

# **VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

## **TUTORIAL**

### **RADIOMETRIA ÓPTICA ESPECTRAL**

**CARLOS ALBERTO STEFFEN**

email: [steffen@ltid.inpe.br](mailto:steffen@ltid.inpe.br)

**ELISABETE CARIA MORAES**

email: [bete@met.inpe.br](mailto:bete@met.inpe.br)

**FÁBIO FURLAN GAMA**

email: [fábio@ltid.inpe.br](mailto:fábio@ltid.inpe.br)

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Laboratório de Radiometria - LARAD

Caixa Postal 515

12201.970 - São José dos Campos - SP - Brasil

---

## RESUMO

As imagens orbitais constituem matrizes de pixel's (picture cells) onde cada elemento representa (através do seu nível digital) o valor médio da radiância dos objetos que compõe o elemento de cena correspondente. A radiância é uma grandeza radiométrica que depende da iluminação solar e principalmente do modo particular como cada objeto reflete a radiação solar. Este fenômeno pode ser estudado através dos espectros de reflectância ou assinaturas espectrais desses objetos que estão intimamente relacionados com suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Diferenças nas assinaturas espectrais dos objetos terrestres produzem diferenças correspondentes nas suas radiâncias e por essa razão aparecem de maneira distinta nas imagens orbitais. Por outro lado, as variações na radiância espectral de um mesmo tipo de objeto são decorrentes de alterações nas suas propriedades e estas relações podem ser estudadas através de suas assinaturas espectrais.

O estudo do comportamento espectral dos objetos terrestres, isto é, das relações entre as suas assinaturas espectrais e suas propriedades físico-químicas e biológicas, é fundamental para o desenvolvimento das técnicas de Sensoriamento Remoto e constitui um importante campo da pesquisa fundamental.

A aquisição de assinaturas espectrais deve ser realizada com equipamentos e técnicas adequadas para a medição e redução dos dados. Este tutorial por objetivo proporcionar um conjunto integrado de conhecimentos que permita uma iniciação às técnicas de Radiometria Espectral, abordando temas como: grandezas radiométricas, radiômetros, sistemas de medição e redução de espectros, bem como uma introdução ao Comportamento Espectral dos objetos terrestres através da análise das relações entre suas assinaturas espectrais e propriedades mais importantes.

## **FUNDAMENTOS DE RADIOMETRIA**

*Carlos Alberto Steffen*

**Abstract.** The measurement of spectral signatures of terrestrial objects is very important to preview their appearance and to understand their meaning on satellite imagery. Digital levels on the image pixels depicts the average radiance on the instantaneous field of view of each detector. For each spectral band that radiance depends on the solar irradiance and reflectance of the objects on the scene which is related to their physical, chemical and biological properties. These relations need to be understood in order to increase the usefulness of sensor image data and basic research becomes very important to this subject. The field measurement , where the natural conditions of the objects and solar illumination are preserved, is the best way to gather the spectral signatures. That work can be improved trough the use of portable spectral radiometers and improved techniques for the measurement, calibration and processing of the spectral data.

## **COMPORTAMENTO ESPECTRAL**

*Elisabete C. Moraes*

**Abstract.** This work describes the general features of “spectral radiance” of natural targets, in form of typical reflectances curves like: vegetation, soil, rocks and minerals, and water (liquid, cloud and snow). The understanding this features permit to determine the optimum number and location of spectral bands and sensitivity requirements in the remote sensing satellites, to improve the differences and classification of the targets in the satellite imagens.

# RADIOMETRIA ÓPTICA ESPECTRAL

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE RADIOMETRIA

1.1	Introdução	1.1
1.2	Radiação Eletromagnética	1.2
1.3	O Espectro Eletromagnético	1.2
1.4	Grandezas Radiométricas	1.4
1.5	Grandezas Radiométricas Espectrais	1.6
1.6	Fontes de Radiação	1.6
1.7	Interação Radiação x Objeto	1.7
1.8	Assinaturas Espectrais	1.8
1.9	Reflectância Bicônica	1.8
1.10	Comportamento Espectral	1.9
1.11	O Radiômetro Óptico	1.11
1.12	O Fator de Reflectância	1.13
1.13	Medida do Fator de Reflectância	1.13
1.14	Processamento de Dados Espectrais	1.15
1.15	Equipamentos Radiométricos	1.15
	Referências Bibliográficas	1.17

### CAPÍTULO 2. COMPORTAMENTO ESPECTRAL

2.1	Introdução	2.1
2.2	Comportamento Espectral da Vegetação	2.2
2.3	Comportamento Espectral das Rochas e Minerais	2.8
2.4	Comportamento Espectral dos Solos	2.11
2.5	Comportamento Espectral da Água	2.17
	Agradecimentos	2.23
	Referências Bibliográficas	2.23

# RADIOMETRIA ÓPTICA ESPECTRAL

## CAPÍTULO 1

### FUNDAMENTOS DE RADIOMETRIA

*Carlos A. Steffen*

#### 1.1 Introdução

O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como o conjunto das técnicas relacionadas com a aquisição e a análise de dados de sensores remotos. Os sensores remotos são sistemas opto-eletrônicos capazes de detectar e registrar, sob a forma de imagens, o fluxo de radiação eletromagnética refletido ou emitido pelos objetos terrestres.

A imagem gerada por um sensor remoto é constituída por uma matriz de pontos denominados pixel's (picture cell's) onde cada um representa, através de seu nível digital, a quantidade de radiação refletida ou emitida pela parte da cena que representa.

A quantidade e a qualidade da radiação refletida pelos objetos terrestres resulta das modificações que o fluxo de radiação solar experimenta ao interagir com os mesmos. Essas alterações são provocadas pelas diferentes propriedades físico-químicas e biológicas dos objetos e determinam a sua aparência na imagens dos sensores remotos.

Os objetos terrestres também emitem radiação eletromagnética cuja quantidade e qualidade depende da natureza e principalmente da temperatura dos mesmos.

#### 1.2 Radiação Eletromagnética

Desde os mais remotos tempos, a energia é utilizada pelo homem para a sua sobrevivência e desenvolvimento. Ao longo da história a ciência dominou as técnicas de transformação da energia e atualmente diversas formas como: elétrica, mecânica, térmica, luminosa, nuclear, etc., são disponíveis para as sociedades mais evoluídas.

Quase toda a energia disponível na Terra tem sua origem no Sol, de onde se propaga para todo o espaço na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação se desloca, na forma de ondas, com uma velocidade próxima de 300.000 km/s. Como qualquer tipo de fenômeno ondulatório, os diferentes tipos de radiação eletromagnética podem ser caracterizados pelo seu comprimento de onda e frequência, que se relacionam com a velocidade de propagação por:

$$C = \lambda \cdot f \quad 1$$

onde  $C$  é a velocidade em m/s,  $\lambda$  o comprimento de onda m e  $f$  a frequência em Hertz.

Muitas vezes os comprimentos de onda tem dimensões muito pequenas e é comum a utilização de submúltiplos do metro como o nanometro ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ) e o micrometro ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$ ) para a sua designação e, da mesma forma, os valores da frequência costumam ser indicados por múltiplos do Hertz, como o quiloHertz ( $1\text{kHhz} = 10^3\text{ Hz}$ ), o megaHertz ( $1\text{MHz} = 10^6\text{ Hz}$ ) e o gigaHertz ( $1\text{GHz} = 10^9\text{ Hz}$ ).

Apesar de suas características de propagação ondulatória, a radiação eletromagnética apresenta propriedades de natureza quântica que se manifestam nos processos de sua emissão ou absorção pela matéria; nesse caso, a conversão da energia ocorre em quantidades discretas denominadas “quantum” cuja energia é dada pela relação:

$$Q = h.f \quad 2$$

onde  $Q$  é a quantidade de energia quântica em Joules,  $h$  a constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34}$  J.s) e  $f$  a frequência da radiação em Hz. A equação anterior mostra que as maiores quantidades de energia são associadas às radiações eletromagnéticas de alta frequência.

### 1.3 O Espectro Eletromagnético

Os diferentes tipos de radiação eletromagnética conhecidos podem ser caracterizados pelo seu comprimento de onda ou pela frequência. O gráfico da figura 1, denominado Espectro Eletromagnético mostra de forma organizada, o conjunto dos diferentes tipos radiação eletromagnética conhecidas. Os limites das diferentes regiões ou bandas espectrais, não são rígidos e suas denominações são de natureza histórica ou decorrentes dos processos utilizados na sua produção ou detecção.

Observando o espectro eletromagnético no sentido dos maiores comprimentos de onda (menor frequência), podem-se observar os seguintes tipos de radiação :

**radiação Gama:** radiação de alta energia geralmente emitida por materiais radioativos. é utilizada em medicina (radioterapia) e radiografia industrial.

**raios-X:** radiação produzida pelo freamento de elétrons de alta energia. O seu médio poder de penetração a torna adequada para as aplicações na medicina (radiografia) e nas técnicas de controle de qualidade industrial.

**ultravioleta:** radiação emitida em grande quantidade pelo Sol na faixa de 100nm até aproximadamente 380nm entretanto é bastante atenuada pela camada de ozônio atmosférico antes de atingir a superfície terrestre. Essa banda pode ser subdividida em:

UV próximo: 300 a 380 nm

UV médio: 200 a 300 nm

UV distante: 100 a 200 nm

**visível:** é o conjunto das radiações que podem ser percebidas pelo sistema visual humano e denominado luz. A cor é uma sensação produzida pelo estímulo luminoso e as diferentes componentes do espectro visível produzem sensações de cor que dependem de seu comprimento de onda (ou frequência) como mostra a relação:

violeta: 390 a 450 nm

azul: 450 a 500 nm

verde: 500 a 560 nm

amarelo: 560 a 600 nm

laranja: 600 a 630 nm

vermelho: 630 a 760 nm

Os limites das bandas espectrais e as denominações da lista acima são apenas indicações que podem ser modificadas numa análise mais detalhada do assunto.

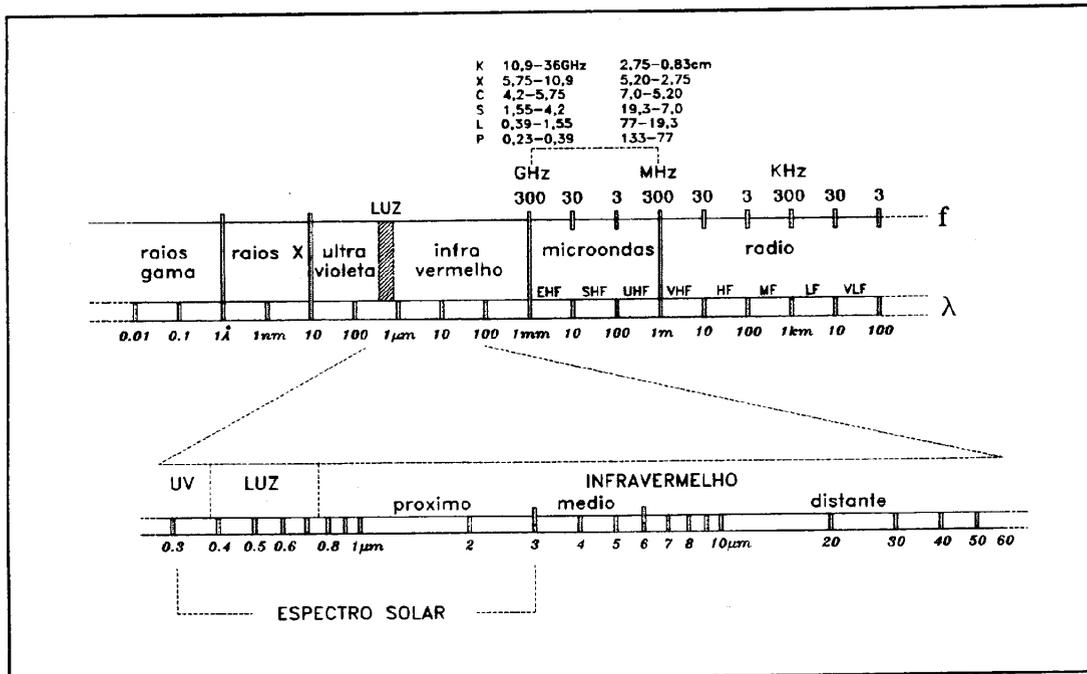


Figura 1. O Espectro Eletromagnético.

**infravermelho:** região espectral que contém as radiações eletromagnéticas desde  $0,7\mu\text{m}$  até  $1000\mu\text{m}$  e costuma ser subdividida em três sub-regiões:

IV próximo:  $0,7$  a  $3,0\mu\text{m}$

IV médio:  $3,0$  a  $6,0\mu\text{m}$

IV distante:  $6,0$  a  $10^3\mu\text{m}$

Na superfície da Terra, as radiações do infravermelho próximo podem ser encontradas em quantidades bastante significativas na radiação solar enquanto que as radiações do infravermelho médio e distante também conhecidas como radiação termal tem sua fonte mais importante nos objetos terrestres (mesmo na temperatura ambiente).

**microondas:** radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas eletrônicos e se estendem pela região do espectro desde  $1\text{mm}$  até cerca de  $1\text{m}$ , o que corresponde ao intervalo de frequências de  $300\text{GHz}$  a  $300\text{MHz}$ . Em Sensoriamento Remoto as radiações de microondas são utilizadas nos sistemas de radar (radio detection and ranging) e são importantes pela sua capacidade de gerar imagens através das nuvens.

**rádio:** radiações eletromagnéticas de frequência menor que  $300\text{MHz}$  ( $\lambda > 1\text{m}$ ) e utilizadas principalmente em telecomunicações.

Algumas bandas do espectro eletromagnético tem denominações especiais relacionadas com suas características como por exemplo:

**espectro óptico:** região do espectro que compreende as radiações que podem ser coletadas por sistemas ópticos (ultravioleta, visível, e infravermelho).

**espectro solar:** região espectral que compreende os tipos de radiação emitidas pelo Sol.

**espectro visível:** conjunto das radiações percebidas pelo sistema visual humano.

## 1.4 Grandezas Radiométricas

Para melhor compreender os processos de reflexão e emissão da radiação eletromagnética pelos objetos terrestres, é necessário quantificar as causas e os efeitos envolvidos nesses fenômenos; neste caso, as quantidades de energia radiante devem ser avaliadas em função de sua distribuição espectral, espacial e temporal e são denominadas grandezas radiométricas.

A radiometria é o conjunto das técnicas utilizadas para a avaliação de quantidades de energia radiante e os sistemas utilizados para a medição são denominados radiômetros. As quantidades relacionadas com a energia radiante que podem ser medidas são denominadas grandezas radiométricas e, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades, as principais são:

**Energia radiante (Q):** é a grandeza radiométrica fundamental que indica a quantidade de energia associada a um fluxo de radiação e sua unidade é o Joule (J).

**Fluxo Radiante ( $\Phi$ ):** a radiação ao se propagar pelo espaço transfere energia de um lugar para outro. A quantidade de energia radiante que flui por uma posição do espaço na unidade de tempo (taxa de transferência) é denominada fluxo radiante e definida por:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad 3$$

onde  $\Phi$  é o fluxo medido em Joule/segundo (J/s) ou Watt (W),  $\Delta Q$  é a quantidade de energia radiante em J e  $\Delta t$  o intervalo de tempo em seg.

**Irradiância (E):** quando um fluxo radiante irradia (ilumina) uma amostra de superfície (Figura 2a), a razão entre o fluxo e a área da amostra é a sua irradiância:

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta a} \quad 4$$

onde E é a irradiância em W/m<sup>2</sup>,  $\Delta \Phi$  o fluxo em W e  $\Delta a$  a área da amostra em m<sup>2</sup>.

**Lei do Coseno da Irradiância:** se um fluxo de radiação colimado (unidirecional) incide perpendicularmente sobre uma amostra de superfície plana, a sua interseção com o plano da superfície determina a área irradiada entretanto, se a direção do fluxo for inclinada, como mostra a Figura (2e), a área da interseção aumenta enquanto o fluxo permanece constante. Neste caso, a irradiância diminui de valor pois o fluxo se distribui por uma área maior o que pode ser descrito pela equação:

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \cos \theta \quad 5$$

O fluxo da radiação solar direta pode ser considerando colimado e não é difícil perceber que a irradiância que produz numa amostra da superfície terrestre não depende somente do ângulo de elevação solar mas também da orientação da amostra com relação ao fluxo (o ângulo  $\theta$  entre a normal à superfície e o fluxo).

**Exitância (M):** se o fluxo radiante deixa uma amostra de superfície, após a sua reflexão ou emissão (Figura 2b), a razão entre o fluxo e área da amostra define a sua Exitância:

$$M_{out} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta a} \quad 6$$

onde  $M$  é a exitância em  $W/m^2$ ,  $\Delta\Phi$  o fluxo em  $W$  e  $\Delta a$  a área da amostra em  $m^2$ .

A irradiância e a exitância diferem apenas com relação ao sentido dos fluxos envolvidos como mostram as Figuras 2a e 2b, portanto sua determinação inclui todo o fluxo contido num dos hemisférios determinados pelo plano da amostra.

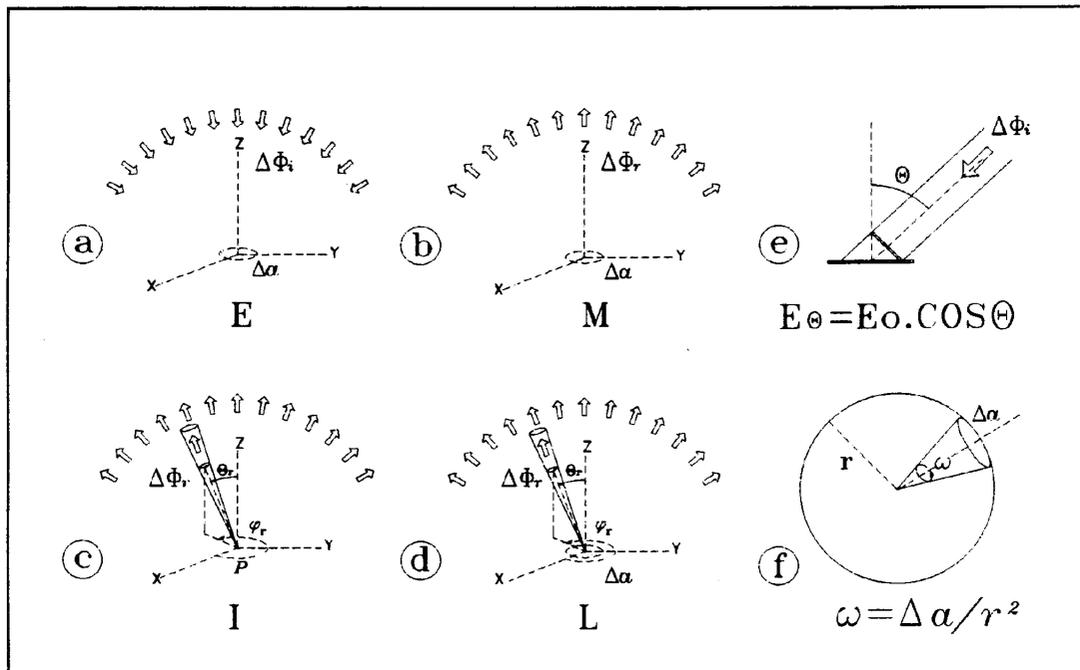


Figura 2. Grandezas Radiométricas.

**Intensidade Radiante (I):** é a densidade espacial do fluxo radiante que tem origem numa fonte puntiforme como mostra a Figura 2c. A intensidade radiante numa determinada direção é definida pela razão entre o fluxo que se propaga num ângulo sólido amostral com origem na fonte e a dimensão desse ângulo sólido:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega} \quad 7$$

onde  $I$  é a intensidade radiante em watt/sterradiano ( $W/sr$ ),  $\Delta\Phi$  o fluxo em  $W$  e  $\Delta\omega$  o valor do ângulo sólido medido em esterradianos (um ângulo sólido em esterradianos é definido pela razão entre a área amostral que intercepta numa superfície esférica e o raio desta como mostra a Figura 2f). Do ponto de vista prático, uma fonte puntiforme é aquela cujas dimensões podem ser consideradas desprezíveis quando comparadas a distância em que é observada (p.ex.: uma estrela, uma lâmpada distante). A intensidade radiante mede o "brilho" da fonte em cada direção do espaço.

**Radiância (L):** se as dimensões de uma amostra de superfície podem ser consideradas desprezíveis com relação à distância em que é observada, o "brilho" dessa amostra, em cada direção (Figura 2d) é medido pela sua radiância definida por:

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega \cdot \Delta a \cos \theta} \quad 8$$

onde  $L$  é a radiância em  $W/m^2 \cdot sr$ ,  $\Delta\omega$  o ângulo sólido em  $sr$  e  $\Delta a \cdot \cos\theta$  é o valor da área da amostra em  $m^2$ , projetada na direção considerada. Considerando que uma amostra de superfície pode ser decomposta em áreas elementares que satisfazem a definição acima, não é difícil perceber que a radiância dessa amostra, numa dada direção, é produzida pela média das radiâncias dos elementos de área que a constituem. Como a radiância depende da intensidade do fluxo que se propaga em cada direção, um radiômetro capaz de medir esse fluxo pode ser calibrado para fornecer a radiância média da área amostral contida no seu campo de visada.

Quando a radiância de uma amostra de superfície é constante em qualquer direção que seja observada, a amostra é denominada lambertiana ou difusor perfeito.

### 1.5 Grandezas Radiométricas Espectrais

Filtros são dispositivos ópticos capazes de isolar bandas espectrais. Com o auxílio de filtros as grandezas radiométricas podem ser medidas em pequenos intervalos espectrais e nesse caso, a razão do valor obtido pelo amplitude do intervalo corresponde ao valor médio da grandeza naquele intervalo (banda). Se os filtros utilizados são bastante estreitos, o valor médio da grandeza medida costuma ser associado ao comprimento de onda central do intervalo e considerado como a amplitude espectral da grandeza nesse comprimento de onda. Por exemplo, o valor da irradiância solar espectral em 505nm pode ser medida através de um filtro cuja banda de transmissão seja de 500 a 510nm; neste caso, o valor obtido é dividido pelo intervalo da banda do filtro (10nm) e a irradiância espectral da amostra indicada por  $E_{505}$  com unidade em  $W/m^2 \cdot nm$ .

O conjunto dos valores espectrais sucessivos de uma grandeza radiométrica é denominado espectro e pode ser utilizado para a construção de gráficos que relacionam a amplitude espectral da grandeza com o correspondente comprimento de onda. Os espectros constituem descrições das propriedades dos objetos.

### 1.6 Fontes de Radiação

A maior parte da radiação disponível nas bandas do ultra-violeta, visível e infravermelho tem origem térmica, isto é, resulta da emissão de energia radiante por corpos aquecidos. Qualquer objeto cuja temperatura seja maior que zero absoluto (0K) emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética que depende da temperatura do objeto. Na realidade, o objeto reemite a mesma energia que é capaz de absorver do ambiente e a eficiência deste processo depende de suas propriedades. Um corpo capaz de absorver toda a energia incidente sobre ele e reemití-la na forma de um espectro contínuo é denominado corpo negro. O corpo negro é uma abstração e o seu espectro é descrito por uma função denominada lei de Planck. Na Figura 3 pode se observar o espectro de radiância de um corpo negro a 6000K, calculado à partir da lei de Planck.

O Sol, a principal fonte de energia para a Terra, é uma esfera gasosa de aproximadamente  $7,0 \cdot 10^5$  km de raio e  $2 \cdot 10^{29}$  toneladas de massa quase totalmente concentrada na metade interna de seu raio. O Sol é essencialmente composto de hidrogênio e hélio e sua energia resulta da reação de fusão desses elementos o que produz no seu interior uma temperatura de dezenas de milhões de graus Kelvin. Apesar dessa elevada temperatura, o Sol tem uma temperatura aparente equivalente à de um corpo negro à 6000K. Na Figura 3 podem ser vistos os espectros do corpo negro e da radiação solar medidos no

topo da atmosfera e ao nível do mar onde o último aparece modificado pela interação com os constituintes atmosféricos. Note que esses elementos produzem alterações importantes na qualidade e quantidade da radiação que atinge a superfície, como por exemplo as descontinuidades que se pode notar na região do infravermelho.

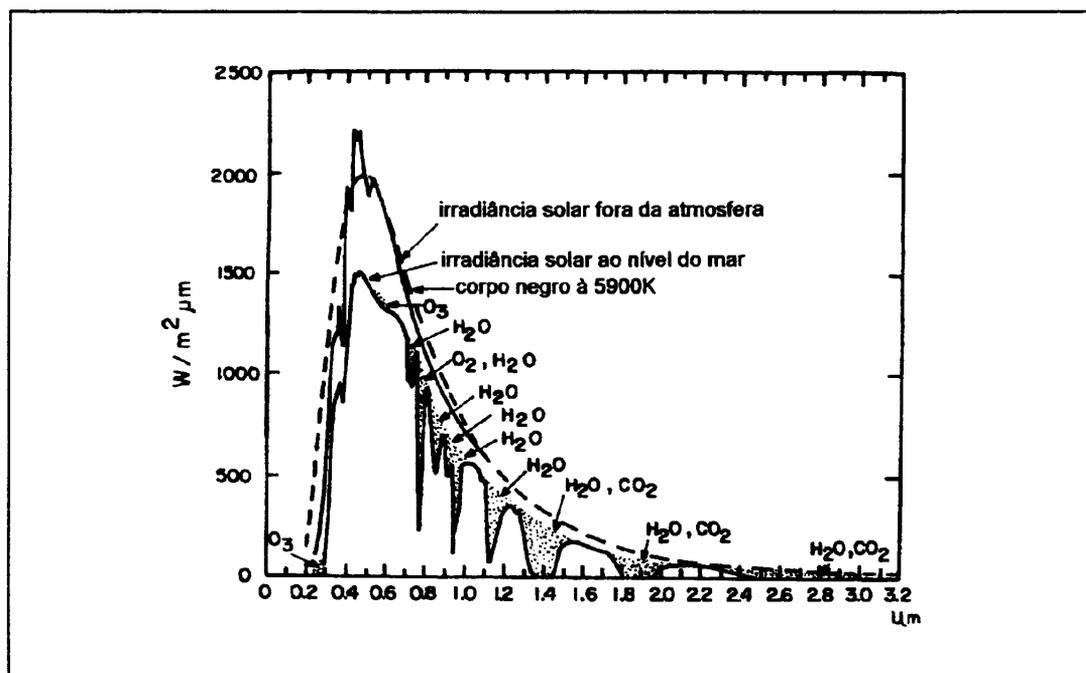


Figura 3. Fontes de Radiação Eletromagnética.

Fontes artificiais, como por exemplo lâmpadas de filamento, gás ou mistas podem ser utilizadas para produção de radiação eletromagnética semelhante à do espectro solar. Como resultado de emissão térmica, a intensidade e a qualidade espectral da radiação que emitem depende da temperatura da lâmpada. Por exemplo, lâmpadas comuns de filamento (domésticas), produzem um espectro de radiação de baixa intensidade e pobre em radiação ultravioleta e azul. Lâmpadas halógenas, comumente utilizadas em projetores, tem um espectro mais semelhante ao espectro solar e são por isso utilizadas como fonte de iluminação na radiometria de laboratório.

### 1.7 Interação Radiação x Objeto

Um fluxo de radiação eletromagnética ao interagir com um objeto pode ser parcialmente refletido, absorvido e transmitido como mostra a Figura 4a e neste caso, os fluxos resultantes têm valores que dependem das propriedades do objeto. A lei de conservação da energia permite escrever que:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad 9$$

e normalizando em relação ao fluxo incidente tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad 10$$

onde as razões adimensionais  $\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$  são denominadas reflectância, absortância e transmitância e consideradas propriedades radiométricas do objeto analisado. O fluxo absorvido não pode ser medido diretamente, portanto a absortância pode ser deduzida da equação 10 após a determinação da transmitância e da reflectância.

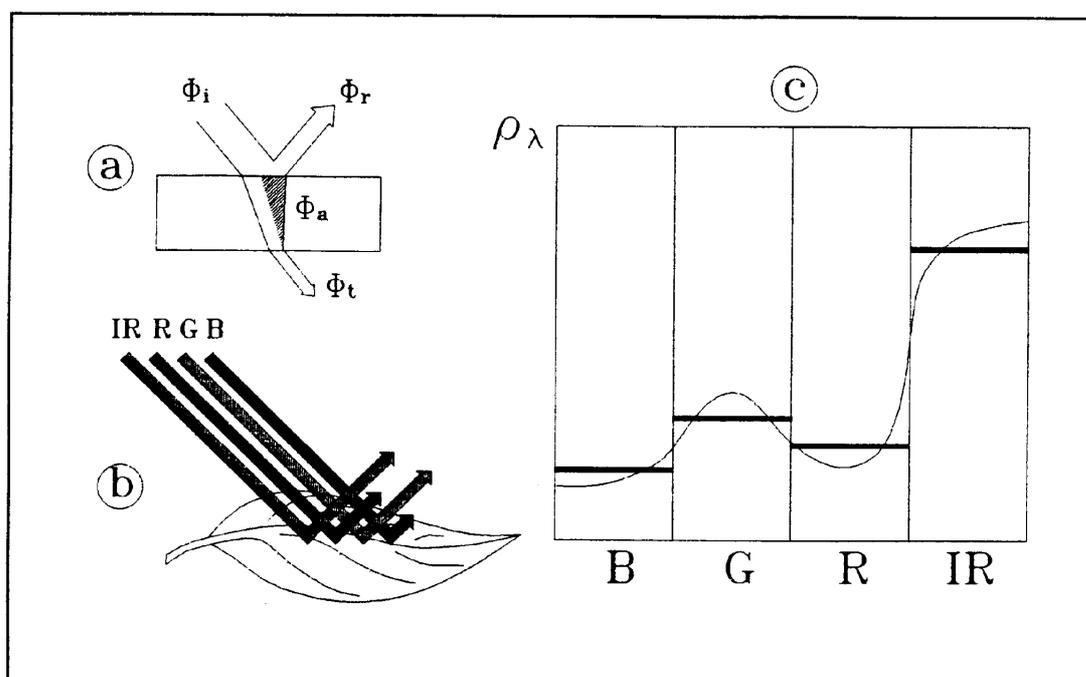


Figura 4. Interação Radiação Objeto.

### 1.8 Assinaturas Espectrais

Pode-se medir a reflectância de uma folha verde nas faixas do espectro correspondentes ao azul, verde, vermelho e infravermelho próximo e construir um gráfico como o da Figura 4b onde aparecem, representados em colunas, os valores médios da reflectância da folha nessas quatro faixas. Nota-se neste gráfico, que a folha reflete mais fortemente as componentes de radiação verde e infravermelha e de forma menos intensa as componentes azul (absorvida no processo de fotossíntese) e vermelha (absorvida pela clorofila). Se um conjunto de bandas espectrais bem estreitas e adjacentes for selecionado para a medida da reflectância espectral da folha, pode-se conseguir um gráfico como o da Figura 4c, conhecido como assinatura espectral e que representa, de forma mais detalhada, o resultado da interação da energia radiante com a amostra. Note que a assinatura espectral da folha é dominada pela absortância na região do visível e pela reflectância na região do infravermelho. As variações de amplitude nas assinaturas espectrais são indicadores de propriedades que se manifestam na interação da radiação electromagnética com as amostras.

### 1.9 Reflectância Bicônica

A reflectância, como definida através das equações 9 e 10, não leva em consideração a distribuição espacial dos fluxos de radiação refletido e incidente, e é por isso denomi-

nada reflectância difusa. Em geral, os fluxos medidos na medida da reflectância estão contidos em dois ângulos sólidos e a razão entre esses fluxos é denominada reflectância bicônica da amostra; com exceção das superfícies lambertianas, o valor da reflectância bicônica varia com as direções dos fluxos incidente e refletido.

Quando os ângulos sólidos envolvidos na determinação da reflectância bicônica forem muito pequenos, a razão entre os fluxos pode ser denominada reflectância bidirecional da amostra de superfícies. O espectro da reflectância bidirecional é uma descrição mais detalhada da assinatura espectral da amostra, e sua medida deve sempre especificar as direções dos fluxos utilizados na avaliação. Pode-se dizer que a reflectância bidirecional é um caso extremo da reflectância bicônica, quando os ângulos sólidos se aproximam de zero e da mesma forma, quando os ângulos compreendem todo o hemisfério de incidência e de reflexão, a reflectância pode ser denominada bi-hemisférica ou difusa.

Na determinação da reflectância pode-se medir o fluxo radiante em uma banda espectral  $\Delta\lambda$  e nesse caso, a denominação recebe também o sufixo multiespectral (in-band), por exemplo: reflectância bidirecional multiespectral. Do ponto de vista prático, se a banda espectral for muito pequena ( $<10\text{nm}$ ), o valor médio da reflectância pode ser associado ao comprimento de onda central da mesma e o sufixo é denominado espectral. Se a banda de medição compreende todo o espectro, o sufixo utilizado é denominado total.

Considerando que os dois fluxos envolvidos na determinação da reflectância podem ter várias configurações geométricas e espectrais, é possível concatenar todas as possibilidades e definir (pelo menos teoricamente) até 27 diferentes tipos de reflectância; por exemplo, a reflectância hemisférica-cônica-espectral de uma amostra considera na sua determinação a razão entre o fluxo espectral incidente de todo o hemisfério e a parte desse fluxo, refletido pela amostra e contido num determinado ângulo sólido.

### 1.10 Comportamento Espectral

Quando um fluxo radiante irradia uma amostra de superfície parte do fluxo é refletido para o hemisfério de incidência. Se a superfície é lambertiana, a radiância resultante é constante em todas as direções e seu valor nas proximidades da amostra é denominada radiância inerente. Neste caso, se a amostra lambertiana tem reflectância espectral  $\rho_\lambda$ , a sua radiância espectral inerente ( $L_\lambda$ ) pode ser determinada pela relação:

$$L_\lambda = \frac{\rho_\lambda \cdot E_\lambda \cos \theta}{\pi} \quad 11$$

onde  $E_\lambda$  em  $\text{W/m}^2$  é a irradiância espectral do fluxo de radiação que ilumina a amostra.

A radiância espectral inerente da amostra quando observada desde um sensor remoto, sofre alterações produzidas pela atmosfera. Essas interferências se devem principalmente a absorção e à radiância da atmosfera (a atmosfera reflete radiação solar de volta para o espaço e na direção do sensor num processo denominado retroespalhamento) de forma que a equação 11 deve incluir esses efeitos e fica:

$$L'_\lambda = \frac{\tau_\lambda(\rho_\lambda \cdot E_\lambda \cos \theta)}{\pi} + L_{\text{atm}, \lambda} \quad 12$$

onde  $L'_\lambda$  é denominada radiância espectral aparente da amostra;  $\tau_\lambda$  e  $L_{atm,\lambda}$  são respectivamente a transmitância e a radiância espectral da atmosfera.

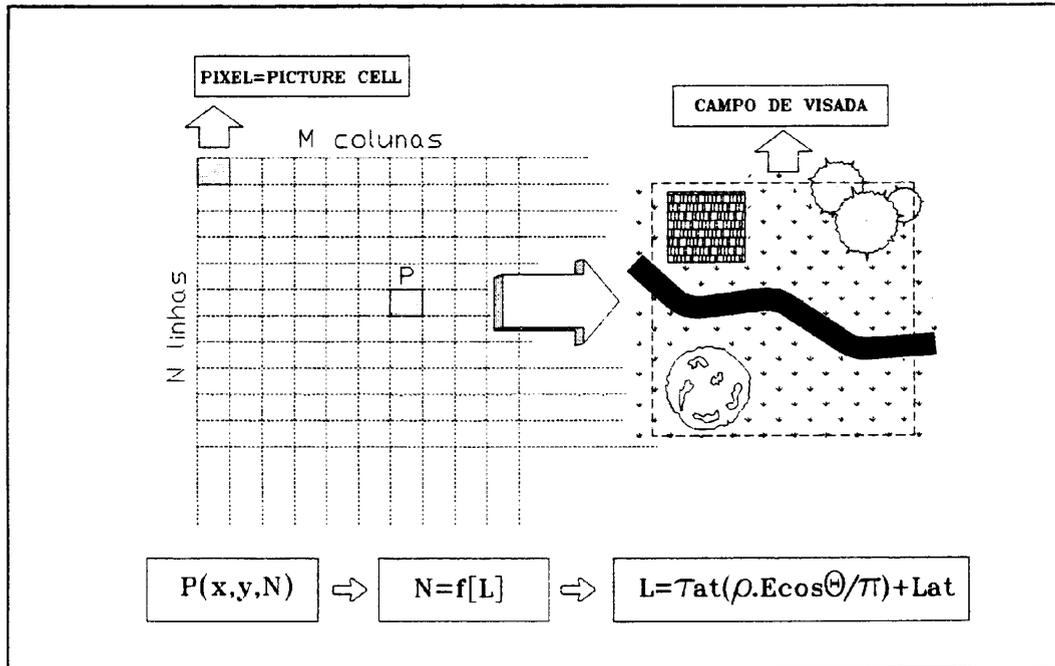


Figura 5. Comportamento Espectral.

Os espectros de radiância aparente são descrições convenientes do comportamento espectral dos objetos terrestres pois estão relacionados com suas propriedades físico-químicas e biológicas (através da reflectância espectral) e com os fatores exógenos (irradiância, geometria e atmosfera) que determinam a sua aparência nas imagens dos sensores remotos.

A imagem gerada por um sensor remoto é constituída (em cada banda espectral) de uma matriz de pixel's onde cada um representa, através de sua densidade (nível de cinza), a radiância aparente (média) de uma amostra de superfície (p.ex: 30 x 30m na banda 3 do Landsat/TM) como mostra a Figura 5. Por essa razão a correta interpretação da aparência de cada objeto presente na imagem depende de um adequado conhecimento de seu comportamento espectral. Esse fato tem induzido muitos pesquisadores, da área de Sensoriamento Remoto, a desenvolverem um grande esforço na medição radiométrica da reflectância dos objetos terrestres com o objetivo de melhor compreender as relações entre as suas propriedades e o seu comportamento espectral.

Na Figura 6, pode-se observar espectros de reflectância, na faixa de 400 à 2500nm de alguns objetos terrestres bastante frequentes nas imagens de sensoriamento remoto. Note que as assinaturas espectrais apresentam algumas propriedades comuns, como as depressões associadas às bandas de absorção da água que aparecem em torno de 1400nm e 1900nm.

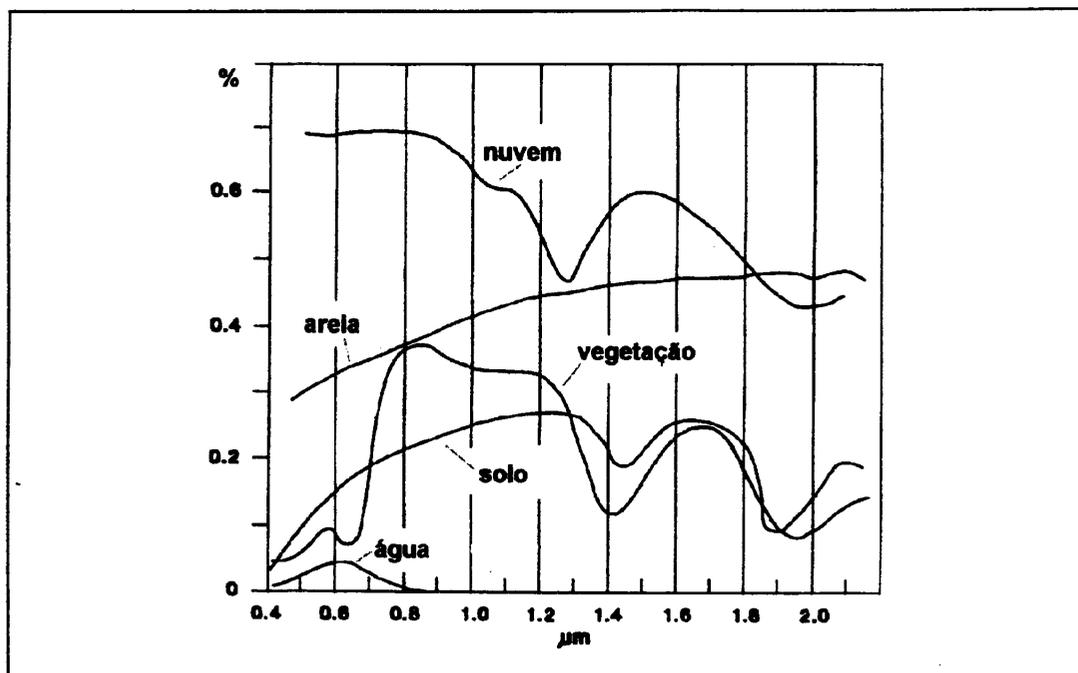


Figura 6. Assinaturas Espectrais de Objetos Terrestres.

### 1.11 O Radiômetro Óptico

As grandezas radiométricas, na região do ultra-violeta ao infravermelho distante podem ser medidas através de equipamentos denominados radiômetros ou espectrorradiômetros ópticos. O esquema da Figura 7a mostra, de forma simplificada, a estrutura de um radiômetro na qual podem-se destacar os seguintes componentes:

**coletor:** é o componente óptico construído com lentes e espelhos cuja função é concentrar o fluxo de radiação proveniente da amostra sobre o detector.

**filtro:** tem a finalidade de selecionar a banda espectral do fluxo de radiação que atinge o detector. Nos espectrorradiômetros no lugar de filtros costumam ser utilizadas as redes de difração que são bastante mais eficientes na dispersão do fluxo de radiação.

**detector:** é um dispositivo de estado sólido, geralmente de pequenas dimensões e feito de materiais cujas propriedades elétricas variam ao absorver um fluxo de energia radiante. Um detector absorve energia radiante e a transforma em energia elétrica cuja amplitude é proporcional ao fluxo absorvido. Em geral os radiômetros utilizam detectores feitos de silício (Si) para as bandas do ultra-violeta, visível e infravermelho próximo e de sulfeto de chumbo (PbS) para a banda do infravermelho.

**processador:** é um sistema eletrônico capaz de realizar a amplificação do fraco sinal elétrico gerado pelo detector. Os detectores geram sinais mesmo na ausência de radiação e estes sinais de natureza aleatória são denominados ruído e se adicionam aos sinais produzidos durante a medição. Como o ruído tem um nível mais ou menos constante o seu efeito é mais significativo quando o sinal da medida é fraco, em caso contrário, o processador pode filtrar esses sinais indesejáveis diminuindo a sua influência na medi-

da. O processador também pode realizar a conversão dos sinais elétricos resultantes, que são de natureza analógica, para valores binários (digitalização).

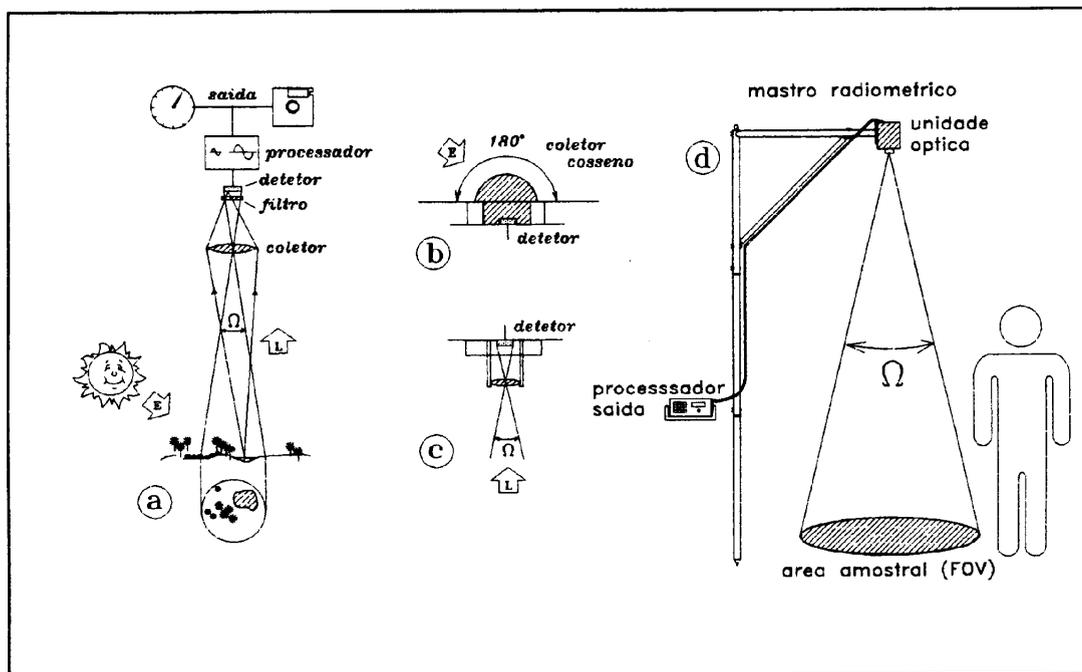


Figura 7. O Radiômetro Óptico.

**unidades de saída:** são os dispositivos utilizados para registrar ou indicar a amplitude dos sinais provenientes do processador. As unidades de saída registram ou exibem os valores relativos dos sinais elétricos, entretanto podem ser calibradas para apresentar os valores absolutos da grandeza para a qual o radiômetro está configurado.

Como mostra a Figura 7a, o radiômetro “vê” uma área amostral que corresponde à projeção (geométrica) do detector sobre a superfície; nesse caso, o fluxo de radiação ~~que~~ focalizado sobre o detector é proveniente dessa área amostral.

A qualidade de um radiômetro costuma ser indicada pela sua resolução ou capacidade de realizar medidas detalhadas das grandezas radiométricas. Assim, o tamanho da área amostral resolução angular do coletor, também denominada campo de visada do radiômetro ( $\Omega$  na Figura 7c). Da mesma forma, o menor intervalo espectral em que o radiômetro consegue realizar as medidas, determina a sua resolução espectral e a menor variação de amplitude da medida que o sistema consegue registrar, determina a sua resolução radiométrica.

Um radiômetro como o da Figura 7a mede a radiância espectral média relativa dos objetos contidos no seu campo de visada entretanto, pode ser calibrado para medir a radiância espectral média absoluta (em  $W/m^2 \cdot sr \cdot nm$ ). Essa calibração é realizada através de medida da radiância espectral de uma fonte padrão cujo espectro de radiância é conhecida (em geral as fontes de calibração tem um certificado que relaciona esses valores). Neste caso, os fatores espectrais de calibração são os valores que devem ser multiplicados pelos sinais obtidos nas unidades de saída para obtenção dos valores absolutos do espectro de radiância espectral da fonte utilizada como padrão.

\* depende da

Em geral, os radiômetros utilizados na medida da radiância em campo tem um campo de visada de abertura pequena (menor que 20 graus) como na Figura 7b. Quando utilizados para a medida da irradiância, os radiômetros devem ser equipados com um coletor coseno, isto é, um dispositivo óptico capaz de estender o campo de visada do radiômetro para todo o hemisfério de incidência (180 graus) como mostra a Figura 7c.

- 7c 15°

- 7b

### 1.12 O Fator de Reflectância

A medida da reflectância bidirecional para caracterizar o comportamento espectral de objetos terrestres deve, idealmente, ser realizada em condições de campo onde as propriedades da amostra ficam preservadas e as condições de iluminação são semelhantes às existentes no processo de aquisição das imagens pelos sensores remotos; Entretanto, as dificuldades técnicas para se medir a reflectância espectral através dos fluxos refletido e incidente, fazem com que, em seu lugar, seja medida uma grandeza equivalente denominada fator de reflectância. O fator de reflectância de uma amostra é a razão entre a sua radiância ( $L_a$ ) e a radiância de uma superfície lambertiana ideal ( $L_r$ ), nas mesmas condições de iluminação e medição (Milton, 1987). A superfície lambertiana ideal tem reflectância unitária e é uma abstração. Na prática, essa superfície é materializada através de uma superfície de referência feita de uma placa plana recoberta com Sulfato de Bário ( $BaSO_4$ ) ou Óxido de Magnésio ( $MgO$ ) e calibrada por comparação com uma placa padrão de laboratório cujo espectro de reflectância é conhecido.

Da mesma forma que a reflectância, o fator de reflectância espectral depende das propriedades da amostra, da geometria de iluminação e de medição e da faixa espectral utilizada. Se o campo de visada do espectrorradiômetro é pequeno ( $<15^\circ$ ) e a irradiância é produzida pelo fluxo solar direto, pode-se considerar a medida como sendo o fator de reflectância bidirecional espectral da amostra; nesse caso, a medida deve especificar as direções dos fluxos incidente e refletido e o comprimento de onda associado à medida; por exemplo:  $R(45^\circ; 0^\circ; 435nm)$  representa o fator de reflectância bidirecional espectral de uma amostra (isotrópica), medida verticalmente sob iluminação de 45 graus (ângulo zenital) e num pequeno intervalo espectral centrado em 435nm.

### 1.13 Medida do Fator de Reflectância

A medida do fator de reflectância deve ser realizada em campo sempre que se pretende preservar as propriedades das amostras, bem como as condições de iluminação natural à que estão submetidos quando imageados pelos sensores remotos; entretanto, é bom lembrar que a radiometria de campo é trabalhosa e exige condições atmosféricas adequadas. Para preservar a configuração do fator de reflectância bidirecional é conveniente realizar medições com a presença de no máximo 20% de cobertura de nuvens no horizonte. Adicionalmente deve se considerar que espectro solar, apesar de sua elevada potência, apresenta descontinuidades provocadas pela absorção atmosférica o que dificulta a obtenção de espectros contínuos na região do infravermelho.

A eficiência da medição radiométrica em campo depende de um bom planejamento. Nesta fase deve se definir as características radiométricas das medidas, como a banda, a resolução espectral e as dimensões das amostras (área amostral); isto permite selecionar o tipo de radiômetro, e a estrutura de elevação necessária. Para medidas amostras localizadas e de pequeno tamanho, um tripé simples é suficiente. No caso de

de

uma área de amostragem não muito extensa e amostras de até um metro quadrado, como acontece nas medidas solos e culturas, pode se utilizar estruturas como o mastro de elevação da Figura 8.

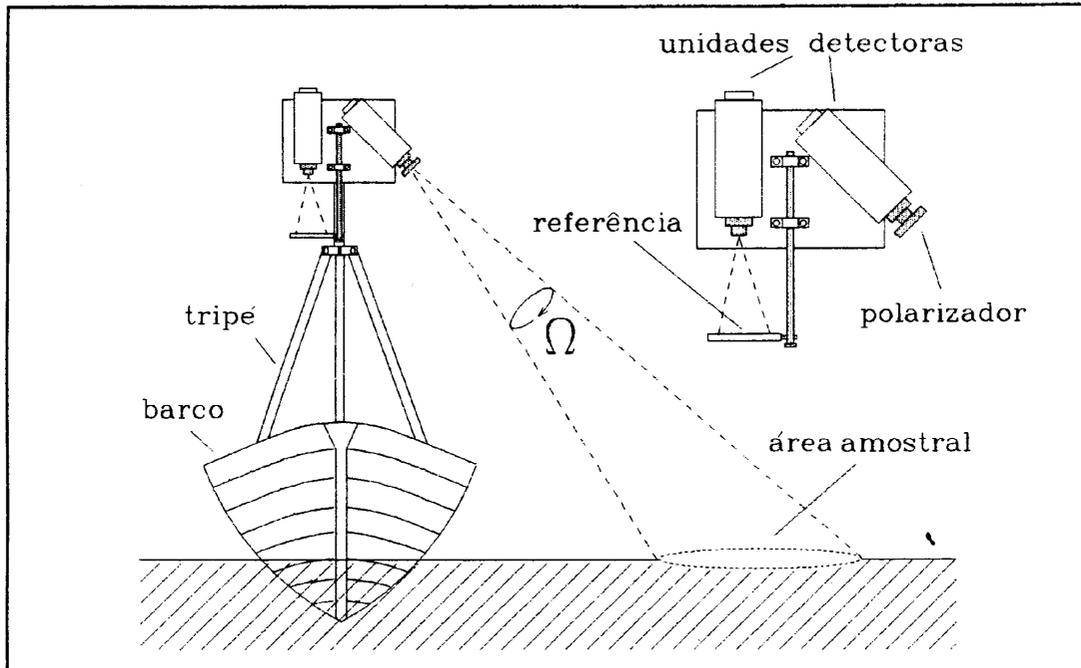


Figura 8. O Sistema Radiométrico Embarcado.

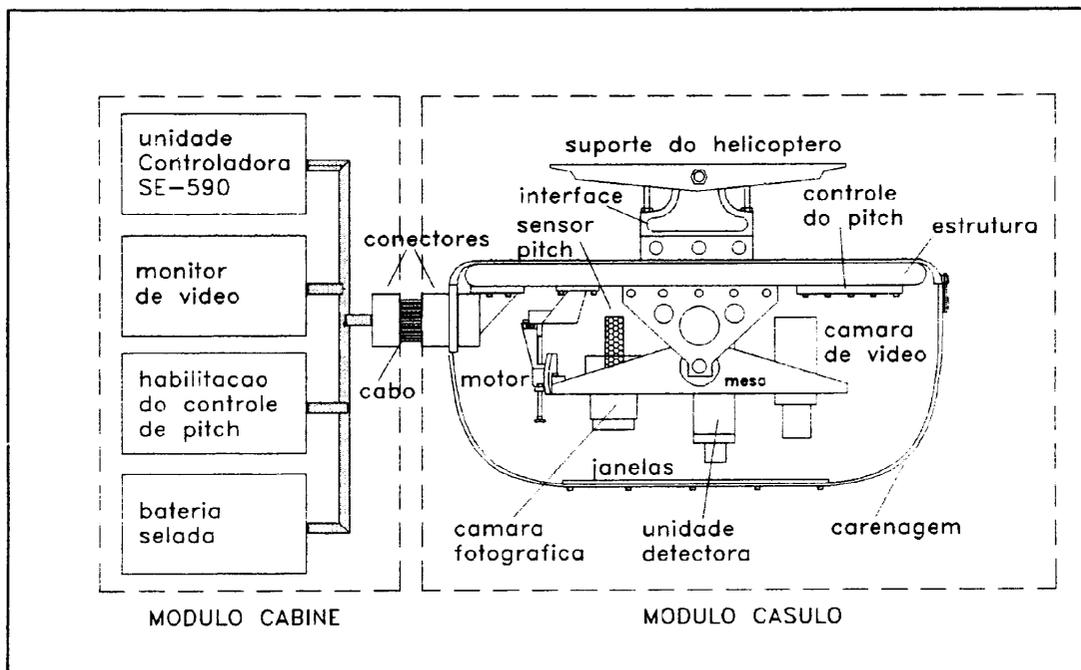


Figura 9. O Sistema Radiométrico Aerotransportado.

No caso de medidas radiométricas de corpos d'água pode se empregar uma montagem como a da Figura 8, onde o sistema tem uma configuração adequada para minimizar os efeitos da radiação solar refletida na superfície (Steffen et al, 1993).

Quando a área de amostragem é muito extensa e as amostras devem ter dimensões compatíveis com elemento de resolução dos satélites (30x30m no caso do Landsat TM) é muito eficiente a utilização de um sistema ~~sistema~~ aerotransportado como o SADA (Figura 9) projetado para ser adaptado em helicópteros e permite o rápido deslocamento pela área de amostragem (Steffen et al, 1992).

No laboratório, a iluminação é geralmente fornecida por uma lâmpada halógena, cujo espectro é contínuo embora de menor potência, instalada em um refletor capaz de concentrar o fluxo sobre a amostra.

Existem situações em que se pretende caracterizar o comportamento espectral das amostras (p.ex.: solos, minerais, rochas) através do controle de algumas de suas propriedades, neste caso, a medida de laboratório é uma solução mais conveniente.

#### 1.14 Processamento de Dados Espectrais

A quantidade de dados espectrais obtidos nas medições de campo ou laboratório costumam ser muito grandes e, felizmente, o seu formato digital permite processá-los com o auxílio de computadores. Neste caso é conveniente a utilização de algum tipo de programa que permita realizar a redução, isto é, a calibração, filtragem e transformação dos dados para um formato adequado aos programas que serão empregados no seu processamento posterior. O fluxograma de um programa de redução de dados radiométricos, desenvolvido no Laboratório de Radiometria do INPE, pode ser visto na Figura 10 (Steffen et al, 1996).

#### 1.15 Equipamentos Radiométricos

A definição de um sistema para a medição espectrorradiométrica de campo, deve considerar prioritariamente as características dos espectros que se pretende obter, principalmente a resolução, a banda espectral, as dimensões da área amostral necessária e a acessibilidade das áreas de amostragem. Para o trabalho de campo, é desejável a utilização de equipamentos radiométricos com as seguintes características:

1. peso e volume reduzidos.
2. suprimento de energia próprio (bateria recarregável).
3. sistema digital para o armazenamento de dados.
4. tempo de aquisição curto e repetitivo (multiamostragem).
5. transferência dos dados para computador..

Atualmente, existem vários sistemas de medição espectral disponíveis comercialmente que satisfazem, pelo menos parcialmente, esses requisitos:

##### **SPECTRON SE-590**

modelo: SE-590

campo de visada: 1, 6, 15 e 180°

resolução espectral: 10 nm (FWHP)

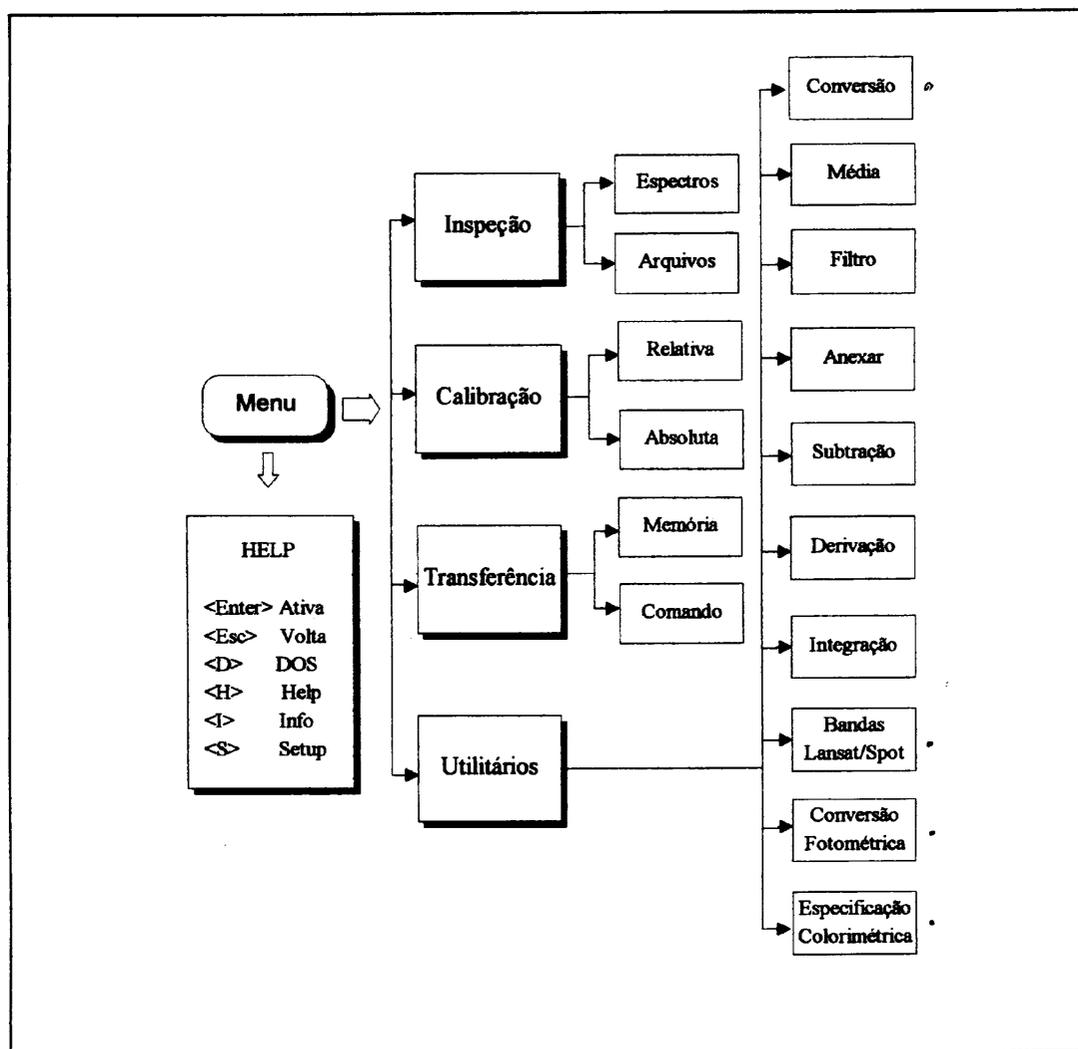


Figura 10. O Programa Espectro.

faixa espectral: 350 até 1100 nm  
 tempo de aquisição: 1/60 até 64/60s  
 unid. controladora: microproc. programável  
 dados/registo: digitais (12bit)/fita cassette  
 energia: bateria recarregável (12 VDC)  
 fabricante: Spectron Eng., Inc. - USA.

### GER IRIS MK-V

modelo: MK-V Dual FOV & Single FOV  
 campo de visada: 14x4°  
 faixa espectral: 300nm até 3000nm  
 resolução espectral: 2nm (300-1000nm) e 4nm (1000-3000nm)

tempo de aquisição: 10seg até 4min  
unid. controladora: micro laptop dedicado  
dados/registo.: digitais/disquete 3,5 pol  
energia: bateria recarregável (12 e 6 VDC)  
fabricante: G.E.R., Corp. - USA

### **GER 2100**

modelo: Ger 2100  
campo de visada: 3° x5°  
banda espectral: 400nm até 2500nm  
resolução espectral: 10nm (400-1000nm) e e 24nm (1000-2500nm)  
tempo de aquisição: 50ms (min)  
unid. controladora: micro laptop dedicado  
dados/registo.: digital  
energia: bateria recarregável (12 e 6 VDC)  
fabricante: G.E.R., Corp. - USA

### **PERSONAL SPECTROMETER**

modelo: PS II  
campo de visada: 1, 5, 10 e 15°  
resolução espectral: 3nm (FWHP)  
faixa espectral: 350 até 1050 nm  
tempo de aquisição: 40ms até 5seg  
unidade controladora: micro portátil  
dados/registo: digitais/ramcard (1Mb)  
energia: bateria recarregável  
fabricante: Analytical Spec. Dev. Inc. - USA

### **Referências Bibliográficas**

- Milton, E.J., 1987. Principles of Field Spectroscopy. Int. Journal of Remote Sensing. Vol.8, n.12, 1807-1827.
- Steffen, C.A.; F.F. Gama; E.M.L.M. Novo, 1992. Avaliação Operacional do Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado - SADA. O Experimento Barra Bonita. INPE-5451-NTC/305.
- Steffen, C.A.; M.P.F. Costa; F.F. Gama, 1993. Spectral Reflectance of the Tucuruí Reservoir Waters - Brazilian Amazon. In: Anais do International Symposium on Optical Engineering and Photonics. Orlando, FL. Abril de 1993.
- Steffen, C.A.; J.L. Oliveira; F.F. Gama, 1996. O Programa Espectro - Manual de Referência. INPE 5737 - MAN/07. 12P.

# RADIOMETRIA ÓPTICA ESPECTRAL

## CAPÍTULO 2

### COMPORTAMENTO ESPECTRAL

*Elisabete Caria Moraes*

#### 2.1 Introdução

Nos últimos anos as atenções de pesquisadores de todo o mundo tem-se voltado para o monitoramento global da geosfera e biosfera, tanto que estabeleceu-se o programa EOS (Earth Observing System), visando o lançamento de 196 novos tipos de sensores de grande resolução espectral e espacial com esse propósito. Com o advento desse programa o conhecimento do comportamento espectral dos objetos terrestres, bem como dos fatores que o influenciam é de relevante importância para a interpretação das imagens de satélite, uma vez que exige do usuário uma seleção criteriosa das bandas de interesse no momento da aquisição.

Uma boa compreensão do comportamento espectral de objetos terrestres é primordial para a definição de novos sensores orbitais e para tanto, os estudos desenvolvidos em nível de campo e laboratório são essenciais, pois pode-se definir as condições de iluminação e observação (Bowker et al., 1985). Para que a análise espectral dos objetos seja completa faz-se necessário o conhecimento das condições experimentais como: características dos sensores, tipo de processamento, geometria de aquisição de dados, fatores ambientais e estado do objeto.

Neste trabalho serão discutidos de uma maneira geral o comportamento espectral dos principais objetos naturais que compõem a superfície terrestre, como vegetação, solo, minerais e rochas e corpos de água.

#### 2.2 Comportamento Espectral da Vegetação

No estudo da interação da radiação eletromagnética com a vegetação as propriedades espectrais desta são a reflectância, transmitância e absorvância, sendo que do ponto de vista do sensoriamento remoto a reflectância é a mais relevante. Portanto, o termo "comportamento espectral da vegetação" é frequentemente relacionado com as características de reflexão da radiação eletromagnética por parte de folhas, plantas individuais e conjunto de plantas.

Ainda deve ser ressaltado outro aspecto relacionado ao termo "vegetação". Sob o ponto de vista fitogeográfico, "vegetação" refere-se ao conjunto de plantas (de um mesmo grupo fisionômico ou não) que ocupa uma determinada área geográfica. Associado ao termo "comportamento espectral", o termo "vegetação" tem sido usado para representar as propriedades espectrais de partes de uma planta, assim como folhas, galhos, etc; uma planta e até conjuntos de plantas (Ponzoni e Disperati, 1995).

Experimentos têm sido conduzidos em todo o mundo voltados para a caracterização do comportamento espectral de partes de plantas, plantas e conjuntos de plantas, visando o atendimento de necessidades específicas que se estendem desde um simples trabalho acadêmico até a aquisição de dados compatíveis a modelos matemáticos destinados a previsão de fenômenos e/ou a estimativa de parâmetros biofísicos.

As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores óticos (Colwell, 1974), sendo que as propriedades espectrais de uma única folha são função de sua composição química, morfologia e estrutura interna.

Uma folha típica é constituída de três tecidos básicos que são: epiderme, mesófilo fotossintético e tecido vascular. A folha é então coberta por uma camada de células protetoras epidérmicas, na qual muitas vezes desenvolve uma fina e relativamente impermeável superfície externa. Abaixo da epiderme encontra-se o mesófilo fotossintético, o qual por sua vez, freqüentemente é subdividido numa camada ou em camadas de células paliçádicas alongadas, arranjadas perpendicularmente à superfície da folha, que formam o parênquima. As células do parênquima são ocupadas por seiva e protoplasma (Cardoso e Ponzoni, 1996 e Ponzoni e Inoue, 1990).

Esparsos através do mesófilo estão os espaços intercelulares cheios de ar, os quais se abrem para fora através dos estômatos. Esta rede de passagens de ar constitui a via de acesso pela qual o  $\text{CO}_2$  alcança as células fotossintéticas e o  $\text{O}_2$  liberado na fotossíntese retorna à atmosfera externa. Uma terceira característica estrutural da folha é o tecido vascular. A rede de tecidos do sistema vascular não serve somente para suprir a folha com água e nutrientes do solo, mas também constitui a passagem pela qual fluem os produtos da fotossíntese que são produzidos na folha para as demais partes da planta. As estruturas das células que compõem os três tecidos das folhas são muito variáveis, dependendo da espécie e das condições ambientais.

Os constituintes da folha que são considerados os mais importantes sob ponto de vista da interação com a radiação são: celulose (encontrada nas paredes celulares), solutos (íons, moléculas), espaços intercelulares e pigmentos existentes dentro dos cloroplastos.

O comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna. Desde que as características da folha são geneticamente controladas, existirão portanto diferenças no comportamento espectral entre grupos geneticamente distintos. A Figura 1 mostra as possíveis trajetórias da radiação incidente numa folha.

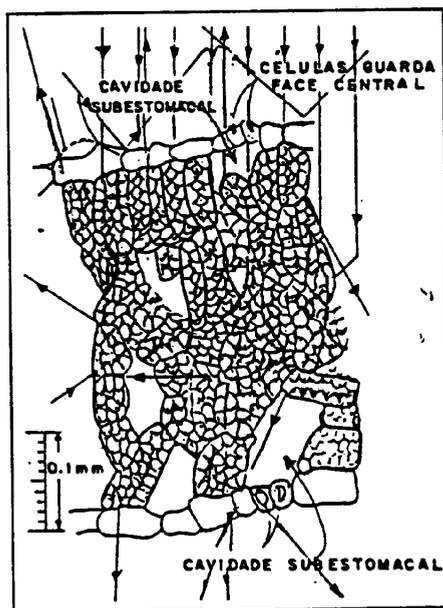


Fig. 1 - Trajetória da radiação em uma folha.  
Fonte: Gates(1971).

Uma pequena quantidade de radiação é refletida das células da camada superficial; a maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos se os ângulos de incidência forem suficientemente grandes. Esta reflexão múltipla é essencialmente um processo aleatório no qual os componentes do fluxo mudam de direção dentro da folha. Dado o grande número de paredes celulares na folha, alguns componentes são refletidos de volta para o hemisfério de incidência, enquanto outros são transmitidos através da folha. A espessura da folha é um fator importante na trajetória da radiação, já que geralmente a transmitância é maior do que a reflectância para folhas finas, mas o inverso acontece com folhas grossas.

A assinatura espectral característica de uma folha verde está mostrada na Figura 2. Os comprimentos de onda relativos ao ultravioleta não foram considerados devido à pequena incidência deste tipo de radiação. Na Figura 2 nota-se que a região compreendida entre 0,4 a 2,6  $\mu\text{m}$  pode ser dividida em três partes: a) região do visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ); b) região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ); c) região do infravermelho médio (1,3 a 2,6  $\mu\text{m}$ ).

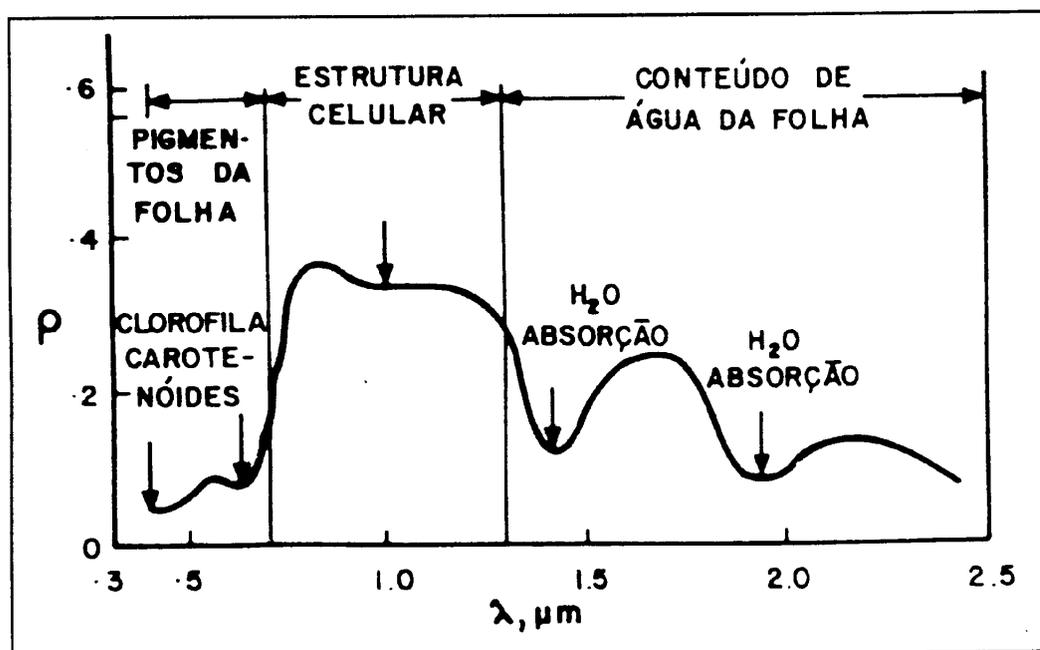


Fig. 2 - Assinatura espectral típica de uma folha verde.

Fonte: Novo(1992).

Na região do visível os pigmentos existentes nas folhas dominam a assinatura espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos apresentados nas folhas podem variar grandemente de espécie para espécie.

A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese.

Na região do infravermelho próximo existe uma absorção pequena da radiação e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nes-

sa região. A assinatura espectral é quase constante nessa região. Gates(1971) menciona que a assinatura espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos a folha, como disponibilidade de água por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região.

Na região do infravermelho médio a absorção devido a água líquida predomina na assinatura espectral das folhas. Considerando a água líquida, esta apresenta, na região em torno de 2,0  $\mu\text{m}$ , uma reflectância geralmente pequena, sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de 65° e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20°, dada a forte absorção da água. A água absorve na região de 1,3 a 2,0  $\mu\text{m}$ . As faixas ou bandas de absorção da água são: 1,1; 1,45; 1,95; 2,7 e 6,3  $\mu\text{m}$ . A influência do conteúdo de umidade na reflectância de um grupo de folhas de milho está mostrado na Figura 3.

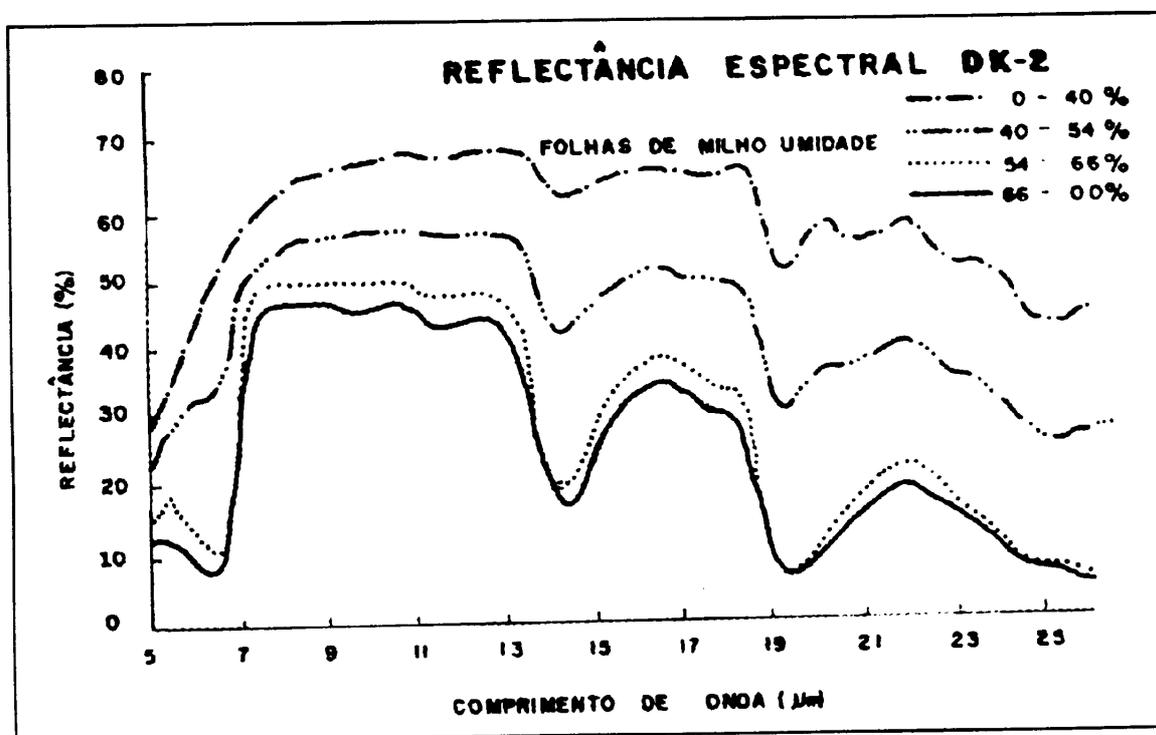


Fig. 3 - Influência do conteúdo de umidade na reflectância de folhas de milho.

Fonte: Kumar(1972).

Pode-se verificar que um pequeno decréscimo na reflectância é visto na primeira faixa de absorção da água para amostras de folhas de 0 a 40% de conteúdo de umidade. A primeira faixa de absorção da água torna-se bastante evidente para amostras contendo 40 a 54% de umidade, e a forma geral da curva na região de 1,3 a 2,6  $\mu\text{m}$  é assumida para folhas suculentas. As assinaturas espectrais referentes a 54 a 66% e 66 a 100% de umidade são geralmente similares. Na região onde a umidade não exerce influência, existe uma consistente diferença de 3 a 4% na reflectância. Examinando uma seção transversal de uma folha poderá ser constatado que essa diferença não se deve a absorção da água, mas sim as alterações estruturais que ocorrem na folha quando esta perde umidade.

Segundo a teoria de Willstatter e Stoll a transmitância das folhas, na região do visível, aumenta com a infiltração de água. Provavelmente isto ocorre devido ao preenchimento dos espaços intercelulares pela água, diminuindo as interfaces de reflexão o que

alteraria a probabilidade de desvios. Birth(1971), apud Kumar(1972), comentam que se os espaços intercelulares fossem totalmente preenchidos com água, a folha deveria ser essencialmente transparente, contudo isso não se verifica e na prática devem existir outras interfaces, além da água e ar, dentro de uma folha.

Na região do visível tem-se verificado que a reflectância de uma folha decresce com a idade (apud Kumar, 1972). Este fato pode ser atribuído ao desenvolvimento da clorofila, que aumenta em quantidade rapidamente nos estágios iniciais do desenvolvimento da folha, aumentando mais lentamente nos estágios subseqüentes, até que a coloração verde característica da espécie seja atingida.

Em geral, as pesquisas reforçam a Teoria de Willstatter e Stoll. A reflectância na região do infravermelho próximo para as folhas mais velhas, após os 12 dias, aumenta porque também aumenta o número de espaços intercelulares no mesófilo e a porcentagem de água nas folhas também aumenta com a idade.

Os efeitos de estresses causados pelo ataque de insetos, doenças, problemas fisiológicos e condições ambientais adversas também alteram a assinatura espectral de folhas. Infelizmente tais efeitos têm sido pouco estudados, apesar de constituir matéria promissora e de grande utilidade para o avanço científico.

A assinatura espectral de folhas infestadas por fungos e folhas sadias foram estudadas por Colwell(1956), apud Kumar(1972), onde verificaram que a reflectância nas folhas doentes era maior do que a das sadias na região do visível, o que provavelmente pode ser explicado pela perda da clorofila. Contudo ela foi menor na região do infravermelho (acima de  $1,08 \mu\text{m}$ ), o que pode ser atribuído pela invasão das hifas nos espaços intercelulares.

Quando a radiação solar incide sobre a vegetação ela é espalhada e refletida, e sua direção e composição espectral são alteradas de uma forma bastante complexa. Para o sensoriamento remoto da vegetação, parte dessa radiação alterada e refletida é interceptada e medida por sensores colocados a bordo de aeronaves e/ou satélites, sendo que o sucesso desse sensoriamento depende da habilidade de se relacionarem as medidas de reflectância com as propriedades da vegetação. Isso somente é conseguido quando a natureza dessas alterações causadas pelos parâmetros da vegetação e do ambiente é perfeitamente compreendida.

O fluxo radiante solar incidente sobre a vegetação é constituído de duas partes : a fração de energia que não é absorvida ou espalhada pela atmosfera (também denominada fluxo direto) e pela fração que é espalhada (fluxo difuso). A intensidade desta depende das condições atmosféricas (especialmente poeira e vapor d'água) e varia com o comprimento de onda. A direção do fluxo direto é caracterizada pelo ângulo zenital solar  $\theta_s$  (ângulo formado entre o raio luminoso e a normal local), enquanto que o fluxo difuso é caracterizado pela sua distribuição angular (Goel, 1988).

A vegetação é constituída por diversos elementos, tais como folhas, galhos, frutos, flores, etc. O fluxo da radiação incidente num destes elementos está sujeito a dois processos físicos: espalhamento e absorção. A razão entre o fluxo espalhado e o fluxo total incidente é chamado de "albedo" do elemento. O processo de espalhamento em si pode ainda ser dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão. A título de exemplo, considerar-se-á uma folha como um destes elementos. O destino da radiação total incidente sobre uma folha depende de suas características (comprimento de onda, ângulo de incidência e da polarização) e das características da própria folha (propriedades da superfície, estrutura celular, composição, etc). Tucker e Garratt (1977) propuseram um modelo para quantificar esta dependência.

Medidas das propriedades espectrais de folhas estão disponíveis para uma ampla gama de comprimentos de onda (Gates et al., 1965; Gausman e Allen, 1973; Gausman, 1985; apud Goel, 1988).

Em geral, a descrição da radiação espalhada por uma folha depende das direções de incidência e reflexão. Poucas medidas têm sido feitas para permitir um perfeito entendimento dessa dependência. Breece e Holmes(1971) realizaram medições espectrais em folhas de milho e soja em ângulos de incidência de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Estas medições mostraram uma grande dependência da reflectância com o ângulo de incidência e com os comprimentos de onda.

A trajetória do fluxo solar incidente dentro do dossel em direção ao solo e o fluxo radiante em direção ao sensor (radiância), não dependem somente das propriedades de reflexão e de absorção dos elementos da vegetação, mas também de suas densidades e orientações. Um elemento da vegetação, por exemplo, uma folha presente no interior do dossel, recebe dois tipos de radiação: aquela que não é interceptada pelos demais elementos e a radiação interceptada e espalhada por esses elementos.

Goel(1988) se refere à distribuição espacial dos elementos da vegetação, bem como a suas densidades e orientações, como a arquitetura da vegetação. A distribuição espacial depende de como foram arranjadas as sementes no plantio (no caso de vegetação cultivada), do tipo de vegetação existente e do estágio de desenvolvimento das plantas. Em vários modelos de reflectância da vegetação um dossel é considerado como sendo composto por vários sub-dosséis, arranjados regularmente no solo (plantios em fileiras, por exemplo) ou arranjados aleatoriamente, segundo uma distribuição específica. Para um dossel ou sub-dossel homogêneo, assume-se que a densidade dos elementos da vegetação é uniforme, o que é caracterizado pelo índice de área foliar (IAF), que representa a razão entre a área do elemento e a área no terreno. O IAF é um dos principais parâmetros da vegetação e é requerido em modelos de crescimento vegetal e de evapotranspiração, além de estar relacionado à biomassa (Souza e Ponzoni, 1996).

Goel(1988) menciona que, em muitos modelos de reflectância da vegetação, a fração de distribuição angular foliar (DAF) é assumida como sendo azimutalmente simétrica e isso parece ser uma aproximação adequada para muitos tipos de vegetação, e esta varia consideravelmente entre os tipos de vegetação. Os dosséis são normalmente descritos por um dos seguintes seis tipos de distribuições: planófila, erectófila, plagiófila, extremófila, uniforme e esférica (Ponzoni, 1994 e Cardoso e Ponzoni, 1996).

Estes parâmetros arquitetônicos afetam qualitativamente a reflectância da vegetação. Na região do visível, uma vez que muito da energia incidente sobre uma folha é absorvido, com o aumento do número de folhas, isto é, com o aumento do IAF, mais e mais energia será absorvida pela vegetação. Assim que o IAF atingir um determinado valor (aproximadamente compreendido entre 2 e 3), muito da radiação incidente é interceptado e absorvido pelas folhas e um permanente aumento do IAF não influenciará a assinatura espectral da vegetação. Por conseguinte, a reflectância na região do visível decresce quase que exponencialmente com o aumento do IAF até atingir um valor próximo de 0, quando o IAF assume valores entre 2 e 3. Na região do infravermelho próximo, uma vez que a absorção é mínima, o aumento do IAF implica no aumento do espalhamento e no conseqüente aumento da reflectância da vegetação, até que o IAF atinja valores compreendidos entre 6 e 8.

Um efeito da DAF sobre a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB) foi apresentado por Norman et al. (1985) através de um exemplo muito simples de duas folhas planas dispostas num plano principal, como apresentado na Figura 4.

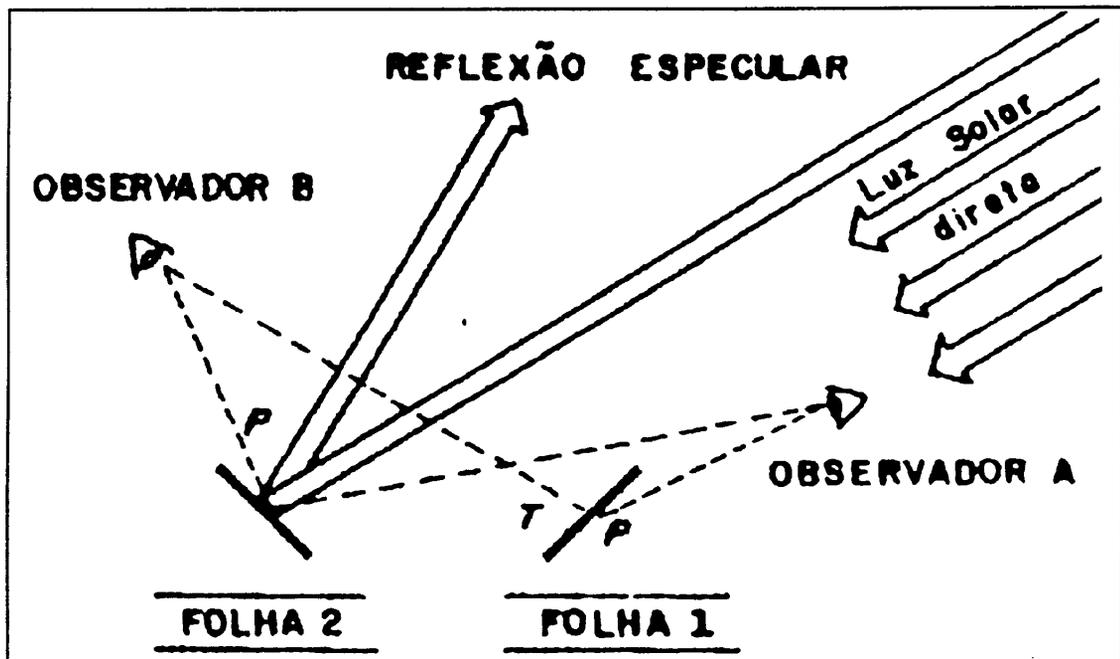


Fig. 4 - A geometria do dossel e sua influência sobre a observação da FDRB.  
Fonte: Norman et al.(1985).

A folha 2, que está posicionada perpendicularmente a iluminação solar, é dita “bem iluminada”, enquanto a folha 1, que se encontra posicionada quase que paralelamente aos raios luminosos, é dita “mal iluminada”. O observador A, que tem o Sol a suas costas, verá o brilho da cena sendo influenciado pelas reflectâncias da parte dorsal da folha 1 e da parte ventral da folha 2. O observador B verá melhor a folha “mal iluminada” (folha 1). Para ele a cena parecerá mais escura do que a vista pelo observador A. O brilho da cena, neste caso, é determinado pela transmitância da folha 1 e a reflectância da folha 2. A reflectância especular de ambas as folhas não é observada em nenhuma das posições assumidas pelos observadores A e B.

Quando a fonte de iluminação é posicionada exatamente atrás do observador (ou sensor), uma maior proporção de componentes da vegetação serão iluminados diretamente. Sombras dentro da vegetação ou sobre a superfície do solo serão escondidas pela folhagem (ou pelas partículas do solo) iluminada e a reflectância da vegetação tenderá a aumentar nesta situação. Este máximo na reflectância é conhecido como “hot spot” (Suits, 1972). O dossel é composto por muitas folhas com uma ampla gama de inclinações e ângulos azimutais; por isso a magnitude do “hot spot” depende em geral da DAF. Desde que o sombreamento de uma folha causado por outra é dependente de seu tamanho, o efeito “hot spot” é também dependente desse tamanho (Goel, 1988).

Existe outro efeito da sobre a assinatura espectral da vegetação. A DAF influi na probabilidade de falhas através do dossel como uma função dos ângulos zenital solar e de visada, que determinam se os fluxos incidente e de reflectância serão ou não interceptados pela vegetação. Por essa afirmação, conclui-se que a FDRB é fortemente dependente da DAF, sendo inclusive possível sua utilização para inferir sobre esta.

Kimes (1984), apud Goel (1988), apresentaram uma excelente discussão sobre a relação entre a DAF e a FDRB. Dosséis compostos por folhas dispostas mais horizontal-

mente apresentam uma menor variabilidade na reflectância em função dos ângulos zenitais solar e de visada, e apresentam as mais altas reflectâncias para todas as distribuições. Para dosséis compostos por folhas dispostas eretamente, a reflectância decresce com o aumento do ângulo zenital solar na região do visível enquanto aumenta na região do infravermelho próximo.

### 2.3 Comportamento Espectral das Rochas e Minerais

Além das implicações importantes da compreensão do comportamento espectral de objetos terrestres mencionadas na introdução, o conhecimento do comportamento espectral de minerais e rochas em sensoriamento remoto têm grande importância, pois possibilita o estudo de outros planetas, investigando tanto a composição química de suas atmosferas, como de suas superfícies (Sunshine et al, 1993). Além disso, através do conhecimento da reflectância espectral e dos parâmetros descritores das bandas de absorção, é possível efetivar aplicações não convencionais de sensoriamento remoto como, por exemplo, a caracterização e correlação espectral de seqüências litológicas em bacias sedimentares (Long et al, 1990; Galvão e Vitorello, 1995).

As rochas são constituídas por minerais, sendo a sua assinatura espectral resultante dos espectros individuais de seus constituintes caracterizados por feições decorrentes de suas bandas de absorção. Portanto, a absorção principal fator que controla a assinatura espectral dos minerais.

O comportamento espectral de rochas apresenta semelhanças com o comportamento espectral de solos, fato que não surpreende por serem os solos provenientes de intempéries (mudanças nas condições físicas e ambientais) sofridas pelas rochas. A maior diferença existente entre rochas e solos situa-se na presença significativa de matéria orgânica nos solos, o qual ocasiona uma diminuição na reflectância, podendo até vir a mascarar as feições das principais bandas de absorção dos minerais. Outro fator de diferenciação importante é a presença de água líquida nos solos, cuja influência é notada pelo rebaixamento na reflectância em todo o espectro.

Na análise da assinatura espectral de rochas é necessário considerar a influência dos fatores microscópicos e macroscópicos.

As feições de absorção observadas nas assinaturas espectrais de rochas podem caracterizar os minerais que as compõem. As principais bandas de absorção dos minerais, observadas nas faixas do visível e infravermelho, devem-se as interações microscópicas que ocorrem a nível atômico e molecular. Os minerais são compostos por proporções de diversos elementos quimicamente unidos por diferentes tipos de ligações, o que define um sistema energético complexo.

A radiação ao incidir sobre a rocha provoca dois tipos de processos: eletrônicos (transições atômicas) e vibracionais (transições moleculares). A posição, forma e intensidade das bandas de absorção são controladas pela composição e estrutura dos materiais, além da disponibilidade do mineral absorvedor à interação com a radiação (Mustard e Pieters, 1987), sendo que a intensidade da banda de absorção indica a quantidade do material absorvedor, embora muitas vezes esta relação possa ser mascarada pela presença de opacos (Galvão, 1994).

Os elementos mais comuns nos minerais e rochas são oxigênio, silício e alumínio, junto com proporções variadas de ferro, magnésio, cálcio e potássio, além de pequenas quantidades de outros elementos. O oxigênio, silício e alumínio não possuem níveis de energia favoráveis às transições que possam gerar feições espectrais nas faixas do visível

e infravermelho próximo (até 1,2 $\mu$ m). Conseqüentemente, as assinaturas espectrais são dominadas pela estrutura cristalina e pelos efeitos de íons menos comum, como íons de ferro e de cobre, os quais indiretamente podem fornecer informações sobre a composição mineral.

Os processos eletrônicos, que requerem mais energia e cujos efeitos aparecem na faixa espectral do visível, podem ocorrer principalmente devido a efeitos de campo cristalino e transferência de carga. No efeito de campo cristalino, a radiação incidente excita os elétrons e estes transitam de um nível orbital de baixa energia para outro de maior energia e geralmente as feições espectrais originadas pelo campo cristalino são amplas e rasas. O processo de transferência de carga a energia absorvida faz com que ocorra uma migração de elétrons entre os íons vizinhos. O processo de transferência de carga produz bandas espectrais mais largas e com maiores amplitudes, ocorrendo usualmente entre os íons ferroso e férrico presentes em óxidos e hidróxidos de ferro (Hunt, 1980). As feições espectrais oriundas deste processo são muito mais intensas do que as de campo cristalino.

Os processos vibracionais consistem de pequenos deslocamentos de átomos em relação a posição de equilíbrio. Quando as vibrações alteram a distribuição de cargas do sistema ocorre uma banda de absorção. Estes processos são mais evidentes na faixa espectral do infravermelho próximo e médio (além de 1,2 $\mu$ m), sendo as feições resultantes muito mais intensas do que nos processos eletrônicos, embora este processo envolva uma quantidade menor do que a energia necessária aos processos eletrônicos (Hunt, 1977). Poucos grupos moleculares são capazes de originar feições vibracionais no infravermelho. A hidroxila, Al-OH, a água, os carbonatos e alguns sulfatos são os principais responsáveis por quase todas as feições espectrais dos materiais geológicos neste intervalo espectral.

As interações macroscópicas envolvem os efeitos de refração, difração e espalhamento. Para quantificar os efeitos das interações macroscópicas têm-se que conhecer as propriedades óticas e físicas do material. As propriedades óticas das rochas são avaliadas conforme o grau de transparência dos objetos, que podem ser classificados como: transparentes, opacos, e transopacos. As propriedades físicas são caracterizadas pelo tamanho, forma e rugosidade do material, sendo que a compactação dos materiais, geralmente tende a aumentar a sua reflectância no espectro visível, mas um comportamento contrário é observado na faixa do infravermelho (1 a 2 $\mu$ m) (Adams e Filice, 1967). Quando as partículas têm forma esféricas o aumento das reflexões internas e da trajetória do fluxo radiante entre elas atenuam a radiação refletida, o que resulta numa diminuição na reflectância (Vincent e Hunt, 1968). As macro e micro variações na rugosidade de uma superfície produzem modificações diferenciadas nas condições de iluminação de suas faces, alterando o padrão de áreas sombreadas e não sombreadas conforme o ângulo de incidência da iluminação.

As rochas são classificadas como ígneas, sedimentares e metamórficas. As características espectrais fundamentais dessas rochas serão sumariadas a seguir.

As rochas ígneas são rochas primárias formadas pelo magmas em superfície ou em profundidade. Conforme o conteúdo de SiO<sub>2</sub> as rochas ígneas são classificadas em ácidas, intermediárias, básicas e ultrabásicas. As rochas ácidas são constituídas de mais de 66% de SiO<sub>2</sub>, as intermediárias de 52 a 66% de SiO<sub>2</sub>, as básicas de 45 a 52% SiO<sub>2</sub> e as ultrabásicas com menos de 45%. As concentrações de alumínio e potássio também diminuem das rochas ácidas para as rochas ultrabásicas, enquanto as concentrações de ferro, cálcio e magnésio aumentam das rochas ácidas para as ultrabásicas. Em geral, as rochas ácidas tendem a apresentar maiores reflectâncias, ou seja, são mais claras do que as de-

mais e apresentam em seus espectros, bandas de absorção bem mais definidas. Entretanto, minerais opacos (p. ex. magnetita), mesmo presentes em pequenas quantidades nas rochas ígneas, podem ter um papel espectral muito importante, diminuindo substancialmente a sua reflectância no intervalo de 0,4 a 2,5 $\mu$ m e mascarando feições de absorção oriundas de outros constituintes minerais. A Figura 5 apresenta a assinatura espectral de diversos tipos de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, sendo que os espectros encontram-se deslocados no eixo vertical para permitir uma melhor representação gráfica.

As rochas sedimentares são derivadas de rochas pré-existentes, que sofreram os efeitos do intemperismo e erosão. As rochas arenosas tendem a apresentar uma maior reflectância do que as rochas argilosas, além de bandas de absorção mais bem definidas. Os principais constituintes responsáveis pela resposta espectral das rochas sedimentares são o ferro, carbono orgânico total e argilas. O carbono orgânico total produz um efeito de mascaramento espectral sob as demais bandas de outros elementos.

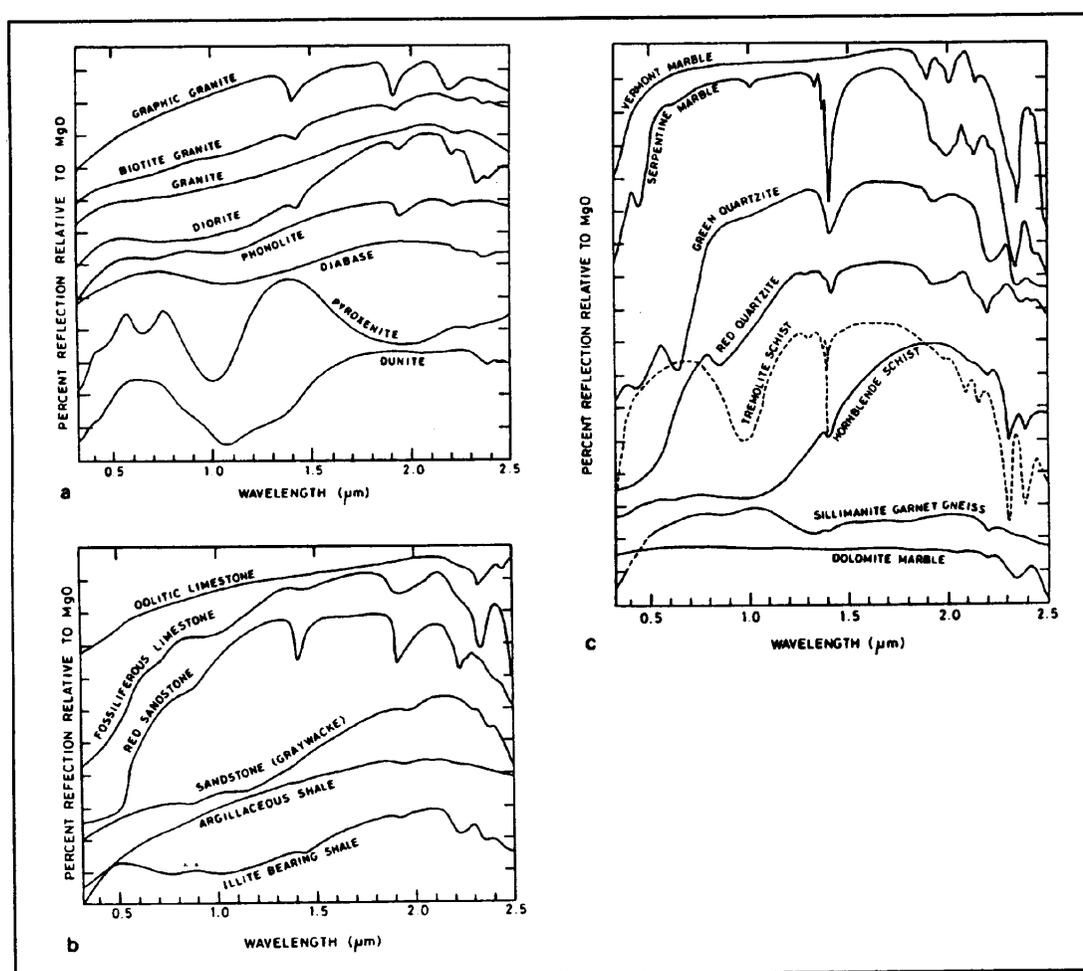


Fig. 5 - Assinatura espectral de diversas rochas: a) ígneas (granitos), b) sedimentares: calcário, arenito e argila xistosa e c) metamórficas: Mármore, quartzitos, xistos e gnaisses. Escala vertical de 10% para o fator de reflectância em relação a um determinado comprimento de onda  
Fonte: Salisburgy e Hunt (1974).

As rochas metamórficas são provenientes de transformação de rochas existentes. A assinatura espectral desse tipo de rocha depende da constituição da rocha original e das transformações mineralógicas sofridas. Na ausência de substâncias opacas, apresentam bandas de absorção bem definidas.

As regiões do espectro eletromagnético mais adequadas para caracterizar as propriedades físico-químicas de rochas foram sumariadas por Novo (1992) e encontram-se discriminadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização no espectro eletromagnético de propriedades de rochas.

Região do Espectro	Propriedade	Autor
2,74 $\mu$ m	Deteção de minerais com presença de hidroxilas na estrutura	
1,6 $\mu$ m	identificação de zonas de alteração hidrotermal rica em argilas	Podwysocki et al., 1983
2,17 $\mu$ m e 2,2 $\mu$ m	identificação de minerais de argila	Goetz e Rowan, 1981
0,8 a 1,0 $\mu$ m	identificação de ferro	

Fonte: Novo, 1992.

O sensoriamento remoto hiperespectral marca o início de uma nova fase de aquisição de dados, pois amostrará o espectro eletromagnético (0,4 a 2,5 $\mu$ m) em bandas estreitas, sendo a resolução espectral dos sensores semelhante a obtida em laboratório (Kruse et al., 1990). Como no intervalo espectral de 2,0 a 2,5 $\mu$ m a influência da vegetação é pequena e é uma região de extrema importância na deteção de minerais ricos em hidroxilas, carbonatos e sulfatos, este novo modo de sensoriamento remoto possibilitará a reconstituição de importantes bandas de absorção comumente presentes nos espectros de rochas e solos, possibilitando a discriminação e a identificação de seus constituintes, mesmo na presença de coberturas vegetais (Galvão, 1994).

Alguns trabalhos que analisam e sintetizam o comportamento espectral de minerais e rochas foram elaborados por: Salisbury e Hunt (1974), Hunt (1980), Gupta (1991), Vitarello (1995) e Cervelle e Flay (1995).

#### 2.4 Comportamento Espectral dos Solos

Na superfície terrestre muitos processos climatológicos e biológicos envolvem a absorção e reflexão da radiação solar pelos solos (Irons et al, 1989). O conhecimento do comportamento espectral dos solos é relevante em diversos estudos como o de culturas, possibilitando uma melhor avaliação do seu desenvolvimento e de sua produtividade (Epiphanyo et al., 1992); o de previsão de tempo e clima, sendo utilizado como parâmetro de entrada em modelos hidrológicos, micrometeorológicos e de radiação; e outros.

A origem básica dos solos são as rochas que cobrem a superfície terrestre, que sobre a ação das condições ambientais (clima e biosfera) ao longo do tempo são transformadas em solos.

As principais características espectrais observadas nas assinaturas espectrais dos solos são devidas a absorção. A absorção da radiação eletromagnética pode ser de origem eletrônica ou de origem molecular. No processo eletrônico a energia absorvida corresponde àquela necessária para a mudança de nível de energia de um elétron no interior do átomo. No processo vibracional a energia absorvida faz vibrar as moléculas, resultando bandas que aparecem devido as transições entre os níveis de energia de vibração. Os processos eletrônicos ocorrem principalmente na faixa do espectro visível e início do espectro infravermelho, enquanto os processos vibracionais ocorrem predominantemente no infravermelho.

Na análise do comportamento espectral de solos é essencial ponderar não apenas os fenômenos físicos que ocorrem durante as interações energia-matéria, mas também sua pedologia, pois seu comportamento espectral é resultado da combinação da influência de vários fatores presentes nos solos, fatores estes que se alteram de um solo para outro (Epiphanyo et al., 1992).

O solo é composto de substâncias em três fases: sólida (minerais e matéria orgânica), líquida (água) e gasosa (ar).

A mineralogia é o aspecto de maior importância no estudo do comportamento espectral de solos, principalmente em regiões de clima quente e solo intemperizado, como no Brasil. Os minerais são encontrados na forma cristalina e não cristalina. Os principais constituintes mineralógicos dos solos tropicais são a caulinita, a gibbsita, o quartzo, a goetita e a hematita. Apresentam-se em quantidades pequenas os óxidos titânio (anatásio e rutilo) e em grandes quantidades a magnetita e a ilmenita, quando os solos são provenientes de rochas básicas (Epiphanyo et al., 1992). Os minerais ainda são classificados em primários e secundários de acordo com o processo de intemperismo, mecânico ou químico, respectivamente. Os minerais primários ocorrem principalmente nas frações de areia (0,05mm) e silte (0,002 a 0,05mm), e os mais comuns são o quartzo, feldspatos e silicatos (laminares e ferromagnesianos). Os minerais secundários, que são provenientes de intemperismos químicos dos minerais primários, apresentam menor granulometria e encontram-se predominantemente na fração de argila (0,002 mm), sendo os mais frequentes os minerais de argila alumínio-silicatados, os óxidos e os hidróxidos de ferro e alumínio, os carbonatos, os sulfatos e os fosfatos (Buol et al., 1980).

A água e o ar encontram-se em concentrações variantes, sendo que a água pode ser evidenciada no espectro de reflectância sobre a forma de água livre (umidade no solo) e sobre a forma de água estrutural, que são moléculas de água encontradas em alguns cristais. O ar do solo é geralmente rico em gás carbônico e pobre em oxigênio (Medina, 1975).

A matéria orgânica é constituída de resíduos de planta e animais em decomposição, de substâncias derivadas dos produtos de decomposição por microorganismos e de pequenos animais que habitam o solo.

As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que definem o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são: a constituição mineral, a matéria orgânica, granulometria (textura e estrutura), e a umidade.

Na análise do comportamento espectral dos solos observa-se que há diversidade tanto na configuração da forma como na magnitude da assinatura espectral. Stoner e Baumgardner (1980), completaram o trabalho de Condit (1970), classificando as diversas assinaturas espectrais de solos e agrupando-as em cinco tipos básicos, conforme mostrado na Figura 6.

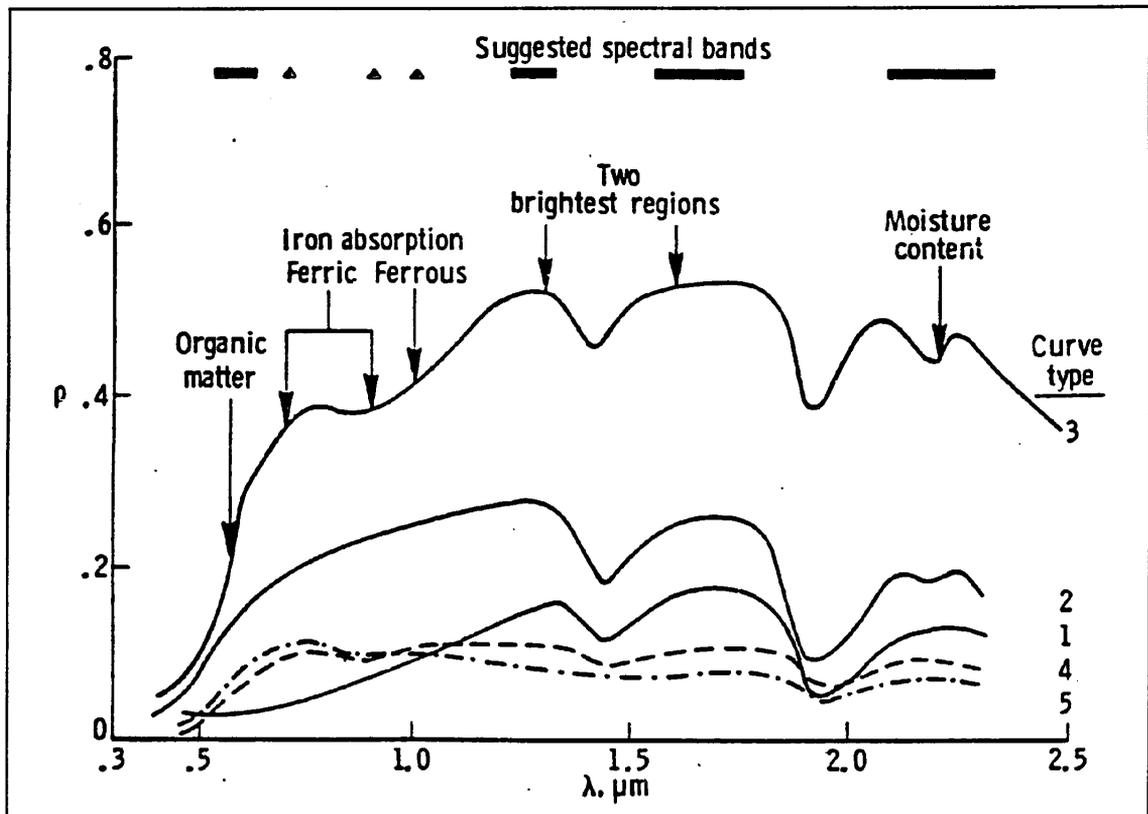


Fig. 6 - Assinatura espectral de 5 tipos característicos de solos. Tipos 1 a 3 proposta por Condit (1970) e tipos 4 e 5 por Stoner and Baumgardner (1980).  
Fonte: Bowker et al. (1985).

A assinatura espectral do tipo 1 é caracterizada pela leve concavidade na região que vai até 1000nm e por uma inclinação constante deste comprimento de onda até 1300nm, enquadram-se nesse tipo de comportamento espectral os solos Podzolizado e Cambissolo. A assinatura espectral do tipo 2 é caracterizado por uma feição nitidamente convexa desde o visível até 1300nm, sendo assinalada por uma sutil inclinação entre 600 e 700nm, sendo que esse comportamento espectral exemplificado através dos solos: Latossolo Amarelo e Areia Quartzosa. A assinatura espectral do tipo 3 apresenta acentuada inclinação ascendente com um leve decréscimo em 600nm, seguida por uma sutil inclinação quase nula de 620 a 740nm, ou mesmo negativa de 760 a 880nm, tendo uma inclinação crescente com o aumento do comprimento de onda, apresentam comportamento espectral típico o Latossolo Una e Latossolo Vermelho Amarelo. A assinatura espectral do tipo 4 apresenta características semelhantes a do tipo 3, porém com inclinação decrescente de 880 a 1000nm e a partir deste comprimento de onda a inclinação torna-se igual a zero e mesmo negativa até 1300nm, sendo que esse comportamento espectral pode ser encontrados no Latossolo Vermelho Escuro. A assinatura espectral do tipo 5, também é semelhante a do tipo 3, porém apresentando inclinação que cai a zero e torna-se negativa entre 750 e 1300nm, sendo que a reflectância em 1300nm é menor do que na região espectral do vermelho; enquadra-se neste tipo de comportamento o Latossolo Roxo e Latossolo Roxo Una. Outras características básicas desses cinco tipos de assinaturas espectrais são apresentadas por Novo (1992) na Tabela 2.

Tabela 2. Principais características das assinaturas espectrais de solo.

Assinatura espectral	Região do Espectro	Feição espectral	Característica do solo
1	0,32 - 1,0 $\mu$ m	baixa reflectância forma cônica	
2	0,30 - 0,60 $\mu$ m 0,60 - 0,70 $\mu$ m 0,70 - 0,75 $\mu$ m 0,32 - 0,75 $\mu$ m	gradiente decrescente gradiente acentuado gradiente decrescente forma convexa	solos drenados com pouca matéria orgânica
3	0,32 - 0,60 $\mu$ m 0,60 - 0,74 $\mu$ m 0,76 - 0,78 $\mu$ m 0,88 - 1,0 $\mu$ m	gradiente acentuado gradiente pequeno gradiente decrescente gradiente aumenta	solos com conteúdo de ferro razoavelmente elevado
4	0,32 - 2,3 $\mu$ m 0,88 - 1,3 $\mu$ m	baixa reflectância redução da reflectância	alto conteúdo de ferro e ma- téria orgânica
5	0,75 - 1,3 $\mu$ m	gradiente decrescente sem banda de absorção de água em 1,45 $\mu$ m	alto conteúdo de ferro e bai- xo conteúdo de matéria or- gânica

Outra maneira de se analisar comportamento espectral do solo e classificá-lo é relacionando suas feições aos seus constituintes, o qual pode ser sumariado na tabela 3.

Os solos aparecem mais escuros quanto mais úmidos estiverem, implicando numa diminuição da reflectância em todo espectro, sendo esta diminuição mais acentuada quanto menor for a concentração de matéria orgânica (Bowers e Hanks, 1965; Obukhov e Orlov, 1964). A diminuição na assinatura espectral do solo, devido ao aumento no conteúdo de umidade neste, varia de solo para solo. Peterson et al. (1979) verificaram que solos mais claros apresentam maior perda da reflectância por umedecimento. De maneira geral, o aumento de teor de umidade não causa alterações significativas na forma das curvas de solos de baixa reflectância, principalmente na região do visível e infravermelho próximo. Entretanto, os picos de absorção devido a outros constituintes ficam mais evidentes quando o solo apresenta uma percentagem menor de umidade (Epiphanyo et al. 1992).

O efeito causado pela matéria orgânica no solo pode ser relatada através de que à medida que o conteúdo de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo diminui, e quando este conteúdo excede a 2%, passa a mascarar as propriedades espectrais dos outros constituintes do solo. É possível discriminar melhor o nível de matéria orgânica no visível e no infravermelho próximo até 1,2 $\mu$ m.

Tabela 3- Componentes do solo e interações com a energia eletromagnética.

Fator		Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Feição
Material Orgânico		todo o espectro	achatamento
Água	Estrutural	1,45 e 1,95; 0,97; 1,2; 1,77	banda de absorção
	Livre	todo o espectro	achatamento
Óxido de Ferro	Íon Ferroso	1,0	banda de absorção
	Íon Férrico	0,7 e 0,87	
Minerais	Montmorilonita	1,4 e 1,9	absorção no IV próximo e médio
	Caulinita	1,4 e 2,2	
	Goetita	0,44 e 0,48	forte absorção
	Hematita	0,45 e 0,53	forte absorção
	Gibbsita	1,55 e 2,3	harmônicas e combinações perceptíveis no IV próximo
	Goetita e Hematita	0,5; 0,65; 0,88; 0,9 e 0,92	feições larga e côncava

Stoner e Baumgardner (1980) observaram que solos de textura arenosa aumentam reflectância à medida em que as proporções de areia fina e areia muito fina tornam-se maiores, e que este aumento é especificamente proeminente nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Para solos de textura média a fina a situação é oposta, pois há a formação de agregados estáveis em água, ocasionando a criação de uma superfície diferente daquela formada por grãos simples de solos arenosos.

Para materiais transparentes, quanto menor for o tamanho das partículas menor será sua reflectância. Para os solos, quanto menor for o tamanho das partículas menor tende a ser a reflectância deste, tendo como exemplo, os solos argilosos, que são constituídos de pequenas partículas. Os solos arenosos, que apresentam maiores partículas, tendem a

apresentar uma maior reflectância, pois também são mais pobres em matéria orgânica, óxidos de ferro e outros opacos, ou seja, constituintes que reduzem a reflectância dos solos.

Da análise dos cinco tipos de assinaturas espectrais dos solos, Novo (1992) sugeriu as principais faixas espectrais de interesse para o estudo de suas propriedades físico-químicas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Regiões espectrais próprias ao estudo de propriedades dos solos.

Regiões Espectrais	Propriedades
0,57 $\mu\text{m}$	monitoramento de matéria orgânica em solos sem cobertura vegetal
0,7 $\mu\text{m}$ e 0,9 $\mu\text{m}$	monitoramento de conteúdo de composto de ferro férrico
1,0 $\mu\text{m}$	monitoramento do conteúdo de composto de ferro ferros
2,2 $\mu\text{m}$	monitoramento de umidade do solo

Fonte: Novo (1992).

A Figura 7 ilustra alguns solos com ampla distribuição espacial no Brasil.

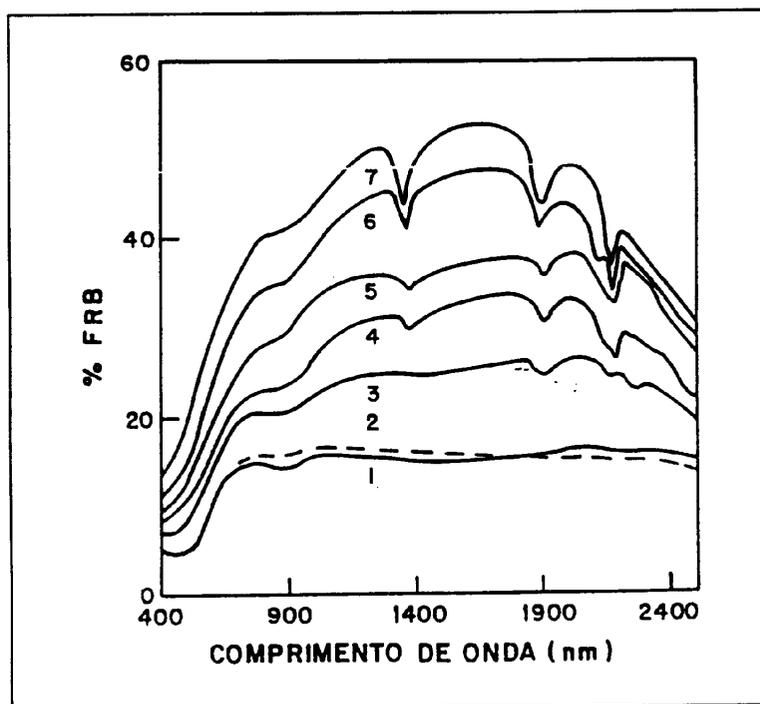


Fig.7 - Assinatura Espectral de amostra de solos brasileiros.  
Fonte Galvão (1994).

A assinaturas espectrais apresentadas na Figura 7 correspondem aos seguintes solos: (1) Latossolo Roxo, (2) Terra Roxa Estruturada, (3) Latossolo Vermelho-Amarelo, (4) Latossolo Vermelho-Escuro, (5) Podzólico Vermelho-Escuro, (6) Podzólico Vermelho-Amarelo e (7) Cambissolo. Em geral, pode-se dizer que solos de baixa reflectância (p. ex. Latossolo Roxo) tendem a ser mais ricos em matéria orgânica e óxidos de ferro que solos de maior reflectância (p. ex. Cambissolo). Além disso, solos de maior reflectância na faixa entre 400 a 2500nm também tendem a possuir bandas de absorção mais bem definidas, especialmente em 1400, 1900 e 2200nm, devido a presença de menores quantidades de materiais opacos. Como exemplo, magnetita é um mineral que mascara fortemente as feições de absorção de outros constituintes, reduzindo a reflectância dos solos.

## 2.5 Comportamento Espectral da Água

Através de imagens adquiridas por sensores remotos pode-se observar a água existente na natureza em seus três estados físicos, os quais apresentam comportamento espectral totalmente distinto. Na Figura 8 pode-se observar as assinaturas espectrais da água na forma de nuvens, neve e líquida (Bowker et al., 1985).

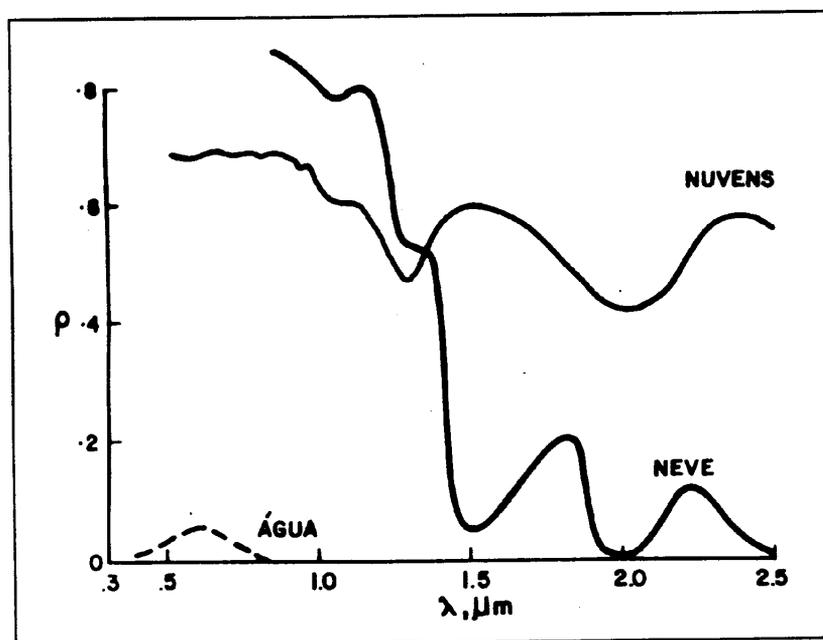


Fig. 8 - Assinatura espectral de água em três estados físicos.

Fonte: Bowker et al. (1985).

De modo geral a assinatura espectral da água líquida apresenta uma baixa reflectância, menor do que 10%, na faixa espectral compreendida entre 0,38 e 0,7 $\mu$ m e máxima absorção acima 0,7  $\mu$ m. As nuvens apresentam elevada reflectância, em torno de 70%, em todo o espectro óptico e com destacadas bandas de absorção em 1, 1,3 e 2  $\mu$ m. A assinatura espectral da neve apresenta maiores valores de reflectância do que as nuvens na faixa espectral de 0,4 a 1,2 $\mu$ m tendo um decaimento acentuado no intervalo entre 0,8 e 1,5  $\mu$ m quando a reflectância atinge valor inferior a 1%. Esses valores voltam a crescer, atingindo valores máximos ( $\rho \approx 20\%$ ) em aproximadamente 1,75 e 2,25  $\mu$ m e mínimo ( $\rho \approx 0$ ) em torno de 2  $\mu$ m.

A assinatura espectral de um corpo d'água resulta dos processos de absorção e espalhamento da radiação solar no seu interior, portanto a radiância detectada por um sensor pode fornecer informações sobre suas características físico-químicas e biológicas.

As propriedades das moléculas da água produzem um aumento da absorção espectral da radiação a medida que esta se afasta da região do azul, o que limita o estudo do comportamento espectral da água ao limites do espectro visível (Szekeida, 1988).

O Fitoplâncton, a matéria orgânica dissolvida e a matéria inorgânica particulada nos ecossistemas aquáticos apresentam estreita relação com a água, pois sua distribuição depende fundamentalmente da movimentação e densidade das massas de água (Mantovani, 1993). Estes elementos são responsáveis pela absorção e espalhamento da radiação eletromagnética e determinam as propriedades ópticas inerentes da água, alterando a disponibilidade e distribuição da radiação fotossinteticamente ativa na coluna de água, portanto influenciando a taxa de fotossíntese e produtividade do corpo de água.

Todos os objetos terrestre sofrem alterações continuamente, impondo modificações no comportamento espectral destes.

O fitoplâncton (produtor primário) é responsável pela produção de matéria orgânica através da utilização de nutrientes inorgânicos e energia solar. As partículas inorgânicas são principalmente formadas por silte e minerais de argila, e sendo as menores permanecem mais tempo em suspensão (Cabral et al., 1990). O material orgânico é utilizada pelos organismos consumidores e decompositores, sendo que estes últimos aceleram grandemente os processos de transformação de matéria orgânica em inorgânica. Através de excreções e secreções dos organismos aquáticos e durante os processos intermediários da decomposição é liberada a matéria orgânica dissolvida que conferem a água a cor amarelo-marrom.

A Figura 9 mostra a variação da reflectância espectral para concentrações diferentes de clorofila tipo *a* total num ambiente com todas as situações controladas. É observado um decréscimo da reflectância espectral com o aumento da concentração de clorofila e a presença da banda de absorção entre 660 e 680nm, tornando-se mais acentuada e deslocando-se mais para o infravermelho próximo com o aumento da concentração.

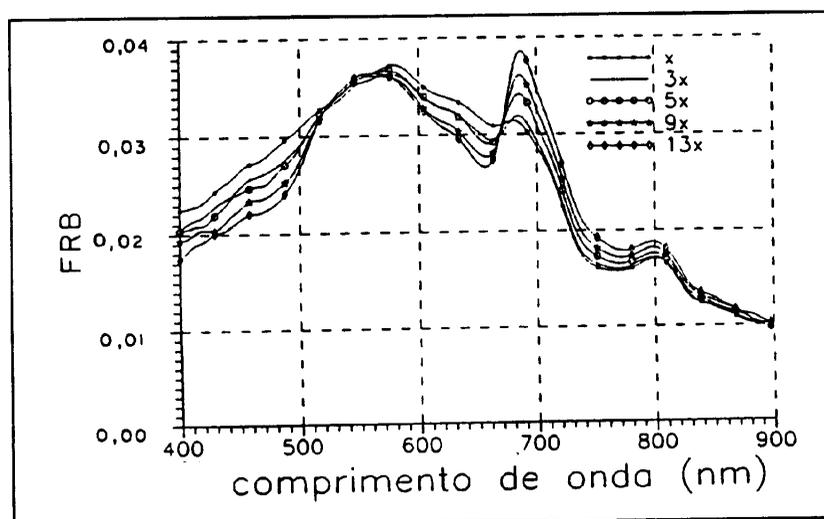


Fig. 9 - Assinaturas espectrais de diferentes concentrações de algas obtidas em experimento realizado em tanque de laboratório.

Fonte: Mantovani, 1993.

Na matéria orgânica encontram-se incluídas proteínas, aminoácidos, ácidos graxos, resinas e compostos conhecidos como compostos húmicos. Os compostos húmicos são classificados segundo sua solubilidade, denominando-se ácidos húmicos aqueles solúveis em meio básico e insolúveis em meio ácido, ácido fúlvicos aqueles solúveis nestes dois meios e humina aquele que é insolúvel (Esteves, 1988). A presença deste composto na água produz bandas de absorção fortes no ultravioleta, decrescendo quase exponencialmente até o verde e com valores muito baixos no vermelho (Carder et al., 1989).

A matéria orgânica pode interagir com o meio aquático das seguintes maneiras: com efeitos benéficos atuando como fonte de energia ou carbono orgânico para algas e bactérias ou maléficis exercendo efeitos tóxicos em larvas e algas e reduzindo a radiação eletromagnética no meio aquático, prejudicando os organismos que dela necessitam (Wetzel, 1975 e Witte et al., 1982).

A Figura 10 mostra grande semelhança entre as curvas de absorção de soluções de ácidos húmicos preparadas em laboratório e amostras filtradas de água de diferentes ecossistemas aquáticos.

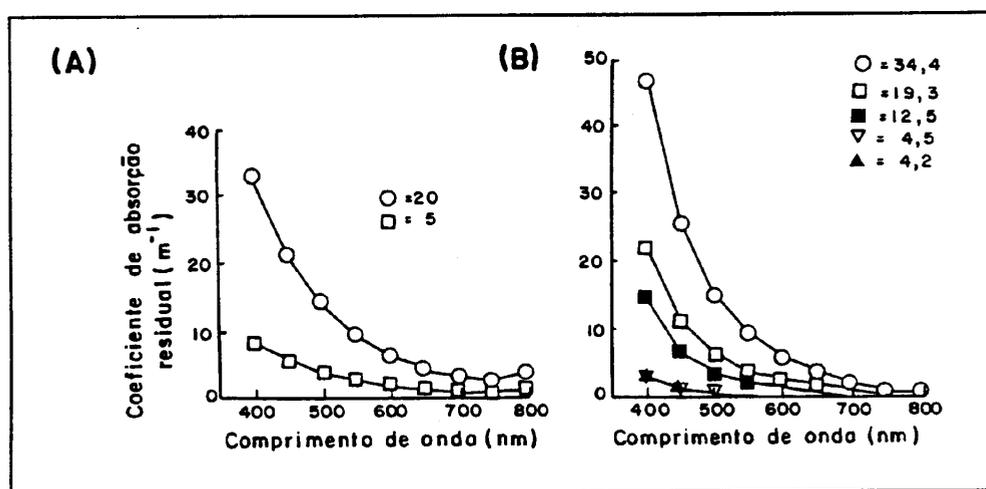


Fig.10 - Comparação entre curvas de absorção de ácidos húmicos (a) e amostras de material orgânico dissolvido (b). As concentrações indicadas são medidas em mg COD l<sup>-1</sup>.

Fonte: Witte et al., 1982.

O comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida na água pode ser observado através da Figura 11, onde se verifica que o aumento de concentração desta resulta na diminuição da reflectância em todo o espectro visível, acentuadamente no azul e no vermelho. A diferença na assinatura espectral entre as duas amostras ocorreu na faixa do verde, onde a amostra obtida pela decomposição não foi tão efetiva na redução da reflectância como a outra amostra (Mantovani, 1993).

Na faixa do espectro entre 400 e 500nm as concentrações de substâncias húmicas utilizadas promoveram uma diminuição de aproximadamente 40 a 50% da reflectância da água, enquanto que acima de 570nm a influência desta substância caíram drasticamente chegando a ser quase nula em torno de 670nm. Na faixa do visível o efeito de absorção é mais intenso que o de espalhamento e no infravermelho como a absorção é muito baixa o espalhamento se sobressai. Em torno de 670nm verifica-se que grandes variações na concentração das substâncias húmicas provocam pequenas alterações na reflectância.

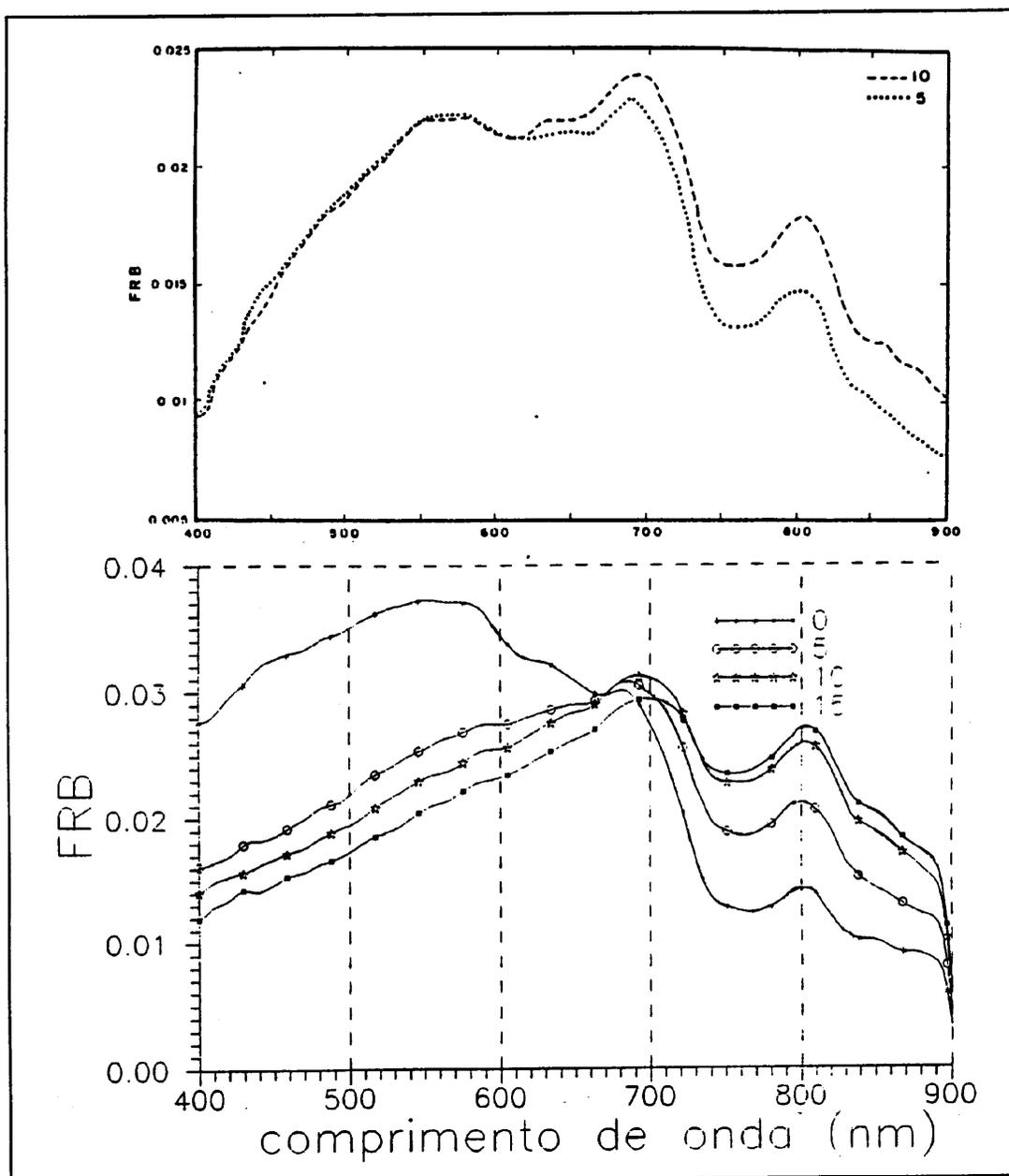


Fig. 11 - Fator de reflectância bidirecional de duas amostras de substância húmica total no tanque preto com diferentes valores de coeficientes de absorção ( $m^{-1}$ ).  
a) obtida via decomposição, b) extraída do Neorgan-51.

Fonte: Mantovani, 1993.

A origem do material particulado inorgânico em suspensão esta associada a minerais provenientes de rochas e solos que são carregados para os corpos d'água por ação do vento ou da chuva e à ressuspensão ou erosão do fundo que também contém detritos inorgânicos como de conchas carbonáticas de moluscos e carapaças silicosas de certas algas plantônicas. Segundo Sturm (1980) a distribuição granulométrica destes materiais é o parâmetro mais importante no espalhamento da radiação em águas naturais. Novo et al. (1989b) analisando dois tipos de material inorgânico com coloração e granulometria

diferentes observou uma maior reflectância do material claro e granulometria menor, e também que em suspensão na água, este promovia uma forte diminuição na amplitude dos espectros de reflectância das amostras, principalmente nas faixas do vermelho e infravermelho, conforme pode ser visto na Figura 12.

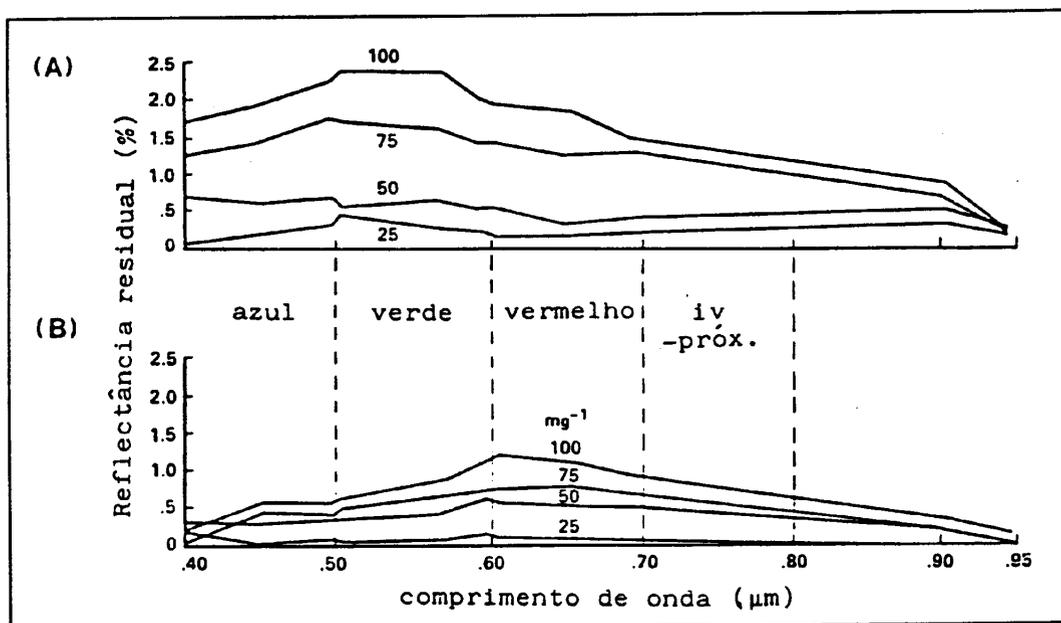


Fig. 12 -Reflectância espectral residual de suspensões de material inorgânico particulado. a) material branco, partículas entre 1 e 20 $\mu$ m de tamanho; b) material vermelho com partículas entre 7 e 37 $\mu$ m de tamanho. Fonte: Novo et al., 1989b.

Novo (1992) apresentou na Tabela 5 o efeito da variação da concentração de sedimentos na reflectância espectral na água. Nota-se que o aumento na concentração de sedimentos implica num aumento da reflectância de forma não linear e mais acentuado na direção do vermelho.

Tabela 5 - Efeito da concentração de sedimentos sobre a resposta espectral da água.

Comprimento de Onda	Reflectância Espectral	
	10mg/l de solido em suspensão	10mg/l de solido em suspensão
0,51 $\mu$ m	0,039	0,051
0,52 $\mu$ m	0,041	0,057
0,53 $\mu$ m	0,045	0,062
0,054 $\mu$ m	0,049	0,068

Fonte: Novo (1992).

Estudos têm demonstrado que existe uma relação quase direta entre a concentração de material particulado inorgânico e a reflectância espectral, entretanto essa relação não depende somente da concentração, mas também da resolução espectral do radiômetro utilizado e da composição mineralógica do material em suspensão (Bukata et al., 1988 e Curran et al, 1988).

Pesquisas voltadas para o comportamento espectral da água baseiam-se na aquisição simultânea de dados radiométricos e de amostras de água em campo e imagens de sensores remotos. O principal objetivo é desenvolver modelos que permitam estimar algumas propriedades da água a partir de medidas radiométricas obtidas por satélites de sensoriamento remoto.

A Figura 13 apresenta as assinaturas espectrais da água em tres pontos distintos do reservatório de Barra Bonita, formado pelos rios Piracicaba e Tietê no estado de São Paulo. A assinatura espectral do rio Tietê é típica de águas com elevada concentração de material inorgânico em suspensão com acentuada reflectância na faixa do vermelho. A assinatura espectral do rio Piracicaba mostra reflectância média baixa, típica de águas com maior transparência e um pico na faixa do verde, forte indicador da presença de material orgânico o que foi confirmado pelas análises realizadas nas amostras da água. A assinatura espectral no corpo central do reservatório, onde as águas dos dois rios já estão misturadas, mostra claramente a transição entre os dois espectros anteriores.

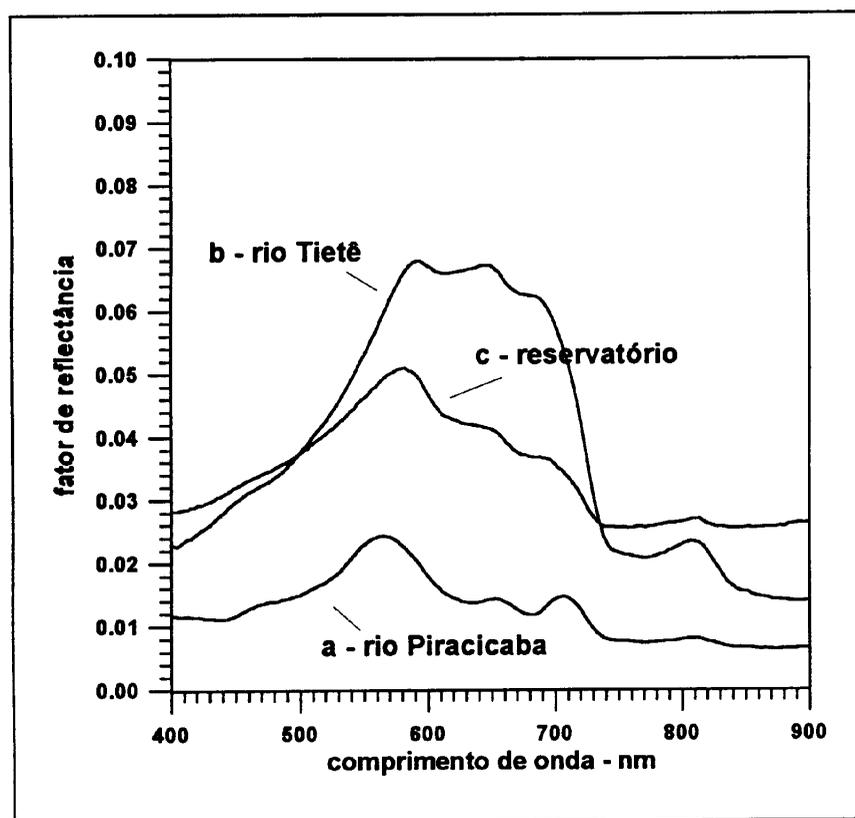


Fig. 13 - Assinaturas espectrais da água do braço do rio Piracicaba, reservatório da UHE Barra Bonita.

Fonte: Steffen et al., 1992.

## Agradecimentos

Aos pesquisadores do Inpe Dr. José Carlos Neve Epiphanyo por sua colaboração, ao Dr. Lênio Soares Galvão por sua prestimosa colaboração e revisão. Em especial ao Dr. Flavio Jorge Ponzoni pela disposição na elaboração do texto em sua área de especialidade, floresta.

## Referências Bibliográficas

- Adams, J. R., Filice, A. L., 1967. Spectral reflectance 0.4 a 2.0 microns of silicate rock powders. *Journal of Geophysical Research*, 72 (22): 5705-5715.
- Allen, W. A., 1968. Richardson A. J. Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58:1023 -1028.
- Bowker, D. E., Davis, R. E., Myrik, D. L., Stacy, K., Jones, W. J., 1985. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. National Aeronautics and Space Administration, *NASA Reference Publication 1139*, 184 p.
- Breece, III. H. T., Holmes, R. A., 1965. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves "in vivo". *Applied Optics*. 10(1):119-127, 1971.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Bruton, J. E., 1988. Particulate concentrations in lake St. Clair as recorded by a Shipborne Multispectral Optical Monitoring System. *Remote Sensing of Environment*, 25 (2): 201-229.
- Cabral, A. P., Mantovani, J. E., Costa, M. P. F., De Lima, R. F., Novo, E. M. L. N., 1990. Efeitos da concentração e da granulometria na assinatura espectral do material particulado inorgânico em suspensão. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 4., Manaus, Anais: São José dos Campos, INPE, v. 2, 496-504.
- Carder, K. L., Steward, R. G., Harvey, G. R., Ortner, P. B., 1989. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 34(1): 68-81.
- Cardoso, P. C. S., Ponzoni, F. J., 1996. Considerações sobre a caracterização espectral de folhas extraídas de cinco diferentes espécies. Submetido ao VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador, BA.
- Cervelle, B., Flay, N., 1995. Diffuse reflectance properties of mineral bearing surfaces, *Coloquio Internacional Propiedades Espectrales y Teledeteccion de los Suelos y Rocas del Visible al Infrarrojo medio*, SPECTÉL Argentina, La Serena 24-27 abril 1995, 1-26.
- Condit, H. R., 1970. The spectral reflectance of american soils. *Photogramm. Eng.*, vol. 36(8); 955-966.
- Curran, P. J., Novo, E. M. L., 1988. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. *Journal of Coastal Research*, 4(3): 351-368.
- Esau, K., *Plant anatomy*. 2.ed. New York. John Wiley, 480p.
- Esteves, F. A., 1988. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro, Interciência, FINEP, 575p.

- Galvão, L. S., 1994. Litoestratigrafia da reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros. *Tese de doutorado em Geofísica*, São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 179 p.
- Galvão, L. S., Vitorello, I., 1995. Quantitative approach in the spectral reflectance - lithostratigraphy of the Wind River and southern Bighorn basins, Wyoming. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(9):1617-1631.
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J.C., Weidner, V. R., 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1): 11-20.
- Gausman, H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Lubbock, Texas. Texas Tech. University. Graduate Studies, nº 29, 78 p.
- Gausman, H. W., Allen, W. A., Myers, V. I., Cardenas, R., 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L., *Agronomy Journal*, 61:374-376.
- Gausman, H. W., Allen, W. A., 1973. Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiol.*, 52, 57-62.
- Goel, N. S., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4: 1-21.
- Goetz, A. F. H., Rowan, L. C., 1981. Geologic Remote Sensing. *Science*, 211(4484): 781-791.
- Gupta, R. P., 1991. Remote sensing geology, New York, Springer-Verlag, cap. 3, 19-34
- Hunt, G. R., 1980. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegal, B.S. & Gillespie, A. R. *Remote sensing in geology*, New York, NY, John Wiley, cap. 2, 5-45.
- Hunt, G. R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
- Long, H. R., Bartholomeu, M. J., Grove, C. J., Paylov, E. D., 1990. Spectral reflectance characterization (0.4 to 2.5 and 8.0 to 12.0µm) of Phanerozoic strata, Wind River basin and southern Bighorn basin areas, Wyoming. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60(4):504-524.
- Knipling, E. B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1:155-159.
- Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S., Boardman, J. W., 1990. Mineral mapping of Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(1): 83-92.
- Kumar, R., 1974. Radiation from plants-reflection and emission: a review. Lafayette. Purdue Research Foundation. (Research Project n:5543), 88p.
- Mantovani, J. E., 1993. Comportamento espectral da água: faixas de maior sensibilidade do fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada. *Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto do INPE*, 98 p.
- Melamed, N. T., 1963. Optical properties of powders Part I. Optical absorption coefficients and the absolute value of the diffuse reflectance Part II. Properties of luminescent powders. *Journal of Applied Physics*, 34:560-570.

- Mustard, J. F., Pieters, C.M., 1987. Quantitative abundance estimates from bidirectional reflectance measurements. *Journal of Geophysical Research*, 92(B4): 617-626.
- Myers, V. I., Allen, W. A., 1968. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. *Applied Optics*, 7: 1819-1838.
- Norman, J. M., Welles, J. M., Walter, E. A., 1985. Contrasts among bidirectional reflectances of leaves, canopies and soils. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*. GE-23: 659-668.
- Novo, E. M. de M., 1992. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. São Paulo. Edgard Blucher. 308p.
- Novo, E. M. L., Hanson, J. D., Curran, P. L., 1989b. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 10(7): 1283-1289.
- Podwysoki, M. H., Segal, D.B., Abrams, M. J., 1983. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, Mining Area. *Economical Geology*, 78(4): 657-687.
- Ponzoni, F. J., Inoue, M.T., 1990. Reflectância espectral de folhas "ex-situ": uma abordagem metodológica. In: VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Manaus.
- Ponzoni, F. J. Dados TM/Landsat na identificação do ataque da Vespa-da-madeira em plantios de *Pinus* sp. Submetido ao VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador, BA.
- Ponzoni, F. J., 1994. Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de *Eucalyptus* sp. e de *Aspidosperma* sp. Curitiba, *Revista Floresta* 21(1 e 2): 45-70.
- Ponzoni, F. J., Disperati, A. A., 1995. Comportamento Espectral da vegetação. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 23 p.
- Salisbury, J. W., Hunt, G. R., 1974. Remote sensing of rock type in the visible and near infrared. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium of the Remote Sensing Environmental*, ERIM, V.III, 1953-1958.
- Silva, E. L. S., Ponzoni, F. J., 1996. Comparação entre a reflectância hemisférica de folhas e a reflectância bidirecional de um dossel. Submetido à revista *Árvore* (Sociedade de Investigações Florestais) (no prelo).
- Smith, J. A., 1983. Matter-Energy interaction in the optical region. In: *Manual of remote sensing*. Falls Church. ASP. p.61-113.
- Sousa, C. L., de, Ponzoni, F. J., 1996. Considerações sobre transformação de dados orbitais para estimativas do Índice de Área Foliar (IAF). Submetido ao VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador, BA.
- Steffen, C. A.; Gama, F. F.; Novo, E.M.L.M Teste operacional de aquisição de dados aerotransportados - SADA, o experimento de Barra Bonita. INPE, São José dos Campos, 1992 (INPE-5451- NCT/305).
- Stoner, E. R., Baumgardner, M. F., 1980. Physicochemical, site and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. West Lafayette, In, Purdue University, (*LARS Technical Report 111679*).

- Sturm, B., 1980. Optical properties of water-applications of remote sensing to water quality determination. In: FRAYSSE, G. ed. *Remote sensing applications in agriculture and hidrology*. Rotterdam, Balkema, 471-495.
- Suits, G. H., 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2: 117-125.
- Suits, H., 1983. The Nature of eletromagnetic radiation. In: *Manual of remote sensing*. Falls Church. ASP. p.37-60.
- Sunshine, J. M., Mustards, J. F., Pieters, C. M., 1993. Deconvolving overlapping absorption features to extract compositional information from reflectance spectra. In: *Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, 9., Pasadena, CA, Proceedings, Pasadena, CA, V. 1, 151-155.
- Swain, P. H., Davis, S. M., 1978. *Remote sensing: a quantitative approach*. Lafayette, McGraw-Hill. 1978.
- Szekeida, K. H., 1988. *Satellite monitoring of the Earth*. New York, John Wiley & Sons, 326 p.
- Tucker, C. J., Garratt, M. W., 1977. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Applied Optics*, 16, 635-642.
- Vincent, R. K., Hunt, G. R., 1968. Infrared reflectance from mat surfaces. *Applied Optics*, 7(1):53-58.
- Vitorello, I., 1995. Synthesis of spectral properties of rocks within the 400-2500nm range, *Coloquio Internacional Propiedades Espectrales y Teledeteccion de los Suelos y Rocas del Visible al Infrarrojo medio*, SPECTEL Argentina, La Serena 24-27 abril 1995, 163-194.
- Wetzel, G. R., 1975. *Limnology*. Philadelphia, W. B. Saunders, 743p.
- Witte, W. G., Whitlock, C. H., Harriss, R. C., Usry, J. W., Poole, L. R., Houghton, W. M., Morris, W. D., Gurganus, E. A., 1982. Influence of dissolved organic materials on turbid water optical properties and remote sensing reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1): 441-446.