

Fundamentos

1. INTRODUÇÃO

Desde 1969, o brasileiro coleta e analisa dados de Sensoriamento Remoto obtidos por sensores a bordo de aeronaves e/ou de plataformas orbitais, pesquisando, desenvolvendo e aplicando metodologias ao estudo dos recursos naturais do país. Quando o Brasil entrou na era espacial, já havia no mundo muita experiência acumulada a respeito dos ecossistemas temperados. Por essa razão, além de se iniciar em nova tecnologia, os pesquisadores brasileiros tiveram que calibrar as variáveis de nossos ambientes com relação aos produtos obtidos por sensores remotos. Esta tarefa se mostrou especialmente trabalhosa, em vista da biodiversidade e da diversidade de ambientes de um país tropical, com dimensões como as do Brasil. A cada passo adiante da tecnologia, novas calibrações tornam-se necessárias para se ter certeza de que as diferenças espectrais registradas pelos sensores remotos são devidas às propriedades dos alvos e não devidas a artefato de coleta ou de interpretação. Assim, registrou-se um longo período de coleta de dados primários nos diversos ecossistemas. Com a experiência acumulada nessas mais de três décadas, hoje é possível confiar nas várias informações obtidas por sensores remotos. Há, contudo, muito que se calibrar, seja porque o conhecimento ainda não se esgotou, seja porque os avanços tecnológicos não tendem a cessar.

O objetivo desse trabalho é reunir o conhecimento acumulado pela autora desde 1981, em um produto capaz de conduzir o leitor ao **uso correto e pleno** do sensoriamento remoto e do geoprocessamento para medir algumas variáveis ecológicas. Visando alcançar este objetivo, alguns fundamentos serão lembrados, algumas aplicações serão sugeridas, ao mesmo tempo em que se alertará sobre as incongruências que podem ser ditas através do seu uso inadequado. O uso correto e pleno do sensoriamento remoto passa pelo conhecimento de vários preceitos básicos. Passa também pelo conhecimento de suas limitações e de como superá-las. É importante lembrar que, ao longo do tempo, o modo como a energia interage com o alvo não mudou, mas a tecnologia para coletá-la e interpretá-la corretamente, sim. Como o obsoletismo dessas tecnologias é muito rápido, o enfoque maior será para aqueles itens que não mudam, tais como o comportamento espectral dos alvos, os efeitos atmosféricos e de condições ambientais, as leis físicas das interações alvo radiação e os processamentos mais aplicáveis a ecologia de ecossistemas terrestres e aquáticos.

1.1. O que é Ecologia?

Uma das mais antigas definições de que se tem registro data de 1870 (Ernst Haeckel), que disse ser a ecologia “o conjunto de conhecimentos voltados para a economia da natureza onde se investigam as relações do animal e seus

ambientes orgânicos e inorgânicos”. Ao longo do tempo, este termo sofreu várias interpretações: “a ciência da comunidade”, segundo Frederick Clements, em 1905; “a ciência do ambiente”, segundo Karl Friederichs, em 1958; “o estudo da estrutura e da função da natureza”, segundo Eugene Odum, em 1959; e “o estudo da estrutura e da função do ecossistema”, também segundo Eugene Odum, em 1962 (Kormondy & Brown, 1998).

Chapmann & Reiss (1999) resumem dizendo que é o estudo de como os organismos vivem e como interagem com seu ambiente. O ambiente de um organismo, por sua vez, possui um componente abiótico e outro biótico.

- O **abiótico** se constitui de fatores basicamente “estáveis” (do ponto de vista das ciências biológicas), como a geomorfologia, envolvendo a geologia, a pedologia, a topografia e os causadores de todos os tipos de intemperismo de cada lugar, para a formação de diversos tipos de relevos e paisagens; e fatores variáveis, como o clima e disponibilidade de nutrientes.

- O **biótico** envolve as interações entre organismos em que se incluem ações antrópicas, como aquelas causadas pelas modificações na biodiversidade e na riqueza.

1.1.1. Fatores do Ambiente Abiótico ou físico:

Para efeito do que temos em vista, podemos sintetizá-los em:

⇒ *Geomorfológicos* – Essa ciência estuda, de forma ampla e sintética, outras ciências para encontrar a totalidade de fatores que compõem a formação das diferentes formas de relevo e paisagens em suas resistências e fragilidades. Assim, para seguir o modelo de Chapman & Reiss (1999), autores do esquema que será apresentado posteriormente, com o objetivo de integrar os fatores bióticos e abióticos, nos concentraremos em três das ciências que compõem a abordagem geomorfológica:

- ⇒ Geologia, oferecendo as características dos diversos tipos de rochas;
- ⇒ Pedologia, oferecendo as características dos diversos tipos de solos; e
- ⇒ Topografia, indicando as diversas altitudes de cada paisagem.

⇒ *Climatológicos* – Aqui temos tudo o que é relacionado aos diferentes tipos de micro, meso e macro climas existentes em todas as escalas de nosso planeta. Não podemos esquecer também da importantíssima inter-relação entre os dois fatores básicos aqui citados, bióticos e abióticos, resultando em diversos tipos de intemperismo.

1.1.2. Fatores do Ambiente Biótico:

O ambiente biótico envolve interações dos organismos e incluem aspectos de competição, predação, herbivoria, reprodução e dispersão, as chamadas

interações intra e interespecíficas. Destas **interações**, resulta o padrão de distribuição das espécies, bem como a sua abundância. A espécie humana não é a mais abundante, mas é a que mais interfere nos ambientes tanto biótico como abiótico.

1.1.3. Interações:

A **Figura 1.1** mostra a maneira complexa com que os componentes bióticos e abióticos interagem na natureza de maneira simplificada. Em seguida serão apresentadas diversas inter-relações dos fatores biótico e abiótico, abordando os tópicos apresentados nos dois itens anteriores, no esquema abaixo e outros tópicos de nosso interesse, apresentando de forma mais detalhada e ampla o que estamos chamando de “Interações”.

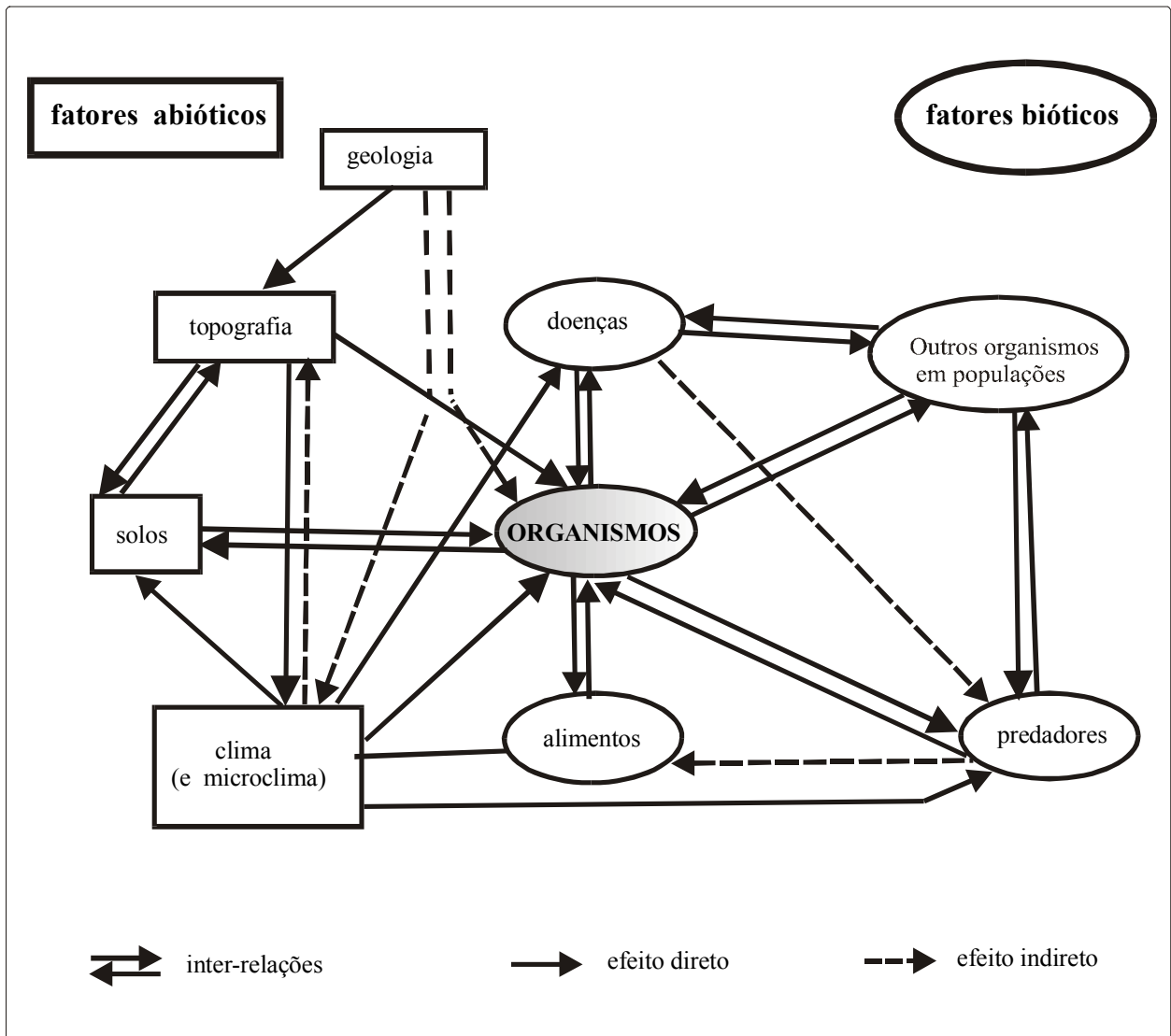


Figura 1.1 - Esquema das relações possíveis entre organismos e os componentes bióticos e abióticos. (Adaptado de Chapmann & Reiss, 1999).

De uma maneira ou de outra, tanto os fatores bióticos quanto os abióticos afetam a distribuição e a abundância dos organismos vivos, ora favorecendo uma espécie, ora desfavorecendo outra. Mesmo as interações aparentemente abióticas acabam interferindo no componente biótico.

Geologia → pedologia

Os compostos inorgânicos do solo resultam do intemperismo das rochas. Assim, é muito importante saber que tipo de rocha está disponível em um dado ambiente. Grandes variações de temperaturas contribuem para o intemperismo mecânico, proporcionando a quebra das rochas em pedaços e facilitando a ação da água. As rochas também podem ser quebradas por intemperismo químico. O dióxido de carbono é dissolvido pelas águas da chuva, formando um meio ácido. Esta acidez reage com as rochas: calcário formando carbonatos de cálcio; o feldspato de rochas ígneas, como o granito, formando argila e carbonato de potássio. Este, por sua vez, ao se acumular na estrutura coloidal das argilas e na matéria orgânica, fica disponível para o uso das plantas. Vários outros minerais como ferro, magnésio, alumínio são produtos do intemperismo de vários tipos de rochas. O quartzo, por sua vez, é muito resistente ao intemperismo, permanecendo na forma de seixos e de areia.

Geralmente, os produtos de intemperismo permanecem próximos do local de formação, por isso é muito importante conhecer a geologia local quando se estuda um ambiente. Outros processos importantes na formação dos solos são a erosão (de vários tipos) e a sedimentação.

Topografia

A altitude e a forma do relevo têm um papel muito importante na distribuição e na abundância dos organismos. A temperatura decresce com o aumento da altitude, selecionando as espécies que ali se instalam. Do mesmo modo, a presença de escarpas requer habilidades específicas para uma espécie viver ali. Dependendo do índice de inclinação, há risco de deslizamentos. A orientação das vertentes também pode selecionar espécies com habilidades específicas (C_3 e C_4). A topografia também condiciona a disponibilidade de água, seja para as plantas, seja para os animais.

A topografia dos mares e lagos (ou batimetria) é muito importante para os organismos aquáticos. A água absorve a luz prontamente, em especial a luz visível (do azul ao vermelho do espectro eletromagnético). A luz vermelha pode ser absorvida até cerca de 30 metros. A luz verde, assim como a azul, penetra mais fundo até cerca de 140 metros, até onde se podem encontrar algas verdes.

Latitude

O sol é a principal fonte de luz da terra e, conseqüentemente, de calor. O comprimento dos dias e a intensidade luminosa são fatores decisivos na inclusão ou exclusão de um ser vivo num dado local. É a rotação da terra em torno do seu eixo que cria o dia e a noite. A inclinação do eixo da terra juntamente com a translação fazem variar a face da terra voltada para o sol ao longo do ano, criando, assim, as estações. No equador, o comprimento do dia e da noite é praticamente igual. Já nas altas latitudes, nos pólos, isso pode significar até dias

de 24 horas e noites de 24 horas durante o verão e o inverno, respectivamente. Nas latitudes médias, ao redor dos trópicos, os dias são mais longos no verão e mais curtos no inverno, embora com uma variação bem mais tênue do que nos pólos.

Climas e condições atmosféricas

Em diferentes condições de topografia, relevo e de latitude ocorrem climas com variações anuais (estações do ano) que influenciam os ciclos abióticos e bióticos (fenologia e ritmos circadianos). As variações nas estações do ano ficam nitidamente evidenciadas: nas plantas, através de certas características fenológicas (senescência, floração, brotamento) e nos animais, através de mudanças de comportamento (hibernação e migração).

Catástrofes

Os fatores eventuais como fogo, deslizamentos, erupções vulcânicas, terremotos, furacões podem modificar o ambiente biótico alterando processos sucessionais bem como a adaptabilidade das espécies em geral.

Ação antrópica sobre o meio físico

Daqueles fatores dependentes do homem temos as inundações, os deslizamentos, o fogo, a modificações da superfície e do subsolo, somente para citar alguns. O homem constrói cidades, barragens e diques, assoreia corpos d'água, muda cursos de rios, explora o subsolo, altera os componentes do solo, sempre deixando marcas indeléveis.

Ação antrópica sobre a biota

As modificações feitas pelo homem na natureza nem sempre passam despercebidas. O homem tem uma habilidade inequívoca de deixar marcas por onde passa. Estas marcas são conhecidas como "pegadas ecológicas" e constituem-se nas modificações que o homem faz na natureza, também conhecidas como impactos ambientais.

Estas modificações do ambiente podem repercutir, desde a escala individual até a escala global, dependendo da extensão e da intensidade da modificação. Ao se agrupar, formando os ambientes urbanos, o homem modifica a biodiversidade ao seu redor removendo a cobertura vegetal natural, lavrando a terra, alterando o solo e o subsolo, modificando os corpos d'água, introduzindo espécies exóticas e favorecendo o crescimento de certas espécies. Dependendo do aglomerado urbano, os efeitos podem ser individuais (micro escala) ou regionais (macro escala). Em ambientes urbanos com menos de 20.000 habitantes, os efeitos são

ditos como sendo locais. Em ambientes com milhões de habitantes, os efeitos podem chegar a níveis regionais. Entretanto, há casos de ações individuais que causaram danos regionais, como o derramamento de óleo no mar, por exemplo.

1.2. Como combinar estes elementos?

A pergunta que leva à compreensão total sobre um organismo é onde ele vive. Definindo-se o meio (se aquático ou terrestre), resta apenas saber o taxon a que ele pertence (animal, vegetal ou outros) para se ter uma radiografia do organismo em questão. Sabendo onde ele vive e lembrando que a organização dos seres vivos tem a seguinte seqüência: organismo → população → comunidade → ecossistema → bioma, podemos identificar o ecossistema do qual ele faz parte, ampliando assim o conhecimento sobre o organismo.

O “onde vive” está associado ao ambiente abiótico e o “ele” (indivíduo), juntamente com os demais organismos com quem interage, está associado ao ambiente biótico.

Das interações abióticas e bióticas resultam os habitats, promovendo a instalação de populações, formando comunidades, levando à formação de ecossistemas e, conseqüentemente, de biomas. Um exemplo dessa interação é o fato de que fatores físicos como pH, temperatura, disponibilidade de água e luz podem afetar o crescimento de uma dada população, alterando sua habilidade de competição e alterando a sua abundância.

Para estudar uma **população** (conjunto de indivíduos de mesma espécie), um dos caminhos é identificar o habitat. Este, contudo, nem sempre caracteriza uma espécie completamente, em vista de o mesmo espaço físico ser ocupado simultaneamente por diversos organismos distintos. Somente quando se conhece muito bem o comportamento de uma dada espécie é que se costuma utilizar o seu habitat como unidade de estudo. Por exemplo, supondo que o meio onde uma dada espécie vive é águas continentais. Nesse caso, ao identificar os corpos d'água de uma dada região, estamos automaticamente identificando os locais da provável ocorrência do seu habitat. Contudo, existe a possibilidade de alguns desses corpos d'água não serem doces. Nesse caso, é preciso buscar outros indicativos de água doce, como a presença de macrófitas.

A **Comunidade**, por sua vez, constitui-se de grupos integrados de populações que ocorrem juntos em um habitat ou ambiente comum. Assim, identificando apenas o habitat, não há garantias de que se identificou uma comunidade.

O **Ecossistema**, que corresponde ao conjunto de comunidades vivendo em diferentes compartimentos de um mesmo ambiente, é o nível de organização mais fácil de ser identificado por sensores remotos, pois a resposta obtida é função direta da sua estrutura.

Conhecendo a **estrutura** de um ecossistema, pode se chegar ao seu estado de conservação e até ao seu tamanho. As avaliações de padrões de estrutura e função de ecossistemas estão relacionadas com a distribuição espacial de certos parâmetros, em uma escala de tempo. Conhecendo o estado dos

ecossistemas, pode se chegar a respostas sobre os recursos disponíveis, informação imprescindível ao tão desejado desenvolvimento sustentado.

Para quantificar estas informações no tempo e no espaço, fez-se necessário lançar mão de tecnologias já conhecidas por outros especialistas ligados às ciências da terra. Dentre estas tecnologias, destacou-se o sensoriamento remoto em geral.

O **sensoriamento remoto**¹ tornou-se muito popular entre os ecólogos interessados na distribuição espacial e na estrutura de vários ecossistemas. A introdução das plataformas orbitais, com seus sistemas **imageadores** (produzindo imagens), tornou-o ainda mais útil por conta da previsibilidade acrescida à visão sinóptica já tão útil. Com estes sistemas (orbital ou aéreo), a distribuição espacial de alguns ecossistemas pode ser obtida, monitorada e quantificada, até certo ponto. Ao indicar as coleções hídricas em uma imagem, por exemplo, os parâmetros "local e proporção" contribuirão para definir vários parâmetros da estrutura do ecossistema, bem como algumas de suas funções. A habilidade de distinguir coleções hídricas, vegetais e rochosas tem feito com que o sensoriamento remoto seja utilizado por todos os biólogos preocupados com o meio ambiente, de meso a macro escalas.

Com o advento do **geoprocessamento**², imagens ganham propriedades cartográficas (*coordenadas geográficas*) tornando-se possível transformar a proporção, acima mencionada, em medidas de áreas, perímetros e distâncias, permitindo o mapeamento de temas diversos.

Desse modo, parâmetros bióticos e abióticos passaram a ser extraídos de imagens e de seu processamento digital, aumentando a compreensão do ambiente e incorporando informações não antes incorporáveis. Desse modo, **mapas temáticos** com classes de orientação de vertentes, declividade, altitude, distribuição de ocorrência, uso e ocupação, limites políticos, limites geomorfológicos passaram a ser gerados, possibilitando novas análises. Com estas informações, foi ampliada em muito, a compreensão da estrutura e da função de um ecossistema.

Mais adiante, na escala de tempo, surgiram os **sistemas de informações geográficas**, ou SIGs, no qual estes mapas temáticos passaram a ser combinados com outros, oriundos de outras fontes e mesmo de outras escalas, ampliando ainda mais o espectro de análise do meio ambiente. Através de operações algébricas convenientes, é possível mesclar temas de interesse, gerando **mapas síntese** ainda mais complexos. Com os SIGs tornou-se possível:

- 1) estocar e manipular dados estruturais com eficiência;
- 2) agregar e desagregar dados de regiões, de paisagens e de pontos;
- 3) identificar áreas semelhantes;
- 4) fazer avaliações geo-estatísticas;
- 5) melhorar informações oriundas de sensores remotos diversos; e

¹ É a ciência que estuda os alvos sem ter contato físico com os mesmos baseando-se somente na interação destes alvos com a radiação eletromagnética.

² Área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico.

6) fornecer dados e/ou parâmetros para modelagem espacial.

Os mapas síntese podem resultar de álgebra de mapa com mapa e de mapa com banco de dados, desde que estes dados tenham endereço cartográfico (x, y ou lat. e long.), dentro de uma mesma projeção geográfica.

2. SENSORIAMENTO REMOTO:

2.1. Definição e Histórico

“Sensoriamento remoto é a ciência que estuda propriedades físicas e químicas dos alvos, sem ter contato físico com os mesmos, baseando-se somente na interação desses com a radiação eletromagnética” (Lillesand & Kiefer, 1994; Novo, 1989)

Esta interação varia conforme:

- o alvo (vegetação, água, rochas, ação antrópica)
- a fonte de energia (o Sol e a Terra, bem como fontes artificiais)
- a atmosfera (com ou sem partículas em suspensão)
- a iluminação (por exemplo, variações no ângulo de elevação solar)
- a interação energia/matéria (diferentes curvas espectrais dos alvos)
- o sensor (ativo ou passivo - óptico ou não óptico)
- o tratamento dos dados (digital ou não digital)
- a interpretação (visual ou computadorizada)

O sucesso na utilização do sensoriamento remoto (SR), em qualquer área, depende do perfeito conhecimento dos oito itens acima, bem como da perfeita formulação da pergunta a ser respondida. Para tanto, a interação entre alvo e a radiação eletromagnética (REM) é o primeiro fator a ser levado em conta.

Interações entre alvo e a REM:

Para que a transferência de energia ocorra, é preciso que haja compatibilidade entre o “pacote” de energia oferecido e a capacidade de o alvo

receber o tal “pacote”. Quando a energia é transferida de um sistema para outro, diz-se que houve absorção. Quando a energia entra em contato com o material, mas foi repelida, diz-se que houve reflexão e, quando não há interação alguma, diz-se que houve transmissão da energia. No mundo real, os três processos ocorrem simultaneamente. O registro dessa interação é que depende de detectores específicos para cada faixa espectral. Não há um detector capaz de detectar todas as faixas pois a interação depende do comprimento de onda e da estrutura do alvo.

Imageamento:

O imageamento consiste em armazenar em celas um número relacionado com a energia refletida ou emitida por frações da superfície da Terra. Para tanto, coletores de energia foram desenvolvidos (lentes, espelhos, orifícios e calhas) e sistemas degradadores de energia, como o prisma, foram colocados no trajeto entre o coletor e o sistema sensor, de modo que a energia coletada seja degradada em faixas espectrais de interesse. Os imageadores podem ser de varredura ou não. No primeiro caso, a coleta de energia é amplificada, permitindo que o elemento de resolução no terreno (pixel) possa ser menor do que aquele imposto pela altura do sistema em relação ao alvo. No segundo caso, o produto é uma tabela de dados.

Se a plataforma for avião, as imagens são coletadas em películas fotográficas. Se a plataforma for orbital, a energia registrada é enviada à terra segundo um padrão radiométrico previamente estipulado (no formato de bits). Assim, a “granulação” da imagem gerada dependerá do tamanho dos **pixels** (resolução espacial), do número de sensores espectrais (resolução espectral) e do número de bits com que a energia foi armazenada (resolução radiométrica).

Estas resoluções têm variado com a evolução tecnológica. Nestes 30 anos de sensoriamento remoto, aumentaram a resolução espectral (maior número de faixas), a resolução espacial (diminuindo o tamanho do pixel) e a resolução radiométrica (maior número de bits).

No Brasil, o INPE é o órgão responsável pela recepção de dados, processamento, pesquisa, calibração, ensino e desenvolvimento tecnológico relativo ao sensoriamento remoto. Durante muitos anos, era o único na América do Sul responsável pela distribuição e comercialização de imagens, graças a sua antena receptora situada em Cuiabá. A história do INPE é absolutamente necessária para que as gerações futuras saibam como tudo começou, uma vez que o sensoriamento remoto nasceu com fins militares e que, somente depois de obsoletas para tal fim, estas tecnologias foram colocadas à disposição para fins civis. **Quadro 1.**

HISTÓRIA DO INPE

Segundo a página Web do INPE (<http://www.inpe.br>), “o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) nasceu da vontade de alguns brasileiros de fazer com que o país participasse da conquista do espaço iniciado nos anos 50. O Brasil começou a trilhar este caminho ao mesmo tempo em que as nações desenvolvidas lançavam os primeiros satélites artificiais da Terra.”

- 1961: houve um decreto criando o Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (GOCNAE);
- 1971: No dia 22 de abril foi criado o embrião do atual Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), subordinado ao CNPq;
- 1972: foi criado o curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto;
- 1990: No dia 17 de outubro é aprovada a Estrutura Regimental da SCT, passando o INPE a integrá-la na qualidade de órgão singular, como também a ser denominado Instituto "Nacional" de Pesquisas Espaciais, único Instituto de Pesquisa Espacial em âmbito nacional;
- 1993: é colocado em órbita o primeiro satélite brasileiro, o SCD-1, demonstrando a capacidade brasileira no desenvolvimento e operação de sistemas espaciais;
- 1998: o SCD-2 é também lançado com sucesso, operando com melhor desempenho do que o primeiro, devido às inovações tecnológicas;
- 1998: criação do Programa de Doutorado em Sensoriamento Remoto;
- 1999: é lançado o CBERS-1, satélite sino brasileiro de recursos terrestres, fruto da cooperação entre os governos Brasileiro e Chinês. O CBERS-2 está previsto para 2002.

O reconhecimento da capacidade do INPE no desenvolvimento de tecnologia espacial e também de aplicações reflete-se na participação brasileira na construção da Estação Espacial Internacional (International Space Station – ISS), o maior empreendimento do mundo no setor, reunindo 16 países.

Desde 1969, o INPE coleta e analisa dados de Sensoriamento Remoto obtidos por aeronaves (câmaras fotográficas, imageadores, radares, etc.) e/ou plataformas orbitais (LANDSAT, SPOT, SPACE SHUTTLE, NOAA, ERS, JERS, RADARSAT, etc.), pesquisando, desenvolvendo e aplicando metodologias ao estudo dos recursos naturais do País.

O embasamento teórico que está por trás do uso de sensoriamento remoto para monitorar e quantificar recursos naturais passa por algumas áreas da física. Recordar estes conceitos e fundamentos é absolutamente necessário para que se faça bom uso desta tecnologia. A correta interpretação dos dados sensorizados

remotamente por diferentes sensores é responsável pela credibilidade de que desfruta hoje, bem como pela sua crescente popularidade nas várias áreas do conhecimento.

Espectro Eletromagnético.

É o conjunto ordenado das radiações eletromagnéticas (REM) conhecidas, organizadas por frequência ou por comprimento de onda no eixo X e pela energia no eixo Y. Radiação é o processo no qual a energia é transferida na forma de ondas eletromagnéticas: a frequência não muda quando muda o meio de propagação. Assim, a energia é reconhecida pela sua frequência, podendo ser quantificada.

Este espectro é subdividido em faixas, representando regiões que possuem características peculiares em termos dos processos físicos, geradores de energia em cada faixa, ou dos mecanismos físicos de detecção desta energia. Dependendo da região do espectro, trabalha-se com energia (elétron-Volts), comprimentos de onda (micrômetro ou nanômetro), ou frequência (Hertz). Por exemplo: na região dos raios gama e cósmicos usa-se **energia**; na região entre o ultravioleta e o infravermelho usa-se **comprimento de onda**; e na região das microondas e das ondas de radio usa-se **frequência**.

A faixa de comprimentos de onda ou frequências em que se pode encontrar a radiação eletromagnética é ilimitada. Com a tecnologia atualmente disponível, pode-se gerar ou detectar a radiação eletromagnética em uma extensa faixa de frequência que se estende de 1 a 1024 Hertz, ou comprimentos de onda que se estendem de 108 metros até 0.01 Ângstrom.

As principais faixas do espectro eletromagnético estão descritas abaixo e representadas na figura a seguir.

Ondas de baixas frequências e grandes comprimentos de onda: As ondas eletromagnéticas nesta faixa são utilizadas para comunicação a longa distância, pois, além de serem pouco atenuadas pela atmosfera, são refletidas pela ionosfera, propiciando uma propagação de longo alcance.

Microondas: situam-se na faixa de 1 mm a 30 cm ou 3×10^{11} a 3×10^9 Hz. Nesta faixa de comprimentos de onda, podem-se construir dispositivos capazes de produzir feixes de radiação eletromagnética altamente concentrados, chamados radares. Pouca atenuação pela atmosfera, ou nuvens, propicia um excelente meio para uso de sensores de microondas em qualquer condição de tempo.

Infravermelho: grande importância para o Sensoriamento Remoto. Engloba radiação com comprimentos de onda de $0,75\mu\text{m}$ a $2,5\mu\text{m}$, que é facilmente absorvida pela maioria das substâncias (causando aquecimento).

Visível: é definida como a radiação capaz de produzir a sensação de visão para o olho humano normal. Pequena variação de comprimento de onda (380 a 750 nm). Importante para o Sensoriamento Remoto, pois imagens obtidas nesta faixa, geralmente, apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete.

Ultravioleta: extensa faixa do espectro (10 nm a 400 nm). Películas fotográficas são mais sensíveis à radiação ultravioleta do que à luz visível. Utilizado na detecção de minerais com luminescência, bem como na detecção de poluição marinha. Uma forte atenuação atmosférica nesta faixa apresenta-se como um grande obstáculo na sua utilização.

Raios X: Faixa de 1 ângstrom a 10 nm. São gerados, predominantemente, pela parada ou freamento de elétrons de alta energia. Por se constituir de fótons de alta energia, os raios-X são altamente penetrantes, sendo uma poderosa ferramenta em pesquisa sobre a estrutura da matéria.

Raios-GAMA: são os raios mais penetrantes das emissões de substâncias radioativas. Não existe, em princípio, limite superior para a frequência das radiações gama, embora ainda seja encontrada uma faixa superior de frequência para a radiação conhecida como raios cósmicos.

(χ) A faixa mais usada em Sensoriamento Remoto está entre $0,3\mu\text{m}$ e $2,5\mu\text{m}$ (conhecida como espectro óptico), pois nesta faixa os componentes ópticos de reflexão e refração, tais como lentes, espelhos, prismas, etc são utilizados para reorientar e coletar a radiação.

** Nanômetro = nm igual a metro $\times 10^{-9}$
Micrômetro = μm igual a metro $\times 10^{-6}$
Ângstrom = metro $\times 10^{-10}$

FONTES DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

As fontes de radiação eletromagnética (REM) podem ser divididas em **naturais** (Sol, Terra, substâncias radioativas) e **artificiais** (Radar, Laser, etc...).

O Sol é a mais importante fonte natural, pois sua energia, ao interagir com as diversas substâncias da superfície da Terra, origina uma série de fenômenos (reflexão, absorção, transmissão, luminescência, aquecimento, etc..) investigados

pelo Sensoriamento Remoto. A Terra é a segunda fonte natural que emite energia na faixa do termal ou infravermelho distante.

Qualquer fonte de energia eletromagnética é caracterizada pelo seu espectro de emissão, o qual pode ser contínuo ou distribuído em faixas discretas. O Sol, por exemplo, emite radiação distribuída continuamente numa faixa que vai dos raios-X até a região de microondas, embora concentrado no intervalo de $0,35 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$.

Toda substância com temperatura superior a zero absoluto (0°K ou -273°C) emite radiação eletromagnética, como resultado de suas oscilações atômicas e moleculares. Essa radiação emitida pode incidir sobre a superfície de outra substância, podendo ser **refletida, absorvida ou transmitida**. No caso da absorção, a energia é geralmente reemitida, normalmente com diferentes comprimentos de onda.

Na prática, os quatro processos emissão, absorção, reflexão e transmissão ocorrem simultaneamente e suas intensidades relativas caracterizam a substância em investigação. Dependendo das características físicas e químicas da mesma, aqueles quatro processos ocorrem com intensidades diferentes em diferentes regiões do espectro. Esse comportamento espectral das diversas substâncias é denominado **assinatura espectral** e é utilizado em Sensoriamento Remoto para distinguir diversos materiais entre si.

EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA PROPAGAÇÃO DA REM

Quando se coleta um dado através de um sensor remoto, seja no nível do satélite ou da aeronave, o sinal coletado, na maioria das vezes, é a radiação proveniente do Sol, que interage com a atmosfera até atingir o alvo e retorna ao sensor interagindo novamente com a atmosfera. Mesmo que o sinal medido seja a radiação emitida pelo alvo, ela interage com a atmosfera até atingir o sensor.

Existem regiões de espectro eletromagnético para as quais a atmosfera é opaca, ou seja, não permite a passagem da radiação eletromagnética. Estas regiões definem as “bandas de absorção da atmosfera”. As regiões do espectro eletromagnético em que a atmosfera é transparente a radiação eletromagnética proveniente do Sol são conhecidas como “janelas atmosféricas”.

Assim, devemos sempre considerar os seguintes fatores associados à atmosfera, os quais interferem no Sensoriamento Remoto: absorção, efeitos de massa de ar, espalhamentos devido a moléculas gasosas ou partículas em suspensão, refração, turbulências, emissão de radiação pelos constituintes atmosféricos, entre outros.

Desse modo, concluímos que a atenuação da radiação se dá por:

Absorção

A energia de um feixe de REM é transformada em outras formas de energia. É uma atenuação seletiva observada em vários constituintes, tais como vapor d'água, ozônio, monóxido de carbono, entre outros. Em muitos casos, a atenuação pode ser desprezada por ser muito pequena.

Espalhamento

A energia de um feixe de REM colimada é removida por mudança de direção. Ao interagir com a atmosfera, pelo processo de espalhamento, gerará um campo de luz difusa, que se propagará em todas as direções.

Existem três tipos de espalhamento:

- (χ) Espalhamento Molecular ou Rayleigh: produzido essencialmente por moléculas dos gases da atmosfera. Ela se caracteriza pelo fato de sua intensidade (E) ser inversamente proporcional à Quarta potência (P) do comprimento de onda ($E = \frac{1}{4} P$). Isto explica a coloração azul do céu, onde o comprimento de onda nesta faixa é menor.
- (b) Espalhamento Mie: ocorre quando o tamanho das partículas espalhadoras é da ordem do comprimento de onda da radiação.
- (c) Espalhamento não seletivo: ocorre quando os diâmetros das partículas são muito maiores que o comprimento de onda. A radiação de diferentes comprimentos de onda será espalhada com igual intensidade. A aparência branca das nuvens é explicada por este processo.

PS₁ – A atenuação da radiação pode explicar ainda a cor avermelhada do entardecer, isto é devido à maior espessura de atmosfera que a radiação tem de atravessar, e onde ficam retidos os menores comprimentos de onda (azul) da luz, deixando passar a componente vermelha da luz solar.

PS₂ – Devido aos fatores de atenuação é importante um planejamento antes da aquisição dos dados e dos processos de interpretação.

2.2. Sensoriamento Remoto e a Ecologia

Para se extraírem informações ecológicas corretas a partir dos produtos de sensoriamento remoto, faz-se absolutamente necessário conhecer:

- os componentes de interesse (biológico, ecológico, físico e/ou químico);
- de que modo estes componentes interagem com a radiação eletromagnética (REM) das diversas faixas conhecidas (ultravioleta, visível, infravermelho óptico, infravermelho termal e microondas);
- os sistemas sensores disponíveis (ópticos e não ópticos), suas características e suas limitações;
- os sistemas imageadores e seus produtos; e
- os métodos disponíveis de interpretação destes produtos.

Seja qual for o componente, é possível espacializar com precisão cartográfica e identificar e quantificar vários parâmetros e variáveis, através de SR aéreo ou orbital.

Como já foi dito anteriormente, não há um único sensor capaz de sensoriar todas as faixas do espectro eletromagnético, uma vez que o sensor é um material que interage com a radiação de um certo comprimento de onda ou uma certa frequência. O ideal é sensoriar no maior número possível de faixas espectrais, pois cada uma delas tem suas peculiaridades na forma de interagir com a REM, denotando assim características diversas de um mesmo alvo.

Nos primeiros sistemas sensores (as câmeras fotográficas), somente as faixas do visível eram registradas nas películas fotográficas. Durante a II Guerra Mundial, foi desenvolvida uma película também sensível ao infravermelho próximo ampliando, assim, o espectro de observação por fotografias aéreas.

Hoje existem sistemas multisensores capazes de sensoriar, por exemplo, o visível, o infravermelho óptico e o não óptico, como é o caso do sistema TM-LANDSAT. Em 1999, o Brasil (INPE), em parceria com a China, lançou com sucesso o CBERS-1, com três sistemas, com resoluções espacial, espectral e radiométrica complementares. Há também sistemas orbitais ativos de microondas que contam, até o momento, com quatro (S, L, C e P) faixas espectrais. Em 2003, deveremos ter em órbita o sistema japonês ALOS que combinará sensores do visível, do infravermelho óptico e das microondas, ampliando ainda mais o espectro de observação dos alvos terrestres.

Prosseguindo com este raciocínio, resta saber: Que componentes da superfície terrestre podem ser sensoriados remotamente?

- Os componentes vegetais;
- Os componentes hídricos;
- Os componentes rochosos.

A superfície terrestre está coberta basicamente por água e rochas. Estas podem estar cobertas ou não por vegetação. A cobertura vegetal pode variar de densa até ausente. Tomando os padrões da natureza como referência, pode-se inferir se estes componentes foram mexidos ou não, denotando assim a ação antrópica. Leitura complementar no [Quadro 2](#).

Quadro 2

A vegetação e temperatura da Terra

A energia do visível e dos infravermelhos próximo e médio, proveniente do sol, é absorvida pelos alvos da Terra de modo diferenciado. A energia não utilizada é liberada e/ou transformada em outras formas de energia, entre elas, a térmica. Alguns alvos absorvem mais que outros, como é o caso da água que tende a absorver quase totalmente a radiação recebida dessas faixas. Devido ao seu alto calor específico, a água guarda-o mais tempo do que os demais alvos. As rochas transformam as energias recebidas em calor, mas perdem-no rapidamente quando o sol se recolhe. A vegetação absorve a radiação desde o azul até o vermelho (visível), utiliza-a no processo fotoquímico e emite o restante para a atmosfera em comprimento de onda maior (termal e microondas). Na faixa do infravermelho próximo (IVP) a radiação é fortemente refletida pela vegetação, sendo que quanto mais folhas verdes há, mais reflete. Este processo é responsável pelo balanço térmico da Terra, pois, ao refletir, impede a entrada destas energias no sistema. Os infravermelhos próximo e médio têm a propriedade de aquecer fortemente os corpos d'água. Como a vegetação pode refletir até 85% da radiação do IVP recebida, a Terra se aquece menos do que seria de se esperar frente à exposição solar observada.

De um modo geral:

- A radiação no termal indica a relação entre a energia irradiada (que chega) e a emitida (absorvida e convertida em energia térmica) que resulta de suas propriedades físicas e químicas.
- As radiações nas microondas interagem com a textura da superfície e sua condutividade elétrica.
- As faixas do visível e dos infravermelho próximo e médio interagem de modo diferenciado com as três grandes coleções (vegetal, hídrica e rochosa) de alvos da superfície da Terra.

Os principais indicadores da ação humana sobre a superfície terrestre são as marcas deixadas na vegetação. O segundo indicador é a água. As rochas aparecem quando a vegetação é removida.

2.2.1. Coleções de vegetais

Nesse contexto, o que pode-se distinguir, através da maior parte dos sensores, são as coleções de folhas verdes, de galhos, de troncos e a de necromassa, dependendo da faixa espectral. As folhas são as estruturas responsáveis pela maior parte da interação entre a REM e a vegetação.

Nas folhas vivas a interação se dá quando há ressonância entre a estrutura e a composição do material e o tamanho do comprimento de onda da REM.

No caso das folhas, são os cloroplastos que entram em ressonância com a REM e os pigmentos que absorvem a energia das faixas do visível. O tamanho do cloroplasto é responsável por deter a energia por um certo tempo, de modo a permitir que os pigmentos a absorvam.

A energia da faixa do infravermelho próximo que chega é detida pela estrutura do mesofilo, e é retroespalhada graças aos diferentes índices de refração entre os espaços aéreos e os líquidos do mesofilo. A absorção é feita pela água presente nos tecidos. A energia da faixa do infravermelho médio também é absorvida pela água presente tanto nos tecidos como fora deles.

- a) as radiações do visível ou VIS (de azul até vermelho) interagem com os cloroplastos e são absorvidas pelos pigmentos;
- b) as radiações no infravermelho próximo ou IVP interagem com a estrutura do mesofilo e são absorvidas pela água;
- c) as radiações no infravermelho médio ou IVM interagem com o mesofilo e são absorvidas pela água.

Por conta dos itens 'a' e 'b', é possível quantificar a densidade de folhas verdes por unidade de área através de SR. Por conta do item 'c', é possível quantificar variáveis como o estado de turgor da vegetação. A ação antrópica é mostrada através das modificações no arranjo natural da cobertura vegetal. As folhas mortas também interagem com estas REM, porém, têm outro comportamento, que é semelhante ao de um solo seco.

2.2.2. Coleções Hídricas

O que se “vê” através de SR é a radiação que emana dos corpos d'água. No VIS, o que reflete são os elementos em suspensão na água, pois:

- a) água pura é fortemente absorvida pelas REM das faixas que vão desde o visível até o IVM.

b) elementos em suspensão interagem com a radiação disponível na zona eufótica, resultando em uma radiação emergente do corpo d'água que pode ser quantificado por SR.

As radiações no visível interagem com os pigmentos presentes no plâncton (zoo e fito); os particulados minerais em suspensão ou no fundo refletem principalmente a radiação na faixa do vermelho. Assim, alguns parâmetros da qualidade da água, como turbidez e presença fitoplanctônica, podem ser quantificados por SR.

As coleções hídricas podem ser lênticas ou lóxicas, naturais ou artificiais. Os corpos d'água lênticos podem estar recobertos por vegetação emersa flutuante, bem como vegetação submersa. Nos corpos lóxicos, isso não ocorre em função da velocidade do curso d'água.

A ação antrópica é notada pelo formato das coleções hídricas, presença de macrófitas, desvios de cursos d'água naturais, alagamentos, etc.

2.2.3. Coleções Rochosas

Estas só aparecem quando não há nem água nem vegetação – rocha viva, derivados de rochas e solos. A ação da natureza deve ser levada em consideração, embora o grande modificador do ambiente seja o homem (lavouras, minerações, edificações).

O que se “vê” através de SR são os componentes físicos e químicos das rochas que interagem com as radiações no visível, indicando a presença de argila, silte, areia, matéria orgânica e umidade. A energia do infravermelho médio interage com os radicais de hidroxila que algumas rochas apresentam.

Para dar uma pequena amostra de como o sensoriamento remoto se relaciona com a ecologia, a Figura 2.1 é apresentada a seguir, juntamente com uma explanação. A porção do espectro eletromagnético aqui apresentado restringe-se ao visível e aos infravermelho próximo e médio, por terem as energias mais relacionadas com a vida na Terra.

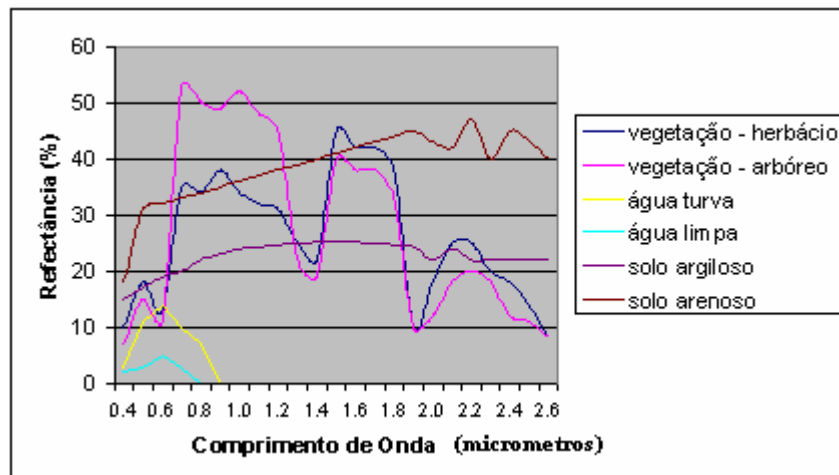


Figura 2.1 – Comportamento espectral médio dos três principais alvos da Terra – água, solo e vegetação, nas duas variações mais comuns de cada alvo. (Adaptado de Lillesand & Kiefer, 1994)

O gráfico da **Figura 2.1**, que apresenta no eixo do X comprimento de onda (μm) e eixo do Y porcentagem de reflectância, apresenta também as curvas de comportamento espectral das águas turva e limpa em amarelo e azul claro, respectivamente. Apresenta, também, os solos argiloso e arenoso, em roxo e marrom, respectivamente. As vegetações herbácea e arbórea aparecem em azul-marinho e magenta, respectivamente.

A **variação espectral nas águas** resulta de diferentes tipos e concentrações de particulado em suspensão: particulado orgânico (plâncton) e particulado inorgânico (silte e argila). Estas variações no campo representam alguns dos parâmetros ecológicos indicadores de qualidade da água. A presença de macrófitas submersas também pode influenciar o comportamento espectral da coluna d'água com uma resposta semelhante a do fitoplâncton.

A **variação espectral nos solos** resulta de diferentes propriedades granulométricas responsáveis pela fertilidade do solo em questão, que condicionam qual tipo de vegetação natural o povoará, assim como que tipo de cultura pode ser cultivada nesses lugares. Além disso, aquelas edificações feitas com derivados de rochas (telhas, cimento, pedras) também apresentarão comportamento espectral semelhante aos solos.

A **variação espectral nas coberturas vegetais** resulta de estruturas com distintas formas de vida, dando origem a diferentes funções. O turgor e o estado fenológico também influenciam o comportamento espectral. O padrão de

ocupação da vegetação, assim como seu estado de conservação, revelam a ação humana.

2.3. FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

Para facilitar a compreensão dos conceitos que se seguem, alguns termos precisam ser definidos:

SISTEMA SENSOR – compreende os aparatos de coleta da energia mais o seu detetor. A energia eletromagnética só pode ser percebida se interagir com algum material. Esta interação se dá em função da ressonância entre o comprimento de onda ou frequência e a estrutura do material. O detetor é o material capaz de interagir com a energia de uma certa faixa do espectro eletromagnético. Os aparatos de coleta também variam com a faixa espectral: espectro refletido e espectro emitido. No primeiro caso, os aparatos de coleta de energia obedecem às leis ópticas (usando-se lentes e espelhos). No segundo caso, os aparatos são outros, que não obedecem as leis ópticas. Há que se usar detetores específicos para cada faixa espectral.

RESOLUÇÃO ESPACIAL - Tamanho da área mínima no terreno correspondente a cada elemento na imagem – pode variar de 1 metro até 1,1 km, dependendo da plataforma e do sistema sensor.

RESOLUÇÃO ESPECTRAL - Número de faixas espectrais do sistema sensor à ser utilizado: conhecer os sistemas disponíveis e quais são úteis no caso do seu alvo ou fenômeno – o número de faixas pode variar de 1 ao número de faixas espectrais conhecidas.

RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA - Número de níveis de energia que o sistema é capaz de armazenar. O Número Digital (ND) pode variar de 6 bits ($2^6 = 64$), 8 bits ($2^8 = 256$), por exemplo – variação conforme o sistema sensor.

*RESOLUÇÃO TEMPORAL - O tempo entre uma tomada de dados e outra. Pode ser repetitivo ou não, conforme a plataforma (manual, helicópteros, aviões ou satélites) e conforme o projeto. Nos sistemas orbitais, o retorno do satélite ao mesmo ponto varia de 12 horas a 25 dias, conforme o sistema. No **Quadro 4** são apresentadas as relações físicas da Radiação com as medidas que podem ser feitas através do sensoriamento remoto, nas várias faixas espectrais.*

O QUE O SENSOR REGISTRA É A RADIANCIA (R)

$$R_{\text{alvo}} = (H(\rho \tau + B) / \pi) \text{ seno } \alpha$$

ρ = Reflectância do Alvo ($\rho = R / H$)

H = Energia Solar que chega no Alvo

τ = Transmitância da Atmosfera

α = Ângulo de Elevação Solar

B = Efeito atmosférico do tipo aditivo

O QUE O SENSOR ORBITAL REGISTRA É

$$R_{\text{total}} = R_{\text{alvo}} + R_{\text{trajetória}}$$

EFEITOS INDESEJÁVEIS SOBRE A RADIANCIA

- LINEARIZAÇÃO Radiância (R) → Número Digital (ND)
- EFEITO MULTIPLICATIVO Ângulo de elevação solar
- EFEITO ADITIVO Radiância da trajetória

RELAÇÃO ENTRE R e ND

$$R = [(R_{\text{max}} - R_{\text{min}})/\text{resolução radiométrica}] \text{ ND} + R_{\text{min}}$$

Resolução Radiométrica: 8 bits = de 0 a 255 níveis de Energia

10 bits = de 0 a 1023 níveis de Energia

R = M ou emitância que obedece a lei de Stephen & Boltzman, em que:

$$M_{\text{do corpo negro}} = \sigma T^4 \quad \text{e} \quad M_{\text{do corpo real}} = \epsilon \sigma T^4$$

Sendo: σ = constante de Stephen & Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$)

Corpo negro = radiador perfeito

ϵ = Emissividade (varia de alvo para alvo vegetação = 0,98; solo molhado = 0,96; e solo seco = 0,92)

$$T_{\text{brilho}} = \sqrt[4]{(R \pi / \sigma)} \quad T_{\text{real}} = \sqrt[4]{(R \pi / \epsilon \sigma)} \quad \text{logo}$$

$$T_{\text{brilho}} \cdot \epsilon = T_{\text{real}}$$

RADIÂNCIA DE ENERGIA REFLETIDA

RADIÂNCIA DE ENERGIA EMITIDA

$$R_{\text{alvo}} = (H(\rho \tau + B) / \pi) \text{ seno } \alpha$$

Onde ρ = reflectância

$$R = M / \pi$$

Onde M = emitância do alvo

EFEITOS INDESEJÁVEIS PARA O SENSORIAMENTO REMOTO

- Plataforma Aérea
- Turbulência atmosférica
 - Mudanças de Altitude
 - Efeito nas condições de iluminação (passivo)
 - Efeitos geométricos
 - Dificuldades na repetitividade

- Plataforma Orbital - Efeito de condições de iluminação (passivo)
- Espalhamento atmosférico
 - Absorção atmosférica
 - Presença de nuvens (sistema passivo)
 - Efeitos geométricos

Sistemas passivos – quando a fonte de energia é o sol

Sistemas ativos – quando a fonte de energia é artificial

Surge, assim, a necessidade de medidas que visam corrigir ou apenas compensar os efeitos indesejáveis que vêm embutidos no ND. Para tanto, são necessárias algumas correções (radiométricas e geométricas), bem como procedimentos de interpretação de imagens.

Correções radiométricas:

No caso de imagens do VIS, IVP e IVM, a energia registrada pelos sensores a bordo de satélite é a refletida e depende das propriedades físicas de cada alvo. Há situações em que se faz necessário transformar o ND em grandezas físicas (radiância ou reflectância) para melhorar a interpretação das informações espectrais inscritas nas imagens:

Seqüência de conversões: $ND \rightarrow R \rightarrow \rho$

No caso do termal, a energia registrada é a emitida, sendo que quanto mais alta a temperatura do alvo, mais ele emite. Deste modo, quanto maior o ND de cada cela, mais alta é sua temperatura real, basta aplicar a seguinte equação:

Seqüência de Conversões: $ND \rightarrow R \rightarrow T_{\text{brilho}} \rightarrow T_{\text{real}}$

O efeito do ângulo de elevação solar é também muito significativo, uma vez que pode variar de 30 a 60 graus aqui nos trópicos, como é o exemplo do Vale do Paraíba. O seno deste ângulo está multiplicado a radiância registrada pelos sistemas sensores a bordo de satélites, alterando, em muito o ND. O ângulo de elevação solar é medido partindo-se do chão até encontrar o nadir. Assim, quanto menor o ângulo de elevação solar, mais longa é a trajetória que a luz tem de fazer desde o sol até o alvo e depois até o sistema orbital.

$F = \text{seno } \alpha$ médio das imagens usadas / $\text{seno } \alpha$ de cada data

Correções geométricas

As imagens são geradas em linhas e colunas (sistema matricial). Contudo, para cruzar estas informações com outras em ambiente de SIG, é necessário que estas sejam geo-referenciadas, ou seja, transformar as coordenadas matriciais em coordenadas, planas ou geodésicas (como estão nos mapas cartográficos).

Interpretações de imagens

É incrível o número de “verdades” e de “mentiras” que podem ser contadas através de uma imagem. Assim, a interpretação deve ser baseada no modo como a radiação de cada faixa espectral interage com cada alvo. Para tanto, é necessário:

- conhecer profundamente o alvo ou o fenômeno, objeto de estudo;
- conhecer a radiação eletromagnética registrada pelo sensor utilizado; e
- conhecer os mecanismos de interação alvo/radiação (assinatura espectral).

A interpretação pode ser visual ou computadorizada, mas, em ambos os casos, é crucial que se conheça:

- a assinatura espectral do alvo ou fenômeno;
- os sistemas de processamento de imagens.

Cada objeto reflete de modo diferenciado, gerando diferentes **assinaturas espectrais** nas várias faixas espectrais conhecidas, de acordo com:

- composição mineral ou química;
- tamanho das partículas;
- tamanho das células ou dos espaços intercelulares;
- teor de umidade;
- rugosidade;
- constante dielétrica.

Os três principais alvos da Terra são **água, rochas e vegetação**. A interpretação correta dos dados obtidos por sensoriamento remoto depende da análise do comportamento ou da assinatura espectral de cada alvo em cada faixa do espectro eletromagnético.

2.3.1. Sensoriamento remoto da vegetação

- permite espacializar a cobertura vegetal
- permite quantificar a densidade da cobertura vegetal
- permite identificar algumas variáveis ecofisiológicas
- permite mensurar a ação antrópica sobre a cobertura vegetal

Comportamento espectral da vegetação no Visível e Infravermelho Refletido:

O comportamento espectral da vegetação se deve às propriedades físicas de seus componentes:

- na faixa do visível (VIS) → se deve aos pigmentos contidos nas folhas;
- na faixa do infravermelho próximo (IVP) → se deve ao arranjo espacial do mesofilo;
- na faixa do infravermelho médio (IVM) → se deve às moléculas de água presentes no mesofilo;
- no termal → depende da temperatura do corpo; e
- nas microondas → rugosidade do dossel e o teor de água das folhas.

Interação da REM e a FOLHA

No visível e infravermelho:

no VIS → absorção pelos pigmentos dos cloroplastos

no IVP → retroespalhamento resultante da variação de coeficientes de refração entre os espaços intercelulares e os espaços aéreos do mesofilo

no IVM → absorção pelas moléculas de H₂O presentes principalmente nas células da folhas

A **Figura 2.2** mostra, novamente, as curvas padrão de comportamento espectral da água límpida, em vinho, da vegetação arbórea, em roxo, e do solo arenoso, em azul. São apresentados, também, os componentes vegetais responsáveis pelo comportamento da vegetação: os pigmentos absorvendo fortemente no visível, a estrutura do mesofilo refletindo fortemente no infravermelho próximo e a água absorvendo fortemente na faixa do infravermelho médio.

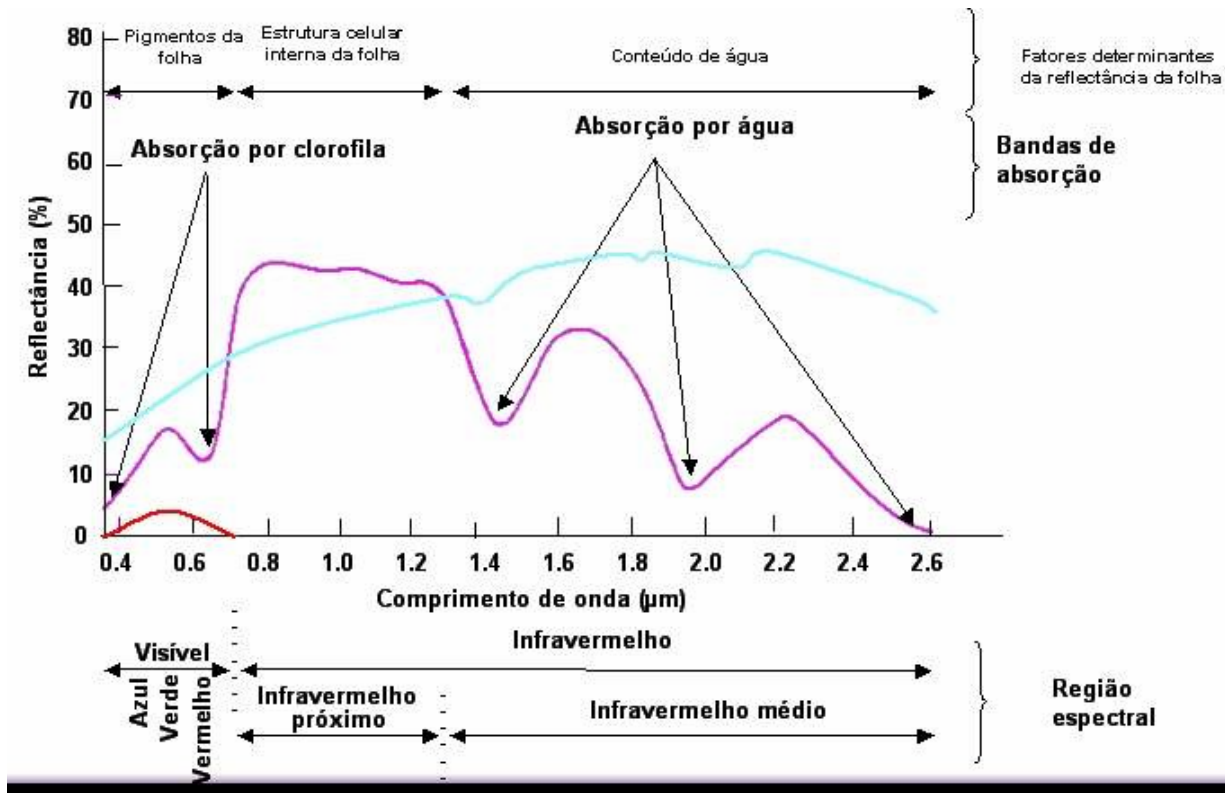


Figura 2.2 – Comportamento espectral dos três grandes alvos da Terra juntamente com a subdivisão do espectro eletromagnético examinado e as indicações de que parte da planta é responsável pela assinatura em cada faixa. (Adaptado de Hoffer, 1978)

O gráfico da **Figura 2.3** traz várias curvas das quais se destacam aquela em vermelho, que é comportamento espectral de uma área com zero de biomassa verde e zero de cobertura vegetal, e a em azul-marinho, que é o comportamento espectral de uma vegetação com biomassa de 1650 Kg/ha e com 53% de cobertura vegetal.

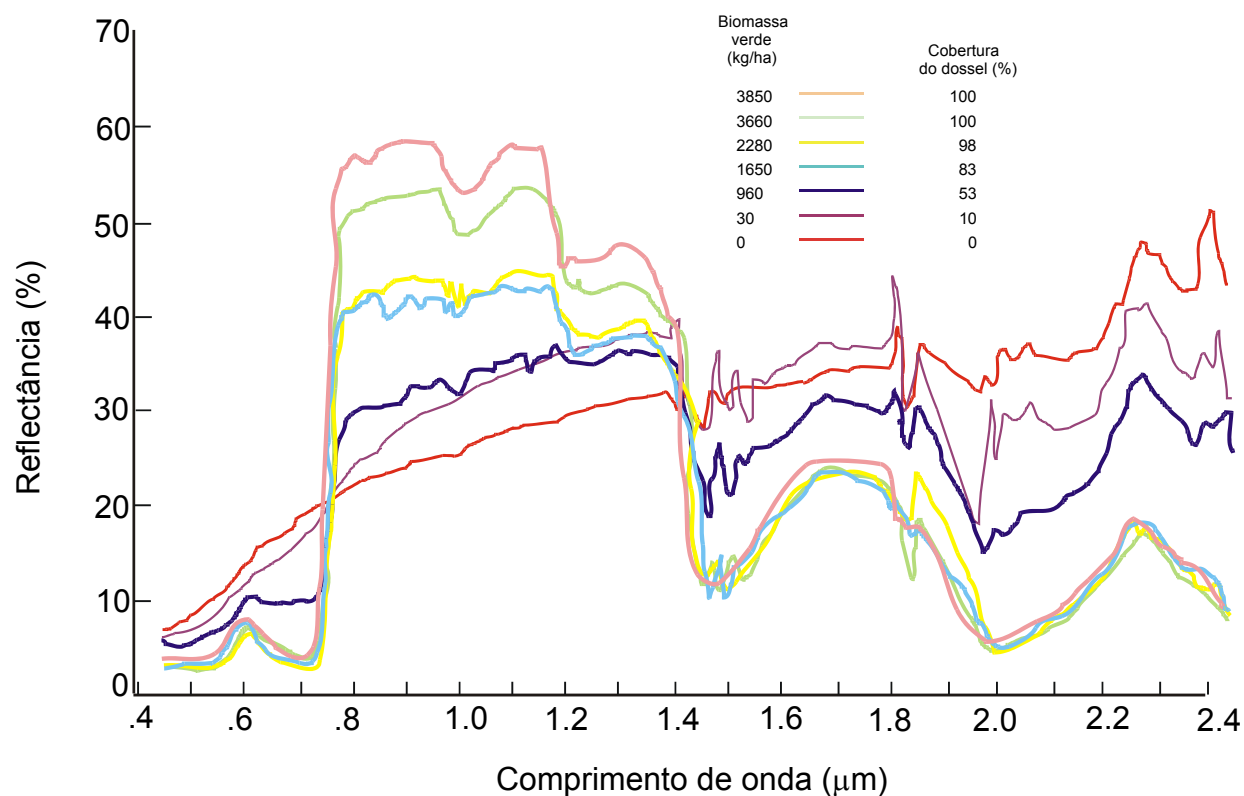


Figura 2.3 – Comportamento espectral de diferentes coberturas vegetais com diferentes quantidades de biomassa verde (Adaptado de Jensen, J.R., 2000).

As curvas em verde claro e rosa apresentam respectivamente, o comportamento espectral de uma vegetação com biomassa verde de 3660 kg/ha e 3850 kg/há, sendo que, em ambos os casos, a cobertura vegetal é de 100%. Notem o comportamento antagônico na faixa do vermelho (0,6 a 0,7 μm), o infravermelho próximo (0,8 a 1,1 μm) e o infravermelho médio (1,2 a 2,2 μm). Tomando-se a curva em azul-marinho, nota-se com clareza uma inversão de comportamento do vermelho ao infravermelho próximo e do infravermelho próximo ao médio. É importante lembrar que, acima de uma certa biomassa verde, não se percebem mais diferenças no vermelho e infravermelho médio, restando ao infravermelho próximo a tarefa de diferenciar esta variável, embora também ocorra saturação à medida que aumenta o número de camadas de folhas.

No caso da cobertura vegetal, três fatores condicionam a correta interpretação de imagens obtidas por sensores remotos orbitais: sombra, substrato e a sazonalidade. A sombra, seja causada por nuvens, seja pelo dossel ou pelo relevo, mistura a assinatura devida à vegetação com a assinatura devida à sombra. O substrato, que pode ser solo, água ou ambos, também mistura a assinatura devida à vegetação com a assinatura do substrato. Estes efeitos indesejáveis nem sempre são corrigíveis, restando apenas considerá-los sempre que uma decisão for tomada. Apesar desses agravantes, muitos parâmetros ecológicos resultam do uso do sensoriamento remoto orbital, que compensa estas falhas com uma série de outras vantagens.

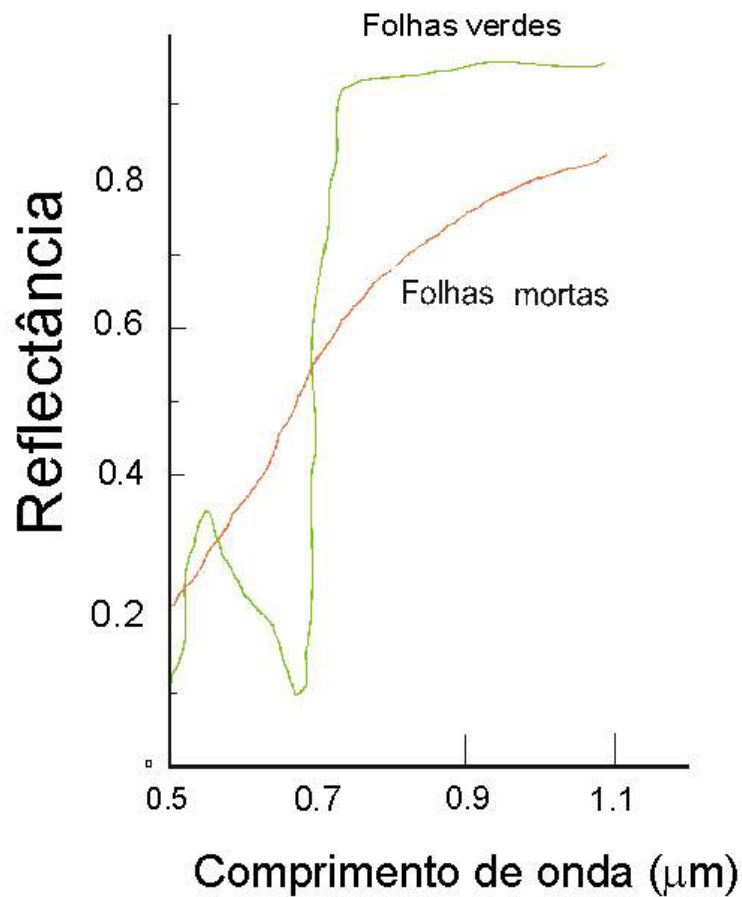


Figura 2.4 – Comportamento espectral de folhas verdes e folhas mortas (Adaptado de Choudhury, 1987)

No gráfico da **Figura 2.4** aparece, em verde, o comportamento espectral de folhas verdes e, em marrom, o comportamento espectral de folhas mortas (marrões), obtidos em laboratório. Note-se que, na faixa do vermelho, as folhas mortas mascaram a resposta das folhas verdes e que somente no infravermelho próximo as folhas verdes se destacam.

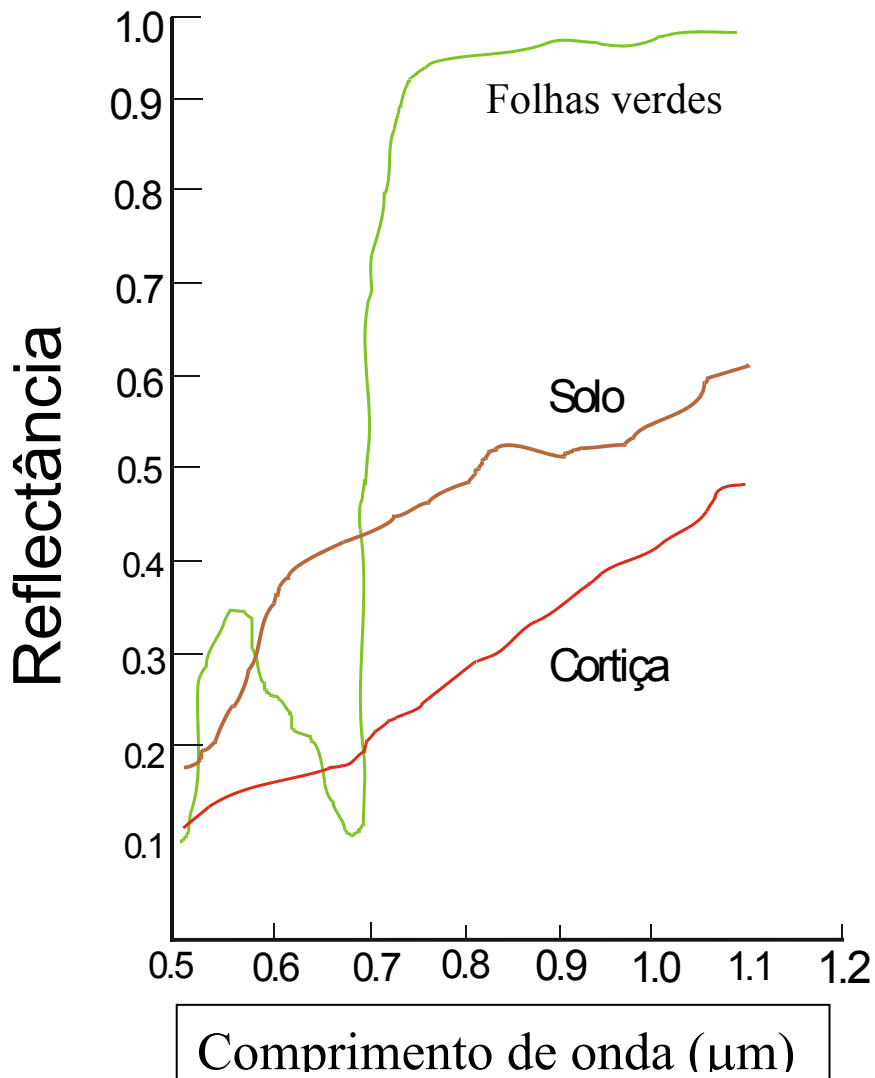


Figura 2.5 – Comportamento espectral de folhas verdes, solo e cortiça. (Adaptado de Choudhury, 1987).

O gráfico da **Figura 2.5** mostra que os comportamentos tanto da cortiça, em vermelho, como o solo, em marrom, apresentam a mesma tendência, ou seja, refletem mais à medida que aumenta o comprimento de onda. A curva em verde, que se refere às folhas verdes, mostra que somente no infravermelho próximo as folhas se destacam do solo e dos troncos e galhos.

Comportamento espectral nas microondas:

banda L e P → penetram o dossel – eco devido aos troncos e galhos;
 banda C e X → refletem da superfície do dossel – eco devido às folhas.

Efeitos sobre a REFLECTÂNCIA:

Fatores que afetam a interação alvo/radiação	Fatores que mascaram a reflectância da vegetação
<ul style="list-style-type: none"> - idade das folhas - outras variáveis fenológicas - arquitetura dos indivíduos - porcentagem de substrato 	<ul style="list-style-type: none"> - Presença de substrato - Efeitos atmosféricos - Efeitos de iluminação - Nuvens e chuvas

A REFLECTÂNCIA guarda uma relação:

- DIRETA com:	- INVERSA com:
<ul style="list-style-type: none"> - Índice de Área Foliar - Fitomassa foliar verde 	<ul style="list-style-type: none"> - Pigmentos na célula - Teor de água na célula

2.3.2. Sensoriamento remoto da água

- espacialização dos corpos d'água
- quantificação da qualidade da água
- identificação de particulados em suspensão
- identificação e quantificação de macrófitas aquáticas
- quantificação de áreas de inundação
- teor de umidade dos corpos

Comportamento espectral da água

Em todas as faixas do espectro eletromagnético - do visível ao infravermelho médio e às microondas - a água absorve fortemente.

Somente os elementos capazes de alterar as propriedades ópticas da água poderão ser monitorados por sensores remotos.

Os particulados em suspensão são capazes de alterar estas propriedades modificando a turbidez da água e provocando um espalhamento da radiação incidente, que resulta em **radiação emergente** do corpo d'água, nas faixas do **visível (VIS)**. Nessas faixas, a turbidez depende:

- do tipo,
- da quantidade e

- da qualidade do particulado em suspensão.

A Radiação emergente é o resultado do espalhamento da radiação na zona eufótica. Vale, portanto, a lei de Beer, que diz que a irradiância decresce com a profundidade exponencialmente:

$$I_z = I_0 \exp^{-Kz}$$

z = energia no limite máximo da zona eufótica

o = energia ao nível da lâmina d'água

K = coeficiente de atenuação vertical (> K > atenuação)

TIPOS DE PARTICULADOS

- Mineral (silte e argila)
- Plâncton (zoo e fitoplâncton)
- dissolvidos (substâncias húmicas)

O particulado mineral provoca forte espalhamento da radiação do Vermelho.

O Plâncton provoca um espalhamento médio nas faixas do VIS dependendo do pigmento do zoo ou fitoplâncton.

As substâncias dissolvidas capazes de escurecer a água aumentam a capacidade de absorção em todas as faixas do VIS.

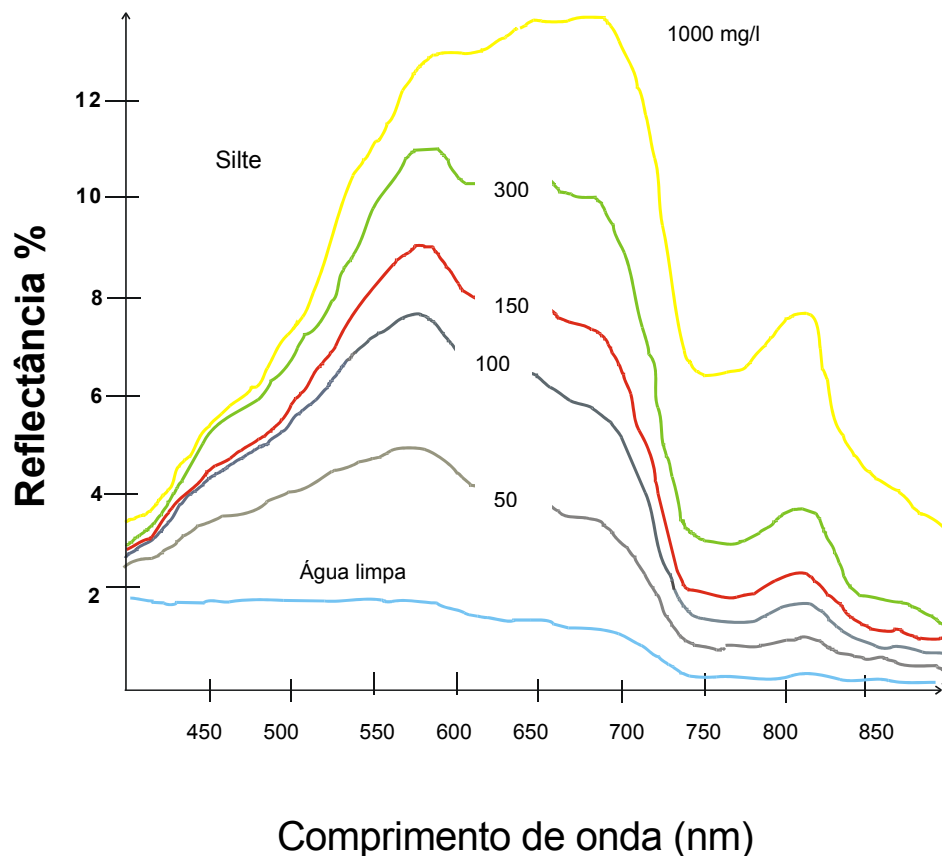


Figura 2.6 – Comportamento espectral de águas com diferentes concentrações de silte em suspensão (Adaptado de Elachi, 1987)

O gráfico da **Figura 2.6**, apresenta no eixo X os comprimentos de ondas em nanômetros (nm) e no eixo Y a porcentagem de reflectância. A curva em azul claro corresponde ao comportamento espectral água limpa ou transparente, no visível; a curva cinza corresponde a uma água com 50 mg/l de silte; a curva vermelha, com 150 mg/l de silte e a amarela, com 1000 mg/l. Note-se que à medida que a concentração de silte aumenta, também cresce a porcentagem de reflectância da água, na faixa que vai desde o verde até o vermelho (500 a 680 nm).

Tanto no IVP, no IVM como nas Microondas observa-se uma fortíssima absorção da água. A profundidade em que o **Disco de Secchi** desaparece na coluna d'água é diretamente proporcional ao espalhamento da luz vermelha. O **Índice de Eutrofização** de Carlson pode ser calculado utilizando a radiância registrada no Vermelho da seguinte maneira:

$$IEC = 10 [6 - (\ln TM-3)/(\ln 2)]$$

Este índice é diretamente proporcional ao estado trófico relacionado com a turbidez da água. A escala do índice é de 0 a 100, sendo que 50 corresponde ao estado mesotrófico. À medida que se aproxima de zero, vai ficando oligotrófico, e à medida que se aproxima de 100, vai ficando eutrófico.

As **macrófitas submersas** podem ser detectadas nas respostas espectrais do VIS, dependendo do pigmento predominante.

As **macrófitas emersas** podem ser detectadas utilizando os mesmos métodos utilizados para vegetação terrestre.

As **Algas**, por sua vez, refletem no VIS de acordo com seus pigmentos predominantes, que estão relacionados com sua posição na zona eufótica.

Em caso de **misturas vegetação - água** (mangue e zonas de inundação), deve-se utilizar a faixa espectral do IVP para distinguir o que é água do que não é água.

As imagens do IVM (infravermelho médio) são usadas para mapear a **umidade do ambiente**, bem como o **turgor da vegetação**. Nas imagens de Radar, todas as faixas são excelentes na identificação de corpos d'água, assim como da umidade do solo.

2.3.3. Sensoriamento remoto do homem

Até o momento, o que se consegue “ver” por sensoriamento remoto, seja ele aéreo ou orbital, são as marcas deixadas pelo homem por onde passa. Suas obras e o modo como altera o ambiente têm sido bastante documentados e quantificados por vários autores (Brondizio *et al.*, 1994). Assim, o que se pode estudar sobre o homem via sensoriamento remoto é o uso e a ocupação que ele faz da terra.

Na década de 90, entretanto, com a liberação do GPS (do inglês global position system) para fins civis e o aperfeiçoamento do geo-referenciamento de imagens, tornou-se possível estudar as marcas, não só do homem moderno, mas também de populações tradicionais. A equipe do antropólogo Emílio Moran já acompanha algumas comunidades da Amazônia através de sensoriamento remoto orbital, há mais de 20 anos (Moran *et al.*, 1994).

As populações humanas modernas abrem estradas, mudam curso de rios, constroem cidades, removem a vegetação natural, alteram a biodiversidade, lavram a terra e domesticam animais, quase sempre em grandes proporções. Já

as populações tradicionais, por seu pequeno número, fazem tudo isso, só que em pequeníssimas proporções.

A forte tendência à urbanização, observada nas últimas décadas, tem requerido cada vez mais que a lavra da terra seja intensiva, com fortes investimentos tecnológicos. Com isso, os estragos à natureza também são concentrados. A globalização e a ganância contribuíram muito para a homogeneização do uso e da ocupação da terra e para as grandes transformações da superfície da terra.

Através de sensoriamento remoto e geoprocessamento, inúmeras das variáveis de uso e ocupação da terra passaram a ser mensuradas, com um grau de certeza bastante bom. Além de identificar as marcas do homem pelas formas retilíneas e pelos corpos d'água, tornou-se possível também prever o volume das safras, nos casos de grandes monoculturas, em áreas de pouco relevo. Os índices de vegetação desenvolvidos na década de 70 foram uma tentativa de se fazer previsão de safras com precisão (Tucker, 1979; Tucker & Sellers, 1986).

Mais recentemente, uma área de pesquisa da área de saúde pública, conhecida como Epidemiologia Paisagística, passou a utilizar sensoriamento remoto e geoprocessamento para quantificar suas variáveis, aumentar a certeza de suas conclusões e até para modelar o contato entre homem e vetores de doenças e entre homem e potógenos, dependentes do ambiente. Desde Foratini (1962) que se associam variáveis ambientais com vetores e/ou patógenos. Hoje, contudo, é possível demarcar o raio de ação de um vetor ou de um procedimento sanitário e se avaliar o risco de contato com o mesmo ou a eficiência do tal procedimento. O uso de GPS e de imagens geo-referenciadas já é comum na literatura do Brasil e do mundo (Becker *et al.*, 1994, 1997 e 2000; Bitencourt *et al.* 1999; Mucci, 2000).

Com o advento do geoprocessamento, a ordenação territorial ficou mais fácil e mais precisa. Os zoneamentos, indispensáveis à ordenação territorial e a qualquer tomada de decisão, agora podem ser feitos, combinando-se informações oriundas de diferentes fontes e escalas (Bitencourt *et al.*, 1997; Bitencourt e Pivello, 1998; Pivello *et al.* 1999).

3. GEOPROCESSAMENTO E A ECOLOGIA

O **Geoprocessamento** é o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais georeferenciadas. É também a área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico. É composto de vários sistemas:

- sistemas de digitalização;
- sistemas de conversão de dados;
- sistemas de modelagem digital de terreno;

sistemas de processamento de imagens; e
sistemas geográficos de informações.

Tipos de dados em Geoprocessamento:

- a) **Mapas temáticos:** - Descrevem a distribuição espacial de um mesmo tema variando dentro de um certo intervalo: hipsométrico, clinográfico, pedológico, aptidão agrícola.
- b) **Mapas cadastrais:** - Descrevem os elementos do espaço geográfico que possuem outros atributos além de sua posição geográfica: lotes de uma cidade, nome do dono, valor venal, valor do IPTU - (banco de dados relacionado com polígonos).
- c) **Redes:** - Sistema de endereçamento 1-D (uma dimensão) colocado no espaço 2-D (duas dimensões: X e Y). Os atributos dos arcos incluem o sentido do fluxo e os atributos dos nós, sua impedância ou custo para percorrer. A topologia armazena informações sobre recursos que fluem entre localizações geográficas distintas. - (banco de dados relacionado com vetores: pontos e linhas) .
- d) **Imagens de sensoriamento remoto geo-referenciadas** – São matrizes, em que cada elemento de imagem (ou cela) tem um número digital proporcional à energia eletromagnética, refletida ou emitida pelos materiais contidos numa determinada área da superfície terrestre.
- e) **Modelos numéricos do terreno ou MNT** – imagens que representam de forma contínua grandezas espaciais do tipo altimetria e batimetria. É o modelo matemático que reproduz uma superfície real, agrupando amostras, de modo que todo o conjunto simule, de modo ideal, o comportamento da superfície original. O sistema é composto da posição geográfica (x e y) e da altitude (z). Apesar de ter três posições relativas (x; y; z), este sistema é dito como sendo 2,5D, pois não chega a ser um 3D (três dimensões) ideal e é mais que 2D (duas dimensões), que é o plano.

3.1 Sistemas de digitalização

Consiste na transferência de informações cartográficas de mapas convencionais para o formato digital, por intermédio de mesa digitalizadora. O que se transfere são pontos, linhas e polígonos (áreas) de fontes cartográficas (cartas topográficas, hidrográficas) e temáticas (mapa de solo, geológico, de vegetação) bem como de decalques, limites de áreas e de classes, resultantes de fotointerpretação e de levantamentos de campo. Nesse processo, o ponto ganha

os atributos de “posição geográfica” (x;y). As linhas, que são compostas de pontos unidos formando arcos e nós, ganham também os atributos “direção e sentido”. Desse modo é possível se saber onde uma linha começa e onde termina.

Os GPS, ou *Global Position Systems*, são equipamentos de geoprocessamento que fornecem a posição geográfica de um dado ponto no espaço em coordenadas geodésicas (lat.;long.) ou plana (X;Y). Com estes pontos de referência, é possível digitalizar no campo a posição de uma dada informação de campo e transferi-la para uma base cartográfica digital. Se inseridos propriamente em um programa de geoprocessamento, torna-se possível unir estes pontos, formando linhas ou polígonos, permitindo ao usuário medir distância, perímetro e área.

3.2 Sistemas de conversão de dados

A representação computacional é feita tanto na forma vetorial como matricial:

- a) **Vetorial** – pontos, linhas (pontos unidos) e polígonos ou áreas (linhas unidas) representados em coordenadas cartesianas (x,y). Topologia - define as relações invariantes da rotação – arco dá o sentido e os nós a direção - translação e escala entre as entidades gráficas no mapa (adjacência, proximidade e pertinência);
- b) **Matricial** – informação organizada em matriz, em cujas celas está armazenado o atributo do tema, representadas em coordenadas matriciais (linha, coluna). O limite de detalhamento depende do tamanho das celas ou resolução espacial.

Os dados vetoriais e matriciais podem ser convertidos de um sistema para o outro, sempre que esse fato facilitar a manipulação e a apresentação destes dados. Para um computador, as manipulações são facilitadas quando o dado está no formato matricial. Contudo, as correções (edições) e a produção de mapas são grandemente facilitadas quando o dado está na forma de vetor.

3.3 Sistemas de processamento de imagens

O processamento de imagem permite que se conte tanto grandes “verdades” como grandes “mentiras”. Por essa razão, é necessário que o usuário tenha um mínimo de conhecimento sobre o que é uma imagem e qual é o potencial dos sistemas de processamento existentes. Para que seus interpretados ganhem confiabilidade, o usuário deve mostrar que domina os fundamentos físicos, matemáticos e computacionais que estão por trás do sensoriamento remoto e do geoprocessamento.

Os sistemas de processamento de **imagens**³ tratam de qualquer produto matricial ou imagem. A ordem de armazenamento dessas celas é da esquerda para a direita, de cima para baixo. A cela, também chamada de PIXEL (do inglês *pictorial element*), constitui a menor porção da imagem, que corresponde a uma certa área no terreno dependendo da resolução espacial do sistema imageador.

Em imagens de satélite, as informações contidas em cada cela ou pixel são números digitais (ND) que podem ter diferentes resoluções radiométricas. Este ND é proporcional à energia eletromagnética proveniente do terreno, que é então registrada em cada pixel. Na orientação chamada matricial, diz-se que o eixo X é o eixo C (colunas), e o eixo Y é o eixo L (linha), e a origem, no canto esquerdo superior.

De forma geral, os sistemas de processamento de imagens são responsáveis por vários conjuntos de tarefas:

- a) **Restauração** – Reamostragem (georeferenciamento e registro), correções radiométricas (conversão ND em R) e atmosféricas (espalhamento).
- b) **Realce** – Composição colorida, contrastes, filtros (ruídos). Obs.: não utilizar imagem com realce em análises quantitativas, pois os valores dos NDs estão alterados.
- c) **Transformações** – Análise de Principais Componentes, conversão de Radiância em reflectância ou temperatura de brilho, índices (o de vegetação é o mais comum), imagem MNT em imagem declividade ou orientação de vertentes.
- d) **Classificadores** – agrupamento por métodos determinísticos e por métodos estatísticos, com ou sem a intervenção do intérprete (supervisionados e não supervisionados).

As imagens multiespectrais (várias faixas do espectro eletromagnético) são processadas segundo os princípios computacionais disponíveis. Contudo, sua interpretação é feita segundo os princípios do sensoriamento remoto.

Dentre os processamentos de imagens, podemos subdividir em dois grandes grupos: as análises qualitativas e as quantitativas. As qualitativas são aquelas que não podem ser relacionadas com grandezas físicas, químicas ou biológicas. Estes produtos não podem ser comparados de uma época para outra nem de um lugar para outro. Contudo, são úteis em alguns tipos de tomada de decisão. As quantitativas são aquelas que guardam uma relação direta com algumas das grandezas acima mencionadas. Os resultados de análises quantitativas podem ser comparados de uma época para outra e de um lugar para outro.

³ consiste em pequenas e uniformes celas arranjadas em uma grade uniforme.

ANÁLISE QUALITATIVA

O processamento mais comum é o realce - aumento ou diminuição de contraste - conforme o caso. Estes procedimentos alteram o ND de forma irreversível, impedindo que esta imagem seja utilizada posteriormente em análises qualitativas.

Um dos procedimentos mais freqüentes feito com imagens multiespectrais é a composição colorida. Estes procedimentos facilitam a interpretação computadorizada, faz as correções atmosféricas mínimas, além de melhorar o contraste. O procedimento consiste em combinar imagens de faixas espectrais produzindo uma imagem sintética com a combinação de cores que melhor agrada o intérprete.

Com este procedimento, converte-se cada ND da imagem nos tons de uma das três cores primárias (vermelho = R, verde = G e azul = B) escolhidas. Se a imagem a ser convertida tiver resolução radiométrica de 8 bits, haverá 256 (ND de 0 a 255) tons da cor primária escolhida em cada um dos três canais:

		R	G	B	Nova
Canal do Vermelho	=	imagem 255,	0,	0	256 tons de R
Canal do Verde	=	0,	255,	0	256 tons de G
Canal do Azul	=	0,	0,	255	256 tons de B

Analogamente, as cores secundárias, que são formadas de duas cores primárias, serão

Cor resultante

Cian	= G + B = 0,	255,	255	
Magenta	= R + B = 255,	0,	255	
Amarelo	= R + G = 255,	255,	0	
Preto	= soma das secundárias	= 0,	0,	0
Branco	= soma das primárias	= 255,	255,	255

As composições coloridas podem ser:

a) Composição colorida imitando cor natural ou falsa-cor. Valendo-se das leis colorimétricas, atribui-se artificialmente uma das três cores primárias (azul, verde e vermelho) a cada uma das imagens espectrais de interesse. Se usarmos os sistema TM-Landsat e atribuirmos:

Azul ao TM-2, **Verde** ao TM-3 e **Vermelho** ao TM-4,

teremos uma nova imagem semelhante a uma fotografia **infravermelho falsa-cor** em que quanto mais denso o vermelho, mais densa é a vegetação viva. Se atribuirmos:

Azul ao TM-2, **Verde** ao TM-4 e **Vermelho** ao TM-3,

teremos uma imagem similar a uma fotografia **colorida real**, porém enfatizando as áreas vegetadas que ficaram ainda mais verdes. Usa-se também a composição **colorida natural** em que:

Azul ao TM-3, **Verde** ao TM-4 e **Vermelho** ao TM-5.

ANÁLISE QUANTITATIVA

Um processamento é dito quantitativo quando resulta em uma imagem que pode ser mensurada de alguma maneira. As classificações transformam os NDs em classes que podem ter medidas as suas áreas e perímetros.

a) Classificações de imagens

Monoespectral - uma única faixa espectral

Multiespectral – várias faixas espectrais

- Critério de classificação estatístico ou determinístico
- Automático ou supervisionado

O principal objetivo desta operação é gerar mapas temáticos, além de agilizar a análise daquilo que, sem estes algoritmos, faria-se visualmente. Deste modo, por meios refinados ou grosseiros, reúnem-se *pixels* com assinaturas espectrais semelhantes em classes.

b) Álgebra de imagens

Não existem limites para álgebra de imagens, só precisa haver fundamentação. A álgebra mais comum com imagens de satélite resulta em combinações lineares ou não, de imagens não correlatas gerando índices. Os índices mais usados são os de vegetação, que relacionam basicamente as assinaturas espectrais do vermelho (**R**) e do infravermelho próximo (**IVP**). Em uma revisão feita em 1997, Thiam & Eastman identificaram 21 índices de vegetação. Além desses, 3 outros índices estão aparecendo na literatura, resultado de variações dos índices já consagrados, visando resolver as incertezas inerentes do sensoriamento remoto. Para mais informações sobre todos os índices de vegetação, leia o item **“Fundamentação e Revisão dos Índice de Vegetação”**.

Existem muitos índices de vegetação, cada um adaptado a peculiaridades da vegetação (xerófita, ombrófita, em substrato árido, alagado ou argiloso).

Estes índices, assim como todos os que vieram depois, são **diretamente proporcionais a fitomassa foliar viva**, segundo a premissa de que o parâmetro físico que caracteriza a fitomassa foliar é a clorofila e a estrutura do mesófilo. Conforme a literatura, o comportamento espectral da vegetação na faixa do vermelho é devido à clorofila, sendo que quanto mais houver deste pigmento, menos a vegetação reflete (menor o ND, a radiância e a reflectância). O comportamento espectral da vegetação na faixa do IVP é devido à estrutura foliar, sendo que, quanto mais folhas, mais a vegetação reflete nesta faixa. Desses antagonismos, desenvolveram-se inúmeros índices, explorando ora a diferença, ora a razão entre Vermelho e IVP.

c) Rotação de imagens.

A Análise de Principais Componentes – que busca o eixo de dispersão com a maior variância possível – resulta na obtenção de uma nova imagem separando o brilho do contraste. Com este procedimento, é possível fazer uma análise multiespectral (buscando uma assinatura espectral mais pura) ou multitemporal (buscando uma variação temporal de uma dada faixa espectral).

Fundamentação e Revisão dos Índices de Vegetação

Os índices de vegetação são modelos numéricos, lineares ou não, que guardam uma relação direta e satisfatória com a fitomassa foliar verde (Tucker, 1979; Gamon *et al.*, 1995). As imagens índices de vegetação são derivadas de imagens resultantes das respostas espectrais nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo. A resposta espectral da vegetação resulta basicamente da reflectância da cobertura vegetal que depende das propriedades estruturais e ópticas da vegetação e do solo (Myneni *et al.*, 1995). Segundo Gates *et al.* (1965), a reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm) reduz com o aumento do índice de área foliar, enquanto na faixa do infravermelho próximo (700-1100 nm) é diretamente proporcional ao aumento do índice de área foliar.

Thiam e Eastman (1997) revisaram os índices de vegetação constantes da literatura e detectaram 21 índices compreendido em dois grupos principais. Um deles é baseado no contraste entre a resposta espectral padrão de vegetação, nas faixas do vermelho e infravermelho próximo, e o outro é baseado na distância entre a linha de vegetação e a linha do solo. Há também um terceiro grupo, baseado na transformação ortogonal de imagens multiespectrais.

O primeiro grupo de índices de vegetação data de 1974 e são: RATIO (razão) **IV = IVP/vermelho** de Pearson & Miller (1972) e o NDVI (*normalized difference vegetation index*) **NDVI = (IVP - R) / (IVP + R)** de Rose *et alii* (1973), ambos com a proposta de reduzir os efeitos multiplicativos da resposta espectral nas duas faixas espectrais acima mencionadas.

O NDVI é o índice mais usado até hoje, reduz parcialmente o efeito topográfico, e apresenta uma escala de medida linear entre -1 e 1, sendo que o valor zero se refere aos pixels não vegetados. No ano seguinte, outro índice é apresentado ao meio científico, resultado da primeira variação do NDVI, que é o TVI (*transformed vegetation index*), que visava eliminar os valores negativos do NDVI.

Em 1984, é apresentada uma modificação do TVI, que é o CTVI (*corrected transformed vegetation index*), que superestima a vegetação verde, sendo mais indicado para regiões com baixa cobertura vegetal. Em 1997, é apresentado um novo índice derivado do TVI, o TTVI (*Thiam's transformed vegetation index*), também indicado para regiões com baixa cobertura vegetal. Dentre os índices derivados do RATIO, o RVI (*ratio vegetatio index*), apresentado em 1977, baseia-se no inverso do RATIO, característico por minimizar os efeitos topográficos, de iluminação e atmosféricos. Em 1991, surge a primeira modificação do RVI que é o NRVI (*normalized ratio vegetation index*), que se mostrou mais eficiente na redução dos efeitos topográficos, de iluminação e efeitos atmosféricos que o próprio NDVI.

Em 1977, é anunciado o primeiro índice do segundo grupo, o PVI (*perpendicular vegetation index*), que se propunha a eliminar o efeito do solo exposto nos pixels mistos. Para tanto, é necessário que haja uma fonte de solo exposto do local, para que se alimente o índice. Em 1984, surgiu o PVI1, em 1991, o PVI2 e em 1994, o PVI3, todos com o objetivo de discernir água da vegetação, que se confunde no índice original. Também em 1977, um outro índice é apresentado à comunidade científica, também visando eliminar o efeito do solo através de uma constante associada à assinatura espectral do solo no infravermelho próximo, o DVI (*difference vegetation index*). Em 1978, foi sugerido o AVI (*Ashburn vegetation index*), indicando que, multiplicando por 2 o valor espectral do infravermelho próximo, o efeito do solo na imagem seria compensado. Deste índice veio a variação SAVI (*soil-adjusted vegetation index*), em 1988, que pretendia minimizar o efeito do solo na assinatura espectral da vegetação, incorporando um fator de correção ao NDVI. Este fator seria zero se valor SAVI = NDVI e seria 100 se valor SAVI se aproximar do valor PVI. Ray (1995) indica o SAVI como um dos melhores índices para correção da interferência do solo na resposta espectral. Em 1989, esse índice foi modificado para TSAVI1, especialmente para regiões semi-áridas.

Em 1991, o mesmo índice foi reajustado para solos com alta reflectância, dando origem ao índice TSAVI2. Em 1994, outra modificação foi sugerida para o TSVI1, utilizado para solos com alta reflectância, o MSAVI (*modified soil-adjusted vegetation index*) 1 e 2. Em 1996, é apresentado o WDV (*weighted difference vegetation index*) com a proposta de dar pesos distintos a cada tipo de solo. Bannari *et al.* (1995, *apud* McDonald *et al.*, 1998) concluiu que o NDVI sofreu uma influência significativa dos efeitos do solo e da atmosfera, enquanto para o PVI e SAVI estas interferências foram em menor grau.

Elvidge & Lyon (1985, *apud* Richardson & Everitt, 1992) verificaram que o PVI produzia um bom resultado para locais áridos e semi-áridos, regiões onde a

cobertura da vegetação é escassa e os índices de vegetação baseados na razão não são sensíveis.

Os aerossóis atmosféricos (fumaça, poeira e partículas de poluição) espalham a radiação solar antes que esta alcance a superfície da terra e absorve-a antes de ela alcançar o sistema sensor em órbita (Kaufman & Tanré, 1996). Tem um significativo efeito sobre todos os índices de vegetação, reduzindo o contraste entre a reflectância do Vermelho e do Infravermelho próximo, reduzindo os valores dos índices tanto naqueles baseados na diferença como naqueles baseados na razão. Segundo Kaufman & Tanré, 1992, os aerossóis atmosféricos influenciam os Ivs com efeito aditivo e efeito multiplicativo. O efeito aditivo pode ser removido de várias maneiras (Chavez & MacKinnon, 1994; Kaufman & Tanré 1992; Myneri & Asrar, 1993). O efeito multiplicativo é mais complicado remover.

Há basicamente duas maneiras de minimizar os efeitos atmosféricos sobre os Ivs. O primeiro é corrigindo a reflectância sobre o que Mesquita Jr & Bitencourt (1997) revisaram longamente. O segundo é usando o conhecimento de que o azul espalha muito mais que o vermelho. Quando a concentração de aerossóis é alta, a diferença entre estas duas faixas também é alta. Esta informação pode ser usada para estabilizar o valor dos IVs. Hoje existem, no mínimo, dois índices com estas propriedades: ARVI e EVI.

O ARVI foi desenvolvido por Kaufman & Tanré (1992) e visa minimizar as variações induzidas pela atmosfera sobre o IV em cada *pixel*. Utiliza a diferença de radiância entre o azul e o vermelho para corrigir o vermelho e estabilizar o índice em relação às variações espaciais e temporais do conteúdo de aerossóis na atmosfera. Este conceito pode também ser incorporado ao índice SAVI (Huete, 1988), gerando um índice resistente aos efeitos tanto do solo como da atmosfera que Kaufman & Tanré (1992) chamou de SARVI (*soil and atmospherically resistant vegetation index*). Huete & Liu (1994), contudo, constataram que a remoção do fator solo aumentava o fator atmosférico. Assim, desenvolveram o EVI (Huete *et al.*, 1997), que é um NDVI modificado com ajuste de solo (fator L) e dois coeficientes (C1 e C2) que descrevem o uso do azul para corrigir o vermelho. Empiricamente, os autores encontram os seguintes valores para: C1 = 6,0, C2 = 7,5 e L = 1,0.

Diante do exposto, é necessário salientar que muitas pesquisas ainda deverão ser feitas para que se substitua o NDVI, já consagrado pelo EVI, embora seus proponentes sejam altamente respeitados pela comunidade científica.

No Brasil, Bitencourt-Pereira (1986) e Santos (1988) procuraram calibrar a resposta espectral de fisionomias de cerrado através de índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto orbital. O primeiro autor trabalhou com campo cerrado e, o segundo, com cerradão, ambos utilizando o TVI. Este autor fez também a calibração dos dados de fitomassa foliar com radiometria de campo corroborando os resultados encontrados com imagens de satélite. O segundo autor buscou a calibração do cerradão com o TVI obtido por imagens de satélite.

3.4 Sistema modelagem digital do terreno

Este sistema é responsável pela construção do modelo numérico do terreno (MNT), que resulta da digitalização de curvas de nível (mapas topográficos) ou de pontos altimétricos.

A imagem MNT pode ter sua superfície analisada, com o auxílio de algoritmos apropriados, e gerar imagens temáticas do tipo: hipsométricas (classes de altitude), clinográficas (classes de declividade), de orientação de vertentes (classes segundo a rosa dos ventos) e de sombreamento (classes de sombra, segundo o azimute).

Além dessas análises complexas acima mencionadas, permite também a reconstrução do ambiente físico em três dimensões. Estas informações ampliam sobremaneira o espectro de análise dos padrões estruturais e funcionais de ecossistemas, numa escala de tempo e de espaço.

O MNT também tem sido apontado para melhorar informações obtidas por sensoriamento. Justice *et al.* (1980) somou imagem índice de vegetação com imagem MNT minimizando o efeito da topografia nas classes de vegetação.

3.5 Sistemas de Informações Geográficas ou SIG

Nos SIGs clássicos, fazia-se a sobreposição de decalques sobre mesa de luz, unindo-se todas as classes dos dois decalques. Ou seja, fazia-se uma simples UNIÃO de classes.

Em ambientes computacionais, onde cada decalque é uma imagem, os SIGs ficaram mais ecléticos, pois outras operações puderam ser acrescentadas. Assim, além da união, que é o mesmo que soma, tornaram-se possíveis todas as operações algébricas de uma imagem com um escalar ou de uma imagem com outra imagem. A multiplicação, por exemplo, revolucionou as análises de imagens pois, sendo uma matriz, a sua multiplicação por outra imagem resulta em uma imagem INTERSECÇÃO, onde são identificadas somente áreas com as classes contidas tanto em uma como em outra imagem.

Os SIGs computacionais constituem-se no meio mais eficiente que se conhece, capazes de combinar dados espaciais oriundos de diferentes fontes e

escalas, a fim de descrever e analisar interações, fazer previsões com modelos e dar suporte para tomada de decisões. Para tanto, estes dados devem estar **georeferenciados**, no mesmo sistema de referência.

Os SIGs podem ser vetoriais ou matriciais e em ambos os casos, apresentam três domínios de aplicação:

- banco de dados relacional
- ferramenta analítica
- tomada de decisão

Como **banco relacional** – quando áreas, linhas ou pontos são relacionados com tabelas onde há informações sobre as respectivas áreas, linhas ou pontos.

Como **ferramenta analítica** – quando permite a aplicação de expressões lógicas e matemáticas entre mapas:

- Expressões matemáticas: + - / * log sin cos tan exp rad
- Expressões lógicas : AND (interseção lógica), OR (união lógica), NOT e XOR:
 - Lógica Booleana: onde falso = 0 e verdadeiro = 1 – apresenta **limites abruptos**. É o modo mais simples e mais conhecido de operar estes mapas (0 ou 1 - binário).
 - Lógica Fuzzy: onde totalmente falso = 0 e totalmente verdadeiro = 1 – apresenta **limite gradual** (de 0 a 1 - real).

Como **suporte para tomada de decisão**, quatro pontos devem ser satisfeitos:

- Identificar qual a decisão a ser tomada ;
- Definir os critérios (fatores e limites) ;
- Definir as regras de decisão ; e
- Estabelecer os objetivos.

Os modelos empíricos são:

Modelos prescritivos – que envolvem a aplicação de mapas obtidos por critérios já consagrados, podendo levar em consideração não apenas os critérios de ordem prática, mas também aspectos científicos, econômicos e sociais.

Ex.: escolher uma área para colocar uma família de macacos em extinção, que permita sua reprodução.

- Mapas com diagnósticos dos recursos bióticos e abióticos
- Mapas com as exigências ecológicas desse macaco

Modelos prognósticos – além dos mapas acima, utilizam-se também mapas de variáveis potenciais.

Ex.: o mesmo, mas com complementos hipotéticos

- mapas diagnósticos;
- mapas das exigências ecológicas;
- mapas dos seus predadores.

Porém, quando os critérios são combinados sob a influência dos objetivos, estes deixam de ser modelos e passam a ser chamados de avaliações (empírico e subjetivo), que podem ser Multi-Critério ou Multi-Objetivo.

Multi-critério – para atingir um objetivo, vários critérios são avaliados

- Combinação linear ponderada (cada fator é multiplicado por um peso e então somado = índice de adequação final);
- Análise de concordância/discordância – não é computacional.

Multi-objetivo – para tomar a melhor decisão, vários objetivos são avaliados

- Objetivos complementares – hierarquizar;
- Objetivos conflitantes – priorizar - **Incerteza e risco.**

Quando a incerteza está presente, as regras de decisão precisam incorporar modificações que transformem as decisões rígidas em decisões suaves. Para tanto, usa-se probabilidade Bayesiana, teoria de conjuntos Fuzzy, teoria de Dempster-Shafer, por exemplo.

4. CARTOGRAFIA AMBIENTAL

Cartografia = ciência de compor CARTAS ou MAPAS

Carta → do grego

Mapa → do latim (mappa)

O projeto de normas de convenções cartográficas P-NB-63/1961 da ABNT diz que: a) carta é a representação dos aspectos naturais e artificiais da Terra destinados à atividade humana; e b) mapa é a representação dos aspectos geográficos naturais e artificiais da Terra. Hoje, contudo, carta e mapa são usados como sinônimos. No **Quadro 5** aparece um breve relato da história os mapas.

Cartas ou Mapas = são representações em escala, sobre um plano, das estruturas naturais e artificiais que se encontram na superfície da Terra.

Quadro 5

História dos mapas

- 2300 a. C. – Babilônia – mapas sobre tábuas de argila
- 300 a. C. – Grécia – primeiros mapas de toda a Terra – Anaximandro de

Mileto

- 300 a. C. – China – a vasta cultura dos mandarins deram origem aos mapas de grande precisão
- 90 a 150 d. C. – Egito – Claudio Ptolomeu redimensionou a ciência geográfica – publicou um Guia Geográfico – *mappa mundi* - recuperado no século XV
- Idade Média – os árabes ampliaram os conhecimentos greco-romanos, lançaram as bases da geografia moderna (latitude e longitude)
- Sec. XI – Al Idrisi – liderou um estudo bibliográfico e de campo, com levantamentos geográficos do mundo todo, que serviu de referência por mais de 500 anos
- Sec. XV e XVI – floresceu em todo o mundo, a necessidade de se fixar um sistema de referência
- 1569 – Gerhard Kremer (Gerhardus Mercator) propôs uma projeção que permitisse calcular trajetórias retilíneas – cilindro tangenciando a linha do equador – Projeção Mercator – UTM (Universal Transverse Mercator)
- Sec. XVIII – começam os levantamentos topográficos
- Sec. XX – algumas partes do mundo seguiam sem mapas até a II Guerra Mundial – liberação, para fins civis, das tecnologias de sensoriamento remoto aéreo, inicialmente, e, depois, orbital - vastas áreas puderam então ser mapeadas.

Classificação geral dos mapas ou cartas:

1. Mapa temático – com um fim particular (geológico, de vegetação, etc...)
2. Mapa topográfico – reproduz os detalhes naturais e artificiais da superfície terrestre de forma mensurável. Apresenta curvas de nível com cotas medidas a partir do nível do mar.

Para compor um mapa, é preciso alguns conhecimentos cartográficos básicos:

- a) Localização geográfica - Depende de pontos de referência
- b) Sistema Geodésico
 - datum vertical ou altimétrico (marégrafos de Imbituba - SC, ou Torres – RS)
 - datum horizontal ou planimétrico – (x;y) - (Córrego Alegre - MG ou SAD-69)
- c) Sistema de Coordenadas Geográficas – Latitude e Longitude
 - Meridianos
 - Linha do Equador
 - Paralelos

Longitude = é a distância angular entre o lugar e o meridiano de origem, contada sobre um plano paralelo ao equador; e

Latitude = é a distância angular entre o lugar e o plano do equador, contada sobre o plano do meridiano que passa no lugar.

Sistema de Coordenadas Planas ou cartesianas – um eixo horizontal X e um eixo vertical Y, dentro de uma dada projeção.

Projeções

Todo mapa é uma representação aproximada da superfície terrestre. Para compor um mapa, é preciso um método que estabeleça uma relação entre os pontos da superfície da Terra e seus correspondentes planos de projeção no mapa. As projeções cartográficas são, entre outras :

- Plana – plano tangente ou secante a um ponto na superfície
 - Cônica – cone que envolve a Terra (tangente ou secante)
 - Cilíndrica – cilindro envolvendo a Terra (tangente ou secante)
- Projeção de Mercator (UTM – Universal Transverse Mercator)

b) Escala:

- Escala Pequena – igual ou inferior a 1:500.000
- Escala Média – superior a 1:500.000 e inferior a 1:50.000
- Escala Grande – superior a 1:50.000
- Escala Detalhada – superior a 1:10.000

Com o advento do geoprocessamento, o ecólogo começou a compor os mapas de seu interesse, tarefa antes reservada aos geógrafos. Para compor estes mapas, o biólogo pode agora contar com informações:

- obtidas através de Sensoriamento remoto – de campo, aéreo e orbital.
- obtidas na literatura e transferidas para o formato digital, via digitalização.
- obtidas no campo e referenciadas com GPS (global position system).
- obtidas do MNT (modelo numérico do terreno) – reconstituição da superfície através de técnicas de geoprocessamento.

Informações obtidas através de Sensoriamento remoto

Através desta fonte de informações, o ecólogo pode compor mapas temáticos de diversos tipos:

- da cobertura vegetal,
- da cobertura de água,
- da qualidade da água,
- da estado da vegetação
- das áreas edificadas,
- das áreas desmatadas,
- das áreas com deslizamentos,
- das áreas queimadas,
- das áreas recuperadas, e
- do uso e ocupação da terra,

os limites são as resoluções: espacial, espectral, radiométrica e temporal de todos os dados, não esquecendo, contudo, da qualidade dos dados em si.

Para interpretar corretamente estas informações, é necessário:

- i) conhecer o objeto de estudo,
- ii) saber como interage com a radiação eletromagnética,
- iii) qual o seu comportamento espectral,
- iv) quais os fatores limitantes, e
- v) conhecer as técnicas de geoprocessamento de imagens

Transferência de dados contidos na literatura

As informações contidas na literatura são quase sempre mapas temáticos ou cartográficos. A transferências destes dados para o formato digital ampliaram sobremaneira o uso de dados cartográficos em ecologia.

Digitalização vetorial ou matricial. Em ambos os casos, há limitações e dificuldades. A primeira é feita usando-se uma mesa digitalizadora onde a ponta ou o centro de um “mouse” isola pontos, cuja posição geográfica é transferida para uma superfície previamente definida. A segunda é feita usando um sistema de varredura que transfere cada pixel previamente definido em função da resolução do sistema e da memória disponíveis.

Na digitalização vetorial, o usuário tem pleno controle sobre a qualidade da transferência e pode introduzir as correções sempre que julgar necessário. Além disso, os arquivos vetoriais são muitos pequenos e de fácil edição.

Na digitalização matricial, o usuário não tem como introduzir correções, sendo necessário uma posterior vetorização para que se possa fazer as edições necessárias. Nos casos em que o mapa a ser transferido para o formato digital for unitemático, este procedimento torna-se viável. Contudo, nos casos de mapas topográficos, é preciso vetorizar a imagem com as curvas de nível para classificá-las segundo sua cota. Sem esta etapa não é possível gerar o MNT. Um outro inconveniente é o fato de a matricialização resultar em arquivos muito grandes para garantir uma resolução satisfatória.

Em ambos os casos, é importante definir o nível de precisão aceitável e lembrar que a qualidade de um dado depende da qualidade da fonte e do modo como esta informação é transferida. A precisão aceitável depende da relação tamanho do alvo e do pixel, no caso do sistema matricial. No sistema vetorial, a precisão depende do número de pontos coletados para formar a linha que não pode ser nem demais e nem de menos.

O produto digitalizado pode ser levado para processamento, onde é transformado em imagem e será analisado em ambiente de SIG matricial ou poderá ser analisado diretamente em ambiente de SIG vetorial.

Transferência de dados de campo

As informações de campo são transferidas para o formato digital através dos pontos de localização registrados por GPS e lidos por programas de geoprocessamento. Estes pontos podem ser unidos gerando linhas ou polígonos, permitindo, assim, medir perímetro, área e distância de informações de interesse.

Informações obtidas do MNT

As informações altimétricas podem ser processadas de modo a simular algumas condições abióticas. A transferência de dados é feita pela digitalização das curvas de nível, com a identificação do valor das cotas ou pela digitalização de pontos altimétricos. Com o auxílio de algoritmos apropriados, estas curvas ou pontos são integrados a uma rede que simula a superfície terrestre. Esta superfície pode ser:

- i) usada como diagrama de bloco (3D) ou
- ii) pode gerar mapas temáticos de altitude (ou hipsométrico), de declividade (ou enclinográfico) e de orientação de vertentes.

Estas imagens podem ser classificadas em intervalos de interesse e serem relacionadas, em ambiente de SIG (matricial), a outros mapas temáticos oriundos de outras fontes.

5. SENSORIAMENTO REMOTO COM MICROONDAS

Inicialmente, o sensoriamento remoto com microondas era feito com plataforma aérea, uma fonte de energia eletromagnética, uma antena na forma de calha e um sistema imageador. Com o avançar da tecnologia, surgiram as plataformas orbitais e as antenas de abertura sintética, melhorando sobremaneira a resolução espacial e diminuindo as limitações daquelas regiões onde a cobertura de nuvens é freqüente. A possibilidade de polarizar as ondas enviadas e recebidas ampliou ainda mais o espectro de observação da terra, pois os diferentes alvos interagem diferentemente com as diferentes polarizações. Apesar dos avanços tecnológicos, o conhecimento básico pouco se alterou nestas décadas, já que a limitação do sistema decorre da relação entre resolução de azimute e tamanho da antena.

5.1. CARACTERÍSTICAS DAS MICROONDAS OU ONDAS DE RÁDIO

No sensoriamento remoto destas faixas o comprimento de onda ou λ varia de 1 mm até 1 metro e atravessa neblina, chuvas leves e neve, bem como nuvens e fumaça, sofrendo pouca ou nenhuma interferência. Além das diferenças acima mencionadas, o sensoriamento remoto nestas faixas possibilita imageamento em qualquer hora do dia e até mesmo da noite, no caso do sistema ativo (possui sua própria fonte de energia). Esta independência em relação às condições atmosféricas e de iluminação vêm tornando este produto reconhecidamente útil, como veremos mais adiante. O princípio se baseia na ecolocalização: um sinal conhecido é transmitido e o seu eco ou retorno é esperado. O tempo que leva para um eco retornar permite calcular a distância do alvo que causou o eco; a intensidade da energia de retorno permite calcular qual é o alvo. Este princípio é o mesmo usado nos sonares, na sismologia e no ultrassom. Alguns animais (morcegos, mamíferos marinhos, alguns pássaros e alguns insectívoros) usam também a localização por meio do eco. Com os avanços tecnológicos, passou a ser possível imagear o terreno utilizando o sinal de retorno, o que foi fundamental nos grandes mapeamentos já realizados no mundo.

O conhecido **RADAR** - *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ing* - utiliza ondas de rádio para detectar objetos à distância e é o mesmo sistema utilizado para detecção de objetos em velocidade. No **Quadro 6** são apresentadas as faixas mais utilizadas. Existem outros tipos de sistemas com outras aplicações: Radar PPI (*Plan Position Indicator*), utilizado para detectar a distância radial de objetos; SLAR (*Side Looking Airborne Radar*), que faz o imageamento lateral e longitudinal com radar, em faixas contínuas, a bordo de aviões. O Projeto RADAM Brasil fez o maior mapeamento já realizado no mundo (do Brasil todo) utilizando o sistema SLAR.

Quadro 6

Faixa Microondas	λ (cm)	f (Mhz ou 10^6 ciclos por segundo)
Ka	0.75 - 1.1	40000 - 26500
K	1.1 - 1.67	26500 - 18000
Ku	1.67 - 2.4	18000 - 12500
X	2.4 - 3.75	12500 - 8000
C	3.75 - 7.5	8000 - 4000
S	7.5 - 15	4000 - 2000
L	15 - 30	2000 - 1000
P	30 - 100	1000 - 300

- 1) Penetram a atmosfera sob quase qualquer condição, dependendo do λ envolvido.
- 2) Pode ser colocado em plataforma aérea ou orbital, com fonte própria (ativo) ou com fonte natural (passivo).
- 3) Diversos sistemas:
 - medir velocidade de veículos em movimento
 - fazer batimetria
 - sensoriamento remoto

A **antena** deve ter o tamanho proporcional ao λ que registrar as informações da seguinte maneira:

- a) largura da calha tem que ser proporcional ao λ ;
- b) comprimento da antena:
 - Para atingir a resolução de 10 mrad com $\lambda = 5$ cm seria necessário uma antena e 5 m.
 - Para atingir resolução de 2 mrad com $\lambda = 5$ cm seria necessário uma antena de 25 m.

SAR (*synthetic aperture radar*) – Usa antenas fisicamente pequenas, que tomam várias sucessivas posições eletronicamente com tal velocidade e sincronismo que várias pequenas antenas têm o desempenho de uma antena muito longa (uma antena de 2m pode ser tão eficiente como se tivesse 600m de comprimento).

O imageamento por microondas tem crescido muito nas últimas décadas. A transmissão de energia é diretamente proporcional ao comprimento de onda: no caso da vegetação, quanto MENOR a frequência, MAIOR é sua penetração.

RADAR pode ou não produzir imagens. Podem estar no chão ou em plataformas aéreas ou orbitais e podem ter sistemas passivos ou ativos.

Nos **sistemas passivos**, mede-se a rotação molecular causada pela temperatura de brilho, que varia de um alvo para outro.

Nos **sistemas ativos**, consiste em transmitir pulsos de energia de λ conhecidos (microondas) na direção do alvo de interesse e esperar pelo eco ou reflexão que pode ser recepcionado por antenas.

Os sistemas de radar podem ser agrupados em imageadores ou não. Os imageadores compreendem os sistemas de antena rotatória, os radares de visada lateral de abertura real (SLAR - *side looking radar*) e os radares de visada lateral de abertura sintética (SAR – *synthetic aperture radar*).

Os SLAR foram os primeiros e foram utilizados durante a II Guerra Mundial como auxiliares a bombardeiros noturnos. Possuem uma antena que ilumina lateralmente os alvos com um feixe que é amplo verticalmente e estreito horizontalmente. A varredura de geração da imagem é produzida pelo próprio movimento da aeronave durante a passagem sobre a área a ser recoberta. Este radar apresenta o inconveniente de possuir a resolução azimutal diretamente proporcional à distância entre a antena e o alvo imageado, e inversamente proporcional ao comprimento da antena utilizada no imageamento. Desta forma, para se obter uma melhor resolução azimutal, ou se diminui a distância entre o radar e o alvo, ou se aumenta o comprimento da antena.

O SAR, desenvolvido na década de 50, resolveu este problema uma vez que a resolução azimutal deste sistema independe da distância entre o radar e o alvo. O sistema SAR tem uma antena muito pequena que se desloca de posição e de direção, simulando uma antena de grande extensão. No Brasil, a sua utilização para fins civis, ficou marcada pelo projeto RADAMBRASIL, no início da década de 70.

A utilização de radar orbital começou com o SEASAT, em 1978, que levou a NASA a desenvolver o Programa SIR (SIR-A em 1981, SIR-B em 1984 e o SIR-C em 1994). Programas de mais longa duração foram: o ALMAZ-1, em 1981 e ALMAZ-2, em 1991, lançado pela então União Soviética; ERS-1, em 1991 e ERS-2, em 1995, pela Agência Espacial Européia (ESA), o JERS-1, em 1992, pela Agência Espacial Japonesa (NASDA) e o RADARSAT, em 1995, por um consórcio Canadense.

A interação entre energia e matéria é devida à constante dielétrica e à rugosidade do alvo. Uma antena ou calha alterna o papel de emissor e o de receptor.

O que determina o retorno ou não dos raios de microondas são as características geométricas e as características elétricas, isoladas ou em conjunto:

Características geométricas: rugosidade da superfície – relevo, por exemplo.

Características elétricas: reflectividade e condutividade dos materiais que compõem a superfície, representada pela constante dielétrica (ϵ).

A maior parte dos materiais têm ϵ entre 3 e 8, quando secos. A água tem ϵ semelhante a 80. Assim, a presença de umidade, tanto do solo como na vegetação, pode significar aumento na refletividade. A vegetação é bom refletor, assim como os metais.

RESPOSTA DO SOLO:

Porque a ϵ da água é cerca de 10 vezes maior que a do solo seco, é possível detectar a presença de umidade a poucos centímetros da superfície. A faixa L é particularmente boa quando o solo está muito seco.

RESPOSTA DA VEGETAÇÃO:

As microondas interagem com o dossel de conformidade com seus componentes (folhas, galhos, troncos). Os λ menores interagem com as camadas superficiais da vegetação e, os mais longos, com as camadas inferiores da vegetação, podendo até interagir com o solo ou mesmo com o subsolo.

Na faixa do espectro óptico, a interação ocorre pela ressonância molecular na superfície de contato.

Quando o λ se aproxima da metade do tamanho dos componentes da planta, o volume de espalhamento é forte: se o dossel for denso, verifica-se um retroespalhamento forte partindo da vegetação.

Em geral, λ menores (de 2 a 6 cm) são bons para sensoriar plantações herbáceas e folhas de árvores.

Os λ maiores (de 10 a 30 cm) são bons para sensoriar troncos.

Com relação à umidade, quanto mais úmida a vegetação, mais reflete microondas.

RESPOSTA DA ÁGUA E DO GELO:

Quando a superfície da água está completamente LISA, tem-se um refletor especular. A faixa X é boa para detectar gelo e a faixa L é boa para mostrar a extensão do gelo.

POLARIZAÇÃO:

A polarização amplifica sobremaneira a aplicação do radar. Nesses sistemas ativos, existe a possibilidade de as ondas serem polarizadas. Esta polarização (horizontal ou vertical) amplia o espectro de observação: HH (vai e volta horizontal) ou VV (vai e volta vertical) penetram a vegetação, mais que VH (vai vertical e volta horizontal) ou HV (vai horizontal e volta vertical).

Quando se deseja informações sobre objetos orientados verticalmente no terreno (tronco de árvores), utiliza-se polarização VV (vai vertical e volta vertical). Quando estamos interessados em informações sobre a rugosidade da superfície (do dossel), podemos utilizar polarização HH (vai horizontal e volta horizontal). Há também a possibilidade de a polarização ser invertida (HV e VH), o que deve aumentar o retroespalhamento.

Variações na reflexão do sinal de radar decorrem da relação entre λ e diferenças geométricas na superfície do objeto. Variações na altura da superfície em relação ao λ definem se a superfície do objeto é lisa, intermediária ou rugosa. Por exemplo, sinais da banda X (λ entre 2,4 e 3,75 cm) não penetram completamente o dossel e interagem com superfícies com estruturas em torno de 3 cm. Já os sinais na banda L (λ entre 15 e 30 cm) penetram e interagem com os troncos das árvores.

Aplicações de microondas mais próximas da ecologia:

- avaliação do potencial de recursos hídricos superficiais e subterrâneos
- monitorar projetos de irrigação
- levantamento planimétrico
- levantamento altimétrico
- mapear desmatamento
- estimar biomassa verde
- identificação de pragas na vegetação
- mapeamento de gelo e neve
- detecção de umidade do solo
- interpretação de alguns parâmetros hidrológicos
- identificação de áreas mineradas
- planejamento e monitoramento ambiental
- levantamento batimétrico
- algumas poluições em corpos d'água
- salinização de solos

INTERAÇÃO:

A energia é transmitida em pulsos muito pequenos, num período de tempo "t" da ordem de micro segundos (10^{-6} segundos). A propagação de um pulso pode ser representada por frentes de onda a cada incremento de tempo sucessivo. Após um certo intervalo de "t" o pulso alcança o alvo e uma onda

refletida atinge a antena e é registrada (tempo de emissão e tempo de recepção é comparado). A imagem é formada pela diferença de respostas de cada alvo (as árvores refletem menos que a casa, por exemplo). Pela altura do sensor, sabe-se quantos pulsos ou frentes de onda há.

As imagens são criadas da seguinte maneira:

- À medida que a plataforma avança, a antena é constantemente reposicionada na direção do vôo, a uma velocidade constante.
- A antena alterna do modo transmissor para o modo receptor por um sincronizador.
- Cada pulso transmitido retorna dos alvos. Este eco é recebido pela mesma antena e é processado para produzir um sinal de vídeo de amplitude/tempo.
- O sinal modula a intensidade de um tubo de raios catódicos de linha única expondo um filme a cada linha de imagem. Cada linha na imagem produzida é a representação tonal do vigor do sinal retornado para cada pulso de radar.
- O filme é avançado a uma velocidade proporcional à velocidade da plataforma.
- Desta maneira, as respostas combinadas de muitos pulsos resultam num produto 2D.

MICROONDAS E A ECOLOGIA:

A década de 90 foi marcada pelo crescimento das pesquisas dos SARs no estudo de processos ecológicos. Os que mais se destacaram foram os estudos dos vários sistemas para estimar a fitomassa florestal. As faixas de radar de mais baixa frequência (P e L) mostraram-se eficientes em detectar inundações sob florestas, enquanto as de mais alta frequência (C) mostraram-se mais eficientes em detectar áreas inundadas dominadas pelo estrato herbáceo.

Durante esta década, vários sistemas de radar orbital foram testados, explorando a multi-frequência e a multi-polarização. Apesar das dificuldades de utilização destes produtos, todos são unânimes na importância dos SARs, principalmente pelo fato de atravessarem cobertura de nuvens e de possuírem sua própria fonte de radiação.

Em vista de as microondas interagirem de forma diferente do que o observado nas radiações ópticas, outras características podem ser detectadas com os SARs das várias faixas. A sua sensibilidade em relação a água, por exemplo, permite distinguir vegetação ripária de floresta de planalto, o que é muito difícil com os sistemas óptico (de ultravioleta até infravermelho médio).

Kasischke et al. (1997) apresenta uma tabela de áreas de aplicação por sistemas sensores disponíveis e conclui que: a) para classificar padrões de cobertura, as análises multibanda são melhores que banda única; b) imagens de radar têm capacidade para monitorar biomassa de floresta com as bandas P e L com polarização cruzada (HV ou VH); c) as bandas com polarização única (HH ou VV) são boas para detectar inundações debaixo do dossel; e d) a banda C é melhor para detectar campos inundados.

Por conta do alto teor de umidade, o dossel das florestas apresenta um discreto espalhamento e atenuação da energia gerada pelos sistemas ativos (radar), promovendo contrastes significativos para a visualização. Variações na constante dielétrica dos elementos vegetativos e do substrato têm o papel principal em determinar a intensidade e a fase em que a energia de microondas espalhadas pela superfície vegetada, que comporá as imagens SAR. Fatores que influenciam a constante dielétrica são: temperatura, teor de umidade e presença de água. A frequência e a polarização são fortemente dependentes do tamanho e da orientação dos diferentes elementos que compõem a vegetação.