemas de armazenamento necessários para o processo e finalmente, a resolução final das imagens. Hoje em dia, 95% dos sistemas de obtenção de imagens aéreas ainda usam o sistema de filmes convencional.

4.0. Generalidades sobre fotografias aéreas

A concretização da fotografia aérea como elemento essencial para o mapeamento aconteceu com a criação da ciência chamada Aerofotogrametria e a sua maior evolução aconteceu no períodos das Guerras Mundiais com o seu uso constante para fins militares.

Com o final dos períodos de conflitos e com a descoberta de novos processos, equipamentos e materiais, a fotografia aérea tornou-se um produtos de valor inestimável para o planejador, pesquisador e empreendedor, além de ser a matéria prima para o trabalho do cartógrafo.

4.1. Câmara aérea

Em termos técnicos, considera-se uma fotografia aérea como aquela obtida por meio de câmara aérea rigorosamente calibrada (com distância focal, parâmetros de distorção de lentes e tamanho de quadro de negativo conhecidos), montada com o eixo ótico da câmara próximo da vertical em uma aeronave devidamente preparada e homologada para receber este sistema (Figura 11).

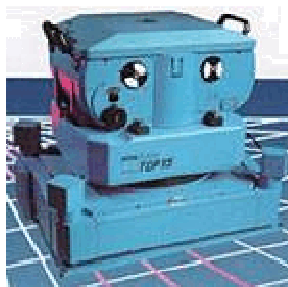


Figura 11. Câmara aérea

4.2. Cobertura aerofotogramétrica

Chama-se Cobertura Aerofotogramétrica ao conjunto de operações necessárias para obtenção destas fotos ou ao conjunto de fotos que superpõe e representam a área voada.

Em Aerofotogrametria ou para fins de Cobertura Aerofotogramétrica, as fotografias aéreas geralmente são obtidas de forma seqüencial e com superposição longitudinal e lateral de imagem permitindo que toda a região de interesse seja imageada (Figura 12).

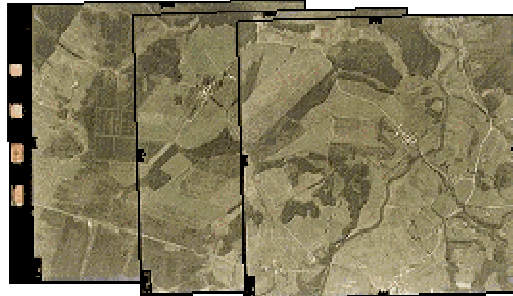


Figura 12. Superposição longitudinal

4.3. Estereoscopia

Imagem estereoscópica é o resultado da superposição longitudinal entre duas aerofotos consecutivas. A superposição conhecida como Recobrimento Longitudinal é o percentual que uma determinada fotografia superpõe em relação a uma fotografia consecutiva em uma faixa de voo.

Para visualizar a imagem em 3D, aproxime-se do monitor. Faça com que os raios óticos de seus olhos focalizem cada uma das imagens separadamente (Imagem esquerda para o olho esquerdo e Imagem direita para o olho direito). Afaste-se lentamente sem perder o paralelismo dos eixos óticos e aguarde a acomodação da imagem. Após algumas tentativas, a visão tridimensional é obtida (Figura 13).

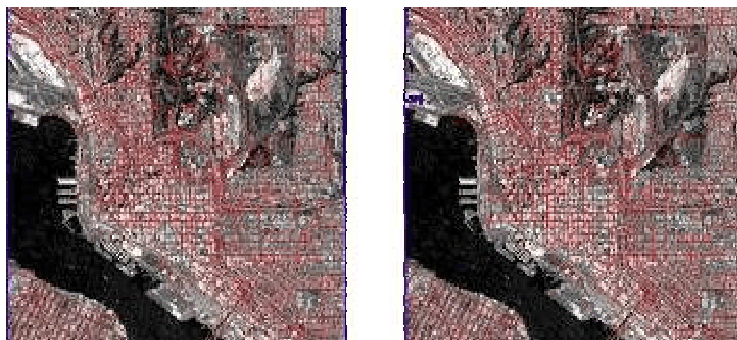


Figura 13. Par estereoscópico

4.4. Recobrimentos Longitudinal e Lateral

O Recobrimento Longitudinal de uma fotografia aérea geralmente é planejado para prover aproximadamente 60% de superposição entre fotografias. Isto permite a obtenção da estereoscopia (3D) quando as duas

fotografias são usadas em um estereoscópio. A superposição entre faixas de voo varia de 20% a 40% e é chamado de Recobrimento Lateral (Figura 14).

Para coberturas não-estereoscópicas, geralmente usadas em vôos de reconhecimento, o Recobrimento Longitudinal pode ser de apenas 20% garantindo apenas a cobertura fotográfica da área de interesse.

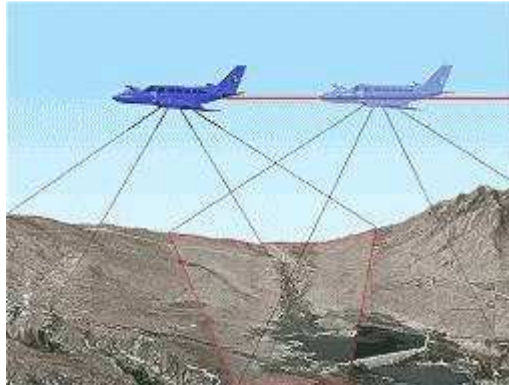


Figura 14. Esquema de tomadas de aerofotos consecutivas.

5.0. Propriedades dos filmes aéreos (Processos de aperfeiçoamento)

Alguns grandes fabricantes de filmes aéreos como a KODAK e AGFA fornecem uma grande variedade de informações sobre as propriedades de cada filme bem como recomendações e procedimentos em relação ao seu manuseio, transporte, armazenagem e principalmente, revelação. Estes processos estão se aperfeiçoando constantemente em vários sentidos, tais como rapidez, definição e permanência da imagem, tempo e facilidade de revelação.

5.1. Estrutura do filme aéreo

Os filmes aéreos usados para mapeamento estão normalmente disponíveis em rolos de 75 a 150 m de comprimento com largura 25 cm.

A estrutura do filme aéreo é composta de uma base de estável de poliéster intercalada entre uma (ou mais) camada(s) finas de uma emulsão foto-sensível e outra camada de apoio para proteção do poliéster. Esta base possui espessura variável (0,06 a 0,18 mm) de acordo com as necessidades de estabilidade e comprimento do filme (Figura 15).



Figura 15. Rolo de filme aéreo.

A base de poliéster satisfaz as exigências de filme aéreas para transparência óptica, estabilidade química, insensibilidade fotográfica e resistência à umidade e substâncias químicas. O poliéster tem resistência ao rasgo e possui excelente flexibilidade e estabilidade dimensional.

A emulsão fotográfica é uma gelatina que serve de suporte para grãos de brometo de prata. O brometo de prata é um elemento que reage à incidência de luz transformando-se em brometo e prata. Dependendo do tempo e intensidade da luz, esta transformação irá acontecer em maior ou menor intensidade criando as tonalidades em uma fotografia (Figura 16).

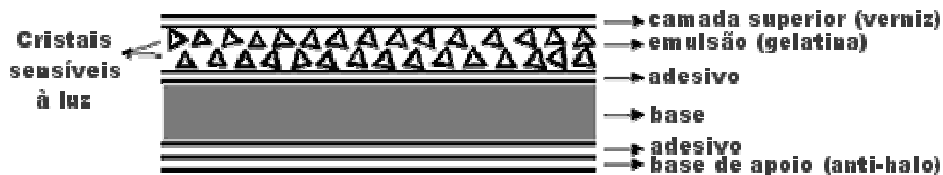


Figura 16. Estrutura de um filme preto e branco.

A estrutura dos filmes coloridos é mais complexa que a do filme P&B. Nos filmes coloridos existem três camadas de material sensível a determinados espectros eletromagnéticos. Cada uma delas possui seu próprio corante, formado ou acrescentado durante o processamento, além de diversas camadas transparentes de proteção, todas aplicadas sobre uma camada base (Figura 17).

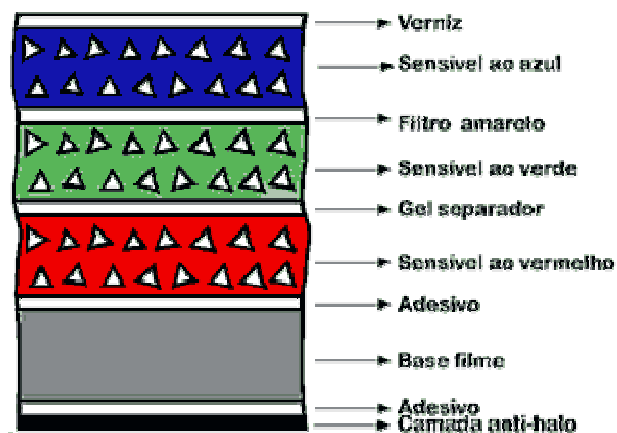


Figura 17. Estrutura de um filme colorido.

Para a fotografia aérea, a estabilidade dimensional diz respeito à manutenção original das dimensões do filme após variações em umidade e temperatura, e também após a própria revelação ou envelhecimento do filme. A estabilidade dimensional de filmes aéreos é de interesse particular para a precisão dos mapas oriundos destas imagens.

Para evitar deformações decorrentes do processo de revelação, manipulação ou armazenamento, a base de poliéster é isenta de solventes na sua fabricação. Além disso, as condições de transporte e armazenamento

requerem temperatura e umidade controlada para evitar qualquer processo degenerativo na emulsão e nas propriedades físicas do filme.

5.2. Propriedades

A velocidade de filme aéreos (ISO A ou EAFS) não deveria ser confundido com velocidades de filme convencionais que são projetadas para aplicação em fotografia comum (Ex: 100 ASA ... 400 ASA). As características de tomada de imagens aéreas diferem notadamente da fotografia convencional por causa do alcance menor da luminosidade, condições atmosféricas (bruma, névoa) e outros fatores.

Assim, são usados parâmetros de velocidade de filme diferentes para relacionar características de cena com recomendações práticas de exposição.

A sensibilidade de espectro fornece uma curva de resposta de sensibilidade às diversas frequências do espectro de luz. A emulsão de um filme aéreo é sensível aos diversos comprimentos de onda. para obter sensibilidade estendida em uma emulsão são utilizados corantes na mesma. Por isso, um filme dito pancromático é um filme com sensibilidade aos comprimentos de onda referente às cores vermelha, verde e azul, ou seja, ao espectro visível. Ver exemplo de gráfico de resposta espectral na Figura 18.

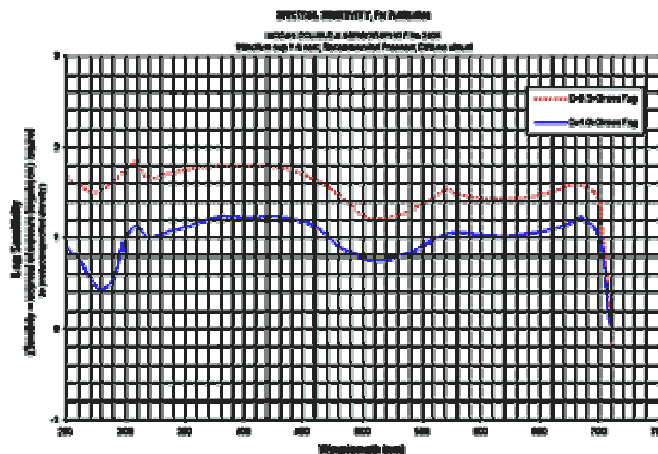


Figura 18. Gráfico de sensibilidade de espectro.

A resolução de um filme aéreo é geralmente expressa por sua granulação e pelo seu poder resolutivo. Granulação é a característica apresentada pelos grãos de prata de um filme após revelado e ampliado. Ela é determinada por meio de medidas microdensitométricas.

O poder resolutivo é a medida de capacidade de um filme registrar detalhes finos. Os padrões de teste de poder resolutivo para filmes P&B e colorido são determinados pela International Organization for Standardization (ISO). Estes padrões são seqüências de linhas muito próximas que são fotografadas. No filme revelado (com alto e baixo contrastes), a diferenciação de pares de linhas por mm é a unidade de medida do poder resolutivo. Os filmes aéreos P&B possuem valores de poder resolutivo variando de 50 a 100 pares de linhas/mm.

6.0. Tipos de filmes aéreos (Atributos necessários)

Os atributos necessários para escolha de um filme são basicamente impostos pela qualidade de imagem desejada e pela finalidade da Cobertura Aerofotogramétrica. Estes atributos incluem a velocidade do filme, contraste, sensibilidade de espectro e resolução (grãos de prata maiores ou menores).

Os filmes aéreos disponíveis no mercado possuem sensibilidade espectral variando desde ultra-violeta até infra-vermelho. Dentro desta variação de espectro se encontram os filmes Preto&Branco, Colorido e Infra-vermelho.

6.1. Preto & branco

O filme aéreo Preto & Branco (P&B) é mais usado nas fotografias aéreas pelo seu custo relativamente baixo e pela sua resposta espectral ser bem próxima do espectro visível pelo olho humano.

Desta maneira, o usuário da fotografia aérea distingue pequenas variações de tons de cinza. Isto permite a interpretação fácil de elementos naturais ou feitos pelo homem. Sua principal desvantagem é que mesmo com o uso de filtros apropriados (filtro amarelo ou menos azul), continua sensível à bruma atmosférica o que reduz o contraste da imagem (Figura 19a e 19b).

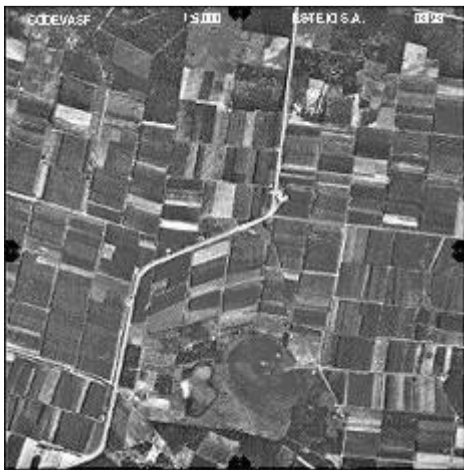


Figura 19a. Foto p&b.



Figura 19b. Foto p&b (detalhe).

6.2. Colorido

Os filmes coloridos ou de cores naturais são filmes que apresentam uma riqueza muito grande de detalhes devido à apresentação de elementos em sua cor real. Isto facilita a interpretação de objetos e cenas uma vez que muitos elementos do mundo real são mais facilmente identificados quando agrupam o atributo cor.

Um exemplo disto são as massas de água (lagos, lagoas) que apesar de serem bem caracterizados pela sua forma, possuem uma resposta espectral variando do branco até o preto nos filmes pancromáticos (P&B) enquanto que nos filmes coloridos a sua identificação é muito facilitada pela sua resposta espectral na imagem. De maneira muito semelhante, podemos exemplificar o caso de piscinas em ambientes urbanos (Figuras 20a e 20b).



Figura 20a. Foto colorida



Figura 20a. Foto colorida (detalhe)

Em contra-partida, os filmes coloridos possuem muito mais sensibilidade aos fenômenos atmosféricos como bruma, névoa, poluição do que o filme P&B. Até mesmo a variação de temperatura do instante da tomada da foto e o ângulo de inclinação do sol têm efeito sobre a resposta obtida na imagem.

6.3. Infra-vermelho

Os filmes infra-vermelho coloridos possuem três camadas de emulsão com sensibilidade aos seguintes comprimentos de onda : verde (500 nm até 575 nm), vermelho (575 nm até 675 nm) e próximo do infra-vermelho (675 nm até 900 nm). Como estas camadas tem sensibilidade para a luz azul, o filme infra-vermelho requer o uso de filtro amarelo. Após revelado, a camada sensível ao verde é representada como azul, a sensível ao vermelho como verde e a próxima do infra-vermelho como vermelho (Figura 21a e 21b).



Figura 21a. Foto infra-vermelha (detalhe).

Figura 21a. Foto infra-vermelha.

As principais vantagens do filme infravermelho, são melhor penetração na névoa atmosférica do que no filme colorido normal, melhor realce das imagens de alguns objetos na fotografia, principalmente com a delimitação entre corpos de água e vegetação, diferenciação entre folhosas e coníferas, distinção entre vegetação sadia e estressada.

No caso da vegetação, a reflectância do comprimento de onda infravermelho de vegetação saudável é muito maior que a reflectância do verde e vermelho da mesma vegetação. Assim, um filme infra-vermelho colorido oferece uma variedade muito grande de tons de vermelho. Com isso, variações no estado fitossanitário da vegetação (doenças, pragas) podem ser detectados com uso deste filme.

Como desvantagens pode-se dizer que é muito sensível às variações de temperatura e umidade do objeto imageado bem como de seu próprio material, portanto requerendo armazenamento em baixa temperatura e revelação imediata após a exposição para evitar a degradação química de suas diversas camadas. Ele não permite grandes variações no tempo de exposição com o risco de produzir resultados não satisfatórios.

Outros fatores preponderantes para um bom resultado no uso de filme infra-vermelho são horário de vôo (janelas pequenas de vôo entre 11 h e 13 h), inclinação e posição do sol, altitude de vôo e ângulo de abertura da câmara (função da distância focal)

7.0. Geometria das fotografias aéreas

7.1. Escala

A escala é a característica mais importante e informativa de uma fotografia aérea. Conhecendo a escala de uma fotografia aérea é possível conhecer outras informações de relevância como a área coberta por uma imagem.

Calcular a escala de uma fotografia aérea (E) é muito simples desde que sejam conhecidos a altura de vôo (H) no instante da tomada da foto e a distância focal da câmara (f) utilizada para obter a foto.

Assim, a relação matemática f/H nos dará a escala da fotografia aérea (Figura 22).

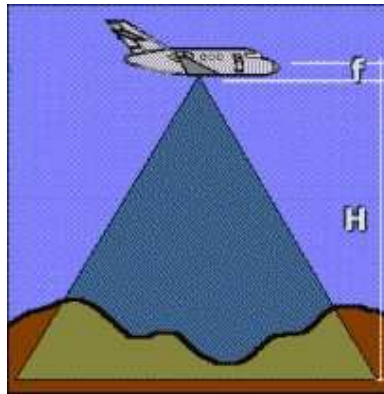


Figura 22. Parâmetros utilizados para o cálculo da escala.

Por exemplo, para uma fotografia aérea obtida com uma câmara com $f=153$ mm e uma altura de vôo $H=1.224$ m, a escala da foto será :

$$E = \frac{f}{H} \therefore E = \frac{0,153}{1.224} = 0,000125 \text{ ou } 1/8.000$$

Outra maneira de obter a escala de uma fotografia aérea é a comparação de distância entre pontos escolhidos na foto e identificados em um mapa de escala conhecida.

Na realidade, a altura de vôo (H) não é uma constante. Ela varia em todos os pontos da área imageada devido à própria ondulação do terreno. Assim, normalmente adota-se uma altura de vôo média que corresponde à média aritmética da menor e maior alturas de vôo possíveis na área a ser fotografada. Com isso, temos uma variação de escalas para os pontos mais baixos e mais altos do terreno. Esta variação de escala admissível é da ordem de 5 a 10%.

7.2. Área coberta por uma fotografia aérea

Conhecendo a escala e as dimensões de uma fotografia aérea é possível avaliar a área coberta por esta imagem. A fotografia aérea tem uma dimensão útil de 23 cm (l), apresentando as seguintes características (Figura 23):

- 1) Área de cobertura única;
- 2) Área de recobrimento longitudinal (RLo);
- 3) Área de recobrimento lateral (RLa);
- 4) Lado da foto (L).

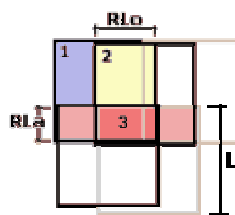


Figura 23. Características da fotografia aérea.

Usando a escala calculada no exemplo anterior (1/8.000), o lado da foto no terreno (L) terá a seguinte dimensão:

$$L = l \times E = 0,23 \times 8.000 = 1.840m$$

Assim, a área coberta pela imagem da fotografia aérea seria :

$$Area_{foto} = L^2 = 1,84 \times 1,84 \cong 3,4km^2$$

7.3. Número de fotografias necessárias para a cobertura de uma área de interesse

Para atender aos requisitos de estereoscopia e outros, uma cobertura aérea deve prever a Superposição Longitudinal entre fotos consecutivas que geralmente é da ordem de 60%. De maneira semelhante, entre faixas de fotos existe uma Superposição Lateral que é da ordem de 30%.

Assim, a área de cobertura única (sem superposição) de uma fotografia aérea corresponderia ao produto da dimensão representativa de 40% do lado da foto no sentido longitudinal e 70% do lado da foto em no sentido lateral.

Para o nosso exemplo, cujo lado da foto no terreno é 1,84 km e a área total de uma foto é de 3,4 km², a área de cobertura única seria:

$$Area_{única} = 28\% \times Area_{foto} = 0,28 \times 3,4 = 0,95km^2$$

Portanto, para avaliarmos a quantidade aproximada de fotos necessárias para cobrir uma área de 100 km² por exemplo, basta dividir o valor da área de interesse pelo valor da área de cobertura única da foto:

$$N_{fotos} = \frac{Area}{Area_{única}} = \frac{100}{0,95} = 105 \text{ fotos} \pm 15\% \text{ de segurança}$$

Veja a tabela abaixo para algumas escalas e para distância focal 153 mm:

7.4. Tabela de recobrimentos e áreas de aerofotos 23 cm X 23 cm

Recobrimento Longitudinal	60%	Área p/ Cobertura	100 km ²
Recobrimento Lateral	30%	Fotos de Segurança	15%
Distância focal	153 mm	Perc Útil do Modelo	28%

ESCALA FOTO	ALTURA VÔO	LADO FOTO	REC. LONGITUDINAL	REC. LATERAL	ÁREA FOTO	ÁREA COBERTURA	NÚMERO FOTOS
-------------	------------	-----------	-------------------	--------------	-----------	----------------	--------------

1 /	(m)	(m)	(m)	(m)	(km ²)	ÚNICA (km ²)	
4.000	612	920	552	276	0,85	0,24	485
8.000	1224	1840	1104	552	3,39	0,95	121
10.000	1530	2300	1380	690	5,29	1,48	78
15.000	2295	3450	2070	1035	11,90	3,33	35
20.000	3060	4600	2760	1380	21,16	5,92	19
25.000	3825	5750	3450	1725	33,06	9,26	12
30.000	4590	6900	4140	2070	47,61	13,33	9
33.000	5049	7590	4554	2277	57,61	16,13	7

8.0. Estereoscopia

8.1. Princípios fundamentais

Estereoscopia é o nome dado ao seguinte fenômeno natural: Uma pessoa observa simultaneamente duas fotos de um objeto, tomadas de dois pontos de vista diferentes (distintos). Vendo cada foto com um olho, verá o objeto em três dimensões. Para que isto se viabilize, devem ser cumpridos os seguintes requisitos:

- 1) No instante da observação os eixos óticos devem estar aproximadamente no mesmo plano.
- 2) A razão B/H deve ser tal que $0,02 < B/H' < 2$, onde B é a aerobase e H' , a altura da aeronave, que obteve as fotos.

É oportuno distinguir estereoscopia de visão estereoscópica.

Visão *estereoscópica* significa visão tridimensional e *estereoscopia* é um dos processos de obtenção desta visão tridimensional.

8.2. O olho humano

O olho humano é a principal condição ou a principal ferramenta para a estereoscopia, pois sem ele não é possível termos noção da terceira dimensão.

Para obtenção da visão estereoscópica, através de fotos, é necessário que tenhamos dois olhos e com a mesma capacidade de visão.

A visão monocular permite examinar a posição e direção dos objetos, dentro do campo da visão humana, num único plano. Permite reconhecer nos objetos, a forma, as cores e o tamanho.

O olho humano é o órgão mais importante, na comunicação com o ambiente em nossa volta. Através dele, conseguimos registrar e levar ao cérebro as imagens dos objetos, com todas as suas características.

8.3. Noção de profundidade

A sensação de profundidade baseia-se em dois fenômenos: a experiência e a estereoscopia.

Experiência: aqui aparecem os exemplos de desenho perspectivo como:

- 1) Uma fila de postes. Notamos que a sua altura diminui com o afastamento dos postes.
- 2) Olhando uma estrada, as suas margens parecem convergir para um ponto.
- 3) As montanhas distantes apresentam uma cor azulada, enquanto que as próximas apresentam cor verde.

8.4. Visão estereoscópica direta e indireta

Existe *visão estereoscópica direta*, quando o olho recebe os raios luminosos refletidos diretamente pelo objeto, ao invés de observar fotografias (diapositivos), processo este chamado de *visão estereoscópica indireta*.

A estereoscopia depende muito da acomodação do olho, que nada mais é do que adaptar a distância focal do olho à distância em que está o objeto, que estamos observando. Assim, podemos ver a diferença do olho com a câmara fotográfica, pois esta tem distância focal fixa, exceto pequenos ajustes de calibração.

8.5. Processos para visão estereoscópica indireta

a) Anaglifo: Este processo estabelece a separação das duas imagens distintas a serem percebidas, usando projeções ou impressão nas cores complementares vermelho e azul e usando óculos com filtros nestas cores. Se a foto da esquerda é projetada ou impressa em vermelho e a direita em azul, o filtro do olho esquerdo é azul e o do direito é vermelho, de tal forma que o olho esquerdo só perceba a foto da esquerda e o direito, a foto da direita. Apesar da projeção colorida, a imagem tridimensional é percebida em preto e branco.

b) Cintilamento: Sabemos que as imagens formadas na retina do olho humano persistem por cerca de 0,1 segundo, após a ocultação do objeto. Este processo explora este fato, para estabelecer a separação dos campos visuais dos dois olhos do seguinte modo:

- Projeta, alternadamente, as imagens da foto da esquerda e da direita, durante cerca de 1/60 de segundo.
- Sincronizadamente, veda o campo visual do olho direito, enquanto a imagem da foto da esquerda é projetada.
- Veda o campo visual do olho esquerdo, enquanto a imagem da foto da direita é projetada. Como a frequência de projeções sucessivas é alta, os olhos vêem, continuamente, as imagens correspondentes e, assim, se obtém a visão tridimensional.

- c) **Polarização:** Usando filtros polarizadores, faz-se, com que as imagens de um par estereoscópico projetadas sejam polarizadas em planos ortogonais. O observador utiliza filtros polaróides ortogonais correspondentes aos planos de projeção. Assim, verá com um olho apenas a imagem projetada por um dos projetores. Da fusão, no cérebro, das duas imagens, resultará a visão tridimensional.
- d) **Método do estereoscópio:** Podemos obter a visão tridimensional por estereoscopia, utilizando o instrumento denominado estereoscópio. O estereoscópio elimina a dificuldade criada pelo nosso condicionamento. Essencialmente, ele é constituído de um par de lentes convexas montadas sobre um suporte. A distância focal destas lentes é um pouco maior que as pernas do suporte, de modo que, quando colocamos o par fotográfico sob o instrumento, os raios luminosos emanados da foto, situadas quase no plano focal das lentes, saem, aproximadamente, paralelos. O cristalino acomodado, para observar a imagem, formada no infinito, obtém a visão tridimensional. Existem estereoscópios de espelhos e estereoscópios de bolso. O estereoscópio de espelhos nos dá condições de analisar uma região maior da fotografia. Isto é importante, na implantação de grandes projetos. Exemplo: na implantação de uma rodovia ou ferrovia, precisamos ter várias opções para depois escolher a melhor. Para tanto, é necessário ver, de uma vez, todas as opções ou, pelo menos, algumas delas. Com o estereoscópio de espelhos é possível usar alguns acessórios como: a barra de paralaxe e o amplificador de detalhes, o qual concentra o campo visual a uma micro-região da foto. O estereoscópio de bolso amplia mais o relevo do que o de espelho. Além disso, ele tem a vantagem de transporte, pois é pequeno e não exige lugar mais sofisticado para o seu uso. É possível, levá-lo em trabalhos de campo e obtermos medidas estereoscópicas no campo.

8.6. Fatores que afetam a estereoscopia

- Orientação do estereomodelo;
- Capacidade de visão do fotointérprete ou fotogrametrista;
- Iluminação do ambiente;
- Diferença notável de escala no estereomodelo;
- Tonalidade fotográfica uniforme;
- Mudanças de posições de objetos no intervalo de tempo decorrido, entre duas tomadas de fotografias.

9.0. Fotointerpretação

Fotointerpretação é a arte de examinar as imagens dos objetos nas fotografias e de deduzir a sua significação.

9.1. A chave da fotointerpretação

A chave da fotointerpretação é o uso de um guia, o qual ajuda os fotointerpretes a identificar rapidamente as características fotográficas. Essas chaves são baseadas em descrições e ilustrações típicas de objetos de uma determinada categoria; por exemplo: indústrias. São organizadas para um estudo comparativo; o intérprete seleciona os diferentes exemplos que mais coincidem com a característica que precisa ser identificada. O procedimento é lento e deve ser feito cuidadosamente, seguindo passo a passo a seqüência correta de trabalho, partindo do geral para o específico.

A determinação do tipo de chave e o método de apreciação a ser usado dependem:

- a) Do número de objetos, as condições para o reconhecimento;
- b) Da variabilidade normalmente encontrada dentro de cada classificação.

De uma maneira geral as chaves são mais facilmente construídas quando as características da superfície terrestre foram idealizadas pelo homem (exemplo: casas residenciais, edifícios, estradas, pontes, etc.). São de difíceis confecção quando se deve estudar as características para vegetação natural e as formas da Terra. Para a interpretação das características naturais, é essencial treinamento e trabalho de campo, para a obtenção da experiência necessária, podendo assim o profissional produzir trabalhos consistentes.

9.2. Fotointerpretação básica

A habilidade em fotointerpretar é desenvolvida pelo estudo e dedução, para aumentar hábitos de observação de objetos familiares, da terra ou de pontos elevados. Muitos de nós tiveram a oportunidade de observar a Terra através do vôo de um avião. Nessa oportunidade todos procuram reconhecer os objetos da superfície terrestre.

Vejamos as diferenças entre a leitura numa simples fotografia aérea e a fotointerpretação estereoscópica da mesma. A leitura fotográfica é um assunto para determinações gerais, tais como escala, orientação geográfica, estação do ano, identificação das linhas correspondentes ao perímetro, estradas de rodagem, estradas de ferro, importantes cursos d'água e classificação das principais formas topográficas. A fotointerpretação é um assunto que diz respeito à fotoanálise de curso d'água, de áreas cultivadas, da cobertura vegetal, de florestas para obtenção de madeira de lei, de formações geológicas, dos solos, de construções e trabalhos gerais feitos pelo homem. Na interpretação geológica e na de solos, precisamos rebuscar e gravar todas as informações a respeito do tipo de solo, dos lençóis de água, da erosão, das falhas geológicas, etc..

Para se obterem melhores resultados na leitura das fotografias aéreas, elas devem ser anotadas de tal maneira que as sombras fiquem voltadas para a direção do observador; como se tivessem uma luz iluminando a fotografia do lado esquerdo, acima do observador. Assim todos os objetos que tiverem projetados suas sombras na fotografia são elevações e os que não tiverem

sombras são depressões. No caso de uma montanha de forma arredondada, a tonalidade na fotografia sofrerá uma mudança gradual, mas um prédio terá uma sombra com tonalidade igual, representando perfeitamente a forma do mesmo. As fotografias que representam uma superfície ondulada ou montanhosa são caracterizadas pela grande quantidade de sombras.

A fotointerpretação é facilitada em áreas cultivadas devido às formas das características que nelas prevalecem. Culturas, pomares, pastos, etc., são geralmente limitados por áreas ou rios, o que facilita a interpretação. Essas áreas são também caracterizadas pelas estradas, trilha de gado, represas para irrigação e drenagem e pelo conjunto de construções típicas de áreas rurais. Nas áreas cultivadas as sombras aparecem com diversas tonalidades de cinza, predominando as tonalidades claras. Assim toda vegetação baixa, como a grama, bem como o milho no início de seu desenvolvimento aparece com tonalidade cinza claro e textura fina. O milho quando totalmente desenvolvido aparece na fotografia com tonalidade escura e textura grosseira.

Áreas com pastagem, áreas gramadas e campos aparecem com tonalidade clara e textura suave. Florestas densas aparecem com tonalidade escura enquanto que uma floresta em início de desenvolvimento aparece com tonalidade clara. O aparecimento de diferentes formas indica a presença de uma floresta mista.

Rios, ribeirões e riachos são identificados pela sinuosidade, uniformidade de tom e pelas características topográficas.

Lagos, reservatórios, tanques e pântanos são identificados pela sua uniformidade e tonalidade escura das águas, exceto nos pontos onde há reflexão do sol.

Os pântanos têm como principal característica um excesso de umidade, e a tonalidade da terra é bem escura.

As estradas de ferro aparecem como linhas finas, retas, mudando de direção através de curvas suaves. As estradas de rodagem são facilmente distinguidas nas fotografias aéreas. O que é difícil de se identificar é o tipo de pavimentação. Essa identificação só é possível em fotografias de escala grande. Estradas sinuosas indicam que a região é montanhosa.

Linhas de transmissão são identificadas pelas características de que, ao atravessar certas regiões, é observada uma área limpa, sem árvores, mostrando a passagem da linha de transmissão.

Cemitérios são identificados pela aparência esquemática das árvores, arbustos e caminhos. A identificação de escolas depende principalmente da forma geométrica da mesma e das características que se encontram nas vizinhanças. As igrejas são identificadas principalmente devido à sua estrutura de construção, seu tamanho, formato e pela torre com cruz no topo.

10.0. Referências bibliográficas

- Oliveira, Cêurio de, *Dicionário Cartográfico*, 4a. ed., Rio de Janeiro, IBGE, 1993;
 Oliveira, Cêurio de, *Curso de Cartografia Moderna*, 2a. ed., Rio de Janeiro, IBGE, 1993;
 Delmar, A.B. Marchetti e Gilberto, J. Garcia, *Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação*, Editora Nobel.

Loch, Carlos e Lapolli, Édis Mafra, *Elementos Básicos da Fotogrametria e sua Utilização Prática*, Editora da UFSC.
Manual of Photographic Interpretation - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - Second Edition – 1997
Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., Curitiba, PR, 2000.