

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-8858-PUD/57**

## **SENSORIAMENTO REMOTO AGRÍCOLA**

Alfredo José Barreto Luiz

Trabalho realizado como parte das exigências do exame de qualificação do curso de  
Doutorado em Sensoriamento Remoto, aprovado em 15 de setembro de 2000.

INPE  
São José dos Campos  
2002

“Ninguna definición es exacta ni puede serlo\*.”

Félix Varela, padre e filósofo cubano, séc. XIX.

\*Toda definición es el resultado de un análisis, siendo pues imposible que una cosa se analice perfectamente sin que se escape la más ligera circunstancia, y comprender después en la definición todos los resultados de este prolijo análisis, se infiere claramente que ninguna definición presenta, ni puede presentar, todo un objeto, y que por tanto, si atendemos a la naturaleza de las cosas, ninguna definición es exacta ni puede serlo.

Es cierto que decimos que un hombre es animal racional, y es imposible que siendo racional , no sea hombre; pero cada uno de estos signos, es una nota genérica, con que expresamos una multitud de propiedades, que nuestro entendimiento muchas veces no ha analizado, y que aunque las hubiera observado perfectamente no podría repetir las, siendo así que el signo, por sí solo no las da a entender. Los verdaderos ideólogos convienen en que las ideas no pueden distinguirse, sino se distinguen sus signos, y que las relaciones de un objeto nunca estarán bien determinadas, si el signo no puede expresarlas. De aquí se infiere la inexactitud de nuestros signos, por más correcto que sea el idioma, pues cuando es muy complicado el objeto, no es posible que el signo recuerde todas las operaciones que fueron necesarias para adquirir ese conocimiento. Deduzco, pues, que están equivocados los que creen conocer las cosas, sabiendo sus definiciones. La naturaleza es más abundante en sus obras, y ha puesto mayor número de relaciones en cada objeto, que las que percibe nuestro espíritu. Esta es la razón por que he creído que ninguna definición es *recíproca*, pues lo que reciprocamos es el conocimiento adquirido, y no el conjunto de todas las propiedades de un objeto, porque entonces sería preciso haberlas conocido todas, lo cual es un imposible.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>PARTE 1 - ESTATÍSTICAS AGRÍCOLAS E O SENSORIAMENTO REMOTO ....</b>	<b>7</b>
1.1 - Introdução .....	7
1.2 - Relevância das Informações Agrícolas .....	7
1.3 - Estatísticas agrícolas .....	8
1.3.1 - Definição .....	8
1.3.2 - Tipos de levantamento agrícola .....	9
1.3.2.1 - Abrangência na população .....	9
1.3.2.2 - Tipo de amostragem .....	9
1.3.2.3 - Forma de mensuração das variáveis .....	10
1.3.2.4 - Executor .....	11
1.3.2.5 - Unidade básica de amostragem .....	12
1.3.2.6 - Tipo e quantidade de variáveis mensuradas .....	13
1.3.2.7 - Painel amostral .....	13
1.3.2.8 - Outros .....	15
1.3.3 - Estimadores .....	15
1.4 - O papel do sensoriamento remoto .....	16
1.4.1 - Histórico de utilização .....	18
1.4.1.1 - Estados Unidos .....	19
1.4.1.2 - Europa .....	21
1.4.1.3 - Brasil .....	24
1.4.1.4 - Outros .....	25
1.5 - Conclusão .....	26

<b>PARTE 2 - SENSORES REMOTOS PARA AGRICULTURA .....</b>	<b>33</b>
2.1 - Introdução .....	33
2.2 - Faixas do espectro .....	35
2.3 - Resolução espacial .....	37
2.4 - Resolução temporal .....	39
2.5 - Quantidade, posição e largura das bandas espectrais .....	41
2.6 - Disponibilidade, acesso e custo dos dados .....	43
2.7 - Sensores em operação .....	44
2.7.1 - Alta resolução espacial .....	45
2.7.1.1 - TM e ETM+ do Landsat .....	46
2.7.1.2 - HRV do SPOT .....	48
2.7.1.3 - CCD e IRMSS do CBERS .....	49
2.7.1.4 - ASTER do Terra .....	49
2.7.2 - Baixa resolução espacial .....	50
2.7.2.1 - AVHRR do NOAA .....	50
2.7.2.2 - Vegetation do SPOT .....	51
2.7.2.3 - WFI do CBERS .....	51
2.7.2.4 - MISR e MODIS do Terra .....	52
2.7.3 - Altíssima resolução espacial .....	52
2.7.4 - Radar .....	53
2.8 - Conclusão .....	54

	<u>Pág.</u>
<b>PARTE 3 - RADIAÇÃO DA CENA AGRÍCOLA .....</b>	<b>55</b>
3.1 - Introdução .....	55
3.2 - Radiação da vegetação .....	55
3.3 - Radiação do solo .....	57
3.4 - Radiação da cena agrícola .....	60
3.4.1 - Comportamento ao longo do espectro .....	60
3.4.2 - Comportamento ao longo do tempo .....	61
3.4.3 - Índices .....	62
3.4.4 - Ângulos de iluminação e visada .....	64
3.4.5 - Efeitos da umidade .....	65
3.4.6 - Elementos de cena impuros .....	66
3.5 - Características do meio agrícola .....	67
3.5.1 - Ambiente natural original .....	67
3.5.2 - Estrutura fundiária .....	68
3.5.3 - Práticas agrícolas .....	68
3.5.4 - Desequilíbrios .....	69
3.6 - Conclusão .....	70
<b>PARTE 4 - CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS DE ÁREAS AGRÍCOLAS .....</b>	<b>71</b>
4.1 - Introdução .....	71
4.2 - Características agrícolas que influem na classificação .....	72
4.3 - O que classificar .....	74
4.4 - Métodos de classificação .....	76
4.4.1 - Classificação supervisionada .....	78
4.4.2 - Classificação não supervisionada .....	79
4.4.3 - Outras abordagens .....	81
4.5 - Avaliação da classificação .....	81
4.6 - Conclusão .....	85
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

## PARTE 1

### ESTATÍSTICAS AGRÍCOLAS E O SENSORIAMENTO REMOTO

#### 1.1. Introdução

O termo “estatísticas agrícolas” (EA) engloba um imenso campo de conhecimento e aplicações, muito maior que o escopo deste trabalho. O mesmo pode se dizer do “sensoriamento remoto” (SR). Portanto, antes de mais nada, é necessário deixar claro que aqui pretende-se ressaltar apenas aquelas características destas duas disciplinas que propiciam sua integração.

Pode se dizer que a estatística e o sensoriamento remoto são, por natureza, formas resumidas (portanto, limitadas) de percepção e representação do mundo real. Selecionando apenas uma das muitas definições disponíveis é válido afirmar que a estatística é uma disciplina única por sua habilidade em quantificar a incerteza inerente aos fenômenos, baseando-se para isso na matéria prima dos estatísticos, os dados, que nada mais são que os números usados para interpretar a realidade (Gonick e Smith, 1993). Também o sensoriamento remoto é baseado em dados numéricos - as medidas de radiação tomadas à distâncias variáveis dos alvos de interesse - dos quais se pretende extrair informação quantitativa sobre os ambientes terrestres (Verstraete et al., 1996).

Aqui se encaixa a afirmação, exposta na abertura deste ensaio, de que nenhuma definição é exata (Varela, 1992) pois, concordar com ela é assumir que, mesmo quando se pode fazer uso extensivo dos signos ou símbolos, é impossível definir exatamente qualquer coisa. Portanto, os resultados estatísticos ou as imagens obtidas por sensoriamento remoto, como casos extremos de simplificação da realidade, nunca poderão substituí-la, mas apenas representá-la. Compare, por exemplo, a diferença entre uma estatística agrícola do tipo: a estimativa de área plantada com soja no Brasil, em 1999, foi de 12.000.000 ha; e a realidade que ela representa, isto é, todas as lavouras de soja existentes no Brasil em 1999, com suas plantas, invasoras, pragas, doenças, em diferentes solos, climas, topografia, seus proprietários, etc. Da mesma forma, uma imagem abrangendo parte de uma região agrícola, gerada a partir de dados obtidos por SR, é uma representação extremamente simplificada daquela região.

Ou seja, mesmo que se empregue o método estatístico mais exato e o melhor conjunto sensor/processamento, a estimativa e a imagem resultantes sempre apresentarão perda de informação em comparação com a realidade representada. A importância de se insistir neste ponto está relacionada ao estabelecimento dos limites de aplicação destas técnicas. Existem usos para os quais são necessárias informações impossíveis de obter por sensoriamento remoto ou de resumir através de estatísticas. Por outro lado, a associação da estatística como o sensoriamento remoto pode produzir informações extremamente valiosas, especialmente quando se trata da agricultura, e isso será abordado a seguir.

## 1.2. Relevância das Informações Agrícolas

Apesar da diminuição da importância relativa da agricultura para a economia mundial nas últimas décadas, existe uma crescente necessidade de se monitorar o complexo agrícola (Ryerson et al., 1997). Além das preocupações com os aspectos ambientais envolvidos com as atividades agrícolas, esse interesse também é justificado economicamente pois, apesar da redução relativa, os números absolutos ainda são muito expressivos, chegando aos US\$ 90 bilhões anuais só nos Estados Unidos e apenas em valor dos produtos, sem contar toda a cadeia produtiva envolvida no agronegócio (Anderson et al., 1999).

No Brasil, em especial, os produtos agropecuários continuam tendo enorme importância econômica, tendo sido responsáveis pela geração de crescentes saldos positivos no comércio internacional, o que auxiliou no enfrentamento da crise do balanço de pagamentos no período 1992 a 1998. Neste curto intervalo de tempo as exportações de produtos agropecuários passaram de 35,8 para 51,1 bilhões de dólares, respondendo por atuais 38,2% das exportações nacionais (Carvalho, 1999).

As informações sobre as atividades agrícolas atendem aos mais diversos interesses. Geograficamente falando, os usuários podem variar desde o nível global até o local, passando por hemisférico, continental, de blocos econômicos, regionais, nacionais, estaduais, municipais, etc. Segundo Pino (1999b), os países que pretenderem se inserir no novo contexto mundial de economia globalizada e fortes blocos econômicos precisarão contar com excelentes informações agrícolas, não somente sobre si mesmo, mas sobre os demais países do próprio bloco e fora dele. Deverão contar,

acima de tudo, com previsões eficazes e rápida percepção das mudanças, por mais sutis que pareçam. Já para Ray et al. (1999), as estimativas de produção, precisas e oportunas, no nível distrital (no caso da Índia, o que provavelmente equivale ao nosso município), são essenciais para as decisões gerenciais relacionadas à economia agrícola de um país. Ainda segundo os mesmos autores, as estimativas de produção feitas na fase de pré-colheita constituem uma informação essencial para o governo e também para as agroindústrias, no sentido de determinar os fatores econômicos tais como preços, excedentes exportáveis, etc.

Do ponto de vista da inserção no negócio agrícola, os interessados nas informações agrícolas podem ser produtores, exportadores, importadores, indústrias de beneficiamento, consumidores, fornecedores de insumos, investidores, etc. Conforme Luiz (2000), hoje as mercadorias agrícolas negociadas nas bolsas de todo o mundo, como o café, a soja, o cacau, o milho, o trigo, o suco de laranja, entre outras, movimentam anualmente cifras astronômicas (na casa do trilhão de reais) e, por isso mesmo, têm seu preço determinado muito mais pelo “mercado global” do que por qualquer lógica referente ao custo de produção ou à eficiência produtiva locais. Sabe-se que o principal fator a determinar as oscilações nestas bolsas, que sempre trabalham com o mercado futuro, são as expectativas de oferta e demanda mundiais dos produtos. Então, aquela empresa ou nação que conseguir prever com maior acerto a sua safra e a dos seus concorrentes, poderá influir no preço de uma mercadoria estratégica e fazer “bons” negócios.

Uma abordagem também interessante é feita por Pino (1999a), que ressalta a importância da determinação da área cultivada por município a partir do fato de que no Brasil, por força de disposição constitucional, 25% do ICMS deve ser repartido entre os municípios, e que em diversos estados brasileiros existem critérios legais que vinculam critérios agrícolas à devolução de parte desse imposto. No caso específico do Estado de São Paulo, 3% do valor do ICMS a ser restituído aos municípios é dividido proporcionalmente à área cultivada em cada um deles. Pode-se imaginar os potenciais conflitos de interesses que leis deste tipo podem gerar, daí a necessidade de se estabelecerem métodos criteriosos para tal fim.

Aqui fica clara a importância do sensoriamento remoto neste contexto, pois as mais eficientes, rápidas e econômicas maneiras de realizarem-se as previsões de safras, já utilizadas por diversos países, apoiam-se invariavelmente em dados obtidos remotamente por sensores orbitais (FAO, 1998). Na realidade, é uma das únicas maneiras de um país atualizar as estimativas sobre a sua produção e, principalmente, sobre a dos concorrentes, com antecedência suficiente para auxiliar na tomada de decisões.

### 1.3. Estatísticas agrícolas

Este tópico tem basicamente a intenção de estabelecer o significado de termos empregados no âmbito das estatísticas agrícolas e será desenvolvido sem nenhuma referência específica ao sensoriamento remoto. Espera-se assim permitir inicialmente uma visão geral do escopo das estatísticas agrícolas, para a partir daí apresentar uma visão específica, ou seja, qual o papel desempenhado ou destinado ao sensoriamento remoto, o que será tratado no tópico 1.4.

#### 1.3.1. Definição

No trabalho de Pino (1999b) está dito que "entende-se a expressão *estatísticas agrícolas* como o conjunto de estatísticas sobre variáveis referentes ao setor agropecuário", e posteriormente afirma-se que "*estatística* é o valor de uma dada variável aleatória calculado sobre os elementos de uma amostra". No presente trabalho, entretanto, discorda-se desta definição, pois os valores obtidos através de censos também são considerados *estatísticas* e, como se verá a seguir, eles não provêm de amostras. Portanto, todo e qualquer número que represente uma característica do meio agrícola será considerado como uma *estatística agrícola*. Cabem nesta definição, portanto, desde totais obtidos em censos nacionais até médias inferidas a partir de amostras tomadas no âmbito de propriedades rurais. As formas de coleta e análise dos dados, utilizadas para o cálculo destas EAs variam enormemente, podendo influir na qualidade e mesmo na validade das mesmas. A este conjunto de procedimentos necessários para a obtenção das EAs é dado o nome de *levantamento agrícola*.

### 1.3.2. Tipos de levantamento agrícola

Um *levantamento* engloba a definição de abrangência e de objetivos, o planejamento do esquema amostral, o estabelecimento dos níveis de precisão desejados, a escolha de mecanismos de coleta, a amostragem propriamente dita, a coleta e a análise de dados, o controle de qualidade, a apresentação de resultados, etc. Existem inúmeras categorias nas quais os levantamentos agrícolas podem ser divididos, levando-se em conta tanto critérios estritamente estatísticos quanto outros não tão rigorosos. Através destas divisões e subdivisões pode-se entender melhor o significado e a utilidade das EAs obtidas. As divisões apresentadas não são as únicas possíveis nem estão em ordem de importância. Elas também não são mutuamente excludentes, ou seja, pode haver a divisão por um critério e a subdivisão por outros, dependendo do interesse do usuário. Alguns critérios de divisão dos levantamentos agrícolas largamente utilizados serão enumerados a seguir.

#### 1.3.2.1. Abrangência na população

O levantamento é considerado **Censitário** quando o conjunto dos elementos mensurados teoricamente é igual ao conjunto de todos os elementos presentes na população alvo do levantamento estatístico. Neste tipo de levantamento, as estatísticas têm um caráter descritivo, são de obtenção dispendiosa e demorada, e são sujeitas a erros eventualmente não mensuráveis, como os devidos às falhas de cobertura, inclusão duplicada, etc. (Otañez, 1986).

Chama-se o levantamento de **Amostral** quando apenas uma fração (amostra) dos elementos presentes na população é objeto de mensuração. A partir dos dados obtidos com os elementos das amostras, são calculadas estimativas das estatísticas desejadas. Neste caso, as estatísticas têm caráter inferencial e, no caso de amostragem probabilística, permitem a correta determinação dos erros amostrais. Segundo Cochran (1977), as vantagens da amostragem em relação aos censos são seu menor custo, maior rapidez, possibilidade de ter um escopo mais amplo e um maior controle sobre a precisão das estimativas.

#### 1.3.2.2. Tipo de amostragem

Pelo critério de amostragem o levantamento é **Probabilístico** quando, a partir da definição do procedimento amostral, é garantida a todo e qualquer elemento da

população uma probabilidade não nula e conhecida de vir a pertencer a uma amostra selecionada. Note-se que a probabilidade de seleção não é necessariamente a mesma para todo elemento, mas ela deve ser obrigatoriamente conhecida. Em pelo menos um passo do processo de seleção da amostra deve estar presente um mecanismo de aleatorização. Este tipo de amostragem é o único que permite o cálculo da variância das estimativas e, conseqüentemente, a aplicação de todo o ferramental estatístico na sua análise.

Diz-se que é **Não Probabilístico** qualquer outro tipo de procedimento que não satisfaça o estabelecido acima para a amostragem probabilística. Alguns tipos mais comuns são: i) parcial = por motivos práticos apenas alguns dos elementos da população têm chance de participar de uma amostra (e.g. amostra-se apenas propriedades ao longo de vias de acesso predeterminadas, ou entrevista-se apenas agricultores presentes em um evento técnico); ii) intencional = *especialistas* escolhem elementos *típicos* ou *representativos*, de acordo com seu julgamento, para compor a amostra; iii) voluntária = a participação ou não da amostra é decidida pelo próprio elemento, conscientemente ou não, sem controle por parte do organizador do levantamento; iv) fortuita = não é estabelecido nenhum procedimento rígido para a coleta das amostras, que são formadas a medida que o amostrador entra em contato com elementos da população.

#### 1.3.2.3. Forma de mensuração das variáveis

Um levantamento é **Subjetivo** quando a maneira de se obter os valores de uma variável é indireta ou sujeita à interferências não controladas.

Já o levantamento **Objetivo** se dá quando os valores de uma variável são coletados diretamente e geralmente com o uso de instrumentos de medição.

É interessante observar que esta divisão é condicionada também pelo tipo de variável que está sendo mensurada. Por exemplo, o uso do sentido da visão, por parte do responsável pela medição, pode originar uma medida subjetiva, se a variável em questão for numérica e contínua, como a produtividade esperada de uma cultura, ou objetiva, se a variável for do tipo binária, discreta ou categórica, como a espécie de cultura presente. Por outro lado, uma mesma variável pode ser obtida de forma

objetiva ou subjetiva, como por exemplo a área plantada com uma determinada cultura que, quando obtida em levantamentos onde é o respondente que fornece oralmente o valor ao entrevistador, classifica-se como subjetiva e, se for obtida por meio de medição in loco (trena, teodolito, etc.) ou remota (fotos, imagens, etc.), como objetiva.

Em um documento sobre estatísticas agrícolas (FAO, 1996), os levantamentos com amostras não probabilísticas são também chamados de levantamentos subjetivos, o que não está de acordo com as definições acima. Para que não haja confusão, é preciso esclarecer que, no presente trabalho, considera-se que a classificação de um levantamento como objetivo ou subjetivo diz respeito à forma como foram obtidas as variáveis e não à forma de seleção das amostras. Portanto, podemos ter, quer em um censo quer em uma amostragem, sendo esta última probabilística ou não, a mensuração de diversas variáveis, umas de forma objetiva (e.g., medição com instrumentos) e outras de forma subjetiva (e.g., opinião, intenção, etc.).

#### 1.3.2.4. Executor

O levantamento **Público** origina-se do interesse de toda a sociedade, representada por qualquer dos poderes, tanto no âmbito municipal, como estadual ou federal, e até mesmo por organismos internacionais. Geralmente seus objetivos estão relacionados ao estabelecimento ou controle de impostos, ao monitoramento ambiental, aos aspectos de abastecimento e segurança alimentar, ao planejamento de obras de infraestrutura, etc. Normalmente são executados com certa periodicidade, por órgãos públicos e não há restrição de acesso aos resultados.

É considerado **Privado** o levantamento que surge da necessidade particular de empresas, cooperativas, associações, etc., com forte conotação comercial ou econômica. Os objetivos são o planejamento de compras, vendas e investimentos, o estabelecimento de preços, o oferecimento de serviços, etc. Na maioria das vezes esse tipo de levantamento é realizado de forma extemporânea, sob encomenda e por empresas especializadas. O acesso aos resultados é quase sempre restrito àquele que solicitou (e pagou!) o levantamento.

#### 1.3.2.5. Unidade básica de amostragem

Chama-se de **Político** ou **Administrativo** o levantamento onde são tomadas amostras e feitas estimativas com base em unidades cujos limites são determinados por critérios antrópicos, do tipo: talhão ou gleba, propriedade, distrito, município, sub-região, estado, região, país, bloco econômico, continente, etc.

No levantamento **Geográfico** ou **Ambiental** os limites das unidades são estabelecidos com base nas características da paisagem natural, do tipo: micro-bacia, vale, serra, bacia, ecossistema, etc.

Pode-se observar que em qualquer dos casos acima existe a possibilidade de se variar o tamanho das unidades, o que pode ser chamado de uma questão de escala. É importante notar que a partir de dados levantados através de um procedimento amostral que escolheu uma determinada unidade básica, só se poderão estimar as EAs para aquela unidade ou para grupos formados pela união de unidades básicas, sendo que qualquer outra divisão da população que implique em fracionamento da unidade básica de amostragem não pode ser feita sob pena de perda de confiabilidade nos dados. Por exemplo, se as amostras foram tomadas visando estimar a área plantada por município, também é possível produzir estimativas para qualquer grau de agrupamento de municípios (municípios do Vale do Paraíba, municípios do estado de São Paulo, municípios com menos de 50.000 habitantes, etc.). Ou seja, tendo-se a área plantada em cada município do Vale do Paraíba, obviamente tem-se a área plantada total do Vale do Paraíba. Infelizmente o contrário não é verdadeiro; se o plano amostral for projetado para estimar a área plantada por estado, não será possível produzir, apenas com base nos dados amostrais<sup>1</sup>, estimativas municipais ou para qualquer outra região que implique no fracionamento do dado estadual.

Com respeito a interseção entre limites políticos e geográficos, existe um problema semelhante. Se a unidade amostral básica foi definida apenas pelos limites políticos, só poderá haver agregação respeitando este limites, não sendo possível inserir um critério geográfico ou ambiental apenas no momento das estimativas. Um exemplo seria um levantamento que foi realizado tendo como unidade básica o estado, e a

---

<sup>1</sup> Existe a possibilidade de fazer essa desagregação desde que se lance mão de dados auxiliares, inclusive os obtidos por satélite, como é sugerido no trabalho de Walker e Mallawaarachchi, (1998), cujo título traduzido seria exatamente "Desagregando estatísticas agrícolas usando o NDVI do NOAA-AVHRR".

partir do qual se pretende extrair estimativas para os ecossistemas; isso só seria possível se as unidades básicas tivessem sido definidas inicialmente com relação tanto aos limites estaduais quanto aos dos ecossistemas (por exemplo, haveria o São Paulo/cerrado, São Paulo/mata atlântica, etc.). E, neste caso, além das estimativas por unidade básica (algo como ecossistema estadual), também seria possível extrair estimativas tanto por estado como por ecossistema.

#### 1.3.2.6. Tipo e quantidade de variáveis mensuradas

**Abrangente, amplo** ou **geral** é como são chamados os levantamentos periódicos (anuais, estacionais), geralmente sobre grandes áreas (estaduais, nacionais), planejados para obter dados básicos sobre o setor agrícola. As variáveis mais comuns neste tipo de levantamento são: área das culturas (preparada, plantada e colhida), produtividade (prevista e estimada), produção, efetivo de rebanhos, estoques de grãos, práticas utilizadas, custo de produção, uso de insumos, mão de obra empregada, situação fundiária, e características sócio-econômicas dos produtores. Pelas características das variáveis, estes levantamentos quase obrigatoriamente envolvem algum tipo de entrevista com os produtores.

No levantamento **Restrito, Especial** ou **Parcial** a principal característica é a limitação no tipo e na quantidade de variáveis mensuradas. Quase sempre este tipo de procedimento evita a utilização da entrevista com o produtor como forma de coleta de dados. Assim, muitas das variáveis citadas acima não podem ser incluídas neste tipo de levantamento, ficando geralmente restrito às estimativas de uso do solo, de área plantada e de produção das culturas. Para justificar a perda de generalidade, estes levantamentos devem ser de execução rápida, de baixo custo relativo e ter alta qualidade nos resultados; isto só é alcançado com alto uso de tecnologia para coleta e tratamento dos dados.

#### 1.3.2.7. Painel amostral

No levantamento **Por Área** ou **Territorial** a população é uma determinada extensão territorial (contínua ou não). Os elementos são porções delimitadas e não sobrepostas deste território. No caso de amostragem, a probabilidade de seleção de cada elemento é proporcional à sua área. Os limites dos elementos podem ser definidos de forma totalmente artificial (sobreposição de uma grade regular de células quadradas sobre o

território alvo), ou seguindo limites físicos do terreno, tanto antrópicos (estradas, cercas, canais, etc.) como naturais (rios, morros, vegetação, etc.). Quando corretamente planejado, este tipo de levantamento garante que não haja falha de cobertura.

Nos levantamentos probabilísticos com amostragem por segmentos de área, cada unidade básica de amostragem, estratificada ou não, é totalmente dividida em segmentos não sobrepostos. É desejável que os segmentos sejam representativos das unidades a que pertencem e não variem muito de tamanho. Existem três tipos de segmentos, que determinam a forma como serão calculadas as estimativas. No **segmento fechado** são coletados os dados sobre todos os talhões, total ou parcialmente localizados dentro limites físicos do segmento, independente se a sede da propriedade à qual pertence o talhão está ou não dentro do segmento; mas as informações serão referentes apenas às frações contidas nele. No **segmento aberto**, os dados são coletados sobre todos os talhões onde se desenvolvem atividades agrícolas, desde que pertencentes às propriedades cujas sedes se situem dentro do segmento, mesmo que parte deles fiquem fora dos limites do mesmo. E, no **segmento ponderado**, são coletados os dados sobre toda a área de qualquer propriedade incluída total ou parcialmente no segmento, independente da localização da sua sede, e ao final, os dados de cada propriedade são ponderados pela fração dela que pertence ao segmento (Krug e Yanasse, 1986).

Designa-se **Por Listas** ou **Cadastral** o levantamento no qual a população é representada por uma lista (cadastro) na qual, teoricamente, todos os elementos estão registrados. Cada elemento, portanto, corresponde a um, e apenas um, destes registros (e.g., nome do proprietário ou endereço da propriedade). A confecção e a manutenção destas listas quando é grande o número de elementos (estados ou países) são tarefas que consomem muito tempo e recursos, o que não permite uma atualização suficientemente rápida para acompanhar a dinâmica do mundo real. O resultado é que as listas nunca são completas ou corretas, ocasionando falhas de cobertura e outros erros nos levantamentos realizados com base nelas. A maior vantagem no seu emprego se dá quando um pequeno número de elementos é responsável por grande parte da informação desejada como, por exemplo, no caso da cana de açúcar no Brasil, onde apenas 9% das propriedades que a cultivam são

responsáveis por 81% da produção nacional (FAO, 1998).

O levantamento chamado de **Múltiplo** nada mais é que a combinação dos dois anteriores. Geralmente é utilizada uma lista bastante completa e atual dos principais elementos da população, segundo algum critério de interesse (área plantada, valor da produção, etc.), com base na qual se realiza um levantamento parcial do tipo cadastral. Outro levantamento parcial, desta vez do tipo territorial, é realizado sobre o território expurgado das áreas correspondentes aos elementos já incluídos na lista do levantamento cadastral. As estimativas são feitas de forma separada para cada levantamento parcial e depois reunidas para produzir a estimativa final desejada.

#### 1.3.2.8. Outros

Além da extensa lista apresentada, os levantamentos ainda podem ser divididos pelo tipo de amostragem, se simples ou estratificada, em um ou dois estágios, com ou sem repetição, aleatória ou sistemática, e por muitas outras maneiras. Uma excelente fonte sobre a teoria de amostragem que engloba tudo o que foi dito aqui de maneira mais profunda e matemática, mas não específica para estatísticas agrícolas, continua sendo o livro de Cochran (1977). Os documentos preparados pela FAO (1989, 1996 e 1998), direcionados exclusivamente para levantamentos agrícolas, também oferecem uma base conceitual importante, embora não tão rica e precisa quanto a do trabalho de Cochran, pelo qual, inclusive, foram fortemente influenciados.

#### 1.3.3. Estimadores

É chamado de estimador o algoritmo utilizado para, a partir dos dados brutos coletados nos levantamentos por amostragem, calcular-se os valores das estatísticas agrícolas desejadas; valores estes que então são chamadas de estimativas. Existem basicamente dois tipos de estimadores utilizados nos levantamentos agrícolas, o estimador por expansão direta e o estimador por regressão. Para facilitar a descrição, consideraremos um levantamento amostral, probabilístico, por área, não estratificado.

De uma maneira muito simples, pode-se afirmar que o **estimador por expansão direta** é aquele que, baseando-se apenas nos dados amostrais, reproduz para toda a população as proporções relativas encontradas nas amostras,. No caso mais simples,

se 10 % da área da amostra é ocupada por milho, conclui-se que 10% da área da população é ocupada por essa cultura.

O **estimador por regressão** exige a obtenção de uma ou mais variáveis auxiliares, as quais devem ter seus valores disponíveis para todos os elementos da população, e não só para os presentes nas amostras. Pressupõe-se que as variáveis auxiliares são linearmente correlacionadas com a variável de interesse. Assumindo apenas uma variável auxiliar, os dados das amostras para ambas as variáveis ajustam-se por um modelo de regressão linear do tipo:

$$y = a + b x \quad (1)$$

onde:

x = variável auxiliar (com valores conhecidos para toda a população)

y = variável de interesse (com valores conhecidos só para a amostra)

a, b = parâmetros da regressão

O objetivo deste ajuste é descobrir o valor do parâmetro **b** da regressão que, por indução lógica, será considerado válido para toda a população. O valor que se quer estimar para a população, é então dado por:

$$Y = y_m + b (X - x_m) \quad (2)$$

onde:

$x_m$  = média de x na amostra

$y_m$  = média de y na amostra

X = média de x na população (conhecida)

Y = média de y na população (desconhecida, é o que se quer estimar)

b = parâmetro obtido do ajuste do modelo de regressão para a amostra

Tanto um estimador como o outro, por serem baseados em pressupostos estatísticos, resultam em estimativas sujeitas a erros aleatórios, que também são estimados e permitem analisar a confiabilidade dos resultados obtidos.

#### 1.4. O papel do sensoriamento remoto

Utilizar-se-á o termo “sensoriamento remoto” no sentido da aquisição de informação sobre a superfície da Terra, a partir do espaço, sem contato físico, fazendo uso das propriedades das ondas eletromagnéticas emitidas, refletidas ou difratadas pelos

objetos sensoriados. Este termo foi cunhado no começo dos anos 60 pelos geógrafos do departamento de pesquisa naval dos EUA, tendo sido aplicado às informações derivadas de instrumentos fotográficos e não-fotográficos. No caso mais simples, o olho humano pode ser considerado um sensor remoto, pois ele capta visualmente informação do mundo ao seu redor. Todavia, o uso do termo normalmente refere-se à obtenção e processamento de informação sobre o ambiente terrestre, particularmente seus recursos naturais e culturais, através do uso de fotografias, imagens ou outros dados relacionados, obtidos de uma aeronave ou de um satélite (Schott, 1997).

Em 1986, durante um curso oferecido pela FAO sobre aplicações do sensoriamento remoto em estatísticas agrícolas, o Diretor de Estatísticas Agrícolas da França, A. Jeanet, afirmava em seu pronunciamento que as imagens de satélite, obtidas por sensoriamento remoto, teriam um papel fundamental a desempenhar na obtenção de conhecimento sobre a agricultura. Na sua opinião, por causa das características inerentes às atividades agropecuárias, como a ampla dispersão espacial, o grande número de produtores, a variabilidade do tamanho das propriedades com muitas delas de pequeno porte, a inexistência ou fragilidade da associação entre produtores, etc., a obtenção de informação atualizada sobre este setor da economia seria particularmente difícil. Os dados obtidos por satélite teriam um grande potencial de utilização neste campo, pois eles podem fornecer informação sobre grandes áreas da superfície terrestre em um prazo relativamente curto e a pequenos intervalos de tempo (FAO, 1988). Mais recentemente, Terres et al. (1995) afirmaram que o sensoriamento remoto por satélites oferece dados sinópticos, objetivos e homogêneos, que podem ser geográfica e temporalmente registrados, e que poderiam, portanto, constituir uma ferramenta eficiente para o fornecimento de informação de alta qualidade sobre a agricultura em grandes áreas, inclusive ultrapassando fronteiras nacionais. Ortiz et al. (1997) registram que devido as características dos dados de sensoriamento remoto por satélite, desde que começaram a ficar disponíveis, no início dos anos setenta, eles passaram a ser empregados visando auxiliar na previsão de safras. Isto coincide com Ippoliti-Ramilo et al. (1999) para quem o caráter multi-espectral, sinóptico, repetitivo e global dos dados orbitais indica esta tecnologia como uma grande aliada dos sistemas de previsão de safra. Em verdade, como será demonstrado pelos exemplos do tópico seguinte, atualmente o uso do sensoriamento remoto já faz parte da rotina de diversos sistemas nacionais de estatísticas agrícolas.

As características dos sensores remotos para agricultura serão o assunto do próximo tema, aqui é suficiente que se diga que hoje há uma predominância do uso de imagens de sensores passivos, apesar deste tipo de sensor ser mais sujeito à interferência por nuvens. Como as nuvens são muito comuns sobre as regiões agrícolas, na época em que as lavouras estão em fase de desenvolvimento, sua presença nas imagens tem sido identificada por diversos autores como um importante obstáculo ao uso do sensoriamento remoto nos levantamentos agrícolas (Feiveson, 1984; Howard, 1984; Allen e Hanuschak, 1988). Por sua vez, os sensores ativos, por serem "independentes das condições climáticas", vêm sendo apontados por alguns autores como uma das soluções para o problema das nuvens (Verhoeve e De Wulf, 1999; Tso e Mather, 1999). Apesar disso, o seu uso ainda é restrito, o que provavelmente se deve ao custo elevado das imagens, a menor possibilidade de escolha entre sensores e a maior complexidade no processamento dos dados, quando comparados aos sensores óticos.

#### 1.4.1. Histórico de utilização

É inegável a liderança americana no uso do sensoriamento remoto em levantamentos agrícolas. Uma combinação de fatores contribui para isto: o pioneirismo em satélites de observação da terra com a bem sucedida série Landsat; a pujança da agricultura americana que, por motivos históricos e geográficos, se desenvolveu principalmente em propriedades de porte médio e topografia plana, com predomínio da monocultura; um extenso território sob uma administração centralizada e profissional; e a forte tradição na coleta de dados e na análise estatística. A Europa, estimulada pelo sucesso do programa americano, também tem avançado bastante nesta área, entretanto, o fato de que cada país tem seus mapas, suas estatísticas, etc. e que, além disso, em muitas regiões as glebas são minúsculas, chegando a menos de um hectare, e com tradição de diversificação de espécies, torna a obtenção de resultados tão animadores como os do EUA muito mais difícil. A seguir será destacado o exemplo americano e o europeu, o que já foi feito no Brasil, e um ligeiro apanhado do que vem acontecendo em outros países.

#### 1.4.1.1. Estados Unidos

Os dados de sensoriamento remoto foram utilizados em levantamentos agrícolas pela primeira vez na década de 50, pelo Serviço Nacional de Estatísticas Agrícolas (NASS), uma agência do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), na forma de fotografias aéreas, como auxiliares na construção de painéis amostrais estaduais por área.

A partir de 1963, com o lançamento dos satélites meteorológicos da série Nimbus, houve um incentivo para o desenvolvimento de um equipamento específico para a observação dos recursos terrestres. Assim, em 22 de julho de 1972 a agência espacial norte americana (NASA) lançou ao espaço o primeiro satélite da série Landsat (Gomarasca e Lechi, 1990). O Landsat 1 foi o primeiro satélite a disponibilizar ampla e regularmente seus dados. A política dos Estados Unidos ao lançá-lo era exatamente a de adquirir imagens sobre toda a superfície terrestre e torná-las acessíveis a qualquer um que quisesse comprá-las (Chipman, 1990).

O uso dos dados do Landsat pela NASS foi uma decorrência natural do processo de busca pelo aprimoramento dos métodos de amostragem por área, e contribuíram para demonstrar o valor das imagens, tanto para a construção dos painéis amostrais, quanto para o desenvolvimento de um estimador de área cultivada (Allen e Hanuschak, 1988). Assim, umas das primeiras utilidades atribuídas as imagens obtidas por satélite foi como material suplementar na construção de painéis amostrais por área, particularmente na estratificação de grandes áreas e, dependendo da resolução espacial, também na subdivisão dos estratos nas unidades básicas de amostragem e até mesmo na identificação e delineamento dos seus limites físicos (Wigton e Bormann, 1978).

Após terem consolidado uma metodologia para os levantamentos agrícolas domésticos, os Estados Unidos, como maior exportador de alimentos do mundo, passaram a se preocupar com o aprimoramento das estatísticas agrícolas em âmbito mundial (MacDonald e Hall, 1980). Assim, em 1974, três agências americanas, NASA, USDA e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), se uniram na realização do experimento chamado LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment), com os objetivos de assimilar a tecnologia de sensoriamento remoto, aplicar a

metodologia dos levantamentos por amostragem para monitorar a produção de trigo ao redor do mundo e para demonstrar a exeqüibilidade técnica e financeira de um sistema de monitoramento agrícola global (Houston e Hall, 1984). O LACIE foi conduzido por três anos agrícolas, de 1974 a 1977, inicialmente nos EUA, Canadá, e ex-URSS, e estendendo-se para outros países como Índia, Brasil e Argentina (MacDonald e Hall, 1980).

Praticamente em continuação ao LACIE, é planejado em 1978 e começa a funcionar em 1980 o AgRISTARS (Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing), um programa de longa duração, dedicado à pesquisa, desenvolvimento, teste e avaliação do sensoriamento remoto aeroespacial visando atender às necessidades do USDA. Para este programa, além das agências que já vinham colaborando no LACIE, NASA e NOAA, cooperavam também o Departamento do Interior americano (USDI) e a Agência para o Desenvolvimento Internacional (AID), esta última na condição de observadora e potencial usuária (AgRISTARS, 1983). Este programa, que se prolongou até 1988, tinha também o objetivo de expandir o uso da tecnologia para o milho, a soja e outras grandes culturas nas principais regiões produtoras do mundo (Houston e Hall, 1984), de forma a fornecer estimativas oportunas da área plantada, as quais teriam erros amostrais significativamente menores que os habitualmente conseguidos naquela época (Allen e Hanuschak, 1988).

Em 1987, a NASS, em cooperação com o Centro de Pesquisa Ames, da NASA, começou a desenvolver o aplicativo Estratificação e Amostragem Auxiliada por Computador (CASS), um programa de computador que emprega processamento digital de dados de satélite e atributos geográficos para facilitar a construção de painéis por área e a seleção de amostras. O aplicativo CASS foi planejado para automatizar os métodos manuais usados até então, que eram baseados em produtos cartográficos em papel. Em 1993, a construção do painel amostral e a seleção de amostras para o estado de Oklahoma foram, pela primeira vez, realizadas exclusivamente através do CASS. A partir de então, ele foi implementado no programa rotineiro de levantamentos da NASS, e é atualmente o único sistema em uso nos Estados Unidos para construção de painéis por área. Embora a maioria dos procedimentos sejam automatizados, a identificação de alguns limites físicos ainda é

um processo visual e, além disso, o processo de classificação automática é baseado em dados multitemporais colhidos à campo, o que onera bastante os custos. Apesar disso, o CASS constitui o mais importante passo da série de melhorias na construção de painéis por área e seleção de amostras durante os últimos dez anos (FAO, 1998).

#### 1.4.1.2. Europa

Os primeiros resultados obtidos pelo Landsat 1, divulgados internacionalmente em outubro de 1972, foram recebidos com tal entusiasmo que a Comissão da Comunidade Européia expressou sua intenção de avaliar o potencial da nova tecnologia de sensoriamento remoto no atendimento das suas necessidades nas áreas de políticas setoriais, agricultura e silvicultura. Devido à manifestação de interesse feita pelo Diretório Geral para Agricultura, foram escolhidos os campos da agricultura e silvicultura e foi apresentada uma proposta que foi aprovada pelo Conselho de Ministros da Comunidade em janeiro de 1973. Esta pesquisa, chamada Investigação dos Recursos Agrícolas no Norte da Itália e Sul da França (AGRESTE), foi incluída pela NASA nas investigações previstas para o Landsat 2. O objetivo específico relacionado à agricultura era o de inventariar os campos de arroz no norte da Itália e sul da França, o qual foi apenas parcialmente atingido. A conclusão geral foi que, as condições Européias exigiam um sensor tecnicamente mais avançado que o MSS (Klersy, 1992). Com base nesta experiência, estudos mais sistemáticos e programas realmente operacionais na Europa teriam de aguardar o lançamento da segunda geração de satélites, os Landsat TM (Thematic Mapper) e os SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) (Meyer-Roux e King, 1992).

Foi assim que apenas em 1987, para atender as necessidades da Política Agrícola Comum (CAP), da Comunidade Européia (EC), que buscava uma atualização do sistema de estatísticas agrícolas, foi proposto um projeto de pesquisa e desenvolvimento, que veio a ser aprovado pelo Conselho de Ministros em 1988 com recursos para um primeiro período de 1989 a 1993. O projeto denominado Monitoramento Agrícola por Sensoriamento Remoto (MARS) tinha como primeiro objetivo distinguir, identificar e medir a área das culturas agrícolas mais importantes, e em segundo lugar estimar a produção a tempo de permitir a tomada de decisões (Klersy, 1992).

O MARS tornou-se o suporte técnico do Fundo Europeu de Direcionamento e Garantia da Agricultura (EAGGF), que subsidia os agricultores, conforme as normas da CAP, para tentar reduzir a super produção de certas culturas dentro da EC. Como o subsídio é pago em função da área plantada declarada pelo agricultor, é fácil entender a importância de um sistema de checagem confiável, rápido e barato. Em 1993, 240 imagens de satélite (SPOT e Landsat TM) foram processadas para checar 35.000 pedidos de subsídio em toda a EC. O resultado foi que o sensoriamento remoto por satélite, auxiliado por um sistema de informações geográficas (SIG), provou ser uma ferramenta objetiva e eficiente em custos e prazos. A principal diferença entre o método usado no MARS e o utilizado nos EUA é que o contorno das unidades básicas de amostragem não são definidos por limites físicos no terreno e sim traçados artificialmente na forma de quadrados de 50 x 50 km ou círculos de 25 km de raio, de maneira a serem compatíveis com uma imagem individual do SPOT (Terres et al., 1995). Vossen (1995) cita como resultado do MARS, com respeito à estratificação, que o emprego das imagens de satélite mostrou-se a maneira ideal de se detectar áreas homogêneas quanto ao uso da terra, identificar os limites físicos dos segmentos e auxiliar na sua seleção. Por outro lado, o mesmo autor afirma que, com base nos resultados obtidos até então, "exceto em condições favoráveis, e dados os atuais estágio tecnológico e custo das imagens, o estimador de regressão não deve ser recomendado de um ponto de vista operacional para os serviços estatísticos regionais ou nacionais".

Além das iniciativas da EC, alguns países também têm ou tiveram seus próprios programas. Em 1979, o Ministério da Agricultura Italiano, em colaboração com o Consórcio Italiano para o Sensoriamento Remoto em Agricultura (ITA) iniciaram um programa cujo objetivo era inventariar a área das principais culturas e fazer a previsão do seu rendimento. Após alguns estudos de viabilidade, em 1986 os métodos foram adaptados para os dados da segunda geração de satélites e permitiram aplicações regionais para a cultura do milho. Os resultados foram animadores e em 1987 foi iniciado um novo programa chamado AGRIT, como objetivo de fornecer, em tempo hábil, a área plantada e a previsão de rendimento das culturas de trigo, cevada, colza, beterraba, girassol e soja (Meyer-Roux e King, 1992). Posteriormente ampliou-se a estimativa de área para todas as principais culturas e a passou-se de previsão de rendimento para estimativa de produção das dez mais importantes delas. Nos

primeiros anos, até 1989, o painel amostral por área nacional utilizava o método dos segmentos quadrados, posteriormente adotada no MARS. A partir de 1990, os segmentos passam a ser definidos por limites físicos reconhecíveis. Foram utilizadas imagens do Landsat TM até 1991 e do SPOT a partir de então, para a construção dos estratos e dos segmentos. Os dados do Landsat TM também são utilizados, após classificados através de um procedimento automático, como uma variável auxiliar do estimador de regressão. Infelizmente as estimativas feitas por estes levantamentos não foram incorporadas pelo Sistema de Estatísticas Italiano (SISTAN) do Instituto Italiano de Estatística (ISTAT), que ainda não utiliza o método de amostragem por área nos seus levantamentos agrícolas (FAO, 1998).

Na França, o Serviço Central de Levantamentos e Estudos Estatísticos (SCEES), do Ministério da Agricultura, desenvolve há quase três décadas levantamentos nacionais por amostragem pontual baseados em fotografias aéreas e observações terrestres anuais. Esse levantamento, chamado TER-UTI é realizado por agentes que visitam anualmente mais de 550.000 pontos, que são quadrados de 3 x 3 m, com a missão de registrar para cada ponto uma, e apenas uma, entre 81 características físicas e também uma, e somente uma, entre 25 características funcionais, ambas escolhidas de listas preestabelecidas. O TER-UTI cobre todo o território da França e permite o estudo de uma grande variedade de problemas agrícolas, florestais, ambientais e urbanos. Após o lançamento do SPOT, alguns inventários regionais de área plantada foram realizados com o objetivo de substituir ou complementar o esquema amostral por pontos por um painel amostral por segmentos, o qual poderia ser aprimorado pelo uso de dados de sensoriamento remoto (Meyer-Roux e King, 1992; FAO, 1998). Mas, o procedimento em uso é tão eficiente que uma nova ferramenta tecnológica só conseguirá provocar mudanças e garantir seu espaço quando oferecer uma vantagem comparativa muito evidente e significativa, o que ainda não parece ser o caso do sensoriamento remoto nos levantamentos agrícolas franceses.

Outros países, inclusive do Leste Europeu, também estão incorporando a tecnologia do sensoriamento remoto aos seus levantamentos agrícolas, principalmente devido à pressão da EC, através do EAGGF, por informações padronizadas. Eles geralmente baseiam-se nos métodos do projeto MARS, como a Espanha (FAO, 1998), a Grécia (Tsiligiridis, 1998), Portugal, Bélgica, Checoslováquia e Romênia (MARS, 1993).

#### 1.4.1.3. Brasil

No Brasil, compete à União organizar e manter os serviços oficiais de estatística, inclusive as estatísticas agrícolas, cuja competência, por delegação, cabe ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O IBGE tem mantido tanto um levantamento sistemático da produção agrícola, com dados obtidos de forma subjetiva, através de consulta a *especialistas*, por município, como um censo agropecuário, de periodicidade variável, com informação colhida, através de entrevistas, por estabelecimento rural (Collares et al., 1983).

A deficiência destas formas de coleta de dados, embora continue sendo apontada em trabalhos recentes (Ippoliti-Ramilo, 1999; Pino, 1999b), já é reconhecida há muito mais tempo. Ainda nos anos setenta, Batista et al. (1978b), referindo-se à necessidade brasileira de conhecimento da produção agrícola anual, considerava que a metodologia utilizada nas previsões de safra não satisfazia às exigências devido à sua subjetividade e à magnitude dos erros.

No planejamento do programa Landsat, o Brasil foi um dos países escolhidos para possuir e operar uma estação terrestre de recebimento dos sinais do satélite e um centro de processamento e distribuição de imagens, e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foi o órgão encarregado de construir e administrar estas instalações. Com isso, desde o lançamento do Landsat 1 o Brasil tem acesso aos dados de sensoriamento remoto através do INPE. Com uma equipe onde haviam membros com formação em ciências agrárias e estatística, consciente das deficiências dos levantamentos agrícolas nacionais, e que estava em contato estreito com o que ocorria nos EUA, logo surgiram na Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do INPE os primeiros trabalhos voltados para a previsão de safras utilizando-se de dados orbitais. Então, a partir de 1975, o INPE e a Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo passam a desenvolver o projeto Estatísticas Agrícolas (EAGRI), dentro do qual se realizariam diversos levantamentos parciais, ora abrangendo diversas culturas em um único município, ora avaliando uma única lavoura em todo o estado. Com o crescimento da experiência do INPE, foram expandidos os trabalhos, com atuações em outros estados e culturas como café e trigo no Paraná, cana de açúcar no Rio de Janeiro, trigo no Rio Grande do Sul (Tardin et al., 1976; Batista et al., 1978a e 1978b; Mendonça et al. 1979; Assunção e Duarte, 1980; Mendonça, 1981; Mendonça et al.,

1981; Costa et al., 1983). O amadurecimento das idéias, fruto da convivência com trabalhos de cunho prático e operacional, permitiu inclusive a proposição de avanços metodológicos originais, como no trabalho de Krug e Yanasse (1986).

Com a repercussão destes trabalhos e a capacitação de diversos técnicos brasileiros nos cursos de pós graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, passa a existir uma massa crítica nacional na área, suficiente para que, em 1986, fosse estabelecido um convênio entre o IBGE e o INPE visando a implantação do Sistema de Informações Agropecuárias (SIAG). O SIAG pretendia ser um levantamento em larga escala, baseado em métodos probabilísticos, técnicas de sensoriamento remoto e processamento geográfico das informações. Como em outros países, o trabalho foi inicialmente delineado para apenas parte do território nacional, abrangendo os estados de São Paulo, Santa Catarina, Paraná e o Distrito Federal. O projeto, que passou a se denominar Pesquisa Objetiva de Previsão de Safras (PREVS), só chegou a utilizar imagens do satélite Landsat 5 na fase de construção dos estratos, embora se pretendesse vir a utilizá-las como variável auxiliar dos estimadores por regressão. Embora algumas tentativas de desenvolver novas metodologias tenham sido realizadas (Medeiros et al., 1996), ao invés da evolução esperada, tanto em termos metodológicos como territoriais, o projeto se mantém nos moldes originais e atualmente é aplicado apenas no estado do Paraná (FAO, 1998; Ippoliti-Ramilo, 1999).

#### 1.4.1.4. Outros

Cada país, devido às suas características de área total, área agrícola, principais culturas, relevo, divisão geopolítica, disponibilidades de recursos humanos e técnicos, etc., estabelece os sistemas de Estatísticas Agrícolas a seu modo. É interessante observar que eventualmente os motivos de escolha desse ou daquele método não são tão fáceis de explicar, senão vejamos, o Canadá, um país desenvolvido, com imenso território de mais de 10 milhões de quilômetros quadrados, que conta aproximadamente 280 mil propriedades rurais, que possui um programa espacial próprio, tem na agricultura a sua segunda maior indústria primária responsável por 10% do PIB, exporta metade da sua produção agrícola, **não utiliza** até hoje nem mesmo fotografia aérea nos seus levantamentos agrícolas oficiais, apesar de já usar dados de sensoriamento de remoto para previsão de safras em levantamentos especiais há muitos anos (Ryerson et al., 1983). Já a Albânia, um país minúsculo com

menos de 30 mil quilômetros quadrados, pobre, abalado por mudanças políticas, com mais de 950 mil pequenas propriedades agrícolas, sem dispor de capacidade própria, material ou humana, na área de sensoriamento remoto, preparou toda a estratificação do seu painel amostral nacional com base em imagens Landsat em 1996 (FAO, 1998). Isso mostra que, de maneira alguma se pode falar em um padrão internacional de uso do SR em levantamentos agrícolas, e o que existe é uma enorme diversidade na intensidade e frequência com que são usados, quando são, em cada país.

Existem ainda alguns outros países que também se utilizam de imagens de satélite, principalmente para a construção dos estratos, como é o caso do Marrocos e do Paquistão (FAO, 1998). Já na Índia, há mais de uma década se realizam inventários agrícolas utilizando dados de sensoriamento remoto a partir de plataformas espaciais. Dados dos satélites de sensoriamento remoto indianos IRS 1A e 1B têm sido usados com sucesso para se obter previsões para a produção das culturas de arroz, mostarda e batata (Panigrahy e Chakraborty, 1998), trigo (Sridhar et al., 1994) e outras culturas (Nageswara Rao e Mohankumar, 1994;).

### 1.5. Conclusão

De tudo o que se viu sobre os levantamentos agrícolas e apesar da inequívoca utilidade do sensoriamento remoto, fica claro que ele não pode ser considerado uma panacéia que substituirá todas as outras formas de aquisição de informação sobre a agricultura. Muitas das variáveis geralmente mensuradas em um levantamento agrícola, como os indicadores sócio-econômicos e a situação fundiária das glebas, por exemplo, não são passíveis de obtenção por sensoriamento remoto no presente e nem se imagina que venham a ser num futuro próximo. Isto já era percebido pelos estatísticos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos logo no início da disponibilização de dados de satélite, em 1975, quando apesar de reconhecerem que o uso do sensoriamento remoto poderia vir a melhorar substancialmente a definição dos painéis amostrais por área e mesmo a eficiência da amostragem por área, ressaltavam que uma grande parcela das estatísticas agrícolas envolviam quantidades ou atividades não passíveis de mensuração por SR (Houseman, 1975).

Hoje, por todos os exemplos apresentados, pode-se afirmar que o único campo dentro dos levantamentos agrícolas onde o SR realmente se estabeleceu, foi o da construção

de painéis amostrais por área. E mesmo assim, surpreendentemente apenas um país, os EUA, incorporou definitivamente e de forma operacional, o SR ao seu programa de estatísticas agrícolas oficiais. Na Europa, apesar do incentivo da EC e da continuidade do MARS, cada país está em uma diferente fase de aplicação e incorporação da metodologia do projeto e, mesmo a Itália, que desenvolve um duradouro esforço nesse sentido, ainda não conseguiu incluir o SR na rotina dos seus levantamentos agrícolas oficiais. Nos demais países, os trabalhos estão muito mais no estágio de pesquisa do que de aplicação.

Por outro lado, algumas das preocupações do passado, que influenciaram fortemente o desenvolvimento do pensamento em certas áreas de aplicação do sensoriamento remoto, foram superadas pelos avanços tecnológicos, tanto nos próprios sistemas sensores, no caso das resoluções espacial e espectral, como em áreas associadas, como nos SIGs, no caso das correções geométricas e cálculo de áreas, e nos sistemas de posicionamento global (GPS), no caso da localização precisa de pontos ou limites no terreno. Estes avanços estão sendo incorporados pelas novas gerações de técnicos e, conseqüentemente, se refletirá nos futuros projetos nesta área. Outro fator importante a ser considerado é que a quase inacreditável evolução da microinformática está aumentando o acesso de cada vez mais pessoas em todo o mundo aos meios de comunicação e computação pessoais. No Estado de São Paulo, no ano agrícola 1995-1996, embora apenas 3,7% dos proprietários das unidades de produção agropecuária declarassem utilizar o computador em suas atividades, eles representavam 19,7% da área agrícola do estado (Francisco e Martin, 1999). Considerando-se a velocidade de crescimento deste mercado, hoje esses números devem ser muito maiores.

Houve uma época de otimismo exagerado com o potencial do sensoriamento remoto, quando se imaginava que ele permitiria, segundo A. Jeantet, até "contar as laranjas no pé!" (FAO, 1988). Infelizmente ainda não se alcançou este estágio. Para evitar gerar expectativas deste tipo, talvez seja necessário correr o risco do conservadorismo e assumir uma visão bastante realista a respeito da vocação do sensoriamento remoto em se tratando de levantamentos agrícolas. A seguir são apresentadas as expectativas do autor com relação ao comportamento das relações entre as estatísticas agrícolas e o sensoriamento remoto num futuro próximo.

A disponibilidade de acesso aos dados de um número cada vez maior de satélites de observação terrestre deverá baratear o custo de aquisição de imagens e aumentar a chance de obtenção de imagens livres de nuvens nas épocas de desenvolvimento das culturas agrícolas. O desenvolvimento de aplicativos do tipo SIG cada vez mais amigáveis, poderosos e confiáveis, facilitará o manuseio de imagens multisensor e multitemporais, além das multi-espectrais. Conseqüentemente, o uso das imagens obtidas por sensoriamento remoto orbital deverá se tornar cada vez mais corriqueiro na construção de painéis amostrais por área, na definição de estratos e na identificação dos limites de talhões nos levantamentos agrícolas em todo o mundo.

A alta precisão, o baixo custo e a facilidade de operação dos aparelhos de GPS atualmente disponíveis deverá incentivar o aumento da utilização de esquemas amostrais probabilísticos, por área, com segmentos fechados. A necessidade de limites físicos facilmente identificáveis no terreno, citada no passado como essencial por inúmeros autores, deixará de ser um fator limitante no estabelecimento de segmentos com formas geométricas regulares.

O aumento das resoluções espacial, espectral e radiométrica dos sensores e das capacidades de armazenamento e processamento de dados dos computadores, juntamente com o aprimoramento das técnicas de classificação digital, permitirão que a identificação de culturas via SR se torne operacional com um grau de confiabilidade suficiente para que possa ser incluída na rotina dos levantamentos agrícolas. Pelos mesmos motivos, o uso do estimador por regressão deverá se tornar viável para diversas aplicações.

A dificuldade em solucionar-se os problemas de interferência atmosférica, o compromisso praticamente insolúvel para um único sensor entre as resoluções temporal e espacial, e a complexidade inerente aos processos biológicos envolvidos no desenvolvimento vegetativo das culturas, devem continuar impedindo a operacionalização do uso de imagens de satélites de alta resolução espacial para a estimativa de produtividade das culturas. As estimativas de rendimento deverão continuar tendo caráter regional, e não ao nível de talhão, e se apoiando em modelos de crescimento, dados agrometeorológicos e em índices de vegetação obtidos a partir

de dados de sensores de baixa resolução espacial e alta resolução temporal (Boissezon, 1995; Laguet, 1995; Bouman, 1995).

A obtenção de dados de campo, chamados de verdade terrestre, continuará sendo imprescindível para os levantamentos agrícolas, mesmo naqueles que se apoiem fortemente em dados de sensoriamento remoto.

## PARTE 2

### SENSORES REMOTOS PARA AGRICULTURA

#### 2.1. Introdução

Historicamente, o Brasil costuma dar saltos tecnológicos em muitas áreas. Entende-se por salto, a passagem de um estágio de pouco ou nenhum uso de tecnologia para um de nível tecnológico alto, sem passar pelos estágios intermediários. Estas mudanças bruscas de patamar tecnológico podem ocorrer tanto ao longo do tempo, de forma homogênea em todo o país, como num mesmo instante, de uma região para outra. Por exemplo, alguns agricultores brasileiros já estão praticando a agricultura de precisão enquanto a maioria nem mesmo faz análise química do solo. Não seria diferente com o sensoriamento remoto. Ao contrário dos EUA e de alguns países Europeus, que tiveram seu território várias vezes recobertos por campanhas aerofotogramétricas antes de começarem a utilizar imagens obtidas por satélites, no Brasil algumas áreas do território foram imageadas remotamente por sensores orbitais sem nunca terem sido alvo de uma fotografia aérea. Como a situação tende a caminhar para um cenário ainda mais favorável ao uso de dados orbitais do que de baixa altitude, toda a discussão se dará tendo em mente os sensores a bordo de satélites.

Outro ponto a ressaltar é que em se tratando de fotos ou de imagens e, conseqüentemente, dos sensores que as obtêm, o conceito de atualidade varia muito de uma disciplina para outra. No caso da Geologia, por exemplo, as fotografias obtidas pelo projeto Gemini, em 1965 (Simonett et al., 1983), são tão úteis como se tivessem sido obtidas ontem, pois a escala de tempo onde se medem as alterações geológicas é de milhares a milhões de anos. No caso das atividades agrícolas, as mudanças ocorrem em dias, no caso de desastres como geadas, enchentes, queimadas, ventanias, etc., ou no máximo em anos, no caso de culturas perenes, alteração no padrão de ocupação e uso do solo, erosão, etc. Além disso, em agricultura os dados oriundos do sensoriamento remoto são usados predominantemente com objetivos de acompanhamento e previsão, o que só tem sentido sobre imagens tão atuais quanto for possível. Portanto, quando se fala em aplicações agrícolas não há muito sentido, exceto pelo valor histórico, que não é o caso deste trabalho, em abordar os sensores que não estão mais em operação.

Primeiramente é preciso que se diga que não existe propriamente um tipo de **sensor remoto para a agricultura**, pelo menos não no sentido de que só a agricultura seria atendida por esse sensor ou, por outro lado, que apenas esse sensor serviria à agricultura. O que existem são características dos sensores que podem ser mais ou menos adequadas à obtenção de dados sobre a agricultura. Estas características, em primeiro lugar, e os sensores que melhor as reúnem, em segundo, serão o principal foco deste ensaio.

A abordagem adotada deixará de lado algumas classificações clássicas dos sensores, como a que os divide em sensores de varredura ou de arrasto, por exemplo. Justifica-se esta decisão com o argumento de que a mudança de um tipo para outro, neste caso, não tem nenhum efeito nas aplicações agrícolas. Não é o que acontece se for diminuída a resolução espacial ou mudado o posicionamento de uma banda no espectro, por exemplo. O ponto de vista adotado será o do usuário com interesse específico, agricultura, portanto, definições de engenharia feitas na fase de projeto como tipo e altitude de órbita, horário de passagem sobre o equador, etc., não serão discutidas. Como estas definições irão determinar as características das imagens geradas, ao fazer sua escolha baseado nas características, digamos mais palpáveis, das imagens, o usuário estará, implicitamente, escolhendo os parâmetros de engenharia.

Outro item geralmente incluído nos tradicionais capítulos sobre os fundamentos dos sensores e que não será discutido aqui é a resolução radiométrica. Apesar de realmente influir na qualidade da discriminação entre objetos da cena agrícola, o seu efeito é tão pequeno [uma melhoria de 2 a 3% na capacidade de separar perfis espectrais de dosséis, por banda, ao passar de 64 para 256 bits, segundo cita Simonett, (1983)] e a sua definição durante o projeto do sensor envolve tantas outras considerações, que este é o tipo da característica sobre a qual o usuário não tem o mínimo controle.

A seguir serão apresentadas as principais características de sensores orbitais e como elas afetam a utilização dos dados de sensoriamento remoto na agricultura. Apesar de estarem intimamente relacionadas, serão tratadas de maneira separada para facilitar a

exposição. Finalmente, serão descritos os principais sistemas sensores com potencial de uso na agricultura.

## 2.2. Faixas do espectro

A radiação da cena agrícola será tratada com detalhes em tema próprio e, portanto, as afirmações sobre as propriedades radiométricas dos alvos agrícolas serão dadas aqui por definição, ou seja, sem demonstração. Serão considerados como alvos de interesse agrícola apenas a vegetação e o solo, desprezando-se água, rocha, gelo, atmosfera e meio urbano.

Em princípio, o sensoriamento remoto poderia medir a energia emanando da superfície da terra em qualquer comprimento de onda. Entretanto, restrições tecnológicas, a opacidade seletiva da atmosfera terrestre, o espalhamento por partículas atmosféricas e a aplicabilidade dos dados excluem certas regiões do espectro. Os principais intervalos utilizados no monitoramento dos recursos terrestres estão entre 0,4 e 14  $\mu\text{m}$ , chamada de região do visível/infravermelho, e entre 30 e 300 mm, ou, em frequência, entre 1 e 10 GHz, chamada de região de microondas (Richards, 1995; Gomasca e Lechi, 1990).

Na região do visível/infravermelho, o valor da energia refletida medido por um sensor, dependerá fundamentalmente da pigmentação, teor de umidade e estrutura celular, no caso da vegetação; e da composição mineral e da umidade, no caso do solo (Richards, 1995). Segundo Simonett et al. (1983), o crescimento (biomassa) e o desenvolvimento (fase fenológica) das culturas agrícolas são melhor monitorados usando-se bandas estreitas na região do visível e do infravermelho refletido. Isso limitaria o interesse aos intervalos entre 0,4 a 0,75  $\mu\text{m}$ , que é a faixa do visível, e entre 0,75 e 3  $\mu\text{m}$ , que é a faixa do infravermelho próximo (IVP). Nesta última, porém, existem as bandas de absorção do vapor d'água atmosférico em 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$ , que inviabilizam a obtenção de medidas aproveitáveis nas regiões em torno deste valores. A faixa do IVP fica então dividida em três intervalos observáveis, de 0,75 a 1,25  $\mu\text{m}$ , de 1,55 a 1,8  $\mu\text{m}$  e de 2 a 2,4  $\mu\text{m}$  (Cunha, 1996).

Tanto a energia emitida pelo sol e refletida pelo alvo terrestre, como a emitida pelo alvo em função da sua temperatura, assumem valores muito pequenos na região além

dos 3  $\mu\text{m}$ , chamada de infravermelho médio e distante ou infravermelho termal, quando comparados aos valores observados na região do visível e IVP. Em função disso, existe um compromisso entre a relação sinal/ruído, a área mínima do elemento de cena imageado instantaneamente e a largura de banda, nos comprimentos de onda desta faixa do espectro. Além do mais, devido aos efeitos atmosféricos, apenas as faixas entre 3 e 5  $\mu\text{m}$ , e entre 8 e 14  $\mu\text{m}$ , são passíveis de monitoramento (Lillesand e Kiefer, 1994). O resultado prático é que ainda não é possível monitorar o estado das culturas agrícolas através de sua temperatura medida por sensores orbitais. A única aplicação dos sinais na faixa do infravermelho termal relacionada às atividades agrícolas está no monitoramento de queimadas, mas mesmo assim de forma marginal, pois estas informações têm mais valor para a área do meio ambiente do que propriamente para a agricultura.

Na faixa de microondas passam a operar os radares, que apesar de não terem atingido o nível operacional para aplicações agrícolas até o momento, possuem algumas vantagens únicas que exigem pelo menos sua consideração. A primeira e mais importante, com certeza, é a capacidade de operar relativamente independente das condições atmosféricas, o que permite a obtenção de imagens com a periodicidade exata determinada pela órbita do satélite, havendo ou não nuvens no momento da passagem. Para a agricultura não irrigada, que é cultivada durante o período das chuvas, esta é uma qualidade muito importante. A segunda vantagem de se utilizar esta faixa de comprimento de onda é que, dependendo da frequência, polarização, e outros parâmetros físicos, a radiação de microondas pode penetrar o dossel das culturas (Frery et al., 1999). Isto permitiria o monitoramento de culturas sombreadas, como o cacau, por exemplo, o que parece ser impossível para os sensores que operam no visível e IVP.

Em resumo, no atual estágio de desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto, as faixas do espectro que não podem deixar de ser cobertas por um sensor útil para a agricultura são quatro, uma no visível (de 0,4 a 0,75  $\mu\text{m}$ ) e três no IVP (de 0,75 a 1,25  $\mu\text{m}$ , de 1,55 a 1,8  $\mu\text{m}$  e de 2 a 2,4  $\mu\text{m}$ ). A divisão destas faixas em bandas será tratada quando se discutir a resolução espectral.

### 2.3. Resolução espacial

A definição mais simples de resolução espacial estabelece que ela é determinada pelo tamanho do elemento de cena imageado instantaneamente pelo sensor (Richards, 1995). Embora seja útil na fixação do conceito, ela não resolve a questão de se escolher uma resolução adequada aos objetivos da investigação agrícola. A questão da resolução espacial está indissociavelmente ligada à idéia de escala. Segundo Lillesand e Kiefer (1994), a definição de escala pode ser problemática, e a sua discussão no domínio do sensoriamento remoto preenche livros inteiros (Quattrochi e Goodchild, 1996). Conforme De Cola (1996), o desenvolvimento de sensores cobrindo uma larga faixa de resoluções espaciais permite explorar de pequenos detalhes até vastos cenários, não devendo-se aceitar nenhuma escala como verdadeira e sim buscar representações múltiplas do mundo.

O que é importante reconhecer é que a resolução apropriada ao esforço de modelagem de um determinado fenômeno biofísico é uma função tanto da estrutura do ambiente sob investigação quanto do tipo de informação desejada (Lillesand e Kiefer, 1994). Por exemplo, a resolução espacial exigida por um produtor irrigante adepto da agricultura de precisão será necessariamente diferente daquela adequada a um sistema de previsão de safras nacional.

Apesar de tantos senões, é possível chegar a alguns valores mais adequados às atividades agrícolas, desde que obedecido o princípio de fazer corresponder a resolução espacial à escala de interesse do usuário. Assim, para usuários com interesse na escala de propriedades rurais de 100 ha, em média, a resolução de 2 x 2 m parece ser suficiente; mesmo para áreas maiores do que 200 ha, o tamanho do elemento de cena não deve passar de 5 x 5 m, pois além deste tamanho não é possível detectar precocemente alguns tipos de injúrias às plantações, como o ataque de certas pragas, por exemplo (Anderson et al., 1999). Este tipo de sensor de muito alta resolução ainda não é de uso comum. O nicho de aplicação mais óbvio é a chamada agricultura de precisão, que também está dando seus primeiros passos.

Já para usuários cujo interesse esteja situado na escala regional, ou seja, que almejem uma visão sinóptica da agricultura sobre uma área muitas vezes maior que a de uma propriedade, mas que ainda permita a identificação dos talhões das diferentes

culturas, a resolução entre 10 e 30 m parece ser a mais adequada. Com elementos maiores que 30 x 30 m, mesmo para as lavouras com talhões de vários hectares, começa a surgir um número muito grande de elementos de cena impuros, principalmente nas bordas, dificultando a definição dos limites entre as várias classes de uso do terreno (Ryerson et al., 1983; Badhwar et al., 1984). Esta é a resolução típica dos sensores mais utilizados em agricultura até o momento. Os principais usuários de dados com esta resolução têm sido as instituições acadêmicas e governamentais, com poucos exemplos de aplicações privadas (Anderson et al., 1999), o que confirma o potencial para obtenção de informações de cunho regional.

Os sensores de baixa resolução espacial, com elementos com dimensões na casa das centenas de metros, não se prestam bem para a identificação de classes de uso do solo, mas são muito úteis para o usuário interessado no monitoramento em âmbito global, pois este tipo de sensor consegue cobrir faixas muito amplas da superfície terrestre a cada órbita completada, garantindo uma excelente visão sinóptica e um intervalo de tempo curto entre uma passagem e outra sobre a mesma área. Devido às suas dimensões, o elemento de cena dos sensores de baixa resolução espacial, raramente poderá ser puro. Mesmo assim, considerando o tempo de revisita e dada uma seleção adequada de bandas, é possível utilizar séries multitemporais de dados destes sensores no acompanhamento fenológico da cobertura vegetal natural e do estágio de desenvolvimento de cultivos agrícolas extensos (Venturieri e Santos, 1998). Como a agricultura, por natureza, é uma atividade que segue o uso original da terra (Epiphanyo, 1997), mesmo as pequenas áreas cultivadas, desde que não sejam irrigadas, tendem a acompanhar o comportamento da vegetação natural ao redor e, portanto, podem ter seu vigor monitorado, basicamente através dos chamados índices de vegetação, pelos sensores de baixa resolução espacial.

Em síntese não existe uma única, nem mesmo a melhor, resolução espacial para a agricultura. O que determina a resolução adequada para cada caso é o que se quer observar e com que intenção. Neste sentido, para o agricultor que quer monitorar os seus talhões para corrigir manchas de baixa fertilidade, controlar o ataque de pragas, doenças e plantas daninhas, ou monitorar a qualidade do sistema de irrigação, a resolução deve ficar entre 2 e 5 m. Para o órgão governamental que pretende utilizar o sensoriamento remoto na estimativa de área plantada por município ou região, o

elemento de cena deve ficar entre 10 m x 10 m e 30 m x 30 m. Já para as instituições nacionais ou supranacionais, cujo objetivo seja monitorar o comportamento das grandes regiões produtoras ao longo do tempo, a resolução pode atingir a marca dos 1000 m.

#### 2.4. Resolução temporal

Os sensores orbitais levam apenas uma fração de segundos, ou até alguns poucos segundos, para compor uma imagem, ou cena, que cobre de milhares a milhões de quilômetros quadrados. Para todos os efeitos práticos isto significa que o registro dos sinais oriundos de cada elemento de cena foram feitos instantaneamente, ou seja, ao mesmo tempo. Como uma das premissas básicas do sensoriamento remoto é monitorar as mudanças através do tempo (Simonett et al., 1983), faz-se necessário que os sensores, após um certo intervalo, repitam as medidas sobre uma mesma área. É a este intervalo que se dá o nome de resolução temporal.

Devido às restrições da ótica e da mecânica orbital, existe um compromisso entre as resoluções espacial e temporal. Para um dado sensor, numa órbita mais baixa, a resolução espacial aumenta, mas com isso a área imageada instantaneamente é menor; como a área do planeta é fixa, o satélite que carrega o sensor levará mais tempo para recobri-la, diminuindo a resolução temporal. Por outro lado, se eleva-se a órbita, a área imageada a cada momento é maior, mas há um prejuízo na resolução espacial. Existem duas soluções para esse impasse até o momento, a utilização de mais de um sensor ou a utilização de sensores com o recurso da visada lateral.

A solução de se utilizar mais de um sensor parece ótima. Se um sensor com resolução espacial adequada aos propósitos do usuário tem resolução temporal de 20 dias e ele precisa de diminuí-la para 10 dias, seria apenas questão de lançar outro sensor com as mesmas características e com 10 dias de defasagem na passagem sobre um mesmo ponto. O principal problema desta solução é o custo. Tanto que, até o presente, em se tratando de satélites civis de baixa altitude, nunca foi realizado o lançamento simultâneo de mais de um exemplar do mesmo modelo; o que eventualmente pode ocorrer, dentro de uma série, é a sobreposição do período de funcionamento de dois ou mais satélites similares, como é o caso atual dos Landsat 5 e 7. O mais comum é o funcionamento simultâneo de sensores da mesma faixa de

resolução espacial e temporal, mas de séries diferentes, como é agora o caso dos Landsat, SPOT e CBERS, por exemplo. Neste caso o usuário, para poder usufruir da melhoria da resolução temporal, deverá estar capacitado para realizar uma análise multisensor, o que ainda não é trivial. Embora não esteja num estágio totalmente operacional, este tipo de abordagem deve crescer muito nas atividades agrícolas com o previsto aumento de opções em termos de sensores, pois ela tem a vantagem adicional de aumentar a chance de obtenção de imagens livres de nuvens.

A outra opção para se conseguir aumentar a resolução temporal é a chamada visão lateral. Neste caso o satélite é capaz de mover o sensor de modo a direcioná-lo para uma região de interesse que não esteja exatamente a nadir da sua trajetória. Esta solução é bastante interessante porque, mesmo usando um único sensor, dá uma certa flexibilidade no estabelecimento do intervalo entre as visitas a um mesmo ponto da superfície. Esta característica é especialmente importante no monitoramento de áreas atingidas por desastres, como geadas, enchentes, secas, ventanias, incêndios, pragas, etc. Outro aspecto interessante é que, se o sistema permitir a incorporação de informações dos sensores meteorológicos, pode ser feita uma busca por regiões livres de nuvens e priorizar a obtenção de imagens sobre elas. Também aqui o grande problema é a operacionalização do uso de imagens obtidas fora do nadir por usuários não especialistas. A correção das distorções geométricas e do efeito atmosférico em imagens oblíquas é bastante mais complexo que no caso das imagens padrão, obtidas com o sensor posicionado verticalmente sobre o centro da cena alvo. Adicionalmente, existe a questão da incerteza na obtenção da imagem sobre uma determinada área de interesse; isto ocorre porque, se o sensor pode ser movido para imagear uma cena lateral, obviamente ele deixa de imagear a cena a nadir, então, a vantagem torna-se uma restrição pois um usuário individual não tem acesso nem controle dos critérios que irão determinar a obtenção da imagem sobre esta ou aquela área.

Ao final, pode-se dizer que, do ponto de vista da agricultura, novamente o que vai determinar a resolução temporal adequada é o uso que se vai fazer dos dados e quais as peculiaridades do agrossistema que se quer monitorar. Então, se o objetivo for o de acompanhar o desenvolvimento das principais culturas anuais, o intervalo ideal entre uma observação e outra deveria ficar em torno de 10 dias (Simonett et al., 1983). Para as culturas semiperenes e perenes, este intervalo pode aumentar e ficar entre 15 e 30

dias. Já a detecção de desastres exigiria uma disponibilidade quase imediata dos dados, uma questão de 1 a 3 dias. Para fins de monitoramento em âmbito global, a resolução temporal dos atuais sensores não é restritiva, pois algumas boas imagens durante o ano são suficientes, sendo mais importante a continuidade por longos períodos.

## 2.5. Quantidade, posição e largura das bandas espectrais

Em um sensor, banda espectral é uma região, delimitada do espectro da radiação eletromagnética, dentro da qual a energia total recebida é transformada em uma única medida. A resolução espectral é dada pela dimensão, ou largura, da banda espectral. A posição da banda é a faixa de comprimento de onda que ela cobre. As posições possíveis para as bandas de um sensor já foram definidas quando se tratou das faixas do espectro no item 2.2. Tanto a posição quanto a largura das bandas espectrais são muito importantes, pois são elas que determinarão a capacidade de um sensor em distinguir os vários alvos presentes em uma cena imageada (Schowengerdt, 1997).

A resolução espectral de um sensor será tanto maior quanto mais estreitas forem as suas bandas. Quanto ao número de bandas, os sensores se dividem em multi-espectrais, com menos de uma dezena de bandas, e hiperespectrais, com algumas dezenas e até centenas de bandas. Como a faixa do espectro eletromagnético coberta pelos sensores é finita, a medida que aumentamos o número de bandas (não sobrepostas) a resolução espectral também aumenta. A maioria dos autores concorda que quanto mais alta a resolução, maior a possibilidade de se distinguir os diferentes alvos presentes na cena (Simonett, 1983; Lillesand e Kiefer, 1994), entretanto, Price (1994) chama a atenção tanto para o potencial quanto para os problemas na interpretação de imagens hiperespectrais de alta resolução. Também é importante lembrar que devido às restrições físicas do mundo real, os instrumentos com bandas muito estreitas começam a ter problemas relacionados à baixa relação sinal/ruído, obrigando o aumento do tamanho do elemento de cena, reduzindo a resolução espacial.

Para que se possa definir a posição, o número e a largura das bandas de um sensor, que melhor atenda às necessidades da agricultura, é preciso se conhecer as curvas de reflectância espectral dos alvos agrícolas. Esta curva é a expressão gráfica da

reflectância espectral de um objeto como função do comprimento de onda (Lillesand e Kiefer, 1994). Com respeito aos sensores multi-espectrais e tratando-se de acompanhar o desenvolvimento da vegetação agrícola em geral, as bandas essenciais são duas, uma no visível, na região do vermelho, e outra no IVP (Knipling, 1970; Formaggio, 1989; Boissard et al., 1992).

Já os sensores hiperespectrais têm potencial para atender a objetivos mais refinados como identificação de espécies, estimativa de produção de biomassa, monitoramento da infestação de pragas, doenças e plantas daninhas, etc. Para isso, será necessário um conhecimento muito mais detalhado da curva de reflectância espectral de cada espécie cultivada e suas relações com as características morfológicas, fisiológicas e agronômicas das plantas. Neste sentido, seria importante a formação de bancos de dados que armazenassem o maior número possível de exemplos dessas curvas, o que poderia ser chamado de biblioteca espectral (Price, 1994). Uma meta-análise, feita a partir dos dados desta biblioteca, permitiria identificar aquelas características com alto potencial de discriminação entre alvos. O tipo e a concentração de pigmentos nas folhas das plantas, por exemplo, influenciam significativamente a intensidade e a posição dos picos de reflectância na porção visível espectro (Curran et al., 1991). No IVP é a estrutura interna das folhas, extremamente variável, que interfere na reflectância (Lillesand e Kiefer, 1994). Apenas a partir da sistematização destes conhecimentos é que será possível ao usuário, interessado em sensoriamento remoto agrícola, definir o número, a largura e a posição das bandas dos sensores hiperespectrais que melhor atendam aos seus objetivos específicos.

Outra abordagem possível no uso dos dados hiperespectrais, devido a abundância de informação quantitativa disponível, é o tratamento puramente estatístico dos dados. Um exemplo do imenso potencial, mas também da complexidade, deste tipo de aplicação pode ser visto no trabalho de Haertel e Landgrebe (1999), no qual consegue-se uma excelente porcentagem de classificação correta (de 86 a 100%) de alvos normalmente muito difíceis de separar através de técnicas de sensoriamento remoto. A área teste estava cultivada com milho ou soja na fase inicial de desenvolvimento ( $\approx 5\%$  de cobertura vegetal do solo), e cada cultura aparecia sob três formas de manejo: plantio direto, cultivo mínimo ou convencional. Para conseguir este incrível resultado, entretanto, foi necessária: a utilização de 30 bandas hiperespectrais;

um número *suficientemente grande*, mas não especificado, de amostras (por região) de treinamento; amostras de treinamento compostas por 180 elementos de cena; e uma sofisticada técnica estatística. Apesar dos bons resultados na classificação, os próprios autores reconhecem que maiores estudos precisam ser feitos no sentido de permitir o uso de um menor número de amostras de treinamento, bem como desenvolver-se um método operacional de segmentação de imagens em espaços multi-espectrais de alta dimensão. Os dados foram obtidos pelo sensor AVIRIS e a única referência à forma de escolha das bandas é que elas estavam uniformemente espaçadas ao longo da região do espectro coberta pelo sensor.

Em suma, para os interesses agrícolas é imprescindível que o sensor realize suas medidas em pelo menos duas posições no espectro, na faixa do vermelho e na do IVP. Quanto maior o número e menor a largura de bandas, cresce a capacidade de discriminação entre alvos. A escolha de bandas em sensores hiperespectrais deve ser decidida caso a caso e seu uso ainda não é operacional.

## 2.6. Disponibilidade, acesso e custo

Os dados coletados pelos sensores orbitais sobre uma determinada área são armazenados a bordo na forma digital por um curto espaço de tempo e depois precisam ser descarregados, ou seja, eles devem ser transmitidos para uma estação receptora em terra onde serão recebidos, decodificados e tratados de forma a comporem o que se convencionou chamar de uma imagem ou cena. Cada série de sensores é administrada de forma própria, com variações no que diz respeito ao número de estações de terra, sua distribuição à volta do globo, política de gravação contínua ou sob encomenda, etc. Portanto, a disponibilidade dos dados de um sensor sobre uma determinada área depende, não só da obtenção regular dos mesmos, mas da sua efetiva gravação, transmissão, decodificação e tratamento, de forma adequada e oportuna para os fins a que se destinam.

Cada sensor possui uma enorme quantidade de parâmetros individuais que são necessários para que, mesmo após a decodificação e o tratamento, os dados, na forma de imagens, possam ser interpretados e analisados. Estas informações vão desde as mais simples até as mais complexas como, por exemplo: formato digital de armazenamento dos dados; número, largura e posição das bandas espectrais;

resolução espacial; sistema de referência para localização da cena; resolução temporal, com datas e horários das passagens; fatores para correção geométrica e radiométrica; etc. Portanto, além dos próprios dados, na forma de imagens, também as descrições detalhadas de cada uma destas particularidades devem ser amplamente distribuídas, em documentos facilmente recuperáveis e escritos em mais de um idioma. O acesso aos dados, então, será medido pela facilidade e rapidez com que o usuário pode obter, não só as imagens, como todas as informações necessárias ao seu bom uso.

Finalmente, o custo dos dados é um fator relativamente importante para a sua aplicabilidade na agricultura, dependendo para quem e para que eles se destinam. Em aplicações rotineiras sobre grandes regiões, geralmente de caráter público e conduzidas por instituições governamentais, a discussão ficará quase sempre baseada no custo por quilômetro quadrado (FAO, 1988). Para sensores dentro de uma mesma faixa de resolução espacial ou espectral, esta é uma forma interessante de comparar custos. Nas aplicações acadêmicas, em geral há uma quantidade muito grande de exigências específicas a serem atendidas, o que deixa os custos em segundo plano. É no uso privado, por empresas ou agricultores, que os custos assumem um papel preponderante, pois então a comparação não se dá somente entre o valor do quilômetro quadrado na imagem de cada sensor, mas sim entre o custo da imagem e o benefício que ela poderá trazer. Segundo Anderson et al. (1999), qualquer um que já tenha tentado convencer um agricultor a usar uma nova tecnologia que custa muito caro e parece ser muito boa para ser verdade, sabe que está perdendo seu tempo.

## 2.7. Sensores em operação

Serão considerados aqui aqueles sensores que possuem a maioria das características adequadas aos interesses agrícolas descritas anteriormente, e que já foram lançados e ainda estão operacionais. Obedecendo ao critério de disponibilidade e acesso, os sensores dos programas espaciais russo, japonês, indiano e chinês (com exceção do CBERS) não serão abordados.

Como alguns satélites carregam mais de um sensor e considerando-se que, do ponto de vista da utilização da imagem em agricultura, é mais importante saber separar os

sensores pelo que eles fazem do que pelo satélite que os transporta, optou-se por uma apresentação por sensor e não por satélite. Além disso, considerando-se que para a agricultura a resolução espacial é a maior definidora do tipo e da extensão de uso das imagens obtidas por sensoriamento remoto, este foi o critério de agrupamento dos sensores passivos. Os sensores ativos são tratados em separado pois todo o processo de aquisição, tratamento e interpretação dos dados é muito diferente daquele utilizado pelos sensores óticos.

#### 2.7.1. Alta resolução espacial

Nesta classe estão os sensores com resolução espacial básica entre 10 a 30 m. Até hoje estes são sem dúvida os sensores mais utilizados em aplicações agrícolas em todo o mundo. O principal uso das imagens produzidas a partir dos seus dados tem sido a localização, delimitação e cálculo das áreas cultivadas. Quando associados a dados obtidos em terra e integrados aos SIGs, também são muito utilizados na classificação de ocupação e uso do solo, zoneamento agrícola e previsão de safras (Sano et al., 1998). As suas características básicas estão registradas na tabela 1.

Tabela 1. Principais sensores de alta resolução espacial para uso na agricultura.									
Satélite		Landsat 5 e 7		CBERS		SPOT 4	TERRA		
Sensor		TM	ETM+	CCD	IRMSS	HRV	Aster 1	Aster 2	Aster 3
Altitude (km)		705	705	778	778	830	705	705	705
Faixa imageada		185	185	113	119	117	60	60	60
Revisita		16	16	26/3	26	26/3	16/-	16/-	16/-
No. de bandas		7	7+1	4+1	3+1	4+1	3	6	5
Banda 1		0,45-0,52	0,45-0,52	0,45-0,52	1,55-1,75	0,50-0,59	0,52-0,60	1,60-1,70	8,13-8,48
Banda 2		0,52-0,60	0,52-0,60	0,52-0,59	2,08-2,35	0,61-0,68	0,63-0,69	2,15-2,19	8,48-8,83
Banda 3		0,63-0,69	0,63-0,69	0,63-0,69	10,4-12,5	0,78-0,89	0,76-0,86	2,19-2,23	8,93-9,28
Banda 4		0,76-0,90	0,76-0,90	0,77-0,89	-	1,58-1,75	-	2,24-2,29	10,2-10,9
Banda 5		1,55-1,75	1,55-1,75	-	-	-	-	2,30-2,37	10,9-11,6
Banda 6		10,4-12,5	10,4-12,5	-	-	-	-	2,36-2,43	-
Banda 7		2,08-2,35	2,08-2,35	-	-	-	-	-	-
Pancromática		-	0,5-0,9	0,51-0,73	0,50-1,10	0,61-0,68	-	-	-
Resolução espacial	normal	30	30	20	80	20	15	30	-
	pan	-	15	20	80	10	-	-	-
	termal	120	60	-	160	-	-	-	90
Revolução		99'	99'	100,26'	100,26'	101,5'	98'	98'	98'
Hora Equador		09:45	10±15	10:30	10:30	10:30	10:30	10:30	10:30
Visada lateral	graus	-	-	±32°	-	±27°	±24°	±8,55°	±8,55°
	km	-	-	485	-	450	318	116	116

#### 2.7.1.1. TM e ETM+ do Landsat

O sensor TM, a bordo do satélite americano Landsat 5, é o mais antigo em operação, tendo sido lançado no dia primeiro de março de 1984. Apesar de já estar com alguns problemas de calibração, afinal já ultrapassou em muito a sua vida útil projetada, suas imagens ainda podem ter utilidade. O seu sucessor, o ETM+ (Enhanced TM plus), a bordo do Landsat 7 foi lançado em 15 de abril de 1999. Existem várias inovações tecnológicas no modelo mais novo, como o sistema de gravação de bordo e o de

transmissão de dados, que têm maior capacidade e rapidez; a maior resolução espacial da banda do termal e a inclusão de uma banda pancromática com resolução de 15 x 15 metros. Mas uma grande vantagem deste sensor é exatamente a continuidade, pois mantendo as sete bandas na mesma posição e com a mesma largura, sendo que as seis mais usadas também com a mesma resolução espacial (tabela 1), ele garante que todas as atividades que vinham sendo desenvolvidas com os dados do TM possam continuar utilizando os dados do ETM+.

Outra grande vantagem destes sensores é a combinação de disponibilidade, acesso e custo dos seus dados. Por possuir uma rede com cerca de 16 estações receptoras em terra recobrando a maior parte da superfície seca do planeta, a disponibilidade dos dados é garantida (FAO, 1988 e 1990). A enorme quantidade de material de apoio, como manuais e mapas do sistema de referência WRS (Landsat Worldwide Reference System), além de inúmeros trabalhos técnicos e científicos já realizados e publicados em vários idiomas, permite a estes sensores oferecerem ao usuário uma grande facilidade de acesso aos seus dados. A política de descentralização na comercialização das imagens e de incentivo à concorrência entre distribuidores, além do avanço das facilidades de comunicação pela rede mundial de computadores e, principalmente com a entrada de outros sensores no fechado mercado de imagens de sensoriamento remoto, fez com os preços contrariassem as previsões de crescimento, caindo de US\$ 0,04 por km<sup>2</sup> no final da década de 80 (FAO, 1988) para cerca de US\$ 0,02 por km<sup>2</sup> atualmente.

Hoje, com o funcionamento simultâneo do TM e o do ETM+, e como os dois estão defasados no tempo em 8 dias, juntos eles oferecem uma resolução temporal de pouco mais de uma semana. As bandas estão posicionadas nas regiões mais importantes para o monitoramento da vegetação, em se tratando de sensores multi-espectrais. Os dados estão disponíveis, o acesso a eles é fácil e o custo é relativamente pequeno. A resolução espacial, que já era razoável para a faixa de alta resolução, foi ainda melhorada pela banda pancromática do ETM+. Por todos estes motivos, os sensores TM e ETM+ deverão continuar sendo muito utilizados na área agrícola, principalmente pelas instituições governamentais e acadêmicas, e com o objetivo de localização, delimitação e estimativa de áreas plantadas.

### 2.7.1.2. HRV do SPOT

O HRV é o sensor a bordo do satélite francês SPOT 4, lançado em 23 de março de 1998. Depois da *família* TM, este é o sensor mais usado e estudado no mundo, dentro da faixa de alta resolução espacial. Como a *família* TM é praticamente o padrão dentro desta faixa, os demais sempre serão analisados em relação à ela. Sendo assim, o HRV apresenta algumas importantes vantagens em relação ao padrão TM. A primeira e mais importante é a resolução espacial de 20 metros para as bandas multi-espectrais e 10 metros para a banda pancromática. Outra grande vantagem é a possibilidade de realizar a chamada visada lateral, que permite tanto reduzir o tempo normal de revisita, que é de 26 dias, para apenas 3 dias, quanto *procurar* por áreas livres de nuvens. Também devido à possibilidade de mover o sensor e *olhar de lado*, o HRV pode produzir pares de imagens, tomadas com pequeno intervalo de tempo sobre a mesma área, com as características semelhantes às do estéreo par obtido com as fotografias aéreas, um recurso poderoso para levantamentos topográficos.

Com relação à posição, largura e número de bandas, embora ele não tenha as bandas equivalentes às bandas 1, 5, 6 e 7 do TM, isto não chega a ser uma séria desvantagem, pois estão presentes as mais importantes para o monitoramento agrícola, que são as das faixas do vermelho e infravermelho próximo, além de dispor também de uma banda no comprimento de onda da cor verde (tabela 1). Mas as principais desvantagens do sensor HRV do SPOT em relação ao padrão TM do Landsat dizem respeito à disponibilidade, acesso e custo. Embora os controladores do SPOT tenham feito um grande esforço para capacitar as estações receptoras do sinal do Landsat a receberem também o sinal do HRV, o uso da visada lateral exige um cuidadoso e complexo planejamento, que só pode ser feito de forma centralizada, tornando-se um empecilho à disponibilidade plena dos dados. A respeito do acesso, pode-se dizer que a quantidade e a variedade do material de apoio impresso é bem menor que no caso do TM, e as informações não são tão detalhadas. Pode se ter uma idéia da importância relativa para o meio científico do HRV em relação ao TM considerando os seguintes dados: ao se fazer uma busca no Science Citation Indice (SCI), fornecendo os termos TM e sensoriamento remoto, todas as línguas, todos os tipos de documentos, anos de 1998, 1999 e 2000, foram encontradas 170 referências, sendo que 13 delas eram relacionadas com a agricultura; ao substituir TM por HRV, apenas 15 referências foram encontradas e somente uma dizia respeito a agricultura.

Finalmente, o custo das imagens do HRV sempre foram significativamente maiores que as do padrão TM, chegando a custar nove vezes mais por quilômetro quadrado (FAO, 1998).

#### 2.7.1.3. CCD e IRMSS do CBERS

No dia 14 de outubro de 1999 o Brasil entrou no seleto grupo de nações aptas a possuir e administrar um satélite de sensoriamento remoto. Nesse dia foi lançado o satélite CBERS (China Brazil Earth Resources Satellite), dentro de uma missão conjunta entre o Brasil e a China. Dois dos sensores do CBERS, um de média e outro de alta resolução espacial, cujas características de interesse estão registradas na tabela 1, serão tratados aqui. O sensor IRMSS é um varredor multi-espectral infravermelho de média resolução espacial cujo potencial de aplicação em agricultura deverá ser limitado; o interesse acadêmico poderá recair sobre a novidade de uma banda pancromática expandida, sem similar até o momento. Mas o sensor realmente interessante para as aplicações em agricultura é o CCD, que reúne as melhores características da família TM e do HRV. As suas quatro bandas multi-espectrais são praticamente idênticas, em posição e largura, às bandas de 1 a 4 do TM, e com isso o CCD já nasce possuindo uma enorme quantidade de trabalhos de pesquisa realizados com bandas de mesmas características espectrais que as suas. Além disso, elas têm a mesma resolução espacial do HRV, 20 metros, que é a principal vantagem do sensor francês. A segunda vantagem do HRV em relação ao TM, que é a visada lateral, também é uma característica do CCD do CBERS. Quanto à disponibilidade e ao acesso, duas considerações devem ser feitas: a primeira é que para os brasileiros estas com certeza não serão limitações ao uso do sensor; e a segunda é que este é o primeiro sensor deste tipo a ser lançado e está no início das operações, o que deverá dificultar a operacionalização por algum tempo. Finalmente, quanto ao custo, as primeiras tabelas de preço colocam o valor de R\$ 600,00 para uma imagem inteira multi-espectral, o que daria US\$ 0,025 por quilômetro quadrado, bastante próximo do preço das imagens do ETM+. Existe um longo caminho a ser percorrido, mas os dados deste sensor podem vir a ter grande utilidade para a agricultura brasileira.

#### 2.7.1.4. ASTER do Terra

Em dezembro de 1999 foi lançado o primeiro grande satélite do programa EOS (Earth Observing System), chamado Terra, que contém, entre outros, o sensor ASTER

(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). O ASTER é composto de três subsistemas, designados na tabela 1 como Aster 1, 2 e 3. Segundo informação disponibilizada na página eletrônica <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>, os dados do ASTER estarão disponíveis a partir de setembro de 2000. Assim como o CCD do CBERS, o Aster 1 reúne as vantagens do ETM+ e do HRV. Como se pode observar da tabela 1, suas três bandas são idênticas às bandas 2, 3 e 4 da família TM, mas com resolução espacial de 15 metros, melhor que a do HRV, e também com capacidade de direcionar o sensor. Além disso, o programa EOS engloba o Terra e o Landsat 7, portanto o Aster deverá se beneficiar de toda a experiência obtida com a série TM/ETM+ no que diz respeito à disponibilidade, acesso e custo. Se tudo correr como o esperado, este será um dos mais importantes instrumentos para o monitoramento agrícola em escala regional no mundo, nos próximos anos.

## 2.7.2. Baixa resolução espacial

### 2.7.2.1. AVHRR do NOAA

O principal sensor desta classe, o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), foi originalmente desenvolvido para aplicações meteorológicas pela agência americana NOAA, que também é o nome do satélite que o transporta, no final dos anos setenta. Apesar do termo *resolução muito alta* no seu nome, que se refere à sua alta resolução radiométrica (10 bits, 1024 níveis), este sensor é de baixa resolução espacial. Como ele foi projetado para aplicações meteorológicas, a característica mais importante nesse caso é a cobertura diária de todo o globo, e para conseguir isso foi sacrificada a resolução espacial. Entretanto, apesar dessa relativa desvantagem para o uso agrícola, com o passar do tempo, devido a boa posição de suas bandas espectrais no vermelho e IVP, este sensor se mostrou muito útil para o acompanhamento das condições gerais da vegetação sobre grandes áreas (Laguette, 1995; Vogt, 1995). Uma diferença notável com relação aos sensores de alta resolução, é o horário de passagem pelo Equador, que na série ímpar dos satélites NOAA (13, 15 e 17) se dá no período da tarde, enquanto todos os anteriores passam no período da manhã. Demais características dos atuais sensores AVHRR em órbita estão anotadas na tabela 2. Os dados do AVHRR têm alta disponibilidade e acesso, e o seu custo para o usuário é zero.

Tabela 2. Principais sensores de baixa resolução espacial para uso na agricultura.					
Satélite	NOAA	CBERS	SPOT 4	TERRA	
Sensor	AVHRR	WFI	Vegetation	MISR	MODIS
Altitude (km)	833	778	830	705	705
Faixa imageada	2250 km	910 km	2250	360 km	2330 km
Revisita (dias)	1-2	3-4	1-2	9	1-2
No. de bandas	6	2	4	4	2+5+29
Banda 1	0,58-0,68	0,63-0,69	0,43-0,47	do visível ao IVP	de 0,4 a 14,4
Banda 2	0,725-1,00	0,77-0,89	0,61-0,68		
Banda 3	1,58-1,64	-	0,78-0,89		
Banda 4	3,55-3,93	-	1,58-1,75		
Banda 5	10,30-11,30	-	-		
Banda 6	11,5-12,5	-	-		
Resolução espacial	1100	240	1100	250 - 275	250 - 50.0 - 1000
Revolução	102,9'	100,26	101,5'	98'	98'
Hora Equador	± 14:00	10:30	10:30	10:30	10:30

#### 2.7.2.2. Vegetation do SPOT

A partir da experiência de sucesso do AVHRR-NOAA, a combinação de baixa resolução espacial, alta resolução temporal e bandas espectrais no vermelho e IVP passou a ser incorporada em sensores destinados à observação da terra. O primeiro a realizar a inovação foi o programa francês dos satélites SPOT, que na sua quarta edição levou a bordo o sensor Vegetation. A vantagem em relação ao AVHRR é que suas bandas espectrais são as mesmas do HRV, que está a bordo do mesmo satélite, conferindo aos dois sistemas um aspecto de complementaridade. Também o horário de passagem matutino é, teoricamente, mais propício à obtenção de imagens livres de nuvens. Novamente o problema está na disponibilidade, acesso e custo dos dados deste sensor. Suas características básicas constam da tabela 2.

#### 2.7.2.3. WFI do CBERS

Dentro da missão CBERS também foi incorporado um sensor com características semelhantes às do AVHRR, só que com uma resolução espacial, embora ainda baixa,

muito melhor. Trata-se do WFI (Wide Field Imager), um sensor com apenas duas bandas, equivalentes às bandas 3 e 4, tanto do outro sensor do CBERS, o CCD, quanto dos sensores da família TM (tabelas 1 e 2). Ele reúne então a vantagem do Vegetation de ser complementar aos dados de um sensor de alta resolução a bordo do mesmo satélite, e ainda se aproveita de todo conhecimento já existente sobre o comportamento dos alvos nas bandas 3 e 4 do TM. A sua resolução temporal é um pouco inferior quando comparada aos AVHRR e Vegetation, mas ainda é excelente em se tratando de acompanhamento do desenvolvimento das culturas agrícolas. Para os usuários brasileiros, soma-se ainda as mesmas vantagens de disponibilidade e acesso já mencionadas. O custo estimado de uma imagem inteira WFI é de R\$450,00, o que daria algo em torno de US\$0,0003 por quilômetro quadrado. A maior desvantagem é que ainda não está operacional.

#### 2.7.2.4. MISR e MODIS do Terra

Os dois sensores desta classe que também estão a bordo do satélite Terra, do programa americano EOS, são revolucionários. O MISR (Multiangle Imaging Spectroradiometer) possui 9 diferentes ângulos de visada, incluindo o nadir, e o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), além de possuir 36 bandas cobrindo desde o limite inferior do visível até o infravermelho termal, consegue aliar uma resolução espacial de 250 metros, nas duas primeiras bandas, com uma cobertura total do globo em pouco mais de um dia. Estes sensores reuniram as melhores características e experiências das duas mais importantes séries de satélites já lançadas, a série Landsat e a NOAA, e portanto, juntamente com o ASTER, deverão ocupar um lugar de destaque entre os principais instrumentos de sensoriamento remoto da Terra nos próximos anos, inclusive para aplicações em agricultura.

#### 2.7.3. Altíssima resolução

Como em quase todas as áreas de alta tecnologia, a pesquisa básica é feita no meio acadêmico e em instituições governamentais, geralmente com grande inversão de recursos públicos, até o momento em que os resultados permitem o desenvolvimento de algum produto com verdadeiro potencial de utilização. Então, a iniciativa privada se apropria do conhecimento gerado e promove uma verdadeira revolução tecnológica que afeta a vida de grande número de pessoas. Parece que este é o atual estágio do sensoriamento remoto dos recursos terrestres. Começam a surgir sensores

administrados pela iniciativa privada, com claros objetivos comerciais, e que devem, por isso mesmo, se aproximar cada vez mais dos interesses dos usuários, desde que estes se tornem clientes.

No final de 1999 foi lançado o satélite IKONOS, que promete oferecer imagens pancromáticas com resolução espacial de 1 x 2 metros, com possibilidade de revisita de 1 a 3 dias. As informações sobre este instrumento ainda não estão facilmente acessíveis nem suficientemente detalhadas na página eletrônica da empresa que o administra <<http://www.spaceimaging.com>>, inclusive no que diz respeito ao nome do sensor, ora chamado de IKONOS ora chamado de CARTERRA. Entretanto, já é possível encontrar alguns trabalhos recentemente publicados sobre o satélite IKONOS no SCI. Se realmente se tornarem disponíveis imagens com esta combinação de resoluções espacial e temporal, e dependendo da posição das bandas espectrais e, principalmente, do custo, certamente teremos uma revolução no uso do sensoriamento remoto na agricultura em poucos anos.

#### 2.7.4. Radar

A palavra *radar* é um acrônimo de RAdio Detection and Ranging que passou a designar os instrumentos que se utilizam de ondas de rádio para detectar a presença de objetos e determinar sua posição ou distância em relação ao aparelho sensor. Uma diferença marcante entre os radares e os demais sensores vistos até aqui é que eles próprios carregam e controlam a fonte da energia eletromagnética que será utilizada para monitorar as características do alvo. Isto trás algumas vantagens, como a possibilidade de coletar dados em qualquer horário do dia ou da noite e o controle absoluto do sinal emitido; mas também desvantagens, como o consumo de energia para produzir o sinal e não só para medi-lo.

Do ponto de vista do interesse agrícola, a principal vantagem dos radares é a sua independência das condições climáticas. Dependendo do comprimento de onda, ou frequência como é mais utilizado ao se tratar de ondas de radar, o sinal quase não é afetado pelas nuvens e nem mesmo pela chuva. Outro ponto interessante é que o sinal dos radares responde principalmente à forma e ao tamanho dos órgãos das plantas, oferecendo um tipo de informação diferente daquela obtida com os sensores óticos. A resolução espacial é outra vantagem pois ela é diretamente relacionada à

potência do radar, podendo-se teoricamente obter valores da ordem de metros, mesmo a partir de instrumentos a bordo de satélites (Bouman, 1995; Lilesand e Kiefer, 1994; Frery et al., 1999).

Os dois principais programas de radar no mundo são o europeu ERS (European Remote Sensing Satellite) e o canadense Radarsat. O ERS 2 tem resolução espacial de 30 metros e temporal de 35 dias. O Radarsat tem resolução espacial variável de 10 a 100 metros e resolução temporal de 24 dias. Como ele pode variar o ângulo de direção da antena, de forma semelhante aos sensores óticos com visada lateral, o tempo de revisita pode ser reduzido para 4 ou 5 dias (Epiphonio, 2000).

A principal desvantagem dos radares está nos aspectos de disponibilidade, acesso e custo. O tratamento do sinal necessário para transformar os dados de radar em informação útil para a agricultura é extremamente complexo e ainda não atingiu o mesmo grau de operacionalização alcançado no sensoriamento remoto por sensores óticos.

## 2.8. Conclusão

Na introdução deste tema foi dito que não existe um **sensor remoto para a agricultura**. Agora, após tudo o que foi visto, pode-se complementar dizendo que não existe um **sensor ideal para a agricultura**. Nenhum sensor consegue que simultaneamente as suas características de resolução espacial, temporal e espectral, e ainda a disponibilidade, o acesso e os custos dos seus dados, sejam ótimos para qualquer usuário. Esse não é um privilégio do sensoriamento remoto, também não existe um meio de transporte ideal para todo o tipo de uso! A variedade é necessária e deverá continuar a existir. Cada usuário deve se aproveitar dela para adquirir os dados mais adequados aos seus objetivos e pelo menor custo.

## PARTE 3

### RADIAÇÃO DA CENA AGRÍCOLA

#### 3.1. Introdução

O primeiro passo na direção da utilização correta do sensoriamento remoto e dos dados obtidos através dele é, certamente, compreender o comportamento da radiação do alvo a ser monitorado. Afinal, a fonte de informação para o sensoriamento remoto é a radiação refletida ou emitida pelo alvo.

As atividades agrícolas tem algumas características que a indicam como uma forte candidata a alvo dos sensores a bordo de satélites de observação da terra. A primeira é que a agricultura se desenvolve, com raras exceções, a céu aberto. Em segundo lugar vem a sua natureza espacialmente dispersa e extensiva em área. Segue-se a sua dinâmica ao longo do tempo. Por último, mas não menos determinante, tem-se a sua importância para a espécie humana que, por enquanto, não conhece outra maneira de suprir as necessidades nutricionais de seis bilhões de indivíduos, todos os dias, a não ser produzindo alimentos através da agricultura.

Conhecer como se comporta a radiação da cena agrícola é, portanto, essencial para que ela possa ser eficientemente monitorada através do sensoriamento remoto orbital.

A cena agrícola é composta basicamente por dois componentes, a vegetação e o solo. A vegetação é o alvo cujo desenvolvimento se quer observar e, o solo, o seu substrato obrigatório. Estes dois componentes são indissociáveis no mundo real, mas aqui serão primeiramente apresentados de forma separada, para simplificar a exposição de alguns conceitos e, só depois, serão reunidos na descrição da radiação da cena agrícola. Após a abordagem do ponto de vista da radiação, será feita uma análise do meio agrícola sob um enfoque agrônomo, associando a cada um dos elementos da cena os efeitos que pode ter sobre a radiação.

#### 3.2. Radiação da vegetação<sup>2</sup>

O principal órgão da planta a interferir na radiação da vegetação é a folha. E não podia ser diferente pois, antes de ser a fonte de informação para o sensoriamento remoto, a

---

<sup>2</sup> Neste trabalho se tratará apenas da vegetação cultivada para produção de alimentos e fibras.

radiação é a principal fonte de energia para os processos bioquímicos que acontecem no interior das células das folhas e que garantem a sustentação da vida sobre a Terra. As folhas das plantas atualmente espalhadas sobre o planeta são fruto de milhões e milhões de anos de evolução em busca do instrumento mais eficiente para captar a energia eletromagnética proveniente do sol e transformá-la, primeiro em energia química e, depois, em matéria orgânica. Assim, também não é por acaso que a faixa dos comprimentos de onda mais absorvidos pelos pigmentos das células vegetais é exatamente aquela na qual o sol mais emite energia, ou seja, a faixa do visível.

Por seu importante papel na determinação das propriedades espectrais da vegetação, e sua estreita relação com a fotossíntese, o comportamento espectral das folhas tem sido estudado há muito tempo e por diversos autores. A maioria dos livros sobre sensoriamento remoto trás a famosa curva de reflectância espectral típica de uma folha verde saudável, que também aparece em teses e artigos sobre sensoriamento remoto agrícola (Lillesand e Kiefer, 1994; Formaggio, 1989; Houston e Hall, 1984; Mendonça, 1981). As principais características do comportamento espectral das folhas são: a baixa reflectância (10 a 15%) na região do visível devido à absorção pelos pigmentos celulares, especialmente a clorofila e os carotenóides; a alta reflectância (40 a 60%) na região do IVP devido à estrutura celular dos tecidos internos das folhas; e o declínio progressivo da reflectância no infravermelho médio causado pela alta absorção da água, principal componente citoplasmático, em várias bandas desta faixa do espectro.

Com relação as bandas de absorção da água, é oportuno um breve comentário. Como a capacidade de forte absorção nos intervalos centrados nos comprimentos de onda de 1,4, 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$  é praticamente a mesma, quer a água esteja em estado líquido no interior das células vegetais, quer esteja em estado gasoso na atmosfera, estas faixas de comprimento de onda são pouco importantes para o sensoriamento remoto, pois normalmente os sensores não têm suas bandas nestas posições.

Conhecido o comportamento espectral das folhas, é necessário agora compreender como se comporta espectralmente o complexo arranjo das milhões de folhas que formam a cobertura de uma área de terreno vegetado, normalmente chamado de dossel vegetal. De maneira geral o comportamento é muito semelhante ao de uma

folha isolada, principalmente no que diz respeito à forma da curva de reflectância espectral. Entretanto, conforme demonstra Knipling (1970) em seu clássico artigo, quando se vai estudar o comportamento espectral do dossel vegetal, a introdução compulsória de outros componentes além dos exclusivamente relativos à folha, como a superfície de fundo, outros órgãos vegetais, os ângulos de iluminação e de orientação das folhas, etc., têm um efeito geral de atenuação da reflectância.

Apesar das dificuldades práticas de se estabelecer um padrão absoluto de comportamento espectral para a vegetação, algumas constatações importantes para os objetivos do sensoriamento remoto agrícola podem ser feitas. Plantas vivas precisam fazer fotossíntese, para isso precisam absorver energia na faixa do visível, portanto, a reflectância será baixa nesta região do espectro. Seguindo o raciocínio, a fotossíntese se dá no interior das células vegetais funcionais, para serem funcionais as células devem estar estruturadas em tecidos, os tecidos celulares são responsáveis por alta reflectância no IVP. Finalmente, o citoplasma celular é o meio onde ocorrem as reações da fotossíntese e também é o responsável pela turgidez que mantém a estrutura dos tecidos, o citoplasma é composto principalmente de água, portanto a reflectância da vegetação saudável deve cair bastante nas proximidades das bandas de absorção da água.

### 3.3. Radiação do solo

O solo não é o alvo do sensoriamento remoto agrícola. Apesar disso, como ele está presente em toda a cena agrícola como superfície de fundo, o conhecimento de suas propriedades espectrais assume grande importância nesta área de aplicação. Na realidade, do ponto de vista do estudo da radiação da cena agrícola, as interferências causadas pela variação das características dos solos são consideradas um empecilho. O ideal seria que todos os solos tivessem o mesmo comportamento espectral, independente de qualquer variação nos seus teores de ferro, matéria orgânica, umidade, etc. Mas, como se sabe, o ideal não existe, e cada tipo de solo tem sua particularidade no que diz respeito a sua interação com a radiação.

O solo é o produto da interação dos seguintes fatores: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo. O material de origem é o substrato sobre o qual agem os demais fatores. O clima, principalmente pelos seus componentes temperatura e

umidade, fragmenta a rocha através das dilatações e contrações e solubiliza os minerais. O relevo, altera o microclima, as perdas e os ganhos de materiais. Os organismos, inclusive o homem, modificam o meio e, sobretudo, adicionam matéria orgânica. E o tempo, que não age por si, determina a duração das atividades dos outros fatores. Ao final de um longo período, portanto, o resultado da ação de todos estes fatores sobre o material original e sobre seus produtos de alteração é o aparecimento de uma seqüência de camadas, cada uma com diferente coloração, teor de argila e areia, estrutura, quantidade de matéria orgânica e de substâncias químicas. Essas camadas são denominadas horizontes e o conjunto de horizontes forma o perfil do solo (Mello et al., 1985).

O resultado é que há uma imensa variabilidade na estrutura física e na composição química dos solos, com seus respectivos efeitos sobre as características de reflectância espectral. Assim como no caso da vegetação, o comportamento espectral dos solos já foi estudado por diversos autores, que estabeleceram a também famosa curva de reflectância espectral típica do solo, que pode ser apresentada de forma bastante genérica (Lillesand e Kiefer, 1994), de maneira mais específica para cada uma das principais classes de solo (Stoner e Baumgardner, 1981), ou ainda detalhada ao nível de amostras individuais ou tipos de solo (Epiphanyo et al., 1992; Formaggio et al., 1996).

Irons et al. (1992) afirmam que ainda não se pode determinar os parâmetros óticos e físicos dos elementos dos solos responsáveis pelas suas reflectâncias características, diretamente a partir dos dados tradicionais de caracterização dos solos (e.g., mineralogia, distribuição do tamanho de partículas, e medidas da rugosidade da superfície), embora se saiba que eles são relacionados. Essa ausência de ligação seria devida à complexidade dos solos. A simples especificação dos elementos individuais responsáveis pela reflectância dos solos já é uma tarefa complexa, pois as principais partículas do solo geralmente formam agregados de composição heterogênea, irregulares em forma e tamanho, e normalmente estão associadas a água, óxidos metálicos ou matéria orgânica.

Apesar das dificuldades impostas pela sua complexidade natural, quando os solos são estudados em condições de laboratório, é possível identificar os principais fatores que

interferem nas curvas espectrais, que são: o teor de matéria orgânica, a granulometria, o teor de óxidos de ferro, o tipo de mineralogia e o conteúdo de umidade (Formaggio et al., 1996). Da mesma forma que acontece com a vegetação, há um forte efeito das bandas de absorção de água em 1,4, 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$ . O teor de umidade é fortemente relacionado com a textura do solo: solos de textura grossa, arenosos, são geralmente bem drenados resultando em baixos teores de umidade e reflectância relativamente alta; solos de textura fina, com drenagem pobre, frequentemente terão reflectância mais baixa. Entretanto, na ausência da umidade, o solo exibirá uma tendência oposta: solos de textura mais grossa aparecerão mais escuros que aqueles de textura mais fina. Especificamente, dentro dos solos arenosos, por exemplo, a medida que aumenta o tamanho das partículas, a reflectância diminui; este fenômeno é normalmente atribuído ao efeito das armadilhas de luz. Assim, as propriedades de reflectância de um solo são consistentes apenas dentro de certos limites (Lillesand e Kiefer, 1994). Já a matéria orgânica age de forma homogênea no sentido de diminuir a reflectância, atuando principalmente nos comprimentos de onda entre 0,4 e 1,3  $\mu\text{m}$ . Ação semelhante produzem os óxidos de ferro que, quando em grande quantidade, passam a ter efeito dominante, diminuindo muito a reflectância, principalmente a partir do início da faixa do infravermelho. A mineralogia exerce sua influência determinando a presença e a quantidade de certos componentes minerais do solo, notadamente as argilas, que apresentam bandas de absorção típicas, como é o caso das argilas caulínicas, que apresentam as bandas de absorção em 1,4 e 2,2  $\mu\text{m}$ , próprias da hidroxila (Stoner e Baumgardner, 1981).

Comparando as curvas de reflectância espectral típicas da vegetação e do solo, pode-se fazer algumas considerações de cunho geral. Na região do visível a maioria dos solos apresenta reflectância superior a da vegetação, com raras exceções determinadas principalmente por altos teores de matéria orgânica no solo. Na região do infravermelho próximo, a situação se inverte e praticamente a reflectância dos solos é sempre menor que a das plantas, com ressalvas para os casos de solos extremamente secos e com teores baixos de matéria orgânica e ferro. Por fim, na região do infravermelho médio o fator determinante será a umidade e a mineralogia, mas o mais comum é que os solos tenham a reflectância bem maior nesta faixa de onda.

### 3.4. Radiação da cena agrícola

Os componentes determinantes da radiação da cena agrícola são, como vimos, a vegetação e o solo. A água não será considerada isoladamente, mas apenas através dos seus efeitos sobre o comportamento espectral da vegetação e do solo. Ambos possuem diversos fatores que afetam a reflectância e que são variáveis no tempo e no espaço. As combinações possíveis entre fatores e níveis de fatores são inúmeras e conferem um caráter extremamente complexo ao comportamento espectral da cena agrícola real. Então, para facilitar a exposição, será assumida uma vegetação típica e um solo típico e alguns dos fatores que afetam a radiação da cena agrícola serão abordados em separado.

#### 3.4.1. Comportamento ao longo do espectro

De início, pode-se imaginar como se comportaria a curva de reflectância espectral de uma cena agrícola típica. Uma primeira tentativa seria assumir que o resultado seria uma média entre os comportamentos espectrais típicos da vegetação e do solo. Isto seria correto se eles estivessem presentes na cena na mesma proporção. Bem, isso pode até vir a ser verdade em algum momento, mas ao considerar-se que com o passar do tempo a vegetação sofre alterações, aumentando ou diminuindo sua biomassa, por exemplo, torna-se necessária a construção de uma curva para cada instante do tempo. Como isso não é possível, a alternativa é escolher algumas fases características da vegetação, como pode ser visto em Formaggio (1989), e descrever qual seria o comportamento espectral esperado para cada uma delas.

Como trata-se de uma abordagem agrícola, pode-se supor uma primeira fase de preparo do solo e plantio. Nesta fase, ainda não houve a germinação da vegetação, ou seja, a curva da cena é igual a do solo.

Com a germinação e o início do desenvolvimento das plantas, a curva de reflectância da cena passa a ser uma média entre as curvas do solo e da vegetação, ponderada pela intensidade de presença de cada um. Em relação à fase anterior, a reflectância cai no visível e no infravermelho médio e cresce no IVP.

Rapidamente as plantas recobrem de folhas toda a superfície do solo, pois esse é o objetivo da maioria das práticas agrícolas, atingindo a fase de pleno desenvolvimento

da lavoura. Neste momento, a curva de reflectância da cena passa a se parecer muito com a da vegetação típica, principalmente na forma, entretanto com valores absolutos sempre menores no IVP, devido ao efeito de fundo dos solos.

Ao se aproximar do final do ciclo, a vegetação entrará em processo de senescência, perdendo umidade e, eventualmente as folhas. O resultado é que volta a haver grande influencia do solo, mas agora em conjunto com os restos secos da vegetação e não mais com uma vegetação verde. Relembrando o comportamento da radiação na vegetação, pode-se imaginar que com o secamento e a queda das folhas, o processo de fotossíntese é paralisado, havendo uma diminuição na absorção de energia na faixa do visível, ocorrendo um aumento da reflectância; na região do infravermelho médio, como não há água, a reflectância também aumenta; e, no IVP, com a morte e a queda das folhas há uma queda também da reflectância, embora devido aos restos culturais ainda se mantenha maior que a do solo nu (Perry e Lautenschlager, 1984).

Dependendo da forma como for feita a colheita, poderá haver uma pequena mudança na resposta espectral da cena, especialmente se os restos culturais forem retirados ou amontoados, quando então a participação do solo volta a ser predominante, mas não única. Se isso não acontecer, a radiação só voltará a ser alterada com o preparo do solo para o próximo plantio ou com a infestação de plantas daninhas.

#### 3.4.2. Comportamento ao longo do tempo

Ao invés de observar o comportamento da reflectância da cena agrícola em todo o espectro, pode-se escolher uma única faixa ou banda para o acompanhamento ao longo do tempo, obtendo assim novos e interessantes pontos de vista. Kollenkark et al. (1981) , por exemplo, acompanharam o desenvolvimento da cultura da soja e observaram que quando representavam o fator de reflectância em função do tempo, a curva obtida para a banda compreendida entre 0,6 e 0,7  $\mu\text{m}$  tinha a forma quase que exatamente inversa daquela obtida para a banda entre 0,8 e 1,1  $\mu\text{m}$ . Na banda do visível, o fator de reflectância começava julho com valores em torno de 12%, caía rapidamente para 4 a 5% entre agosto e setembro, só retornando ao patamar de 10% a partir do início de outubro. Já no IVP, o fator de reflectância, que no início de julho era de 20%, subia até um máximo de 50% no final de agosto/começo de setembro, e voltava a valores um pouco inferiores a 20% na segunda quinzena de outubro.

Outros autores adotaram este tipo de abordagem para estudar vários aspectos do comportamento espectral das culturas agrícolas e muitos deles passaram a utilizar não o fator de reflectância diretamente, mas índices obtidos a partir deles, mas todos em função do tempo (Houston e Hall, 1984; Crist, 1982; Formaggio, 1989). Este método, que ficou conhecido por técnica de análise de perfil, pode ser útil para a classificação de culturas, quando estão disponíveis imagens multitemporais.

O enfoque do acompanhamento ao longo do tempo também foi utilizado por alguns para realizar análises não mais de duas variáveis, como a da reflectância em função do tempo, mas de três. Para isso pode-se fazer o gráfico da reflectância de uma banda em função de uma característica cultural qualquer (e.g., biomassa total) e ligar os pontos observados seguindo a ordem das datas de coleta dos dados. Apesar de simples, esta é uma técnica de forte apelo visual, e que permite a compreensão de algumas relações não triviais entre aspectos da cena agrícola e a reflectância. Como em alguns casos os pontos pareciam caminhar pelo gráfico seguindo sempre um mesmo caminho, este comportamento foi chamado por alguns de fenômeno da *trilha* ou da *trajetória* (Tucker et al.; 1979).

#### 3.4.3. Ângulos de iluminação e visada

Outro aspecto relevante ao se estudar a radiação da cena agrícola é o dos ângulos de iluminação e de visada. O ângulo de iluminação zenital é o ângulo formado entre as linhas imaginárias que unem o alvo ao sol e ao zênite. O ângulo de visada zenital é formado pelas linhas imaginárias que unem o alvo ao sensor e ao zênite. Para efeito de sensoriamento remoto por satélite, exceto para os casos de sensores com recurso de visada lateral, as imagens são tomadas sempre com o alvo a nadir do sensor, ou seja, com ângulo de observação ou visada igual a zero. Como para um sensor em particular, o horário de passagem sobre uma determinada área é sempre o mesmo, a única causa de variação no ângulo de iluminação zenital é o movimento gradual do sol ao longo do ano. Nos dois casos, mesmo com a visada lateral do sensor, os ângulos zenitais são muito bem conhecidos, sendo fornecidos juntamente com os dados, e já existindo procedimentos operacionais para as correções necessárias.

O ângulo azimutal solar, ou de iluminação, é o ângulo formado entre o meridiano do local do alvo e o plano vertical do sol. Da mesma forma, o ângulo azimutal de visada é

formado entre o meridiano local e o plano vertical do sensor. Com relação ao ângulo azimutal para o sensor com visada a nadir, ele é fixo, dado pela inclinação da órbita do satélite. Com relação ao ângulo azimutal solar ou de visada lateral, novamente os sensores estão aptos a fornecê-los com bastante precisão.

O maior problema com relação a este aspecto está no componente não controlado da interação sol-alvo-sensor, ou seja, no alvo. Se o alvo tivesse uma superfície plana, uniforme, homogênea, bastariam as informações sobre os ângulos zenital e azimutal, solar e do sensor, para que todas as correções necessárias fossem feitas. Entretanto, esse alvo perfeito não existe em agricultura. Pelo contrário, as culturas agrícolas possuem diversas características que interagem com a geometria de iluminação e observação da cena, influenciando na sua radiação.

Algumas destas características são próprias das plantas e, portanto, sua influência é bem vinda, pois permite a identificação do tipo ou do estágio da cultura em questão. Outras, ao contrário, são introduzidas pelo homem e podem causar variações na resposta espectral da cena agrícola que dificilmente serão corretamente interpretadas apenas com base nos dados do sensor remoto. Entre elas estão várias práticas agrícolas como o plantio em linhas; o plantio consorciado de culturas com folhas, ciclos e alturas diferentes; o plantio em faixas alternadas; a irrigação por sulco; entre outras, que terão forte efeito sobre o padrão de reflectância da cena.

Como o agricultor não está preocupado com o analista de sensoriamento remoto ao fazer o seu cultivo, nem sempre ele cuidará para que suas linhas de plantio fiquem todas exatamente paralelas, entre si e com a linha de deslocamento do satélite, ou então escolherá as espécies para consorciar procurando aquelas que mantenham sempre a mesma altura, tenham o mesmo ciclo e folhas de mesma forma e tamanho. Assim, uma mesma lavoura poderá ter algumas linhas de plantio no mesmo ângulo azimutal do sol e outras em ângulos variados, produzindo diferenças na reflectância que serão registradas pelo sensor e se refletirão em um padrão variado na imagem onde deveria haver um padrão único. A interação entre os ângulos de observação e iluminação e as práticas agrícolas é complexa e se dá principalmente na forma da geração de sombras na cena agrícola. Diversos autores já se dedicaram ao seu estudo, sendo que uma boa revisão encontra-se em Formaggio (1989)

#### 3.4.4. Efeitos da umidade

O principal efeito da umidade é baixar muito a reflectância dos solos em todo o espectro. Se a sua distribuição por toda a cena agrícola fosse sempre uniforme, não haveria muito com que se preocupar. Entretanto, se imagina-se uma cena do TM, de 185 por 185 km, é fácil compreender que dificilmente a distribuição da umidade será uniforme por toda área abrangida pela imagem, primeiro porque a distribuição da precipitação pluviométrica nunca é tão uniforme e, depois, mesmo que fosse, cada parcela de terreno com sua declividade, porosidade, cobertura, profundidade, tipo de solo, posição na rampa de declive, etc., absorverá ou deixará escorrer quantidades diferentes de água; logo a seguir, a evaporação ou evapotranspiração também serão diferentes dependendo dos fatores já citados e ainda da exposição ao sol e ao vento, altitude, etc. O resultado é que cada parcela do terreno presente em uma cena agrícola pode apresentar um teor de umidade diferente, o que influirá na sua resposta espectral.

O efeito da umidade sobre a vegetação também existe, embora seja mais sutil e demore mais tempo para se fazer sentir. Como o tipo de vegetação que consegue se instalar em um determinado local, o faz por estar adaptada às condições ambientais, inclusive de umidade, a vegetação apresenta um efeito tipo tampão com relação a umidade se comparada ao solo isoladamente. Ou seja, como a planta que está numa parte mais alta e, portanto, mais seca do terreno, já aprofundou as suas raízes até alcançar o lençol freático para poder sobreviver ali, num período sem chuvas a camada superficial do solo na parte alta secará rapidamente enquanto as plantas continuarão tão verdes como as da parte baixa do terreno, só começando a sentir os efeitos da falta de chuvas muito tempo depois.

Em resumo, o aumento da umidade diminui a reflectância da cena agrícola em todo o espectro e a extensão deste efeito é proporcional à quantidade de solo exposto. Já a diminuição da umidade pode aumentar a reflectância no visível e no infravermelho médio, também de forma proporcional à área de solo descoberto. A vegetação só responderá ao teor de umidade em casos extremos, como de secas muito prolongadas, que levem à morte das plantas ou das folhas, tendo o mesmo efeito da senescência do final de ciclo.

### 3.4.5. Índices

Entre as características da vegetação que interferem na sua identificação em imagens digitais obtidas por sensores orbitais, uma das mais notáveis é o fato de que quando sadia ela reflete pouco a luz visível e muito a luz infravermelha. Para tentar diferenciar a cobertura vegetal de outros alvos, e os tipos de vegetação entre si, vêm sendo desenvolvidos inúmeros índices de vegetação baseados em medidas espectrais (Huete, 1988). Um índice de vegetação ideal deveria minimizar os efeitos variáveis do brilho de fundo e enfatizar as variações decorrentes da densidade de vegetação (Barbosa, 1998).

Num interessante trabalho onde reuniram mais de 20 índices de vegetação em uso naquela época, Perry e Lautenschlager (1984) provaram que, para todos os propósitos práticos, eles eram equivalentes. Assim, discutir o comportamento de um desses índices é o suficiente. Entre os índices testados estava o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que continua sendo amplamente utilizado por proporcionar um forte sinal da vegetação e oferecer um bom contraste com outros objetos da superfície terrestre (Tucker e Sellers, 1986). Ele é baseado na razão normalizada da diferença entre as reflectâncias da vegetação nos comprimentos de onda equivalentes ao vermelho e ao infravermelho. Esse índice, bem como outros, pode ser relacionado com propriedades particulares da vegetação, como quantidade de biomassa, porcentagem de cobertura e índice de área foliar (Middleton, 1991; Huete, 1988; Asner, 1998), sendo útil também para o acompanhamento fenológico da cobertura vegetal natural (Venturieri e Santos, 1998). Para um mesmo ponto no terreno o índice varia ao longo do tempo, principalmente devido aos efeitos dos fatores climáticos sobre a vegetação. Já para um mesmo instante do tempo, o índice varia de um ponto para outro no espaço, basicamente devido às diferenças entre os tipos de cobertura vegetal.

Os valores assumidos pelo NDVI dependem do tipo de cobertura, da densidade da vegetação e da umidade, variando teoricamente entre -1 e 1. Os maiores valores desta variável estão associados a coberturas vegetais mais densas. Valores negativos geralmente estão associados a presença de nuvens ou corpos d'água. Rochas e solos expostos possuem valores semelhantes de reflectância nas duas bandas espectrais utilizadas para o cálculo, resultando em números próximos a zero (Holben, 1986).

#### 3.4.6. Elementos de cena impuros

A cena agrícola é geralmente caracterizada por talhões de limites bem definidos, não raras vezes com diferenças abruptas de uso do solo em questão de metros. Um exemplo comum seria uma cerca dividindo um pasto degradado de uma lavoura de cultura anual em pleno desenvolvimento. O sensor ideal deveria refletir na imagem a mesma descontinuidade observada no mundo real. Mas isso só acontecerá se a resolução espacial do sensor for tão alta que o elemento de cena fique menor que a distância em que se dão as mudanças reais. Não é esta a situação atual. Portanto, é comum a ocorrência de elementos de cena cuja projeção no terreno encerra dois ou mais tipos de cobertura vegetal. Este fenômeno é particularmente importante nas bordas dos talhões e, portanto, afeta principalmente aqueles com altas razões superfície/área. Apenas como exemplo, uma área de 100 ha com forma quadrada tem uma razão superfície/área de 40 m/ha; se esta mesma área fosse retangular com os lados de 200 x 5000 metros, a razão superfície/área aumentaria para 104 m/ha, um aumento de 260%.

O valor medido da reflectância de um elemento de cena que esteja nesta situação, portanto, será uma mistura dos valores de reflectância de cada um dos tipos de cobertura presentes na área imageada correspondente. É a este elemento que se está chamando de elemento de cena impuro. Em oposição, os elementos de cena inteiramente posicionados no interior do talhão seriam os elementos puros. Esta é a abordagem adotada por Chhikara (1984), que a designou de modelo de mistura, e utilizou para ponderar a estimativa de área plantada com cereais. Este enfoque foi aprimorado e surgiu inclusive uma linha de pesquisa que passou a considerar que, em maior ou menor grau, todo elemento de cena é um elemento impuro; no caso da vegetação, as *impurezas* presentes em todos os elementos da cena seriam o solo e a sombra. A aplicação deste modelo parece ter se mostrado especialmente adequada a ambientes de vegetação natural, permitindo inclusive a inclusão da água como mais um componente dos elementos impuros (Novo e Shimabukuro, 1997; Shimabukuro et al., 1998). Em suma, o efeito sobre a reflectância será sempre dependente da reflectância individual de cada componente da mistura de maneira proporcional à área que cada um ocupa dentro do elemento de cena.

O uso de modelos de mistura para classificação de culturas agrícolas deve ser visto com muito cuidado pois, como alerta Price (1994), o espectro de uma espécie pode aproximar-se muito do espectro da mistura de outras espécies, portanto, não se deve perder de vista a possibilidade do problema ter soluções múltiplas.

### 3.5. Características do meio agrícola

Serão apresentadas algumas das muitas causas de variação presentes na cena agrícola, agora do ponto de vista da realidade do meio rural. Sempre que possível se fará referência aos aspectos do comportamento espectral que são afetados pelas características descritas.

#### 3.5.1. Ambiente natural original

Algumas das características ambientais do local onde está localizada determinada atividade agrícola podem influir na radiação da cena agrícola. O tipo da cobertura vegetal natural que é substituída pela agricultura, por exemplo, pode ter um aspecto bem diferente se a região de estudo é Rondônia, onde as fazendas avançam pela floresta, ou se é a zona irrigada de Juazeiro, onde avançam sobre o sertão. Provavelmente o efeito da umidade na região seca será marcante, enquanto que na região úmida será desprezível.

A topografia ou relevo de uma região é outro aspecto importante, cujo principal efeito se dá com relação aos ângulos de observação e de iluminação, pois eles se alteram com as mudanças na direção e na intensidade dos declives. O solo, que já foi bastante discutido, também varia de um local para outro, tanto dentro de um talhão como entre talhões, influenciando de diversas formas na reflectância da cena.

Outro fator ambiental que afeta a radiação, às vezes drasticamente, é o clima. Dependendo dele, as condições atmosféricas durante a fase propícia ao desenvolvimento das culturas impedem ou dificultam a obtenção de boas imagens da região de interesse. Além disso, regiões específicas dentro da cena podem ser mais propensas a fenômenos localizados como névoa ou geada, que por seus efeitos na vegetação ou na umidade vão também afetar de maneira desigual a reflectância.

### 3.5.2. Estrutura fundiária

Parece estranho considerar a estrutura fundiária como causa de variação na radiação de uma cena, mas ela pode afetar o tamanho das glebas, influenciando indiretamente no tipo de atividade potencial, visto que algumas culturas não são rentáveis em pequenas áreas, por exemplo. Também a forma das glebas, que determina a forma dos talhões, afeta, como já se viu, o número de elementos de cena impuros.

### 3.5.3. Práticas agrícolas

Aqui quase tudo o que se faz afeta a radiação de uma forma ou de outra. A começar pelo tipo de agricultura, se é monocultura ou se é uma agricultura diversificada, de novo o número de elementos impuros é afetado. Se as culturas são anuais ou perenes, é o comportamento a longo do tempo que muda. Ao se praticar a produção do tipo familiar ou de subsistência em oposição ao modelo empresarial ou capitalista, isso se reflete na diversificação e no tamanho dos talhões, com as conseqüências já citadas.

A prática da irrigação tem efeitos óbvios sobre a umidade, com seus desdobramentos sobre a reflectância. A variação da época de plantio em poucos dias de um talhão para outro, pode originar grandes diferenças na curva de reflectância espectral ao afetar a fase de desenvolvimento da cultura e, portanto, a quantidade de solo e vegetação presentes em cada elemento de cena. As diferentes espécies têm, cada uma o seu comportamento espectral, principalmente ao longo do tempo. Mesmo dentro de uma mesma espécie, a mudança de cultivar pode alterar substancialmente o ciclo da lavoura.

Também as diferentes formas de preparo do solo, aração e gradagem, ou só gradagem, ou ainda subsolagem e gradagem, todas influem na rugosidade do solo, taxa de infiltração e evaporação de água, com seus efeitos sobre a resposta espectral do solo. Outro ponto importante são as práticas conservacionistas, como o plantio em curvas de nível, a construção de terraços, o plantio em faixas, o uso de faixas de retenção, todas com alto potencial de impacto sobre a reflectância, pois afetam as velocidades de escoamento e infiltração da água, alteram a superfície original do terreno, intercalam espécies de diferentes ciclos e alturas, gerando elementos impuros e a ocorrência de sombras.

Com relação a semeadura, se for por plantio direto, tem-se de considerar a presença constante de farta camada de restos culturais sobre o solo. A forma de distribuição de sementes, se feita a lanço ou em linhas, afeta a relação com os ângulos de iluminação e visada. O espaçamento e a densidade de plantio afetam a velocidade com que se dá o recobrimento do solo pelas folhas das plantas, afetando o período de exposição do solo. Os tratos culturais como as capinas, a poda, o dessecamento ou a indução floral, afetam ou a exposição de maior ou menor área de solo, ou aceleram a mudança de estágio de desenvolvimento da cultura.

Se o tipo de produto utilizado no controle fitossanitário necessita recobrir toda a folha, como acontece com os Pó Molháveis e com os Óleos Minerais, com certeza eles afetarão as propriedades de reflectância destas folhas. Também o tipo de colheita realizada, se manual ou mecânica, pode causar uma grande diferença na homogeneidade de tamanho e distribuição da palhada, interferindo na proporção de solo exposto. Se a colheita é parcial ou se é única, como o algodão, que pode ser colhido de uma só vez ou em duas ou três apanhas, dependendo da cultivar ou do uso de dessecante; é claro que a resposta espectral muda de um tipo para outro por causa das proporções de capulhos, palha, sombra e solo que são imageadas a cada vez.

Finalmente, o manejo que é dado aos restos culturais afeta muito a radiação da cena por todo o período até o próximo plantio. A prática do fogo, obrigatória por motivos sanitários em alguns casos e usada por iniciativa dos próprios agricultores, em outros, apesar de não recomendada, provoca uma mudança significativa na resposta espectral em poucas horas, pela eliminação da palha, pela exposição do solo, e pela adição da cinza. Outras práticas, como o enleiramento, formarão faixas de solo exposto intercaladas com faixas saturadas de material vegetal em decomposição, gerando elementos de cena impuros sobre toda a área. A incorporação ou a retirada dos restos culturais causam a imediata exposição do solo, fazendo com que seu sinal passe a predominar.

#### 3.5.4. Desequilíbrios

Alguns desequilíbrios, infelizmente mais comuns do que seria desejável nas propriedades agrícolas, podem causar sérias alterações na radiação da cena agrícola. A erosão dos solos, por exemplo, além de eliminar a cobertura vegetal em certos

casos, expõe camadas sub-superficiais do solo que podem ter características de reflectância bastante diferentes da camada superior. O ataque de pragas, pela diminuição da área foliar, pode aumentar a reflectância no visível. A incidência de doenças nas plantas pode ocasionar o amarelecimento das folhas e conferir uma resposta semelhante à da fase de senescência. A infestação da lavoura por ervas daninhas, dependendo da espécie, da intensidade e da fase do ciclo, vai alterar a curva de resposta espectral da lavoura, funcionando como impurezas dos elementos de cena.

Eventos climáticos como enchentes, secas, ventanias muito fortes, chuva de granizo, geadas, etc., podem causar a morte das culturas, o transporte de resíduos de um local para outro, e a alteração da estrutura do dossel, tudo em um curto espaço de tempo, alterando completamente a reflectância de algumas áreas. Os incêndios e o desmatamento também são desequilíbrios que podem alterar permanentemente algumas características da cena agrícola, como limites e tamanho das áreas.

### 3.6. Conclusão

A cena agrícola é um alvo extremamente complexo e variável, que oferece uma imensa riqueza de aspectos com potencial de influir no comportamento da sua radiação. O solo e a vegetação interagem para a composição de um comportamento espectral próprio da cena agrícola, que não pode ser analisado sem levar-se em consideração o aspecto temporal. O usuário das informações obtidas através do sensoriamento remoto deve incorporar ao máximo o conhecimento disponível sobre as características do meio agrícola monitorado antes de proceder à análise dos dados.

## PARTE 4

### CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS DE ÁREAS AGRÍCOLAS

#### 4.1. Introdução

A classificação digital de dados de sensoriamento remoto tornou-se uma necessidade imperativa com o aumento impressionante na quantidade de dados disponíveis para análise. Segundo Lillesand e Kiefer (1994), no momento da preparação do seu livro a capacidade para gerar dados dos sensores remotos existentes, superava em muito a capacidade de tratar esses dados. Com o crescimento do número de sensores em operação, o surgimento de sensores hiperespectrais e a integração com bases de dados não espectrais cada vez mais disponíveis, a quantidade de dados aumentou ainda mais desde então. Uma das maneiras de se fazer frente a este imenso volume de dados é através da análise digital.

Dados de sensoriamento remoto podem ser usados para mapear, monitorar e estimar as propriedades de ambientes diversos. Destes três principais campos de aplicação, o mapeamento, e o mapeamento temático em particular, é um dos mais disseminados e pode ser um precursor necessário aos demais. O mapeamento temático a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto é utilizado em numerosos campos de estudo, **inclusive na agricultura**. Ele tem uma história relativamente longa, com os mapas tendo sido inicialmente derivados da interpretação de fotografias aéreas, mas com ênfase crescentemente destinada às análises computadorizadas de imagens. As técnicas de classificação, baseadas nas análises tanto visual como digital dos dados de sensoriamento remoto, têm sido tradicionalmente usadas como uma ferramenta para o mapeamento temático. Numerosos enfoques de classificação têm sido usados com variados graus de sucesso. Apesar dos consideráveis avanços alcançados recentemente, a exatidão com que se podem derivar mapas temáticos dos dados de sensoriamento remoto ainda é frequentemente considerada muito baixa para usos práticos. E esse problema parece se dar independentemente do tipo de classificador utilizado. Portanto, apesar do mapeamento temático ser uma das aplicações mais comuns do sensoriamento remoto, com uma história já de muitas décadas, ainda não se atingiu um estágio no qual os mapas de cobertura do terreno possam ser rotineiramente derivados de dados obtidos remotamente. Muitas são as razões de ainda não ter sido concretizado o enorme potencial do sensoriamento remoto como

uma fonte de dados de cobertura do solo ou temáticos de maneira geral. Entre elas pode-se destacar a natureza das classes, as resoluções espectrais e radiométricas dos sensores, e os métodos usados nos mapeamentos (Foody, 1999).

Classificação é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos (Fonseca, 1997). Ele se baseia na utilização de algoritmos que nomeiam elementos de cena em uma imagem como representativos de um tipo de cobertura particular ou uma classe (Richards, 1995). A classificação digital de dados de sensoriamento remoto para fins agrícolas visa, basicamente, extrair o máximo de informação temática, num tempo computacional mínimo, e de forma a obter o nível de precisão desejado.

#### 4.2. Características agrícolas que influem na classificação

Do ponto de vista do sensoriamento remoto, as atividades agrícolas possuem algumas características que interferem na sua identificação em imagens digitais obtidas por sensores orbitais. Diferentemente dos ambientes naturais, os alvos agrícolas sofrem intensa e intencional influência antrópica, o que contribui para lhes conferir um aspecto de figuras geométricas relativamente regulares, de grande homogeneidade interna. Isto se deve aos procedimentos de: 1) aração e gradagem, que diminuem a irregularidade do terreno; 2) calagem e adubação, que suavizam as diferenças nas componentes químicas do solo; 3) plantio mecanizado, que confere o caráter geométrico aos “talhões”; 4) semeadura em um curto espaço de tempo e uso de sementes selecionadas, que conferem regularidade à cobertura vegetal em cada instante no tempo; e 5) controle de pragas, doenças e ervas daninhas, que conferem regularidade e pureza à população de plantas. Outros fatores de homogeneidade são o calendário agrícola e a vocação regional, que resultam num conjunto limitado e relativamente estável de culturas agrícolas que podem estar presentes em uma imagem. Todas estas características contribuem no sentido de facilitar a identificação dos limites dos alvos agrícolas em imagens obtidas por satélites de sensoriamento remoto.

Por outro lado, a resposta ao longo do tempo para um mesmo ponto no terreno, ocupado por uma cultura agrícola (anual ou temporária), muda drasticamente devido aos fatores estacionais (climáticos) e também aos antrópicos (plantio, colheita; preparo

de solo, etc.). Além disso, apesar da duração da época de plantio das culturas ser curta em relação à resolução temporal dos sensores em operação, em uma mesma imagem é possível e altamente provável encontrarmos uma mesma espécie plantada em diversas datas, ou seja, que se encontram em diferentes fases de desenvolvimento, o que afetará a reflectância e, portanto, o sinal medido pelo sensor. Também é sabido que uma mesma espécie pode apresentar respostas espectrais distintas, dependendo, além da fase de desenvolvimento, do estado fitossanitário, aspectos nutricionais, estresse hídrico, genótipo, espaçamento e densidade de plantio, etc. Contrariamente, espécies distintas podem apresentar a mesma resposta em determinadas faixas do espectro, ou por possuírem características realmente semelhantes para aquela determinada banda, ou por limitações das resoluções radiométrica e espectral do sensor, que impediriam a detecção de diferenças sutis.

Este conjunto de particularidades confere grande dificuldade para a classificação dos alvos agrícolas. Assim vários estudos vêm sendo realizados no intuito de aprimorar as classificações de imagens, se caracterizando, muitas vezes, pela integração de dados originados em diferentes tipos de sensores. Segundo Brisco e Brown (1995), classificações feitas utilizando-se sensores com diferentes sensibilidades demonstraram a existência de sinergismo, o qual pode ser justificado pelo fato que, apesar de possuírem alta resolução espacial, as imagens Landsat-TM e SPOT-HRV podem não estar disponíveis com a resolução temporal nominal, devido a possível ocorrência de nuvens. Já as imagens de radar, apesar de exigirem tratamento mais complexo, não apresentam o mesmo problema.

Outra técnica que pode incrementar a classificação de culturas agrícolas é a utilização de dados multi-temporais. Em trabalho feito no Sul dos EUA imagens de datas distintas (março, maio, agosto e dezembro), foram analisadas com o intuito de identificar as diferentes culturas que ocorrem durante as diferentes épocas do ano (Congalton et al., 1998). Em um trabalho canadense a multitemporalidade também foi explorada nas imagens, contribuindo para a precisão da classificação (Brisco e Brown, 1995).

Para tratar esta multiplicidade de dados, sejam eles de diferentes fontes (sensores, dados de campo, etc.), sejam de diferentes datas, torna-se importante levantar o papel

dos SIGs. Green (1992) comenta que estes sistemas são um instrumento espetacular para a integração de dados e obtenção de melhor precisão nos modelos de representação do mundo real. Através do registro de imagens tornaram-se possíveis as análises de relacionamento entre localização espacial, variação espectral da imagem e variação da cobertura dos solos. A atualização dos dados também fica extremamente facilitada uma vez que, montada a base de dados, fica muito fácil produzir uma cobertura atualizada, obtendo assim um resultado dinâmico e portanto mais próximo do real.

Fica clara, então, a ampla possibilidade de utilização de imagens de sensores remotos e processos de classificação de imagens digitais em sistemas agrícolas. Abrangendo desde o mapeamento de culturas agrícolas (Chen, 1980), passando pela previsão de safras agrícolas (Batista et al., 1978b; Chen, 1990; Ippoliti-Ramilo, 1998) e chegando a estimativas de produtividade (Thenkabail et al., 1994; Murthy, 1996).

#### 4.3. O que classificar

Antes de tratar de como proceder à classificação é preciso decidir o que classificar. É óbvio mas não é trivial. Principalmente quando se parte do que se pode chamar do paradigma da imagem visual. Como, no início da era do sensoriamento remoto, as análises temáticas eram baseadas na interpretação visual de imagens em papel, obtidas primeiramente por meios fotográficos e depois por espectrorradiometria, e principalmente, porque a visão humana é baseada em uma composição tridimensional de cores, há uma tendência para se trabalhar no espaço tridimensional. Com isso, e após o surgimento de sensores que ofereciam a possibilidade de se obter informação em mais de três dimensões espectrais, começou a surgir a necessidade de se escolher quais as três bandas seriam as melhores para cada fim específico da classificação.

Os procedimentos básicos para a escolha de bandas baseiam-se no estudo da correlação entre a reflectância de cada banda com as variáveis agrônômicas de interesse. Quanto maior a correlação encontrada, mais útil será a informação fornecida por aquela banda para a classificação com relação às variáveis estudadas. Outra maneira de abordar este assunto é menos empírica e busca explicações teóricas para o comportamento espectral dos alvos de interesse em cada faixa de comprimento de

onda, baseando-se nestas relações para a escolha das bandas mais adequadas. Surgiram também, a partir dessa discussão, as técnicas de redução da dimensionalidade, baseadas nos conceitos da estatística multivariada. O objetivo principal era, a partir de uma quantidade *maior que três* de bandas espectrais, proceder a uma combinação linear delas de forma a garantir que a maior parte da variância contida no total de bandas passasse a estar presente em apenas duas ou três bandas sintéticas. Tudo para poder fazer a classificação a partir de, no máximo, três bandas.

Dentre as técnicas de redução de dimensionalidade, a mais conhecida e utilizada é a da análise de componentes principais (ACP). Basicamente, a técnica de ACP consiste, a partir da nuvem de pontos criada ao fazermos um diagrama multidimensional de uma banda contra a outra, em encontrarmos novos eixos para a referência dos pontos, sendo que o primeiro deles deverá coincidir com a direção de maior dispersão dos dados, e o subsequente será perpendicular ao primeiro na segunda direção de maior dispersão, e assim por diante tantas vezes quantas forem as bandas. Se agora decomposermos as coordenadas dos pontos nos novos eixos (chamados de componentes principais), vamos obter novos valores para cada elemento de cena, o que nos permitirá reconstruir as imagens. Uma das principais características desta técnica é que, quando aplicada a duas ou mais bandas, a primeira componente principal conterá grande parte da variação total (e portanto da informação) das bandas originais. Outra propriedade importante é que entre as componentes principais não há correlação.

Mais recentemente, surgiu um novo enfoque que defende a incorporação de dados não espectrais aos procedimentos de classificação. Dois tipos de dados foram adicionados então aos do sensoriamento remoto durante o processo de classificação. O primeiro, apesar de não ser espectral, é um dado interno da imagem, que são as medidas de textura ou análise de vizinhança; sua aplicação aos dados de sensoriamento remoto passivo tem sido limitada (Mather, 1999). O segundo é a utilização de dados externos, ou auxiliares, não contidos nas imagens de sensoriamento remoto, como os dados altimétricos, mapas de solo ou geológicos, etc. Com o desenvolvimento dos SIGs este método têm se tornado cada vez mais freqüente nas classificações temáticas na agricultura.

#### 4.4. Métodos de classificação

Diversos algoritmos de classificação têm sido usados em sensoriamento remoto, em especial os procedimentos estatísticos convencionais como os algoritmos de máxima verossimilhança e, mais recentemente, enfoques baseados em inteligência artificial, como as redes neurais. Independente do tipo de algoritmo adotado, o processo de classificação pode ser dividido em três estágios básicos. Primeiro, o estágio do treinamento, no qual são gerados os descritores de cada classe. Estes descritores são então utilizados pelos algoritmos de classificação no segundo estágio, o de atribuição de classes [ou classificação propriamente dita], para alocar cada elemento de cena de classe desconhecida àquela classe com a qual ele tenha maior similaridade. O terceiro é o estágio de teste, no qual a exatidão da classificação é avaliada. Os enfoques utilizados em cada estágio são geralmente de apelo intuitivo, largamente disponíveis, e, quando sua aplicação é apropriada, podem ser usados para uma precisa classificação dos dados. Existem, entretanto, problemas em seu uso. Logo de início deve-se salientar que a classificação é um processo subjetivo e, portanto, a qualidade final é, em parte, uma função da perícia e do discernimento do analista. O analista tem, por exemplo, controle ou influência sobre muitos fatores que afetam a exatidão da classificação. Isso inclui itens essenciais, tais como a seleção do tamanho da amostra de treinamento e do próprio delineamento amostral, a definição das classes, e a definição de numerosos parâmetros associados ao algoritmo de classificação adotado, como os que definem a taxa de aprendizagem em uma rede neural ou as probabilidades “a priori” em classificadores probabilísticos. Além disso, muitas das técnicas de classificação utilizadas fazem suposições acerca dos dados que nem sempre podem ser sustentadas. Por exemplo, o classificador de máxima verossimilhança, largamente utilizado, assume que os dados são normalmente distribuídos. Este algoritmo pode, é claro, ainda ser utilizado mesmo que suas suposições não sejam satisfeitas. Embora pequenos desvios das condições assumidas possam não ser importantes, outros podem ser uma fonte significativa de erros de classificação (Foody, 1999).

O primeiro passo para se desenvolver a classificação é escolher a estratégia de classificação a ser usada. Existem essencialmente duas abordagens na classificação de imagens: a primeira denomina-se classificação supervisionada e a segunda não supervisionada. Há também quem se utilize de ambas as abordagens para a obtenção

de um resultado mais preciso. Chuvieco e Congalton (1988), por exemplo, destacaram que a combinação de classes supervisionadas e não supervisionadas tem uma vantagem dupla: por um lado ajuda a dar um significado àquelas classes que tiveram classificação não supervisionada através da associação com as categorias supervisionadas (ou informativas) e, por outro lado, reduz a subjetividade da seleção supervisionada porque descobre qualquer grupo que não tenha uma relação espectral definida, identificando possíveis grupos “artificiais” (informativos mas não espectrais) que podem não ser derivados diretamente da informação espectral contida na imagem.

Conforme o processo de classificação empregado, os classificadores podem ser divididos em classificadores por pontos, ou elementos de cena, e classificadores por regiões (Fonseca, 1997). O primeiro utiliza apenas a informação espectral de cada elemento de cena enquanto o último utiliza além da informação espectral do próprio elemento, também a informação espectral dos seus vizinhos, pertencentes a um mesmo segmento.

No caso de alvos agrícolas, como dito anteriormente, encontra-se a presença de talhões, que são segmentos com um padrão geométrico relativamente regular, de grande homogeneidade interna. Pode-se então optar pela abordagem de classificação por regiões, sendo que a segmentação neste caso deve ser otimizada para que cada segmento corresponda o mais possível à área de um talhão.

O processo de segmentação pode ser entendido como um processo iterativo em que as regiões espacialmente adjacentes são agrupadas segundo algum critério de similaridade (Fonseca, 1997) ou descontinuidade. O método de segmentação baseado na descontinuidade explora a existência de bordas, trabalhando de maneira análoga a uma filtragem de altas frequências. De maneira inversa, a segmentação baseada no critério de similaridade explora o interior das regiões mais homogêneas da imagem.

Uma variedade de algoritmos está disponível para as operações de classificação, variando entre aqueles que se baseiam em modelos de distribuição de probabilidade estatística para as classes de interesse àqueles em que o espaço multi-espectral é simplesmente particionado em regiões de classes específicas (Richards, 1995).

#### 4.4.1. Classificação supervisionada

Na classificação digital supervisionada, o classificador deve ser treinado para reconhecer os padrões espectrais dos alvos, usando áreas de treinamento representativas, onde as informações de campo são disponíveis (Chen, 1990). Estas regiões serão chamadas de amostras.

Segundo Lillesand e Kiefer (1994), uma das mais simples estratégias de classificação supervisionada que pode ser utilizada é a do classificador por distância. Neste método, após selecionadas as amostras das classes nas quais se quer mapear todos os elementos de cena da imagem, classifica-se cada elemento separadamente, calculando-se a distância euclidiana entre a sua posição no espaço multidimensional, formado pelas bandas espectrais consideradas na análise, e a posição da média dos elementos de cada amostra. O elemento é classificado como pertencente àquela classe cuja distância calculada for a menor. Este método é matematicamente simples e computacionalmente eficiente, mas tem certas limitações. A principal delas é que ele é totalmente insensível aos diferentes graus de variância nos dados de resposta espectral.

O segundo método mais simples, e que inclui de uma certa forma o conceito de variância, é o método do paralelepípedo. Nele, a partir dos valores dos elementos das amostras de cada classe, encontram-se os valores máximos e mínimos, por classe e por banda espectral. Estes valores constituirão os vértices de um *paralelepípedo* multidimensional para cada classe. Os elementos de cena serão classificados como pertencentes a uma classe se suas posições no espaço de atributos estiverem dentro dos limites do paralelepípedo daquela classe. Aqueles que não estiverem dentro de nenhum paralelepípedo figurarão como não classificados. Apesar de rápidos e eficientes computacionalmente, este classificador também apresenta problemas, principalmente de sobreposição entre paralelepípedos de classes diferentes e de rigidez na definição dos limites das classes.

Sem dúvida, o mais importante dos classificadores supervisionados é o classificador por máxima verossimilhança, ou Maxver. Em poucas palavras, ele pressupõe que os valores de reflectância para uma determinada classe de elementos de cena apresentam distribuição normal. A partir desta pressuposição, são estimadas as

médias e as variâncias de cada classe, a partir dos dados das amostras, e ajustadas as curvas de distribuição de probabilidade próprias da função normal. Para cada elemento de cena é calculada então a probabilidade de pertencer a cada uma das classes, sendo classificado naquela cuja probabilidade for maior. Este método permite ainda a definição de regiões de aceitação ou de rejeição, que é feita, por exemplo estabelecendo-se que um elemento só será classificado em uma classe se estiver a uma distância de mais o menos dois desvios padrões da média da classe, o que equivaleria à faixa de 95% de probabilidade.

Os exemplos descritos se referiam aos métodos de classificação por pontos, mas existem também os métodos de classificação supervisionada por regiões. Um método bastante comum é o Bhattacharyya, que é o algoritmo de classificação supervisionada por regiões que utiliza como critério de decisão estatística a distância de Bhattacharyya. A classificação é realizada computando-se a distância entre a distribuição referente a uma região e a distribuição da classe, sendo as distribuições, tanto das classes como das regiões, definidas pelos parâmetros: vetor de médias, e matriz de covariância (Pereira, 1996).

#### 4.4.2. Classificação não supervisionada

Neste tipo de classificação, o algoritmo baseia-se na análise de agrupamentos, onde são identificados no espaço de atributos as nuvens formadas pelos elementos de cena com características espectrais comuns ou similares (Venturieri e Santos, 1998). Um dos principais objetivos da análise de agrupamento é o de obter, entre todas as possíveis divisões de um conjunto de objetos em “n” grupos, aquela que otimize um determinado critério (por exemplo, maximizar a variância conjunta entre grupos).

Existem diversos algoritmos baseados na programação matemática que permitem encontrar esta divisão ótima, no entanto, eles são pouco aplicados por apresentarem um custo computacional alto, consumindo muito tempo para chegar à solução. Na prática, são utilizados algoritmos muito eficientes, do ponto de vista do tempo de computação, que partem de uma divisão inicial, obtida aleatoriamente ou fornecida pelo usuário, que vai sendo alterada pela migração de objetos de um grupo para outro a cada iteração. Ao fim, o algoritmo oferece como solução a divisão em grupos obtida: ou após um número pré-determinado de iterações (também fornecido pelo usuário), ou

após o critério de convergência (ou regra de parada) ter sido atingido.

Como falta a figura do *supervisor*, na classificação não supervisionada é o computador que decide, com base em regras estatísticas, quais as classes a serem separadas e quais os elementos de cena pertencentes a cada uma (Crósta, 1992).

O ISOSEG é um dos mais utilizados algoritmos de classificação não supervisionada por regiões, baseado em técnicas de agrupamento (clustering), caracterizado por se utilizar dos atributos estatísticos, média e matriz de covariância, para estimar o valor central de cada classe, não supondo nenhum conhecimento prévio da distribuição de densidade de probabilidade (Fonseca, 1997). Segundo INPE/DPI (1998), este algoritmo envolve três etapas:

a) definição do limiar de similaridade: corresponde à distância de Mahalanobis máxima na qual as regiões podem estar afastadas do centro das classes, associando a cada classe todas as regiões cuja distância for inferior ao limiar estipulado. O limiar é definido de forma interativa pelo usuário, em porcentagem;

b) detecção das classes: as regiões são organizadas em ordem decrescente de acordo com sua área. Através dos parâmetros estatísticos (média e matriz de covariância) da primeira região e do limiar de similaridade, inicia-se o procedimento de agrupar as regiões em classes, repetindo este processo até que não haja mais nenhuma região a ser agrupada;

c) competição entre classes: as regiões são reclassificadas considerando os novos parâmetros estatísticos de cada classe. Como o processo é seqüencial, ele pode favorecer as classes que são detectadas primeiro; por este motivo os valores das médias das classes são recalculados e o processo se repete até que esse valor não mais se altere (convergência).

Ao término, todas as regiões estarão associadas a uma classe definida pelo algoritmo e o usuário deverá então associar estas classes às classes informativas definidas a priori, correspondente a área de estudo.

#### 4.4.3. Outras abordagens

A área da classificação digital tem avançado muito com o aumento da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores e a diminuição do seu custo, além do surgimento de novas técnicas. Um dos mais significativos e recentes avanços no campo da classificação da cobertura do solo usando dados de sensoriamento remoto foi a introdução dos procedimentos que empregam redes neurais artificiais (RNA). Diferentemente dos métodos estatísticos tradicionais, como o de máxima verossimilhança, as RNAs são não-paramétricas e, portanto, permitem o uso de uma ampla gama de dados, incluindo dados categóricos.

Em um trabalho recente (Kavzoglu e Mather, 1999) onde se usaram dados de microondas do SAR e óticos do SPOT para classificar os tipos de cobertura do solo em uma área agrícola onde as classes presentes eram: beterraba, trigo, cevada, ervilha, batata, linhaça, mata, não classificada e mistura, a precisão geral da classificação foi maior para o método RNA (79,7%) do que para o método Maxver (72,3%), usando os mesmos dados para treinamento e teste. Segundo os condutores do trabalho, a fragilidade do enfoque Maxver está nas suas pressuposições estatísticas, entretanto, este procedimento é mais fácil de usar e não requer nenhuma outra intervenção do usuário além do fornecimento da amostra de treinamento. Por outro lado, diversas tentativas foram necessárias para determinar a *melhor* arquitetura para a rede no método RNA. Ressalta-se que o uso da técnica de RNA na classificação de dados obtidos por sensoriamento remoto ainda é recente e requer maior desenvolvimento, principalmente para tornar mais racional a escolha da estrutura de rede a ser utilizada em cada caso.

Outras técnicas que têm surgido e devem continuar se desenvolvendo no campo da classificação temática das atividades agrícolas são a abordagem "fuzzy" e os sistemas especialistas.

#### 4.5. Avaliação da Classificação

Uma vez classificada a imagem surge a necessidade de se verificar a precisão das informações geradas pela classificação. A precisão pode ser verificada através da seleção de uma amostra de pontos do mapa e comparação da classificação do mapa com dados de verificação. Para tal, a classificação pode ser vista como um teste de

hipótese. A estratégia do teste de hipótese é estabelecer o problema em termos de escolhas mutuamente exclusivas, e então aceitar a hipótese conservadora (hipótese nula) a não ser que haja uma baixa probabilidade de esta ser verdadeira. Para avaliar a precisão de mapas deve ser testada uma hipótese nula (o mapa é menos exato que o requerido), e uma hipótese alternativa (a precisão do mapa é igual ou melhor que a requerida). Este teste pode levar a duas decisões corretas e duas erradas. As primeiras são: 1. Aceitar um mapa suficientemente exato, 2. Rejeitar um mapa abaixo do padrão estabelecido. As decisões erradas são: 1. Aceitar um mapa abaixo do padrão estabelecido (risco do consumidor), 2. Rejeitar um mapa suficientemente exato (risco do produtor) (Aronoff, 1982a).

Antes de discorrer mais profundamente sobre os erros a serem analisados vamos nos deter na metodologia elaborada para a materialização deste teste de hipótese: a matriz de erros. Também conhecida como matriz de confusão ou tabela de contingência (Story e Congalton , 1986) , a matriz de erros pode ser definida como uma tabulação de resultados de testes de precisão que demonstram o número de pontos corretamente e incorretamente identificados. Nessa matriz os erros de inclusão (erroneamente incluir um ponto em uma classe) e erros de exclusão (erroneamente excluir um ponto de uma classe) são claramente apresentados (Aronoff, 1982a).

De uma forma mais precisa Congalton e Mead (1983) definem a matriz de erros como sendo uma tabela constituída de linhas e colunas que expressam o número de células classificadas segundo um tipo de cobertura particular (fotointerpretada ou classificada digitalmente) relacionada com a cobertura atual (dado de referência). As colunas representam o dado de referência enquanto as linhas representam a cobertura designada pela classificação digital ou fotointerpretação. Todas as classificações corretas são indicadas na diagonal principal da matriz. Os elementos fora desta diagonal indicam desclassificação, que é uma combinação de erros de inclusão e exclusão .

Referindo-se ao formato da matriz de erros Aronoff (1982b) afirma que este requer o mínimo de cálculos, é facilmente compreendido pelo usuário com um mínimo de treinamento estatístico e atende a um objetivo muito importante de um relatório de precisão, que é o fato de permitir ao usuário a extração de resultados importantes dos

testes para sua aplicação específica. Esse método viabiliza, então, a avaliação pelo próprio usuário, o que difere da avaliação proposta pelo responsável pela elaboração do teste, ou ainda, da avaliação proposta pelo próprio executor do mapa. Em outras palavras, os dados estão ao mesmo tempo disponíveis para diferentes usuários que querem calcular probabilidades de tipos de erros específicos. Promovendo tal flexibilidade de interpretação, a matriz de erros permite que o produto do mapa seja integralmente utilizado pois usuários podem predizer melhor seu desempenho em aplicações específicas.

Assim sendo, para que a matriz de erros possa ser corretamente interpretada várias abordagens devem ser consideradas. De acordo com Story e Congalton (1986) o primeiro passo para obter a precisão geral da classificação, deve ser a divisão da soma dos números que formam a diagonal principal (o número de classificações corretas) pelo número total de amostras realizadas. Inferências mais detalhadas sobre precisões de categorias individuais podem também ser feitas. Tal passo é importante uma vez que categorias podem exibir, e freqüentemente exibem, diferenças drásticas na precisão. Existem, então, dois métodos para determinar a precisão de classes individuais: 1. Precisão do Produtor, 2. Precisão do Consumidor, que seriam a análise dos riscos que se incorre em se tomar decisões errôneas quando da utilização de testes de hipótese (riscos do produtor e do consumidor, como relatado anteriormente).

1. A precisão do produtor mede os erros de exclusão que ocorrem na matriz de erros. É nomeada como tal pois o produtor do mapa/imagem classificado está interessado em quão bem uma área específica na terra pode ser mapeada<sup>3</sup>. Para calculá-la deve-se dividir o número total de uma classificação correta de amostras de uma categoria X pelo número total de amostras de referência da categoria X. Ou seja, a porcentagem resultante indica a probabilidade de um dado de referência (amostra de campo) estar corretamente classificado .

2. A precisão do consumidor, por sua vez, mede os erros de inclusão. Recebe tal nome pelo fato do usuário do mapa estar interessado em quão bem um mapa

---

<sup>3</sup> Com relação aos termos: produtor e consumidor, Aronoff (1982a) afirma que estes foram tirados de um método estatístico conhecido como amostragem aceitável, usado extensivamente na indústria manufatureira para controle de qualidade.

representa a realidade no campo. Consegue-se obtê-la através da divisão do número de amostras corretamente classificadas de uma categoria X pelo número total de amostras que foram classificadas na categoria X. Portanto, o resultado indica a probabilidade da amostra de uma imagem classificada realmente representar a categoria no campo.

Há que se atentar ao fato de apenas a primeira análise ser usualmente realizada. Um erro de classificação incorreta não é somente um erro de omissão da categoria correta, mas é também um erro de inclusão em uma outra categoria. Portanto ambos devem ser considerados.

Tais métodos de verificação de precisão são bastante eficientes para comparações feitas entre os dados de uma mesma matriz, porém tal metodologia é limitada pois não abrange a possibilidade de se fazer comparações de dados provenientes de matrizes distintas. Para que tais comparações possam ser realizadas técnicas de análise discreta multivariada podem ser utilizadas.

Para medir a relação entre matrizes Congalton et al. (1983) usou três técnicas de análise multivariada . A primeira consiste em se gerar uma matriz normalizada (nela cada linha e cada coluna somam um). A segunda técnica desenvolve um método de testar diferenças de significância entre matrizes de erros que variam através de apenas uma variável<sup>4</sup>. A terceira permite a análise simultânea de mais de um fator que estejam afetando a precisão de classificação.

A análise comparativa das matrizes de erro pode promover métodos melhores de comparação de classificações do uso da terra que uma simples comparação do total estimado da precisão do mapa, pois permite uma classificação classe por classe, mostrando realmente o número de amostras inválidas em cada classe, permitindo que o usuário selecione um teste adequado para julgar a confiança das conclusões tiradas a partir dos dados (Aronoff, 1982a).

---

<sup>4</sup> Esta técnica de análise multivariada é também conhecida como análise KAPPA. O resultado da performance da análise KAPPA é a estatística KHAT. (Congalton et al., 1983; Congalton, 1991).

Note-se que, ao usar a matriz de erro para comparar sistemas de sensoriamento remoto, é o sistema inteiro de aquisição de imagem desde a interpretação de imagem até a compilação do mapa que está sendo comparado. Uma comparação válida requer que todas essas variáveis sejam controladas, caso contrário diferenças na compilação de mapas, por exemplo, poderiam mascarar completamente as diferenças na capacidade de interpretação dos produtos da imagem (Aronoff, 1982a).

Por esta razão a devida atenção deve ser dada às diversas variáveis, ao longo do processo, que irão afetar o resultado final da classificação. Através da análise dessas variáveis pode se chegar às prováveis fontes de erros. Congalton (1991) levanta este problema afirmando que se a matriz for impropriamente gerada, todas as análises feitas através dela não farão sentido. Portanto, os seguintes fatores tem que ser considerados: coleta de dados no campo, esquema de classificação, autocorrelação espacial, tamanho da amostra, esquema de amostragem. Cada um desses fatores fornece informações essenciais para o processo. Outras fontes de erros analisadas mais detalhadamente estão em Congalton e Green (1993), e podem ser resumidas como sendo: diferenças de registro entre o dado de referência e o mapa de classificação gerado, erros na delimitação gerados durante a digitalização, erros de interpretação, mudanças na cobertura entre a data de aquisição do dado de sensoriamento remoto e a data do dado de referência, entre outros.

#### 4.6. Conclusão

A classificação digital de imagens de sensoriamento remoto para fins agrícolas tem ao seu dispor inúmeras técnicas teoricamente capazes de atender aos seus objetivos presentes. Os baixos valores encontrados nas avaliações das classificações feitas com dados reais entretanto, parecem mostrar que isso não é bem verdade. A causa talvez esteja na extrema complexidade do meio agrícola, muito diferente do mundo digital das imagens e do mundo exato da estatística. Por outro lado, talvez sejam os dados de sensoriamento remoto que ainda não contenham informação suficiente para que uma classificação produza resultados nos níveis esperados de confiabilidade. Com a disponibilização em breve de sensores com resolução espacial mais fina, outros com sensores multi-espectrais, a possibilidade de mesclar dados multisensores, inclusive de radar, possivelmente trará uma resposta à esta questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgRISTARS Program Management Group. **AgRISTARS: Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing**. Research Report - Fiscal Year 1983. Houston: NASA, 1984. 116p. (JSC-18920).
- Allen, J. D.; Hanuschak, G. A. **The remote sensing applications program of the National Agricultural Statistical Service: 1980-1987**. Washington: USDA/NASS, Research and Applications Division, Aug. 1988. 43p. (SRB Staff Report No. SRB-88-08).
- Anderson, J. E.; Fischer, R. L.; Deloach, S. R. Remote sensing and precision agriculture: ready for harvest or still maturing? **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.10, p.1118-1123, 1999.
- Aronoff, S. Classification accuracy: a user approach. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.8, p. 1299-1307, 1982a.
- \_\_\_\_\_ The map accuracy report: a user's view. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.8, p. 1309-1312, 1982b.
- Asner, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.64, p. 234-253. 1998.
- Assunção, G. V.; Duarte, V. **Avaliação de áreas preparadas para plantio (solonú), utilizando-se dados digitalizados do Landsat, através de tratamento automático no I-100**. São José dos Campos: INPE, 1980. 28p. (INPE-1910-RPE/243).
- Badhwar, G. D.; Henderson, K. E.; Pitts, D. E.; Johnson, W. R.; Sestak, M. L.; Woolford, T.; Carnes, J. Comparison of simulated thematic mapper data and multispectral scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v.14, n.1-3, p.247-255, 1984.
- Barbosa, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85**. São José dos Campos. 164 p. (INPE-7237-TDI/690). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

Batista, G. T.; Mendonça, F. J.; Lee, D. C. L.; Tardin, A. T.; Chen, S. C.; Novaes, R. A. **Uso de dados orbitais para identificação de áreas de cana-de-açúcar**. São José dos Campos: INPE, 1978a. 29p. (INPE-1228-NTE/116).

\_\_\_\_ **Uso de sensores remotos a bordo de satélite e aeronave na identificação e avaliação de áreas de culturas para fins de previsão de safras**. São José dos Campos: INPE, 1978b. 41p. (INPE-1229-NTI/103).

Boissard, P.; Pointel, J. -G.; Tranchefort, J. Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. **International Journal of Remote Sensing**, v.13,n.9, p.1681-1692, 1992.

Boissezon, H. Rapid estimates of acreage and potential yield in the European Union. In: Dallemand, J.F.; Vossen, P. Ed. **Agrometeorological models: theory and applications in MARS project**. Luxembourg: Ispra, p.181-195, 1995.

Bouman, B. A. M. Yield prediction by crop modelling and remote sensing. In: Dallemand, J.F.; Vossen, P. Ed. **Agrometeorological models: theory and applications in MARS project**. Luxembourg: Ispra, p.91-104, 1995.

Brisco, B.; Brown, R. J. Multidate SAR/TM synergism for crop classification in western Canada. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, n.8, p. 1009-1014, 1995.

Carvalho, M. A. Comércio agropecuário brasileiro no MERCOSUL. **Informações Econômicas**, v.29, n.6, p.7-22, 1999.

Chen, S. C. **Precisão de classificação de mapas de distribuição de culturas, obtidos a partir de imagens Landsat**. São José dos Campos: INPE, 1980. 7p. (INPE-1889-RPE/232).

\_\_\_\_ **Contribuição de dados de satélite no sistema de previsão de safras**. São José dos Campos: INPE, 1990. 7p. (INPE-5087-PRE/1595).

Chipman, R. International cooperation in the acquisition and dissemination of satellite remote sensing data. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Remote sensing applications to land resources**. Rome, p.11-18, 1990. (FAO Remote Sensing Centre Series, 54).

Chhikara, R. S. Effect of mixed (boundary) pixels on crop proportion estimation. **Remote Sensing of Environment**, v.14, n.1-3, p. 207-218, 1984.

- Chuvieco, E.; Congalton, R.G. Using Cluster Analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.9, p. 1275-1281, 1988.
- Cochran, W. G. **Sampling techniques**. 3.ed. New York: Wiley, 1977. 428p.
- Collares, J. E. R.; Lauria, C. A.; Carrilho, M. M. Pesquisa de previsão e acompanhamento de safras baseada em painéis de amostras de áreas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Anais**. São José dos Campos: INPE, v.4, p.450-453, 1993.
- Congalton, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37 , n.1, p. 35-46, 1991.
- Congalton, R.G.; Balogh, M.; Bell, C; Green, K.; Milliken, J. A.; Ottman, R. Mapping and monitoring agricultural crops and other land cover in the lower Colorado river basin. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.64, n.11, p. 1107-1113, 1998.
- Congalton, R.G.; Green, K. A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n.5, p. 641- 644, 1993.
- Congalton, R.G.; Mead, R.A. A quantitative method to test for consistency and correctness in assessing photointerpretation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.1, p. 69-74, 1983.
- Congalton, R.G.; Oderwald, R.G.; Mead, R.A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.12, p. 1671-1678, 1983.
- Costa, S. R. X.; Paião, L. B. F. C.; Mendonça, F. J.; Shimabukuro, Y. E.; Duarte, V. **Estudos estatísticos preliminares sobre a região canavieira de Campos - RJ, utilizando imagens Landsat e fotografias aéreas**. São José dos Campos: INPE, 1983. 15p. (INPE-2723-NTE/200).
- Crist, E. P. Effects of cultural and environmental factors on corn and soybean spectral development patterns. **Remote Sensing of Environment**, v.14, n.1-3, p. 3-13, 1984.

- Crósta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992. 170 p.
- Cunha, R. P. **Commission VII Resource and Environmental Monitoring**. Poster of The International Congress for Photogrammetric Remote Sensing, 18., Viena, 1996.
- Curran, P. J.; Dungan, J. L.; Macler, B. A.; Plummer, S. E. The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.1, p. 69-76, 1991.
- De Cola, L. Multiresolution covariation among Landsat and AVHRR vegetation indices. In: Quattrochi, D. A.; Goodchild, M. F. Ed. **Scale in remote sensing and GIS**. Boca Raton: CRC, 1996. Chap.4, p.73-91.
- Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio, A. R.; Valeriano, M.; Oliveira, J. B. **Comportamento espectral dos solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 132p. (INPE-5424-PRP/172).
- Epiphanyo, J. C. N. Monitoreo ambiental y sistemas de información para la evaluación de la relación agricultura-medio ambiente. In: Viglizzo, E., coord. **Libro verde: elementos para una política agroambiental en el Cono Sur**. Montevideo: IICA – PROCISUR, 1997. Cap.3, p.35-51.
- \_\_\_\_\_. **Satélites de sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, 2000. Palestra realizada no Seminário Sobre Meio Ambiente e Uso de Tecnologias Espaciais para Professores de Ensino Fundamental e Médio no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em julho de 2000. 35p. (INPE-8152-PRE/3959).
- Feiveson, A. H. Weighted ratio estimation in agricultural surveys. **Communications in Statistics: theory and methods**, v.13, n.23, p.2937-2959, 1984. Special Issue on Crop Surveys Using Satellite Data.
- Fonseca, L. M. G. **Processamento digital de imagens**: apostila do curso dado no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 1997. 48 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) **Multiple frame agricultural surveys**: current survey based on area and list sampling methods. Rome, 1996. 119p., v.1. (FAO Statistical Development Series, 7).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) **Multiple frame agricultural surveys**: agricultural survey programmes based on area frame or dual frame (area and list) sample design. Rome, 1998. 242p., v.2. (FAO Statistical Development Series, 10).

\_\_\_\_\_ **Report of the eleventh international training course on applications of remote sensing to agricultural statistics**. Rome, 1988. 224p. (FAO Remote Sensing Centre Series, 47).

\_\_\_\_\_ **Sampling methods for agricultural surveys**. Rome, 1989. 262p. (FAO Statistical Development Series, 3).

\_\_\_\_\_ **Remote sensing applications to land resources**. Rome, 1990. 299p. (FAO Remote Sensing Centre Series, 54).

Foody, G. M. The continuum of classification fuzziness in thematic mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.4, p.443-451, 1999.

Formaggio, A. R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão**. Piracicaba. 163p. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, 1989.

Formaggio, A. R.; Epiphânio, J. C. N.; Valeriano, M.; Oliveira, J. B. Comportamento espectral (450-2.450nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.3, p.467-474, 1996.

Francisco, V. L. F. S.; Martin, N. B. A informática na agricultura paulista. **Informações Econômicas**, v.29, n.11, p.18-24, 1999.

Frery, A. C.; Yanasse, C. C. F.; Sant'anna, S. J. S.; Rennó, C. D. Statistical properties of SAR data and consequences. In: **Seminars of the United Nations Programme on space applications**. New York: United Nations, 1999. p.53-62.

Gomasca, M. A.; Lechi, G.M. Data-collection Systems. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) **Remote sensing applications to land resources**. Rome, 1990. p.63-83. (FAO Remote Sensing Centre Series, 54).

Gonick, L.; Smith, W. **The cartoon guide to statistics**. New York: HarperPerennial, 1993. 232p.

Green, K. Spatial Imagery and GIS: Integrated data for natural resource management. **Journal of Forestry**, v.90, n.11, p. 32-36, 1992.

Haertel, V.; Landgrebe, D. A. On the classification of classes with nearly equal spectral response in remote sensing hyperspectral image data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n.5, p.2374-2386, 1999.

Houseman, E. E. **Area frame sampling in agriculture**. Washington: USDA, n.20, Nov. 1975. 79p. (Statistical Reporting Service).

Houston, A. G.; Hall, F. G. Use of satellite data in agricultural surveys. **Communications in Statistics: theory and methods**, v.13, n.23, p.2857-2880, 1984. Special Issue on Crop Surveys Using Satellite Data.

Howard, J. A. **Remote sensing and food production for a growing world population**. Rome: FAO, 1984. 13p. (FAO Remote Sensing Centre Series, 26).

Huete, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295-309. 1988.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Divisão de Processamento de Imagens (INPE/DPI). **Classificação**. [on line]. <[http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/pdi\\_con.htm](http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/pdi_con.htm)> acesso em ago. 2000.

Ippoliti-Ramilo, G. A. **Imagens TM/LANDSAT da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**. São José dos Campos. 161p. (INPE-7116-TDI/668). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

Ippoliti-Ramilo, G. A.; Epiphanyo, J. C. N.; Shimabukuro, Y. E.; Formaggio, A. R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. **Agricultura em São Paulo**, v.46, n.1, p.89-101, 1999.

Irons, J. R.; Campbell, G. S.; Norman, J. M.; Graham, D. W.; Kovalick, W. M. Prediction and measurement of bi-directional reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.30, n.2, p. 249-259. 1992.

Kavzoglu, T.; Mather, P. M. Pruning artificial neural networks: an example using land cover classification of multi-sensor images. **International Journal of Remote Sensing**. v.20, n.14, p.2787-2803, 1999.

- Klersy, R. The work and role of the Commission of the European Communities. **International Journal of Remote Sensing**, v.13,n.6-7, p.1035-1058, 1992.
- Knipling, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p.155-159, 1970.
- Kollenkark, J. C.; Daughtry, C. S. T.; Bauer, M. E. **Soybean canopy reflectance as influenced by cultural practices**. West Lafayette: Purdue University - Laboratory for Applications of Remote Sensing, 1981. 43p. (AgRISTARS Technical Report)
- Krug, T.; Yanasse, C. C. F. **Estimativa de safras agrícolas utilizando dados coletados por satélites de sensoriamento remoto e dados terrestres, através de amostras de substratos geográficos**. São José dos Campos: INPE, 1986. 51p. (INPE-4102-RPE/534).
- Laguette, S. Combined use of NOAA/AVHRR indices and agrometeorological models for yield forecasting. In: Dallemand, J.F.; Vossen, P. Ed. **Agrometeorological models: theory and applications in MARS project**. Luxembourg: Ispra, 1995. p.197-208.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3.ed. New York: Wiley, 1994. 750p.
- Luiz, A. J. B. Pesquisa espacial: questão de soberania. **Gazeta Mercantil**. São Paulo, 01 de jun. 2000. Caderno Planalto Paulista, p. 2.
- MacDonald, R. B.; Hall, F. G. Global crop forecasting. **Science**, v.208, p.670-679, May. 1980.
- Mather, P. M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. 2.ed. New York: Wiley, 1999. 292p.
- Medeiros, A. M. P.; Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E. Imagens Landsat na estimativa de áreas de cana-de-açúcar, milho e soja. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São Paulo: Image Multimídia, 1996.
- Mello, F. A. F.; Sobrinho, M. O. C. B.; Arzolla, S.; Silveira, R. I.; Netto, A. C.; Kiehl, J. C. **Fertilidade do solo**. 3.ed. São Paulo: Nobel, 1985. 400p.

- Mendonça, F. J. **Sensoriamento Remoto aplicado à agricultura:** princípios básicos, metodologia e aplicações. São José dos Campos: INPE, 1981. 87p. (INPE-2225-MD/012).
- Mendonça, F. J.; Cottrell, D. A.; Tardin, A. T.; Lee, D. C. L.; Shimabukuro, Y. E.; Moreira, M. A.; Lima, A. M.; Maia, F. C. S. **Cultura do trigo:** identificação e avaliação de áreas através de dados do Landsat. São José dos Campos: INPE, 1981. 27p. (INPE-2204-RPE/397).
- Mendonça, F. J.; Lee, D. C. L.; Tardin, A. T.; Chen, S. C.; Novaes, R. A.; Shimabukuro, Y. E. **Resultados significantes do projeto Estatísticas Agrícolas:** 1975-1978. São José dos Campos: INPE, 1979. 29p. (INPE-1609-NTE/155).
- Meyer-Roux, J.; King, C. Agriculture and Forestry. **International Journal of Remote Sensing**, v.13,n.6-7, p.1329-1341, 1992.
- Middleton, E. M. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. **Remote Sensing of Environment**, v.38, n.1, p. 45-62. 1991.
- Monitoring Agriculture with Remote Sensing Techniques (MARS). **Crop area estimation of annual crops through area frame sampling based on segments:** results obtained in Europe in 1992. Varese: Ispra, 1993. 21p.
- Murthy, C. S.; Thiruvengadachari, S.; Raju, P. V.; Jonna, S. Improved sampling and crop yield estimation using satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.17, n.5, p. 945-956, 1996.
- Nageswara Rao, P. P.; Mohankumar, A. Cropland inventory in the command area of Krishnarajasagar project using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.6, p.1295-1305, 1994.
- Novo, E. M.; Shimabukuro, Y. E. Identification and mapping of the Amazon habitats using a mixing model. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.3, p.663-670, 1997.
- Ortiz, M. J.; Formaggio, A. R.; Epiphanyo, J. C. N. Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS, and historical database. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.1, p.95-105, 1997.

- Otañez, G. **Manual para la construccion del marco de muestreo de areas y seleccion de la muestra.** Bogotá: Ministerio de Agricultura, 1986. 95p. (Proyecto OPSA/PNUD/FAO/COL/83/012).
- Panigrahy, S.; Chakraborty, M. An integrated approach for potato crop intensification using temporal remote sensing data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.** v.53, n.1, p.54-60, 1998.
- Pereira, J. L. G. **Estudos de áreas de floresta em regeneração através de imagens Landsat-TM.** São José dos Campos. 104p. (INPE-3987-TDI/578). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Perry JR., C. R; Lautenschlager, L. F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment,** v.14, n.1-3, p.169-182, 1984.
- Pino, F. A. Área cultivada e ICMS. **Informações Econômicas.** v.29, n.3, p.7-14, 1999a.
- \_\_\_\_\_. Estatísticas agrícolas para o século XXI. **Agricultura em São Paulo,** v.46, n.2, p.71-105, 1999b.
- Price, J. C. How unique are spectral signatures?. **Remote Sensing of Environment,** v.49, n.3, p.181-186, 1994.
- Quattrochi, D. A.; Goodchild, M. F. Ed. **Scale in remote sensing and GIS.** Boca Raton: CRC, 1996. 406p.
- Ray, S. S.; Pokharna, S. S.; Ajai. Cotton yield estimation using agrometeorological model and satellite-derived spectral profile. **International Journal of Remote Sensing,** v.20, n.14, p.2693-2702, 1999.
- Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.** 2.ed. Berlim: Springer-Verlag, 1995. 340p.
- Ryerson, R. A.; Curran, P. J.; Stephens, P. R. Agriculture. In: Philipson, W. R. ed. **Manual of photographic interpretation.** 2.ed. Bethesda: ASPRS, 1997. p.285-397.

- Ryerson, R. A.; Harvie, J.; Tambay, J. L.; Plourde, R. **The use of Landsat, ground data and a regression estimator for potato area estimation.** Canada: Centre for Remote Sensing, 1983. 42p.
- Sano, E. E.; Assad, E. D.; Orioli, A. L. Monitoramento da ocupação agrícola. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. Ed. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura.** 2.ed. Brasília: Embrapa, 1998. p.179-190.
- Schott, J. R. **Remote sensing: the image chain approach.** New York: Oxford, 1997. 394p.
- Schowengerdt, R. A. **Remote sensing: model and methods for image processing.** 2.ed. San Diego: Academic, 1997. 522p.
- Shimabukuro, Y. E.; Novo, E. M.; Ponzoni, F. J. Índice de vegetação e imagens fração derivadas do modelo linear de mistura espectral para o monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.10, p.1729-1737, 1998.
- Simonett, D. S.; Reeves, R. G.; Estes, J. E.; Bertke, S. E.; Sailer, C. T. The development and principles of remote sensing. In: Colwell, R. N. Ed. **Manual of remote sensing.** 2.ed. Falls Church: American Society of Photogrammetry (ASP), 1983. p.1-35.
- Sridhar, V. N.; Dadhwal, V. K.; Chaudhari, K. N.; Sharma, R.; Bairagi, G. D.; Sharma, A. K. Wheat production forecasting for a predominantly unirrigated region in Madhya Pradesh (India). **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.6, p.1307-1316, 1994.
- Stoner, E. R.; Baumgardner, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, n.6, p.1161-1165, 1981.
- Story, M.; Congalton, R.G. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, n.3, p. 397-399, 1986.
- Tardin, A. T.; Palestino, C. V. B.; Sonnenburg, C. R. **Levantamento de áreas ocupadas por café e trigo no noroeste do Paraná por análise automática de dados do satélite Landsat.** São José dos Campos: INPE, 1976. 18p. (INPE-875-NTE/065).

- Terres, J. M.; Delince, J.; Van de Steene, M.; Hawkins, A. The use of remote sensing and GIS capabilities to support the reform of the common agricultural policy of the European Community. **Remote Sensing Reviews**, v.12, 1995, p.53-60.
- Thenkabail, P.S.; Ward, A.D.; Lyon, J.G.; Merry, C.J. Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.60, n.4, p. 437-442, 1994.
- Tsiligirides, T. A. Remote sensing as a tool for agricultural statistics: a case study of area frame sampling methodology in Hellas. **Computer and Eletronics in Agriculture**, v.20, n.1, p.45-77, 1998.
- Tso, B.; Mather, P. M. Crop discrimination using multi-temporal SAR imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n.12, p.2443-2460, 1999.
- Tucker, C. J.; Elgin Jr., J. H.; McMurtrey III, J. E. Temporal spectral measurements of corn and soybean crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.45, n.5, p.643-653, 1979.
- Tucker, C. J.; Sellers, P. J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p.1395-1416, Nov. 1986.
- Varela, F. **Miscelánea filosófica**. Habana: Pueblo y Educación, 1992. 184p.
- Venturieri, A.; Santos, J. R. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. Ed. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 1998. p.351-371.
- Verhoeye, J.; De Wulf, R. An image processing chain for land-cover classification using multitemporal ERS-1 data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.10, p.1179-1186, 1999.
- Verstraete, M. M.; Pinty, B.; Myneni, R. B. Potential and limitations of information extraction on the terrestrial biosphere from satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.58, n.2, p.201-214, 1996.
- Vogt, J. V. The use of low resolution satellite data for crop state monitoring: possibilities and limitations. In: Dallemand, J.F.; Vossen, P. Ed. **Agrometeorological models: theory and applications in MARS project**. Luxembourg: Ispra, 1995. p.223-240.

- Vossen, P. Early crop production assessment of the European Union: the systems implemented by MARS-STAT project. In: Dallemand, J.F.; Vossen, P. Ed. **Agrometeorological models: theory and applications in MARS project.** Luxembourg: Ispra, 1995. p.21-51.
- Walker, P. A.; Mallawaarachchi, T. Disaggregating agricultural statistics using NOAA-AVHRR NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v.63, n.1, p.112-125, 1998.
- Wigton, W. H.; Bormann, P. **A guide to area sampling frame construction utilizing satellite imagery.** Washington: USDA, Statistical Report Service Staff Report, 1978. 26p.