



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS
ILUMINAÇÃO DA CENA

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
Marco Antonio Raupp
Diretor Geral

AUTORES/AUTHORS
AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR
Roberto Rosa

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY
Evelyn M.L. de Moraes Novot

CDU/UDC
528.711.7

DATA / DATE
Dezembro, 1987

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-4463-TDL/320
	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO SOLAR NOS DADOS TM/LANDSAT
AUTORES/AUTHORSHIP	Roberto Rosa

ORIGEM
ORIGIN
PG/DPA

PROJETO
PROJECT
FRH/SER

Nº DE PAG.
NO OF PAGES
116

ULTIMA PAG.
LAST PAGE
B.5

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

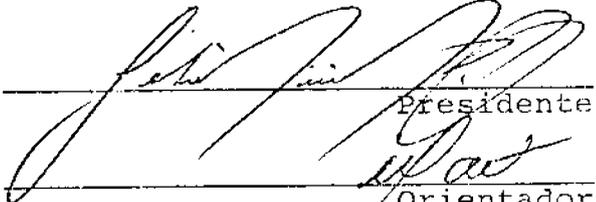
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

As imagens da superfície terrestre obtidas por veículos espaciais, como os da série Landsat, estão sujeitas a variações tonais quando tomadas em épocas diferentes, ou em áreas com acentuadas variações topográficas. Essas variações tonais podem ocorrer em função de inúmeros fatores, dentre os quais destaca-se a variação das condições de iluminação da cena. O objetivo deste trabalho é estudar o efeito causado pela variação do ângulo de incidência solar sobre os valores digitais registrados nos intervalos espectrais correspondentes a parte do espectro refletivo das bandas do Thematic Mapper (TM). Para atingir esse objetivo considerou-se as seguintes simplificações: a) os alvos foram considerados lambertianos, ocorrendo portanto variações na radiância no sensor como função da irradiância na superfície; b) não foram considerados os efeitos atmosféricos; c) nem os da radiação difusa sobre os alvos. A irradiância na superfície varia em função da: a) variação anual do ângulo de elevação e azimute solar; b) variação da distância terra-sol; c) inclinação e orientação da superfície topográfica. Essas variações na irradiância podem ser expressas como função do $\cos \beta$, termo esse que exprime o somatório dos 3 parâmetros descritos anteriormente. Partindo-se do princípio de que com a variação da irradiância, variará também a radiância da superfície através do termo $\cos \beta$, procurou-se testar tal efeito sobre os dados digitais obtidos a partir da cana-de-açúcar e o solo exposto, onde concluiu-se o seguinte: a) o solo apresenta maior dependência das condições de iluminação do que a cana-de-açúcar, em todas as faixas espectrais estudadas; b) a faixa do infravermelho médio (TM5 e TM7) é mais afetada do que a faixa do visível e infravermelho próximo, tanto para o solo quanto para a cana-de-açúcar.

OBSERVAÇÕES / REMARKS
Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em 19 de Outubro de 1987.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Getúlio Teixeira Batista



Presidente

Dr. Mario Valério Filho



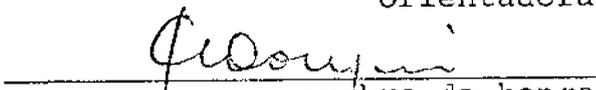
Orientador

Dr^a Evlyn Márcia L. Moraes Novo



Orientadora

Dr. Pedro Luis Donzelli



membro da banca
-convidado-

Dr. Paulo Roberto Meneses



membro da banca

candidato: Roberto Rosa

São José dos Campos, 19 de outubro de 1987

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar o presente trabalho, quero expressar os meus mais sinceros agradecimentos as pessoas e entidades que de alguma forma colaboraram no decorrer das várias etapas desta pesquisa, em especial a:

- A Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo e ao Dr. Mario Valério Filho, pela orientação desta dissertação, apoio, estímulo e atenção com que dedicaram-se às discussões dos problemas de fronteira no decorrer da pesquisa.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.
- Ao Instituto de Pesquisas Espaciais que forneceu os recursos para a execução das atividades.
- A equipe de analistas e operadores do I-100, pelas operações do sistema de tratamento automático de imagens.
- A Universidade Federal de Uberlândia pela concessão de tempo de trabalho para dedicação à dissertação.

ABSTRACT

Satellite imageries are subjected to changes in tonality as related to both topography and sensing geometry changes along the year. The objective of this research is to study how changes in solar incidence angle affects digital number on the reflexive TM bands. Some simplification were adopted such as: a) targets were assumed to be lambertian with radiance being only function of irradiance; b) no atmosphere effects were taken into account; c) no diffuse irradiance was considered. Irradiance on the surface is a function of: a) annual change in solar zenith and azimuth; b) annual changes in the sun-earth distance; c) aspect and inclination of slopes. All those variables can be joined in the term $\cos \beta$ which was used to express changes in the radiance into the earth surface. Correlation between $\cos \beta$ and digital number was run for 72 examples and 2 different earth targets: bare soil and sugar cane. The hypothesis tested was that if $\cos \beta$ was the only factor effecting digital number, there would be a very high correlation between them. The results have shown the following trends: a) digital numbers taken from soil samples are more dependent on $\cos \beta$ than sugar cane sample; b) infrared wavelength are more dependent on $\cos \beta$ term than visible wavelengths. Results led to the conclusion that topography does affect (through changes in slope aspect and inclination) digital number on TM Landsat data.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>ix</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xi</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Colocação do problema.....	1
1.2 - Objetivo	4
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	7
2.1 - Considerações gerais	7
2.2 - O sistema Landsat	8
2.3 - O Landsat 5	9
2.3.1 - O sensor TM (Thematic Mapper)	10
2.3.2 - A imagem digital do TM	12
2.4 - Parâmetros responsáveis pelas variações nas condições de iluminação nos dados Landsat	13
2.4.1 - Sistema de coordenadas horizontais	17
2.4.2 - Sistema de coordenadas equatoriais ou horárias	18
2.4.3 - Cálculo da declinação, elevação e azimute solar	19
2.4.3.1 - Cálculo da declinação solar	20
2.4.3.2 - Cálculo da elevação solar	21
2.4.3.3 - Cálculo do azimute solar	23
2.4.4 - Irradiância (E) em uma superfície horizontal, conside rando ausente a atmosfera.....	24
2.4.5 - Irradiância (E _p) em uma superfície com diferentes orien tações e inclinações: considerando ausente a atmosfera	24
2.5 - Fatores específicos da geometria da visada e seu efeito na reflectância	31
2.5.1 - O efeito do ângulo de elevação solar	31
2.5.2 - O efeito do ângulo de visada do sensor	33
2.5.3 - O efeito do ângulo relativo de azimute solar	34
2.5.4 - O efeito da topografia	35
2.6 - O comportamento espectral dos alvos em estudo	36

	<u>Pág.</u>
2.6.1 - Comportamento espectral da vegetação	36
2.6.2 - Comportamento espectral dos solos	39
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	45
3.1 - Área de estudo.....	45
3.2 - Dados TM/Landsat	47
3.3 - Mapas e cartas	48
3.4 - Fotografias aéreas verticais.....	48
3.5 - Procedimentos metodológicos	49
3.5.1 - Definição da hipótese de trabalho	49
3.5.2 - Definição da técnica de avaliação do efeito da geometria de iluminação sobre os registros digitais.....	49
3.5.3 - Seleção dos alvos a serem estudados	50
3.5.4 - Delimitação do experimento	51
3.5.5 - Aquisição de dados digitais	52
3.5.6 - Análise dos dados	53
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	55
<u>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE A - CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS DAS ÁREAS AMOSTRADAS COM SOLO E CANA-DE-AÇÚCAR	
APÊNDICE B - NÚMEROS DIGITAIS OBTIDOS DO SOLO E CANA-DE-AÇÚCAR	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Sistema de coordenadas horizontais	17
2.2 - Sistema de coordenadas equatoriais.....	19
2.3 - Representação dos dois sistemas de coordenadas horizon tal e equatorial.....	20
2.4 - Representação do triângulo esférico	20
2.5 - Variação da declinação solar durante os meses do ano ...	21
2.6 - Variação da elevação solar durante os meses do ano.....	23
2.7 - Irradiância em uma superfície inclinada	25
2.8 - Ângulos envolvidos no cálculo da irradiância.....	26
2.9 - Triângulo formado pelos ângulos envolvidos no cálculo da irradiância	27
2.10 - Ângulos que determinam a intensidade de irradiância em uma superfície	29
2.11 - Algumas condições da irradiância sobre superfícies irre gulares.....	30
2.12 - Comportamento espectral da vegetação nas respectivas ban das do TM	37
2.13 - Comportamento espectral do solo, nas respectivas ban das do TM	41
3.1 - Localização da área de estudo	46
4.1 - Variação da irradiância em função da orientação e incli nação da vertente.....	58
4.2 - Frequência das amostras de solo segundo os valores de co -seno β	59
4.3 - Frequência das amostras de cana-de-açúcar segundo os va lores de co-seno β	59
4.4 - Frequência das amostras de solo segundo as classes de de clividade	64
4.5 - Frequência das amostras de cana-de-açúcar segundo as clas ses de declividade	65
4.6 - Frequência das amostras de solo segundo as classes de orientação	70
4.7 - Frequência das amostras de cana-de-açúcar segundo as classes de orientação.....	70

	Pág.
4.8 - Localização das amostras de solo segundo as classes de orientação e inclinação da superfície	71
4.9 - Localização das amostras de cana-de-açúcar segundo a orientação e inclinação da superfície	72

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Faixas espectrais do TM e suas aplicações	11
4.1 - Valores de irradiância em w/m^2 calculados para a área de estudo.....	55
4.2 - Valores percentuais de irradiância calculados para a área de estudo.....	57
4.3 - Coeficientes de correlação para o solo e cana-de-açúcar em cada banda TM ($DN \times \cos \beta$).....	60
4.4 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para o solo e cana-de-açúcar nas respectivas bandas do TM	62
4.5 - Coeficiente de correlação (r) para o solo segundo as classes de declividade	63
4.6 - Coeficiente de correlação (r) para a cana-de-açúcar segundo as classes de declividade.....	63
4.7 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para o solo segundo as classes de declividade	66
4.8 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para a cana-de-açúcar segundo as classes de declividade.....	66
4.9 - Média e desvio padrão dos números digitais para o solo, segundo as classes de declividade nas respectivas bandas do TM	67
4.10 - Média e desvio padrão dos números digitais para a cana-de-açúcar segundo as classes de declividade nas respectivas bandas do TM.....	67
4.11 - Coeficiente de correlação (r) para o solo segundo 7 classes de orientação.....	68
4.12 - Coeficiente de correlação (r) para a cana-de-açúcar segundo as 7 classes de orientação	69
4.13 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para o solo segundo 7 classes de orientação	73
4.14 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para a cana-de-açúcar segundo as 7 classes de orientação.....	73
4.15 - Média e desvio padrão dos números digitais para o solo, segundo as 7 classes de orientação nas respectivas bandas do TM.....	75
4.16 - Média e desvio padrão dos números digitais para a cana-de-açúcar, segundo as 7 classes de orientação nas respectivas bandas do TM.....	75

	<u>Pág.</u>
4.17 - Média e desvio padrão dos números digitais do solo, em 3 classes de orientação nas respectivas bandas do TM.....	76
4.18 - Média e desvio padrão dos números digitais da cana-de-açúcar, em 3 classes de orientação nas respectivas bandas do TM	77
4.19 - Coeficiente de correlação (r) para o solo segundo 3 classes de orientação.....	78
4.20 - Coeficiente de correlação (r) para a cana-de-açúcar segundo 3 classes de orientação.....	78
4.21 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para o solo segundo 3 classes de orientação	79
4.22 - Coeficiente de determinação ($r^2 \times 100$) para a cana-de-açúcar segundo 3 classes de orientação.....	80
A.1 - Condições topográficas das áreas amostradas com solo.....	A.2
A.2 - Condições topográficas das áreas amostradas com cana-de-açúcar.....	A.4
B.1 - Números digitais obtidos do solo.....	B.2
B.2 - Números digitais obtidos da cana-de-açúcar.....	B.4

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

O início da década de 70 assistiu a uma retomada nos estudos radiométricos de campo visando uma melhor compreensão dos efeitos da geometria de iluminação dos objetos sobre seu comportamento espectral. Esse interesse derivou da compreensão de que o modelo Lambertiano e as deduções dele derivados não se aplicavam a todas as condições de geometria de aquisição de dados. Com a possibilidade de aquisição de dados do satélite SPOT dotado de uma visada off-nadir, o interesse pelas questões de geometria alvo-sensor-fonte aumentou consideravelmente.

Neste contexto, o presente trabalho pretende dar uma contribuição ao estudo desses fatores. Devido a complexidade desses fatores foram adotadas simplificações tais como: a adoção de um modelo Lambertiano para o comportamento dos objetos; a imposição de ausência de interferências de atmosfera; condição de visada nadir. Embora não se tenha um controle completo das características dos alvos estudados, partiu-se do princípio que as amostras utilizadas para representá-los eram homogêneas.

Tendo em vista que no Brasil não se dispõe de instrumental necessário aos estudos de radiância de cena, por onde se deveria necessariamente iniciar qualquer análise dessa natureza, optou-se por abordar os problemas de geometria de iluminação dos objetos a partir do registro de níveis de cinza em imagens orbitais.

Deste modo esse trabalho pretende mais do que apresentar soluções aos problemas inerentes aos efeitos da geometria de iluminação da cena, levantar hipóteses para estudos de radiância de cena.

O estudo dos efeitos da geometria de iluminação de alvos terrestres em imagens orbitais se justifica principalmente tendo em vista a grande utilização desses dados no levantamento de recursos naturais. O sensoriamento remoto a nível orbital é apontado como sendo uma ferramenta de grande valia para a coleta de dados, capaz de fornecer informações de forma rápida e confiável.

As imagens da superfície terrestre obtidas por veículos espaciais, como os da série LANDSAT, de pequena escala, permitem a observação de extensas regiões nacionais com pouco manuseio de material. No entanto, as informações contidas nestes produtos são muitas vezes de difícil interpretação, em função da baixa resolução espacial, e o que permite a discriminação dos objetos são mais seus atributos espectrais do que geométricos. Além do mais a complexidade da extração de informações aumenta em função das diferenças acentuadas que ocorrem nas variações tonais das imagens, quando tomadas em épocas diferentes, ou em imagens com variações topográficas. Essas variações tonais podem ocorrer em função de inúmeros fatores dentre os quais a própria modificação das condições de iluminação do alvo.

Com o intuito de estudar a intensidade desses efeitos, nos últimos anos, tem crescido o número de trabalhos visando principalmente o entendimento do comportamento espectral de alvos naturais e suas interações com a radiação eletromagnética. Por exemplo; Coulson et alii, 1965; Coulson, 1966; Suits e Safir, 1972; Egbert e Ulaby, 1972; Bunnik e Verhoef, 1974; Colwell, 1974; Kriebel 1976; 1978a,b; Chang e Lemaster 1978; Duggin 1977, 1980; Kollenkark et alii, 1982; etc.

Essas interações têm interesse na medida em que o conhecimento da resposta espectral do alvo em face de determinadas condições, permite que se façam inferências sobre as características do alvo.

A desvinculação entre a interpretação de dados de sensoriamento remoto e o conhecimento das várias interações entre a radiação eletromagnética e o alvo, levam à subutilização dos dados obtidos por sensores remotos. A necessidade de aquisição desses conhecimentos de base é grande, pois sem eles, reduz-se a capacidade de interpretação de produtos mais sofisticados como os sensores da nova geração (Thematic Mapper/LANDSAT e HRV/SPOT).

Um dos problemas frequentemente enfrentados na discriminação de objetos da superfície, a partir de dados orbitais, é a extrapolação de chaves de interpretação desenvolvidas para regiões didáticas (baixa declividade) para áreas com ocorrência de relevo montanhoso. Em áreas de relevo plano a iluminação solar sobre o alvo de interesse é uniforme, permitindo um estabelecimento mais fácil de padrões de respostas espectrais. O mesmo não ocorre em áreas montanhosas ou de relevo mais acidentado, onde as condições de iluminação (geometria, sol, alvo, sensor) variam apreciavelmente de pixel para pixel em função da topografia.

Para muitas aplicações um dos mais sérios problemas inerentes ao sensoriamento remoto, é sem dúvida a interferência da topografia sobre a radiância de alvos naturais em diferentes comprimentos de onda.

O efeito topográfico pode ser definido como sendo a variação da radiância da superfície inclinada em relação à radiância de uma superfície horizontal, em função de sua orientação em relação à fonte de iluminação e à posição do sensor. A topografia portanto interfere na geometria de iluminação do alvo.

Estudando o uso de dados orbitais para identificação e avaliação de áreas de cana-de-açúcar, Batista et alii (1983) concluíram que as condições de iluminação ao lado de fatores inerentes à própria cultura, tais como estágio de desenvolvimento, época de plantio e de colheita, e variedade, influenciaram decisivamente na resposta es

pectral da cana, afetando conseqüentemente, a precisão de identificação e avaliação da área da mesma em imagens LANDSAT.

Desta maneira são claras as evidências de que as condições topográficas afetam as medidas de radiância feitas pelos sensores a bordo do satélite LANDSAT. Entretanto há poucos estudos sobre como se dá nestas imagens essa interferência ou se essa interferência é semelhante para qualquer tipo de objeto da superfície.

Assim sendo, este trabalho pode ser situado no contexto de aquisição de conhecimentos básicos sobre a interação da radiação eletromagnética com alvos naturais de grande ocorrência e interesse no Brasil.

1.2 - OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito causado pela variação do ângulo de incidência solar sobre os valores digitais registrados nos intervalos espectrais correspondentes às bandas refletidas do TM (Thematic Mapper).

Espera-se que a melhor compreensão desses efeitos auxilie no processo de extração de informações a partir de dados orbitais. De modo a atingir esse objetivo uma série de simplificações tiveram que ser feitas na equação básica do cálculo de irradiância no sensor TM. Tais simplificações serão discutidas mais profundamente no próximo capítulo.

As principais simplificações a serem feitas são:

- 1) os alvos são considerados lambertianos, ocorrendo portanto variações na radiância no sensor como função da irradiância na superfície;
- 2) é desprezado o efeito da radiação difusa sobre os alvos;

3) não serão considerados os efeitos atmosféricos;

4) considerar-se-ã o sensor com visada a nadir.

Embora o parâmetro atmosférico seja extremamente variável no tempo e no espaço, assume-se ser constante, de modo a, avaliar os efeitos do co-seno β (iluminação) sobre os números digitais, pois esse tem maior influência sobre os dados LANDSAT, do que a atmosfera, Kowalik et alii (1983).

No que tange ao ângulo de visada, pode-se verificar que é pequeno nas imagens de alta altitude ocasionando menores variações na reflectância, Hugli e Frei (1983).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em uma primeira aproximação, uma imagem pode ser considerada resultante da reflectância, absortância ou emitância dos alvos da cena; a tonalidade ou cor em cada ponto é determinada pela alteração ou interação espectral da radiação solar incidente em cada elemento da superfície da cena.

Diferentes objetos refletem diferentes quantidades de energia e em diferentes comprimentos de onda e estas diferenças espectrais são registradas em uma imagem na forma de variações tonais de cores ou de densidade. Os sensores remotos buscam detectar e mostrar as diferenças em tonalidade ou cor entre alvos ou entre um alvo e o ambiente, sem as quais não haverá imagem identificável. Deste modo cada pixel contém a informação espectral do alvo de interesse, mais a informação da atmosfera, relevo, sazonalidade, etc.

Para que medidas de sensoriamento remoto tenham maior utilidade, as influências de fatores não relacionados aos alvos de interesse devem ser conhecidas e quando possível removidas. Isto facilita enormemente as comparações de dados obtidos de sensoriamento remoto em várias datas, locais e por vários sensores diferentes, e também facilita a interpretação dos dados em termos de propriedades intrínsecas dos alvos de interesse.

A tonalidade e a textura são conceitos visuais interrelacionados que auxiliam a percepção e o reconhecimento de características da superfície em fotografias aéreas e em imagens.

Segundo Haralik e Shanmugan (1973), as feições espectrais, texturais e do contexto são os três elementos padrões na inter

pretação visual de imagens. As feições espectrais descrevem as variações tonais entre as diferentes bandas de um conjunto multibanda; as feições texturais contêm informações sobre a distribuição espacial dos valores tonais dentro de uma banda espectral; as feições de contexto contêm informações das áreas que envolvem a unidade que está sendo analisada. Todas essas feições entretanto podem se alterar em função das condições de iluminação da cena.

Uma das variações mais importantes nas imagens de sensoriamento remoto está relacionada às condições de iluminação da área, que é função das relações geométricas entre ângulos solares de elevação e azimute, e a topografia.

2.2 - O SISTEMA LANDSAT

O Sistema LANDSAT foi desenvolvido com o objetivo de permitir a aquisição de dados espaciais, espectrais e temporais sobre a superfície da Terra, de forma global, sinóptica e repetitiva.

Lançados em 1972 (LANDSAT 1); 1975 (LANDSAT 2); 1978 (LANDSAT 3); 1982 (LANDSAT 4), 1984 (LANDSAT 5), utilizam uma plataforma onde são instalados os sensores e os demais subsistemas destinados à gravação e transmissão de dados, medição e controle de atitude e temperatura, retransmissão, etc. A potência para funcionamento do sistema é conseguida através de painéis solares que convertem a energia solar radiante em elétrica.

Os satélites LANDSAT deslocam-se de norte para o sul, em órbita descendente geocêntrica, circular, quase polar e heliossíncrona, isto é, o ângulo Sol-Terra-satélite permanece constante, o que garante condições semelhantes de iluminação, ao longo do ano, na área imageada.

2.3 - O LANDSAT 5

Lançado ao espaço em 1 de março de 1984, este satélite apresenta o tradicional sensor MSS, com 4 bandas, mais um sensor TM (Thematic Mapper), com 7 bandas espectrais. As pesquisas para a construção deste sensor iniciaram no final da década de 70 e os primeiros testes a nível de simulação foram realizados em 1980, procurando-se definir a melhor combinação de número de bandas, resolução espacial e espectral que satisfizessem os interesses das diferentes áreas de aplicação.

O LANDSAT 5 significou o maior avanço no desenvolvimento de sistemas orbitais de coleta e processamento de dados altamente automatizados da superfície terrestre por ocasião de seu lançamento. O sistema como um todo é consideravelmente mais complexo que os LANDSATs anteriores e isto inclui desde mudanças na configuração externa do satélite até nas formas de retransmissão de dados, comunicação e controle de órbita.

Nos EUA os dados digitais TM e MSS são transmitidos em tempo real via satélite TDRS (Tracking and Data Relay Satellite), para estações terrenas e então retransmitidos via um satélite de comunicação doméstica - DOMSAT - para estações de processamento, onde são radiometricamente corrigidos e novamente retransmitidos via DOMSAT, para o Earth Resources Observations Systems (EROS) Data Center para reprodução em formatos digitais e filmes, e posterior distribuição aos usuários. A transmissão de dados TM e MSS do satélite LANDSAT 5 pode também ser feita diretamente para os países que possuem apropriadas estações terrenas de recepção, como é o caso do Brasil.

O satélite LANDSAT 5 opera a uma altitude nominal de 705 km em uma órbita circular quase polar, imageando a mesma área a cada 16 dias. O satélite cruza o equador de norte para o sul às 09:45h e no paralelo 34 graus no extremo sul do Brasil às 09:50 h. Cada órbita gasta 98,9 minutos, sendo realizadas 14 órbitas por dia.

2.3.1 - O SENSOR TM (THEMATIC MAPPER)

O TM opera simultaneamente em sete bandas espectrais com um campo de visada instantâneo (IFOV) ou resolução espacial equivalente a um quadrado no terreno de 30 x 30 m, nas seis bandas do visível e do infravermelho refletido, e de 120 m na banda termal.

O mecanismo de imageamento se baseia no princípio de técnica de imageamento de scanners multispectrais lineares. A energia refletida da superfície dos alvos (radiância em mW/cm^2 Sterad.) é coletada por um espelho móvel com face plana, montado com um ângulo de 45 graus sobre um eixo mecânico que imprime um movimento oscilatório ao espelho, de tal forma que o solo é varrido em linhas perpendiculares à direção de deslocamento do satélite. O deslocamento do satélite permite o imageamento sequencial de linhas de superfície do terreno.

A radiação coletada por este processo é dirigida para um espelho parabólico que a focaliza através de um telescópio sobre um conjunto de detetores, orientados e dispostos num arranjo, de tal maneira que possam ser imageadas no terreno tantas linhas quanto for o número de detetores existentes por banda.

Para cada uma das quatro primeiras bandas (bandas 1, 2, 3 e 4), há 16 detetores de silício que operam a temperatura ambiente. Para as bandas 5 e 7 tem-se também individualmente, 16 detetores de antimoneto de índio (InSb) que são resfriados à temperatura abaixo de $0^{\circ}C$ para se obter uma boa sensibilidade, enquanto que a banda 6 (termal) usa apenas 4 detetores de telureto de mercúrio-cádmio (HgCdTe). O arranjo completo dos detetores do TM é então uma matriz de 100 detetores. Desta forma, no TM são imageadas simultaneamente 16 linhas por banda no terreno, ou seja, um segmento de área com uma largura de imageamento de 480 m por 185 m de extensão.

TABELA 2.1

FAIXAS ESPECTRAIS DO TM E SUAS APLICAÇÕES

FAIXA	INT. ESPECTRAL	APLICAÇÕES
1	0,45 - 0,52 μm	Estudos batimétricos em regiões litorâneas de água limpa, até a profundidade de 20 a 40 m, mapeamento de superfície de águas e análise de materiais em suspensão. É denominada de banda azul. Diferenciação de solo/vegetação. Sensitividade à concentração de carotenos e clorofila. Alguma possibilidade de identificação de óxidos e de hidróxidos de Fe^{+3} e Mn^{+3} .
2	0,52 - 0,60 μm	Mapeamento de vegetação sadia pela reflectância verde que tem pico em 0,55 μm .
3	0,63 - 0,69 μm	Banda de absorção da clorofila; significativa na diferenciação de espécies vegetais.
4	0,76 - 0,90 μm	Estudos de volume da biomassa e delimitação de corpos d'água.
5	1,55 - 1,75 μm	Estresse de vegetação por desequilíbrio de água na cobertura foliar. Expectativa na identificação de mineralizações superficiais, sobretudo com dados da divisão da banda 5 pela banda 1.
6	10,4 - 12,5 μm	Propriedades térmicas do solo, rocha, vegetação e água. Estudos de contraste térmico, entre litologias de rochas silicáticas.
7	2,08 - 2,35 μm	Considerada uma banda estritamente geológica, selecionada para identificação de minerais, com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

FONTE: Meneses (1986)

Para limitar e decompor a radiação total em intervalos espectrais correspondentes a cada banda, é colocado na frente dos detectores um conjunto de filtros espectrais. Ao incidir sobre os detectores, a radiação os sensibiliza fazendo com que produzam um sinal elétrico de intensidade proporcional à energia incidente, o qual é então amplificado por um circuito eletrônico, convertido, de analógico para digital e transmitido aos satélites TDRS para retransmissão às estações terrenas, ou para serem transmitidos diretamente a estas.

2.3.2 - A IMAGEM DIGITAL DO TM

A imagem digital é formada pela conversão do sinal analógico medido pelo sensor em uma representação digital que possa ser armazenada numa fita magnética compatível com computador, para posterior processamento em computadores. Ela é desta forma, uma representação numérica quantizada dos valores de radiância correspondentes a cada pequena área unitária imageada no terreno (pixel). Estes valores digitais são normalmente referidos como níveis de cinza, número digital ou ainda valores de brilho (percepção visual do mais claro ou mais escuro) e somente valores inteiros ou discretos são assumidos.

Os números digitais podem ser dispostos numa forma matricial. Além das dimensões espacial e brilho que representam, o conjunto de dados que compõe uma imagem tem ainda dimensões espectrais e temporais, desde que uma cena pode ser observada em várias bandas espectrais e em diferentes datas. Portanto, uma imagem digital é uma matriz multidimensional, das várias dimensões que representam uma cena. Os índices das linhas e colunas da matriz da imagem digital identificam as coordenadas espaciais X e Y de cada elemento da área imageada no terreno (pixel), e o valor numérico de cada elemento da matriz identifica o brilho daquela área. Para uma mesma área imageada quanto maior for o número de elementos da matriz, maior será a resolução espacial (no caso do TM é de 30 x 30m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 e de 120 x 120m para a banda 6), e quanto maior for o intervalo total dos valores discretos de níveis de cinza, maior será a resolução radiométrica (no TM vai de zero a 255 níveis de cinza).

Esta forma de representação numérica das imagens permite a aplicação de uma grande variedade de técnicas e análises de processamentos por computadores, convenientes ao tratamento de enorme volume de dados contidos em cada imagem.

2.4 - PARÂMETROS RESPONSÁVEIS PELAS VARIACÕES NAS CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO NOS DADOS LANDSAT

A resposta espectral dos objetos da superfície é função da interação de suas propriedades físico-químicas com a energia radiante incidente. Essa interação se faz de duas formas: interações microscópicas - interação de energia a nível de estrutura atômica e molecular dos objetos, e interações macroscópicas que seriam reguladas pelas leis da óptica geométrica.

Os efeitos de geometria de iluminação se classificam como parte das interações macroscópicas porque dado um alvo da superfície com uma certa propriedade intrínseca de reflectância (ρ), teria uma percentagem de energia refletida que seria função não só da reflectância, mas da quantidade e distribuição espectral que o atingiu e que teve possibilidade de interagir com ele microscopicamente.

Essa quantidade de energia que atinge a superfície dos objetos e/ou é refletida por ele é função da geometria de iluminação. A quantidade de energia que atinge o sensor é função da geometria alvo x sensor x fonte e atmosfera.

No caso em estudo, o sensor estará numa posição fixa, e a variação da geometria de iluminação será simulada a partir da variação da superfície topográfica. A escolha dessa abordagem se deve ao fato de que em condições de dados orbitais não é possível variar a geometria de iluminação variando a elevação e azimute solar de modo amplo, implicando em modificação dos alvos de superfície em função da variação das propriedades intrínsecas dos objetos (fenologia) ou extrínsecas (umidade, etc.).

Deste modo para garantir o mínimo de variação de outros fatores que não a geometria de iluminação optou-se por adquirir dados em vertentes com diferentes orientações e inclinações, mantendo-se fixo os ângulos de azimute e elevação solar.

De modo a se avaliar a influência das condições de iluminação da cena sobre os dados LANDSAT é preciso analisar a radiância da superfície e a irradiância que atinge o sensor e, os fatores que a afetam.

A radiância (L) registrada por um sistema sensor pode ser representada pela seguinte relação:

$$\begin{aligned}
 L_{\lambda s} = & \frac{1}{\pi} [(E_{\lambda 0} \cos \theta \exp[-\tau'_{\text{ext}}(\lambda) \sec \theta] \\
 & + \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\lambda d}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi] \rho(\lambda) \\
 & + \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\lambda t}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi] \exp[-\tau'_{\text{ext}}(\lambda) \sec \theta] \\
 & + \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} L_{\lambda u}(\alpha, \beta) \cos \alpha \sin \alpha \, d\alpha \, d\beta, \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

onde:

$E_{\lambda 0}$ = irradiância espectral em uma superfície perpendicular a radiação direta do Sol, medida no topo da atmosfera (constante solar);

θ = ângulo de incidência do fluxo solar direto na superfície da Terra;

$\tau'_{\text{ext}}(\lambda)$ = coeficiente espectral de extinção ótica;

θ_z = ângulo zenital solar;

$L_{\lambda d}(\theta, \phi)$ = radiância atmosférica espectral descendente devido ao fluxo solar espalhado, depende das coordenadas angulares θ e ϕ ;

$\rho(\lambda)$ = reflectância espectral direcional da superfície de interesse;

$L_{\lambda t}(\theta, \phi)$ = radiância espectral devido a emissão termal da superfície de interesse;

θ' = ângulo entre o sensor e a normal a superfície de interesse;

$L_{\lambda \mu}(\alpha, \beta)$ = radiância atmosférica espectral ascendente, onde (α, β) definem a direção e campo de visada instantâneo do sistema de sensoriamento remoto (α e β são respectivamente ângulos de elevação e azimute),

A irradiância espectral total na superfície (E_λ) é expressa por:

$$E_\lambda = E_{\lambda_0} \cos\theta \exp[-\tau'_{\text{ext}}(\lambda) \sec\theta_z] + \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\lambda d}(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.2)$$

No presente estudo assumindo-se valores constantes e a equação (2.2) pode ser expressa da seguinte forma:

$$E_\lambda = E_{\lambda_0} \cos\theta \quad (2.3)$$

Como propósito do presente estudo é não utilizar a parte do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho termal (banda 6 do TM-LANDSAT), pode-se desprezar os termos

$$\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\lambda t}(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi] \exp[-\tau'_{\text{ext}}(\lambda) \sec\theta']$$

da equação da radiância.

O termo

$$\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} L_{\lambda p}(\alpha, \beta) \cos\alpha \sin\alpha \, d\alpha \, d\beta,$$

também pode ser desprezado, uma vez que estamos considerando o sensor com visada fixa, ou seja a nadir, e os valores para este caso são muito pequenos.

Feitas estas considerações, pode-se representar a forma simplificada a equação da radiância (L_λ) por:

$$L_\lambda = \frac{E_\lambda \rho(\lambda)}{\pi} \tag{2.4}$$

Onde E_λ é a irradiância espectral na superfície; e $\rho(\lambda)$ é a reflectância espectral direcional da superfície de interesse (característica intrínseca do alvo).

A irradiância na superfície considerando as simplificações mencionadas varia em função da:

- 1) Variação anual do ângulo de elevação e azimute solar (variação sazonal), que ocorre devido a variação da declinação solar; esta por sua vez é função da inclinação (de $23^{\circ}27'$) do eixo de rotação terrestre em relação ao plano de órbita da Terra ao redor do Sol.

- 2) Variação da distância Terra-Sol durante o ano, provocada pela órbita elíptica da Terra e responsável pela variação de $\pm 2\%$ na irradiância.
- 3) Inclinação e orientação da superfície em relação a fonte de irradiação, para superfícies não horizontais.

Para uma melhor compreensão da influência destes parâmetros (declinação solar, distância Terra-Sol, orientação e inclinação da superfície) na irradiância de uma superfície, é necessário obter a posição do Sol na esfera celeste em um dado instante. Essa identificação de posição e hora é dada pelos sistemas de referência e tempo. Basicamente estes sistemas fundamentam-se em coordenadas polares, e dentre os vários sistemas, o de coordenadas horizontais e o de coordenadas equatoriais ou horárias são os mais importantes para o propósito deste estudo.

2.4.1 - SISTEMA DE COORDENADAS HORIZONTAIS

No sistema de coordenadas horizontais, o plano fundamental é o horizonte e as coordenadas esféricas recebem o nome de Altura (h) e Azimute (A) (Figura 2.1).

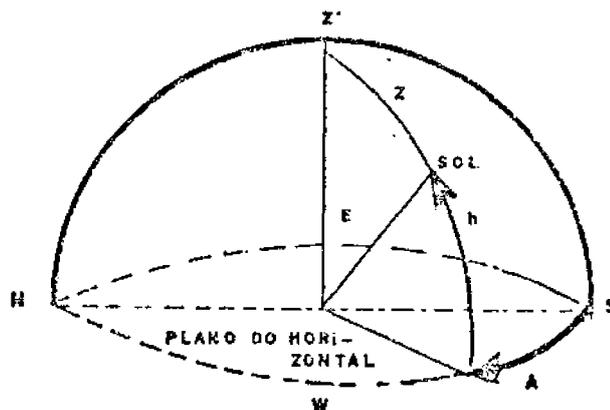


Fig. 2.1 - Sistema de coordenadas horizontais.

Altura (h) é a elevação de um astro acima do plano do horizonte, ou seja, é o arco do círculo vertical que passa pelo astro compreendido entre a linha do horizonte e o referido astro, no caso deste trabalho, o Sol. Se o Sol estiver situado no horizonte ou zenite (z'), as suas alturas serão respectivamente zero e 90° . É comum substituir a altura (h) pelo seu complemento, isto é, o afastamento de um astro em relação ao zenite (z'), chamado de "distância zenital (z)". Tem-se então $h + Z = 90^{\circ}$, ou ainda, $Z = 90^{\circ} - h$.

Azimute (A) é o arco do horizonte compreendido entre o ponto cardinal sul e o círculo vertical que passa pelo astro. Expresso em unidades de arco, e contado a partir do ponto cardinal sul no sentido do SONE, ou seja, um astro no ponto sul, oeste, norte e leste tem respectivamente 0° , 90° , 180° e 270° de azimute.

As coordenadas do sistema horizontal são locais, ou seja, a altura e o azimute do Sol no mesmo instante, variam de um lugar para outro, uma vez que variam o horizonte e o meridiano do astro.

2.4.2 - SISTEMA DE COORDENADAS EQUATORIAIS OU HORÁRIAS

A fim de simplificar o estudo dos astros, define-se um sistema de referência no qual pelo menos uma das coordenadas do astro permanece constante ao longo do seu movimento; surgiu assim, o Sistema de Coordenadas Horárias ou Equatoriais. O plano fundamental é o equador celeste (Figura 2.2) e as coordenadas esféricas neste sistema recebem a denominação de Declinação (δ) e Ângulo Horário (H).

Declinação (δ) é o arco do círculo horário que passa pelo astro, compreendido entre o equador celeste e o astro, e pode variar de zero a $\pm 90^{\circ}$. Qualquer astro situado sobre o equador celeste possui declinação zero. O sinal negativo é tomado quando o astro encontra-se no hemisfério sul e positivo quando no hemisfério norte.

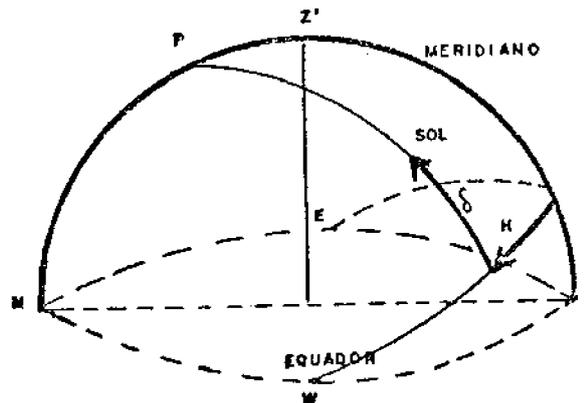


Fig. 2.2 - Sistema de coordenadas equatoriais.

A declinação do Sol varia de $-23^{\circ}27'$ (solstício de verão) a $23^{\circ}27'$ (solstício de inverno), sendo que a declinação nula é obtida por ocasião dos equinócios (outono e primavera).

Ângulo Horário (H) é o ângulo formado entre o meridiano local e o meridiano celeste que contém o astro (Sol), contado sobre o plano do equador, no sentido retrógrado, variando de zero (no meridiano local) a 360° . O mais usado é medi-lo em horas (0 - 24 horas). Quando a contagem for para leste, adota-se o sinal negativo e quando para oeste, o sinal positivo.

O sistema horário, em relação ao horizontal, oferece maiores vantagens, uma vez que a declinação do astro em um curto espaço de tempo é invariável e o equador celeste é o mesmo para todos os observadores.

2.4.3 - CÁLCULO DA DECLINAÇÃO, ELEVAÇÃO e AZIMUTE SOLAR

Para se determinar a declinação, elevação e azimute solar, sobrepõem-se os dois sistemas de coordenadas anteriormente descritos (Figura 2.3) e através da formação de um triângulo esférico (Figura 2.4) e a partir de equações da trigonometria esférica, pode-se calcular tais parâmetros.

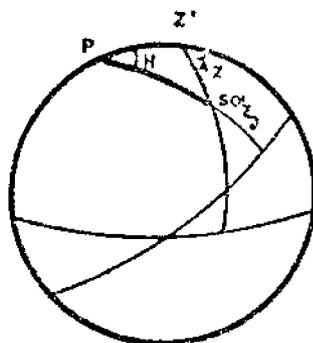


Fig. 2.3 - Representação dos dois sistemas de coordenadas horizontal e equatorial

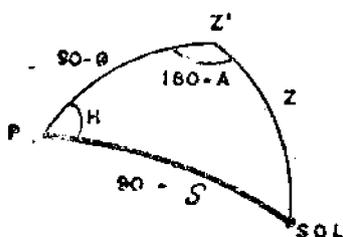


Fig. 2.4 - Representação do triângulo esférico.

2.4.3.1 - CÁLCULO DA DECLINAÇÃO SOLAR

Os valores exatos para a declinação solar (δ) podem ser obtidos no Anuário Astronômico do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo - SP, no Anuário Astronômico do Observatório Nacional - RJ ou ainda no Almanaque Náutico. A sua variação durante os meses do ano é mostrada na Figura 2.5. Uma boa aproximação pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\text{sen } \delta = \text{sen } i \text{ sen } \lambda \quad (2.5)$$

onde i é a inclinação da eclíptica ($23,44^\circ$) e λ a posição aparente do Sol com relação ao equinócio vernal (equinócio vernal = 0°). A fórmula pode ser escrita também da seguinte maneira:

$$\delta = \text{arc sen} (0,3978 \text{ sen} (0,9860 d)) \quad (2.6)$$

Onde d é o número de dias decorridos após o equinócio vernal (21/3).

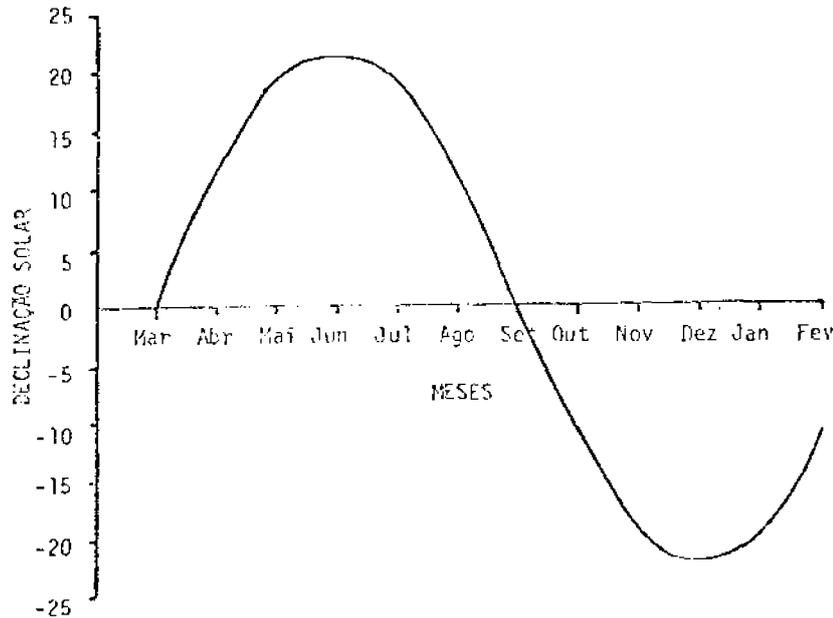


Fig. 2.5 - Variação da declinação solar durante os meses do ano.

2.4.3.2 - CÁLCULO DA ELEVAÇÃO SOLAR

A partir do triângulo esférico mostrado na Figura 2.4 chega-se a seguinte equação:

$$\cos z = \text{sen}(90 - \phi) \text{ sen}(90 - \delta) \cos H + \cos(90 - \phi) \cos(90 - \delta). \quad (2.7)$$

Simplificando, pode-se expressar da seguinte forma:

$$\cos z = \text{sen}\phi \text{ sen}\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H \quad (2.8)$$

Como

$$h = 90 - Z \quad (2.9)$$

Pode-se então calcular a elevação solar por:

$$h = 90 - \arccos(\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H)$$

Onde Z é a distância zenital do Sol; δ é a declinação do Sol; ϕ é a latitude do ponto de interesse; H é o ângulo horário do Sol e h é a elevação do Sol.

O ângulo horário (H) da equação pode ser encontrado da seguinte forma:

- 1) Achar a diferença em horas e décimos de hora entre 12 e o tempo de interesse (T);
- 2) Multiplicar o resultado obtido no item anterior por 15, para transformar o valor de horas em graus;
- 3) Achar a diferença em graus entre a longitude de interesse e a longitude do meridiano central (no caso do Brasil as longitudes dos meridianos centrais são 30, 45, 60 e 75);
- 4) Juntar o resultado do item 3 com o resultado do item 2, se a longitude de interesse for para leste da longitude do meridiano central (do centro de longitude) e parte da tarde, ou oeste e pela parte da manhã. Subtrai-se o item 3 do item 2 para o caso contrário. O valor final será o ângulo horário (H).

A variação da elevação solar durante os meses do ano, no horário da passagem do satélite (9:45h) para as latitudes 10° , 20° e 30° sul é mostrada na Figura 2.6.

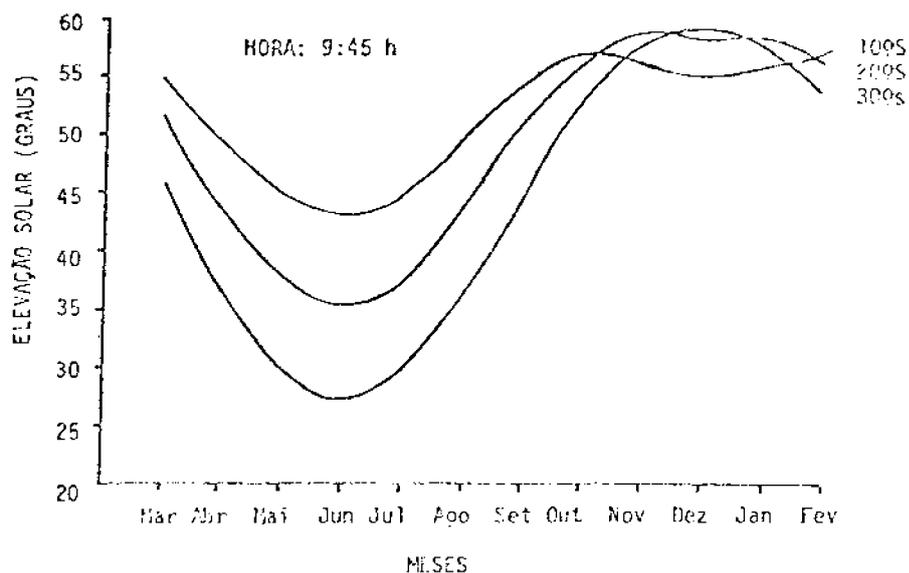


Fig. 2.6 - Variação da elevação solar durante os meses do ano.

2.4.3.3 - CÁLCULO DO AZIMUTE SOLAR

Também a partir do triângulo esférico mostrado na Figura 2.4, chega-se a seguinte equação:

$$\cos(90 - \delta) = \sin(90 - \phi) \sin Z \cos A_0 + \cos(90 - \phi) \cos Z. \quad (2.10)$$

Simplificando, pode-se expressar da seguinte forma:

$$\sin \delta = \cos \phi \sin Z \cos A_0 + \cos \phi \cos Z. \quad (2.11)$$

Pode-se então calcular o azimute solar por:

$$\cos A_0 = \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos Z}{\cos \phi \sin Z} \quad (2.12)$$

Onde A_0 é o azimute do Sol.

2.4.4 - IRRADIÂNCIA (E) EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL; CONSIDERANDO AUSENTE A ATMOSFERA

Em uma superfície horizontal, o zênite coincide com a normal a superfície. Portanto, o ângulo zenital é igual ao ângulo solar e a normal a superfície, ângulo este chamado β .

A irradiância (E) em uma superfície horizontal considerando ausente os efeitos atmosféricos, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$E = E_0 \cos Z \quad (2.13)$$

Onde E_0 é a constante solar ($E_0 = 1353 \text{ Watt/m}^2$ - Fonte: NASA), ou seja, é a irradiância medida em uma superfície perpendicular a radiação direta do Sol, considerando uma influência nula da atmosfera e também uma distância Terra-Sol média; Z é a distância zenital (complemento da elevação solar).

Um valor mais preciso de irradiância (E), considerando-se a distância Terra-Sol (r) variável durante o ano pode ser obtido por:

$$E = \frac{E_0}{r^2} \cos Z \quad (2.14)$$

Onde E_0 é a constante solar; Z e r são respectivamente distâncias zenital e Terra-Sol.

2.4.5 - IRRADIÂNCIA (E_p) EM UMA SUPERFÍCIE COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES E INCLINAÇÕES; CONSIDERANDO AUSENTE A ATMOSFERA

Na realidade, a forma mais correta de se calcular a irradiância em uma superfície é considerar o ângulo entre o Sol e a normal à superfície (β), pois o caso descrito anteriormente só é válido para superfícies horizontais, onde $Z = \beta$.

A irradiância incidente em qualquer plano (E_p), inclinado ou não, é dada pela seguinte expressão:

$$E_p = \frac{E_0}{r^2} \cos\beta \quad (2.15)$$

onde E_0 é a constante solar; r é a distância Terra-Sol e β é o ângulo entre o Sol e a normal a superfície.

O ângulo β é a função da distância zenital (Z), do azimute solar (A_0), do azimute da superfície inclinada (A_p) e da inclinação da superfície (I) (Figura 2.7). A diferença entre o azimute do Sol (A_0) e o azimute da superfície inclinada (A_p) que contém a normal a superfície e chamado de A_d ($A_d = A_0 - A_p$).

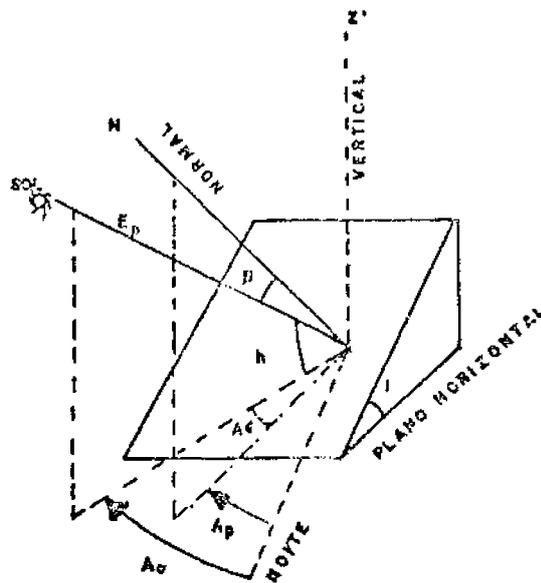


Fig. 2.7 - Irradiância em uma superfície inclinada.

As relações entre os vários ângulos pode ser observada na Figura 2.8.

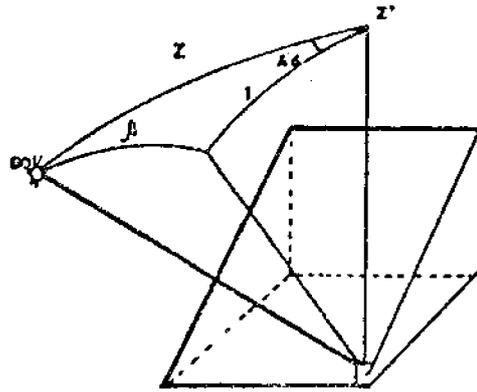


Fig. 2.8 - Ângulos envolvidos no cálculo da irradiância.

Onde Z' é o zenite; Z é a distância zenital; β o ângulo entre o Sol e a normal a superfície; I a inclinação da superfície; A_p o azimute da superfície inclinada e A_s o azimute do Sol.

A partir do triângulo formado pelo zenite, normal e Sol, extraído da Figura 8 e representado na Figura 2.9, pode-se calcular o valor de β :

$$\cos \beta = \sin Z \sin I \cos A_d + \cos Z \cos I. \quad (2.16)$$

Então, tem-se que:

$$E_p = \frac{E_o}{r^2} \cos \beta \quad (2.17)$$

A Equação (2.17) permite calcular a irradiância (E_p) em qualquer superfície, com qualquer orientação, inclinação, azimute e elevação solar considerando ausente a atmosfera.

Terminadas estas considerações, conclui-se que o sinal registrado pelo sensor é fortemente dependente da latitude, azimute, elevação solar, orientação e inclinação do relêvo.

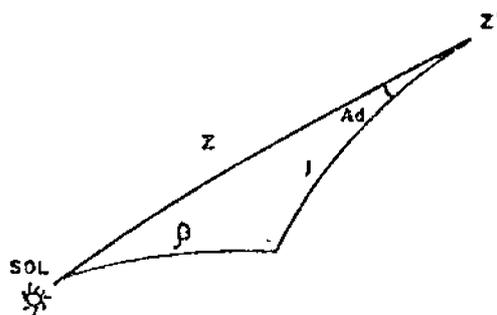


Fig. 2.9 - Triângulo formado pelos ângulos envolvidos no cálculo da irradiância.

Para uma determinada latitude, o principal fator de variação da irradiância numa superfície plana durante o ano é a variação da declinação solar, uma vez que o satélite LANDSAT passa aproximadamente no mesmo horário. Esta variação da declinação solar é responsável pela chamada variação sazonal nos dados LANDSAT. As variações sazonais mais importantes estão relacionadas as condições de iluminação da área, em função das relações geométricas entre ângulos solares de elevação, azimute e topografia.

Os efeitos de sombreamento nas imagens de verão são mais reduzidos, em relação as de inverno, pois os ângulos de elevação solar são mais elevados.

Além dos ângulos de elevação, outro fator que influi nos efeitos de sombreamento é o perfil e a orientação das vertentes, em relação a direção de iluminação. Se uma determinada feição topográfica orienta-se na direção do azimute solar, ambos os seus lados serão uniformemente iluminados, não aparecendo assim, efeitos acentuados de sombreamento. Se, ao contrário, ela apresentar ângulos distintos de azimute, os seus lados serão diferencialmente iluminados, sendo os efeitos de iluminação tão mais intensos quanto mais frontal a vertente em relação a direção de iluminação.

O azimute e a elevação solar variam no decorrer do ano e com a latitude, de modo que as diferentes direções de iluminação solar provocam diferentes condições de iluminação para as feições do terreno e, conseqüentemente, diferentes valores de resposta espectral.

Quando se utilizam as imagens de sensoriamento remoto na análise de suas variações tonais, como associadas ao comportamento espectral de diferentes alvos (solo, rocha, vegetação), os efeitos de iluminação são desejáveis, pois podem criar variações tonais dentro de uma mesma unidade, ou fazerem com que alvos diferentes apareçam com tonalidades semelhantes.

Holben e Justice (1981) alertam quanto a problemas do efeito topográfico causado por diferenças na radiância espectral devido ao declive do terreno e o ângulo de incidência da luz solar. Este problema é crítico quando se quer classificar coberturas vegetais em áreas acidentadas através de dados multiespectrais, principalmente com baixos ângulos de elevação solar.

Holben e Justice (1979) também demonstraram que o grau do efeito topográfico na resposta do sensor varia consideravelmente em função da elevação solar. Estes efeitos tem sido um complicador na aplicação de técnicas de classificação digital em áreas montanhosas.

Slater (1980) salienta a importância da relação entre (β), definido como sendo o ângulo entre a normal a superfície e a radiação direta do Sol; (Z), ângulo zenital do Sol; e (θ), ângulo entre a normal a superfície e o zênite (Figura 2.10).

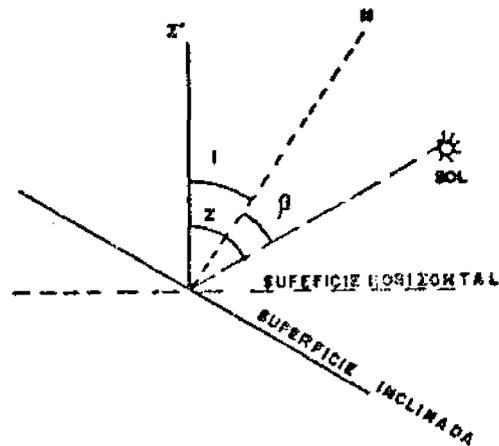


Fig. 2.10 - Ângulos que determinam a intensidade de irradiância em uma superfície.

Em uma superfície irregular, verifica-se a condição de máxima irradiância quando $\beta = 0$ e $Z = I$, e a condição de irradiância mínima (sombra), quando $Z + I = \beta > 90$.

De acordo com Kowalik (1982) a topografia, observada em relação aos ângulos de elevação e azimute solar, afeta o registro da radiância através do termo co-seno β da equação da radiância:

$$\cos \beta = \sin Z \sin I \cos Ad + \cos Z \cos I \quad (2.18)$$

onde:

β - ângulo entre o Sol e a normal a superfície;

I - inclinação da superfície topográfica;

Z - ângulo zenital solar

Ad - diferença entre o azimute solar e o azimute da superfície inclinada, medido no sentido horário.

Como pode ser observado pela Figura 2.11, quando a superfície tiver a face diretamente voltada para o Sol ($\beta = 0$) $\cos \beta = 1$, a

medida que aumenta o ângulo β , diminui o valor de $\cos \beta$, até atingir um valor zero ($\beta = 90$), e a partir daí valores negativos ($\beta > 90$).

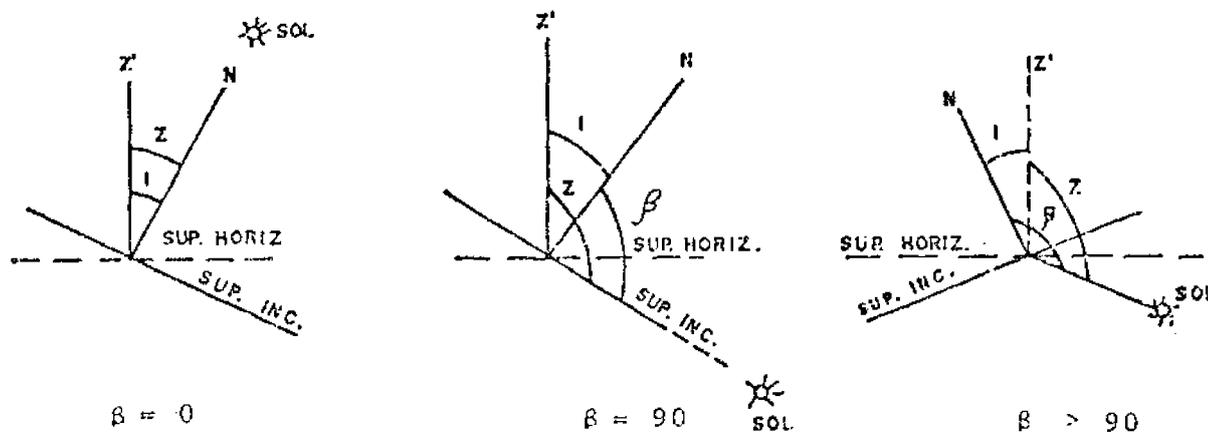


Fig. 2.11 - Algumas condições de irradiância sobre superfícies irregulares.

Os ângulos de elevação e azimute solar aumentam ou diminuem simultaneamente, e os valores de radiância dependem da interação da iluminação direta com o terreno, cuja distribuição de declividades e orientações são muito variáveis.

Novo (1983) utilizou valores de altitude para simular os padrões de sombreamento determinados pela interação do relevo com a direção de iluminação, verificada no momento da passagem do satélite LANDSAT. Os setores da área que se encontravam na sombra aparecem com tonalidades cinza escuro, em função de receberem apenas a radiação difusa.

Eliason et alii (1981) consideram que o dado registrado em um elemento de resolução de uma imagem contém, em geral, dois tipos de informação: 1) variação na reflectância espectral, relacionada às propriedades intrínsecas dos materiais da cena; 2) variação na intensidade refletida, devido a declividade que modula o fluxo iluminante.

Hilwig et alii (1974), e Yao (1983), concordam com Elia son et alii, salientando a importância das condições de iluminação nos dados LANDSAT.

Para um satélite com visada a nadir, a direção de iluminação vai ser responsável pela visada de áreas com maior ou menor intensidade de sombreamento (Egbert e Ulaby, 1972).

Egbert e Ulaby (1972), fazendo medidas de reflectância, observaram grande variação de valores quando foram feitas diversas combinações entre ângulo azimutal, ângulo de incidência e elevação solar, e concluíram que deve ser feito um estudo da melhor combinação desses parâmetros para obter a máxima diferenciação entre os alvos de interesse. Com isso fica evidente a necessidade de estudos que permitam a avaliação quantitativa dos efeitos de variação da resposta espectral de alvos em função das diferentes condições de iluminação e relevo.

2.5 - FATORES ESPECÍFICOS DA GEOMETRIA DE VISADA E SEU EFEITO NA REFLECTÂNCIA

Os alvos em geral não se comportam como um refletor perfeitamente lambertiano e os ângulos com que os mesmos são iluminados e observados afetam a medida de sua reflectância bidirecional. Os principais fatores que afetam esta reflectância são: ângulo solar, ângulo relativo de azimute solar e o ângulo de visada do sensor.

2.5.1 - O EFEITO DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO SOLAR

Referindo-se a mudança dos ângulos de elevação solar na reflectância espectral existe um grande número de variabilidade com vários autores indicando diferentes pontos. Por exemplo, Smith et alii, (1975) demonstraram que a reflectância espectral de um dossel pode crescer ou decrescer em função do acréscimo do ângulo zenital solar

(elevação solar = 90 - zenite solar) dependendo do estágio de desenvolvimento do trigo. Duggin (1977) relata que o efeito do ângulo zenital solar na reflectância espectral foi significativamente diferente entre sete variedades de trigo do mesmo estágio de desenvolvimento. Também, Jackson et alii. (1979a), Vanderbilt et alii (1981) e Kollenkark et alii (1982) observaram que os efeitos do ângulo zenital solar na reflectância espectral eram completamente diferentes para várias configurações de plantio (orientação das linhas, espaçamento das linhas, estrutura da planta, cobertura do dossel, etc.).

A principal razão para esta variabilidade são as grandes indefinições do dossel particularmente nos comprimentos de onda do visível, que é grandemente dependente do ângulo solar. Pinter et alii (1983) também examinando os padrões diários da reflectância espectral do trigo mostra como mudança do ângulo de elevação solar e o azimute solar relativo afetam a reflectância no visível e infravermelho próximo de maneira complexa. Estas modificações são devidas a interações da componente especular da irradiância com a geometria de plantio, solos, solo e planta. Ao meio-dia, a luz solar penetra mais diretamente na superfície e no dossel do trigo com linhas de plantio orientadas no sentido N-S, do que em outras horas do dia, causando um máximo de reflectância nos comprimentos de onda do visível e uma reflectância mínima nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Os autores notaram também que as medidas espectrais feitas a cada hora do dia estão bem correlacionadas com o Índice de área foliar verde, no entanto a relação muda significativamente em cada ponto no decorrer do tempo.

Na discussão das dinâmicas de distribuição do fator de reflectância direcional Kimes (1983) determinou que a interação entre baixos ângulos zenitais solares e dosséis populacionalmente espessos são primariamente resultado das características de espalhamento dos solos. A anisotropia da reflectância bidirecional em superfícies vegetais foi também comentada por Koepke e Kriebel (1978). Eaton and Dirnhirn (1979) comentam que mudanças substanciais na resposta espectral de várias superfícies com o ângulo solar são resultado da estrutura vertical e das

características da área em estudo. Para certas superfícies, por exemplo, neve, salinas e álcali, predominam o espalhamento para frente, enquanto que para campos arados e superfícies vegetadas o efeito dominante é o retroespalhamento.

Kimes et alii (1980) apresentaram dados de campo onde geralmente a reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo são relativamente inafetadas pela mudança do ângulo zenital solar.

O ângulo de elevação solar muda a quantidade de sombra do dossel (Colwell, 1974b). Não somente a quantidade de sombra, mas também a qualidade da sombra é importante. Por exemplo, as mesmas quantidades de sombra observadas em um dossel de coníferas e em um dossel de madeira-de-lei possuem grandes efeitos na reflectância no infravermelho próximo no dossel de coníferas, porque nestes comprimentos a sombra de coníferas é relativamente mais escura devido a baixa transmitância desta vegetação, comparada com a vegetação de madeira-de-lei.

A irradiância do céu também altera a escuridão da sombra sendo a contribuição da irradiância maior nos intervalos espectrais de comprimentos de onda menores.

2.5.2 - O EFEITO DO ÂNGULO DE VISADA DO SENSOR

Aumentando-se o ângulo de visada do sensor em um dossel de vegetação se reduz a quantidade de solo e sombra vistos pelo sensor, e aumenta-se a quantidade de vegetação observada. Contudo, teoricamente, um movimento desde a visada vertical tem efeitos similares no acréscimo da reflectância bidirecional em uma cobertura vegetal (Curran, 1981).

Colwell (1974) notou que quando o sensor apresenta visada off-nadir, as interrelações entre os ângulos de visada e iluminação se tornam muito complicados. A tendência da reflectância bidirecional para dois ângulos zenitais é cruzada, isso indica que com grandes ângu

los de visada a reflectância do dossel aumenta com o acréscimo do ângulo zenital e que para pequenos ângulos de visada a reflectância do dossel decresce com o acréscimo do ângulo zenital.

Além de Colwell (1974), Egbert e Ulaby (1972) foram os primeiros a notar os efeitos do ângulo de visada na reflectância de duas superfícies, uma com grama e outra com asfalto. Eles notaram que a reflectância na cobertura da grama possui pequena variação para grandes ângulos de elevação solar.

Kimes (1983) cita que geralmente para coberturas vegetais completamente homogêneas, a maior tendência observada em todos os ângulos solares e bandas espectrais foi reflectância mínima para ângulos de visada próximos ao nadir e o acréscimo da reflectância com o acréscimo dos ângulos de visada off-nadir para todos os azimutes.

2.5.3 - O EFEITO DO ÂNGULO RELATIVO DE AZIMUTE SOLAR

Quando consideramos os efeitos da geometria de visada na reflectância bidirecional de um alvo tem-se mostrado que o ângulo relativo de azimute solar entre o plano de iluminação e o plano de visada pode ser um determinante muito importante no efeito de visada off-nadir. Há uma série de convenções para a medida do ângulo relativo de azimute solar. Suits (1972b) adotou a convenção de que quando o Sol estiver atrás do sensor e o sensor possui visada para frente desde o plano de iluminação, o ângulo relativo do azimute solar é 0° . Quando o sensor possui visada na direção do Sol, o ângulo relativo de azimute solar, entre o plano de iluminação e o plano de visada é de 180° . Similares considerações são também adotadas por Egbert e Ulaby (1972).

O efeito do ângulo relativo do azimute solar é muito dependente das condições de superfície, isto é, rugosa ou não rugosa, vegetada ou não vegetada.

Suits (1972b) mostrou que a reflectância de uma cobertura vegetal predominantemente vertical é grande quando o sensor possui visada com ângulo relativo de azimute solar igual a 0° . Isso acontece pelo fato da vegetação refletir a quantidade de radiação espalhada de volta, na direção do sensor (backscattering). A 180° de ângulo relativo de azimute solar, a visada contra o Sol, faz com que o sensor receba somente a luz que foi transmitida, mais o pequeno fluxo difuso refletido. Contudo, recentes pronunciamentos, baseados em modelos de medidas de campo tem indicado que para coberturas perfeitamente homogêneas, a reflectância direcional cresce com o ângulo de visada off-nadir, crescendo para todo o azimute solar relativo/ângulos de visada e ângulos solares (Kimes, 1983).

Para coberturas não homogêneas, tais como plantios em linhas, o ângulo relativo de azimute solar possui efeitos mais drásticos; em certas horas, o Sol iluminará somente a cobertura (Sol iluminando as linhas de lado), em outras horas o Sol iluminará predominantemente o solo (Sol iluminando paralelamente as linhas).

2.5.4 - O EFEITO DA TOPOGRAFIA

Menciona-se agora um efeito que pode afetar enormemente a resposta espectral dos alvos, trata-se do efeito topográfico. A maior parte dos trabalhos tem assumido as superfícies como sendo horizontais (planas) isto para simplificar os problemas. A situação de uma superfície inclinada apresenta problemas adicionais que levam a muitas discussões. A superfície inclinada na direção do sensor ou no sentido oposto causa efeitos semelhantes ao movimento do sensor desde a vertical (visada off-nadir). Isto é, mais vegetação e menos solo pode ser visto. Contudo, quando a superfície inclinada estiver voltada para o Sol, receberá maior irradiância, conseqüentemente terá uma maior radiação. Da mesma forma, a superfície inclinada no sentido oposto a iluminação solar receberá menor irradiância tendo conseqüentemente radiação menor. Estes efeitos de exposição da superfície perante a irradiação solar, pode resultar em diferentes respostas espectrais dos alvos

causadas em função do efeito topográfico. Este efeito em dados do MSS LANDSAT foi estudado por Holben e Justice (1979) onde encontraram uma variação de 50 DN (Números Digitais) para duas coberturas similares colocadas em superfícies com diferentes inclinações.

2.6 - O COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS ALVOS EM ESTUDO

2.6.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

Segundo Wiegand et alii (1973), fatores como percentagem de cobertura do solo pelas culturas, porte das plantas, entre outros, são parâmetros que, de uma maneira ou de outra, devem influenciar na resposta espectral dos dados de satélite.

É importante observar que a reflectância de uma cultura difere daquela obtida em laboratório de folhas isoladas devido aos seguintes fatores:

- a) variação na quantidade da área foliar, volume de fitomassa e cobertura do solo devido a diferentes datas de plantio, tipo de solo, teor de umidade do solo, população de plantas por unidade de área, condições de fertilidade, fitossanidade, etc;
- b) diferentes épocas de maturação, devido a variedade, data de plantio, tipo e umidade do solo;
- c) uso de práticas culturais diferentes;
- d) variação na geometria da copa devido a diferentes espaçamentos e direções de plantio e tombamento;
- e) fatores ambientais, tais como: condições atmosféricas, vento, ângulo de reflectância em relação ao ângulo de incidência solar e condições de umidade do solo.

A vegetação interage com a radiação eletromagnética de maneira diferente em cada faixa do espectro. A curva padrão da resposta espectral da vegetação (Figura 2.12) mostra um pico de absorção na região azul e outra na região do vermelho, devido à presença da clorofila e carotenos. Nota-se também, um pico de alta reflectância na região verde. Na transição do vermelho para o infravermelho próximo, nota-se um acentuado aumento da reflectância, a qual se mantém ao longo da faixa do infravermelho próximo, diminuindo na região do infravermelho médio.

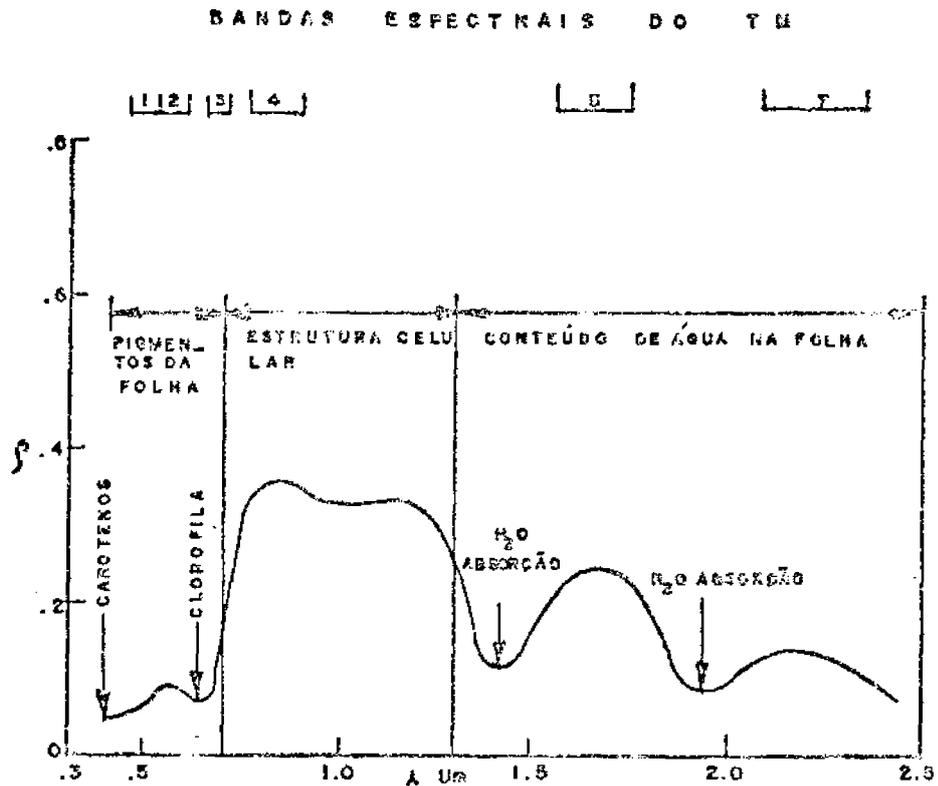


Fig. 2.12 - Comportamento espectral da vegetação nas respectivas bandas do TM.

FONTE: Bowker et alii, 1985.

Na faixa visual (0,40 - 0,68 μm), os pigmentos existentes na folha verde são responsáveis pela sua resposta espectral, apresen

tando uma forte absorção da radiação incidente nas regiões do azul e do vermelho. Essa absorção é inversamente proporcional à reflectância nesta faixa.

Na porção do espectro referente ao infravermelho próximo (0,69 - 1,10 μ m) ocorre exatamente o inverso. As folhas verdes absorvem muito pouca energia nesta região do espectro, apresentando uma alta reflectância, causada pelo espalhamento resultante dos diferentes índices de refração do líquido intra-celular (1,33 μ m) e dos espaços inter-celular (1,0 μ m) do mesófilo (Gausman et al. 1974). Esse autor estudou as razões biofísicas da reflectância foliar e concluiu que ao incidir em uma camada de folhas essa radiação reflete cerca de 50% e transmite o restante. Se esta porção transmitida encontrar outra camada de folhas, o aumento da reflectância é pouco significativo.

Na faixa do visível, o comportamento da vegetação verde é caracterizado por forte banda de absorção, a qual ocorre logo que a radiação incide na primeira folha. No infravermelho, a resposta da vegetação cresce com a densidade da folhagem. A deficiência d'água aumenta a reflectância da vegetação em todo o intervalo considerado, visível e infravermelho.

A densidade de folhagem exerce importante papel na intensidade da resposta da vegetação no infravermelho próximo. A maior densidade de folhagem na estação de chuvas faz com que a reflectância da vegetação tomada nesta época no infravermelho seja menor.

As estações de chuva e seca modificam também a resposta da vegetação na faixa espectral do visível. As variações de reflectância nesta faixa são devidas principalmente as diferentes associações de solo e vegetação, em termos de exposição relativa entre ambos. Assim, durante a estação das chuvas, o maior vigor e a maior densidade de folhagem acarretam forte absorção da radiação nessa faixa espectral fazendo com que áreas de cobertura vegetal mais densa apareçam com menor reflectância (no visível). Por sua vez, áreas de solos expostos ou

coberturas vegetais menos densas serão mais contrastadas neste intervalo espectral, apresentando-se com uma maior reflectância.

Conforme Curran (1981), a cobertura vegetal no campo se comporta como uma superfície não-lambertiana, no que tange ao seu comportamento espectral, uma vez que se têm folhas de diferentes tamanhos em diferentes posições.

Como a vegetação nem sempre cobre toda a superfície, ou seja, há sempre uma certa percentagem de solo presente, quando se analisa um ponto no terreno, sensoriado a nível orbital, a radiação registrada corresponde a energia proveniente da interação dos alvos, mais a energia proveniente do espalhamento atmosférico.

Essa energia proveniente do alvo é a informação útil, e o fator adicionado é a informação indesejável. Desta forma, observa-se que variações nas condições de iluminação, de reflectância do alvo e condições atmosféricas, afetam a resposta espectral de modo multiplicativo, enquanto que o espalhamento atmosférico afeta de forma aditiva.

Hoffer e Johannsen(1969) foram os primeiros a indicar a necessidade de uma análise apropriada da assinatura espectral da vegetação, a fim de que se pudesse monitorar as diversas coberturas vegetais.

Coulson et alii (1965), Brennan e Bandeen (1970), Colwell (1974), Kriebel (1976), demonstraram que superfícies naturais, especialmente a vegetação, pode variar em vários por cento sua reflectância devido a mudanças nos ângulos de visada e ângulos de iluminação.

2.6.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS SOLOS

Westin e Lemme (1978) estudaram o efeito do solo e da vegetação sobre a resposta espectral do LANDSAT. Associações de seis

solos utilizados com a cultura do milho, pequenos grãos e pastagens de gramíneas foram analisados. As diferenças de solo, no que se refere às propriedades espectrais, mostram-se mais acentuadas em relação às áreas de pastagem, do que as áreas ocupadas com culturas. Os dados mostraram que as associações de solo não podiam, consistentemente, serem separadas dentro de dados provenientes de um único tipo de vegetação. Entretanto, os resultados evidenciaram que os solos de algum modo influenciaram a resposta espectral da vegetação.

Os mesmos autores dizem que a variação nos solos pode causar diferenças nas assinaturas de cada cultura. Comentam que muito embora a cobertura vegetal de um campo de cultura, em estágio avançado de crescimento, elimine a influência dos solos, as culturas localizadas em diferentes solos, não são plantadas igualmente na mesma data e nem crescem com a mesma taxa de desenvolvimento, nos diferentes tipos de solos.

O comportamento espectral dos solos varia de acordo com diversos fatores intrínsecos aos mesmos, dentre os quais tem sido citados como os mais importantes: a umidade, o conteúdo de matéria orgânica, a textura, a cor, a capacidade de troca catiônica (CTC), o conteúdo de óxidos de ferro e as condições de superfície (Granulometria e estrutura). Uma curva média dos diferentes tipos de solo pode ser observada na Fig. 2.13.

Bowers e Hanks (1965) estudando a reflectância de solos em laboratório mostraram que o aumento da umidade provoca a diminuição da reflectância dos solos, porém, a forma geral das curvas espectrais dos solos não é afetada pelas variações da umidade.

BANDAS ESPECTRAIS DO TM

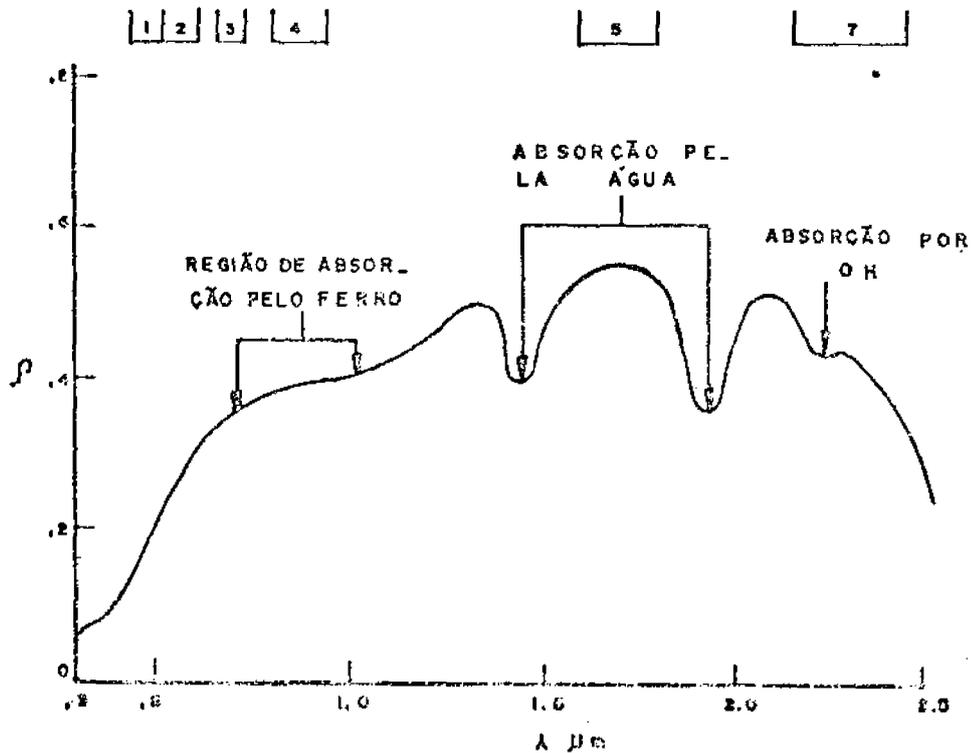


Fig. 2.13 - Comportamento espectral do solo, nas respectivas bandas do TM.

FONTE: Bowker et alii (1985).

Baumgardner et alii (1970), estudando os efeitos da matéria orgânica nas propriedades espectrais dos solos, notaram que a matéria orgânica em quantidades maiores que 2% pode provocar um efeito de mascaramento na contribuição que os outros constituintes dão para aquelas propriedades, na região refletiva do espectro eletromagnético.

De acordo com Al-Abbas et alii (1972), quando há um aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo, a reflectância deste diminui, sendo que há uma relação semelhante entre o conteúdo de argila

dos solos e os seus dados espectrais. A importância da umidade do solo como fator que afeta a cor foi estabelecida por Beck et alii (1976), usando um espectroradiômetro EXOTECH 20C. Entre os vários fatores estudados, eles concluíram que a umidade do solo teve a maior influência na sua reflectância ao nível de umidade de 1/3 de atmosfera, vindo em seguida o fator matéria orgânica. Entretanto, em um estado mais seco, cerca de 15 atmosferas, os mesmos solos mostraram que a matéria orgânica tem maior efeito em certos comprimentos de onda.

Sabe-se que a redução da reflectância ou da absorção de energia pela água ocorre de maneira diferente nos diversos comprimentos de onda; a absorção pela água é bastante pronunciada em 1,45 e 1,95 μm .

O efeito da diminuição da reflectância, quando presente em uma substância, de acordo com Peterson et alii (1979), foi atribuído por Angstrom (1925) às reflexões internas totais dentro da camada fina de água que recobre a superfície.

Obukhov e Orlov (1964) constataram que todos os solos por eles pesquisados possuíam características de refletividade espectral relacionadas com a sua cor e, em citação de Myers e Allen (1968), acentuam que geralmente o umedecimento e a pulverização da superfície do solo induzem suas curvas de reflectância a se tornarem mais próximas umas das outras.

Crown e Pawluk (1974) concluíram que a cor do solo é um fator dominante na influência sobre a reflectância na porção visível do espectro, enquanto que a rugosidade superficial e o teor de umidade afetam mais no infravermelho refletido. Para solos de cores claras, a rugosidade tende a aumentar a reflectância no infravermelho, enquanto que para solos de cores superficiais escuras, a rugosidade tende a diminuir a reflectância na faixa correspondente ao infravermelho.

Estudando a reflectância em relação ao tamanho das partículas, desde argila até areia, Bowers e Hanks (1965) verifi

caram um aumento exponencial da reflectância à medida que havia uma diminuição no tamanho das partículas.

Stoner et alii (1980), estudando a influência dos vários parâmetros sobre a reflectância dos solos nos EUA, Espanha e Brasil, afirmaram que os solos de climas mais úmidos geralmente refletem menos do que aqueles de climas secos, devido ao maior acúmulo de matéria orgânica nos primeiros. Mostraram ainda que geralmente a reflectância diminui à medida que as condições de drenagem pioram. Os solos de drenagem mais pobres refletem consideravelmente menos do que aqueles de outras classes de drenagem, em todos os comprimentos de onda.

Ainda, de acordo com Stoner et alii (1980), como uma característica local que integra os efeitos de clima, relevo e acúmulo de matéria orgânica, as características de drenagem estão intimamente associadas às propriedades de reflectância superficial dos solos. Mantendo-se todas as propriedades constantes, um aumento no conteúdo de umidade do solo diminui a sua reflectância em todos os comprimentos de onda.

Em geral, aumentado-se a umidade, matéria orgânica, teor de ferro, tamanho das partículas, argilo-minerais e CTC, vamos ter uma diminuição na reflectância dos solos.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - ÁREA DE ESTUDO

Segundo Almeida (1961) as áreas de estudo localizam-se na região fisiográfica da depressão periférica (bacia do Rio Piracicaba) do Estado de São Paulo. Tendo em vista a abordagem adotada selecionaram-se duas áreas testes em função da disponibilidade de dados de campo confiáveis.

A área teste de Iracemópolis localiza-se no norte do município de Iracemópolis - SP, e é limitada pelas coordenadas geográficas de 22°33' - 22°42' de latitude sul e 47°30' - 47°35' de longitude oeste. Esta área caracteriza-se por relevos de baixas colinas de formas suavizadas com topos subaplainados. Há o predomínio de vertentes com perfis retilíneos e convexos e drenagem de baixa densidade.

Segundo o mapa geológico do Estado de São Paulo (Instituto Geográfico e Geológico), a geologia da área é constituída por rochas do Grupo Tubarão (Permocarbonífero), Grupo Passa-Dois (Formações Irati e Corumbataí) arenitos da Formação Botucatu-Piramboia, intrusivas básicas e rochas Cenozóicas.

A distribuição pluvial segue regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, com verão chuvoso e inverno seco. Os dados de temperatura e precipitação permitem incluir esta área como tendo clima mesotérmico de inverno seco (Cwa) segundo o sistema de classificação de Köppen. Os balanços hídricos assinalam discreto período de deficiência hídrica de maio a setembro.

No tocante aos solos, a área teste de Iracemópolis é ocupada por Latossolos Roxos o qual apresenta horizonte B latossólico com pelo menos 30 cm de espessura abaixo do horizonte A.

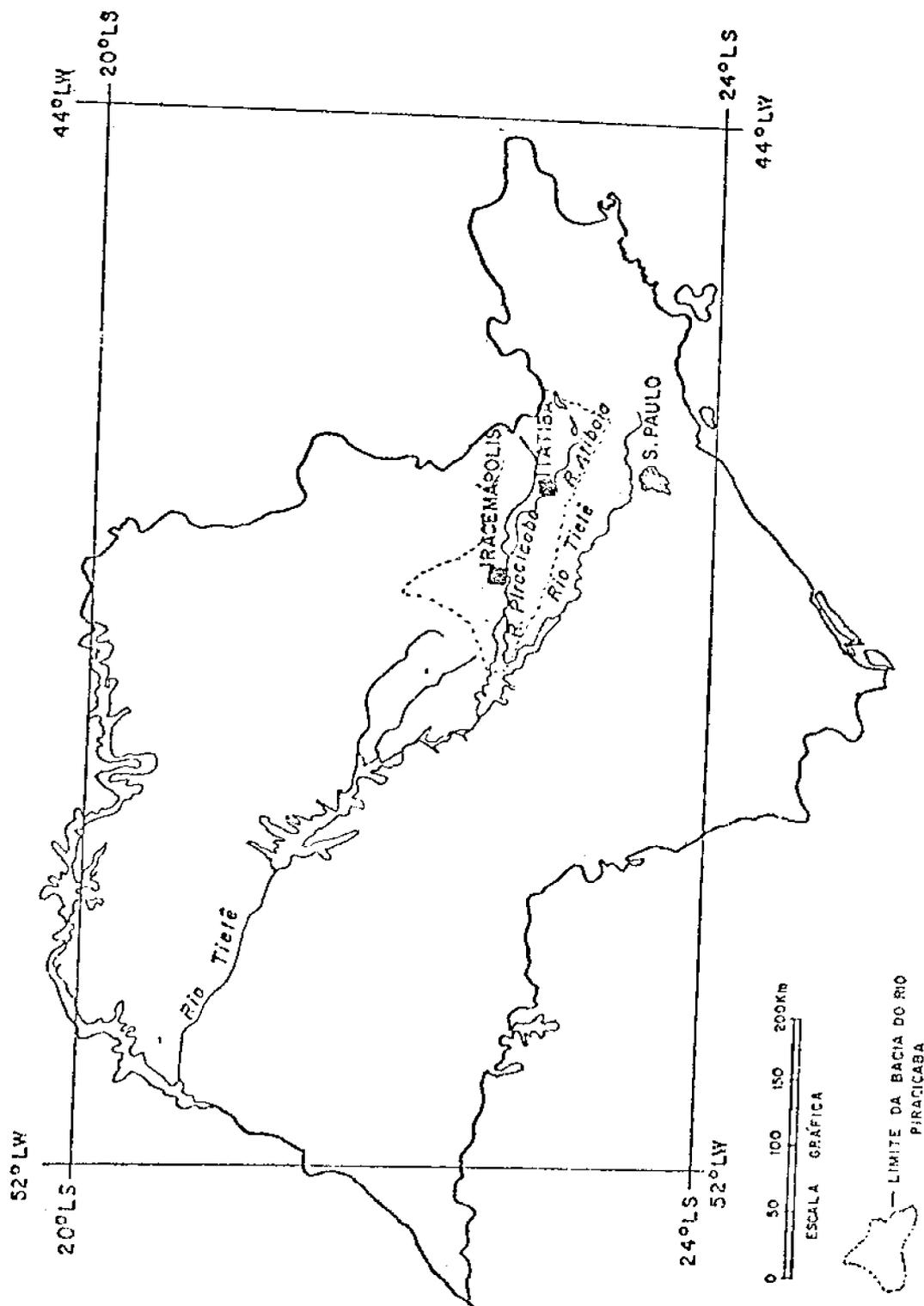


Fig. 3.1 - Localização da área de estudo.

O uso atual do solo é a cultura da cana-de-açúcar ocorrendo apenas esporadicamente remanescentes da vegetação natural original (mata subperenifolia) e outras culturas anuais.

A área teste de Itatiba localiza-se a sudeste do Município de Itatiba - SP, entre as coordenadas geográficas de 22°58' - 23°02' de latitude sul e 46°38' - 46°45' de longitude oeste.

A topografia da área caracteriza-se por relevo de mar de morros, com topos arredondados e vertentes com perfis convexos e retilíneos onde predominam declives inferiores a 15%.

Climatologicamente a área teste apresenta regime típico de zona tropical de baixa altitude com verão chuvoso e inverno seco (Cwa) segundo o sistema de Koppen. Nessa área também se verifica um período de deficiência hídrica entre junho e setembro.

O solo predominante nesta área é o Latossolo Vermelho-Amarelo, álico a moderado, textura média, relevo ondulado.

O uso atual do solo caracteriza-se pelo predomínio de culturas anuais destacando-se o milho, o trigo, a batata e a floricultura.

3.2 - DADOS TM/LANDSAT

Para a aquisição de informação espectral nas áreas a serem amostradas foram utilizadas imagens obtidas pelo sensor Thematic Mapper do satélite LANDSAT 5 no formato de fitas compatíveis com computador (CCTs).

As cenas selecionadas para este estudo são identificadas pela órbita 220, ponto 76 quadrante B de 19 de maio de 1984 referente a área teste de Iracemápolis e a órbita 219 ponto 76, quadrante A, de 31 de maio de 1985 referente a área teste de Itatiba.

O sistema de análise de imagens multiespectrais foi utilizado para a aquisição dos valores de níveis digitais (DN) necessários para as análises posteriores. Maiores informações sobre o sistema encontram-se em General Electric (1975).

3.3 - MAPAS E CARTAS

Para a aquisição de dados de declividade e orientação das vertentes necessárias ao cálculo do termo co-seno β foram utilizadas folhas topográficas na escala 1:10.000 com curvas de níveis equidistantes de 5 metros.

Para a aquisição de outras informações planimétricas e temáticas utilizaram-se ainda os seguintes mapas e cartas:

- Carta de solos do Estado de São Paulo, escala 1:500.000 - Ministério da Agricultura, 1960.
- Folhas topográficas, escala 1:50.000 - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.
- Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 1978.
- Plantas com a localização das parcelas de cana-de-açúcar da usina Iracema, 1984.

3.4 - FOTOGRAFIAS AÉREAS VERTICAIS

As fotografias aéreas verticais na escala 1:25.000 referentes ao ano de 1972 foram utilizadas como apoio a aquisição de dados de campo.

3.5 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.5.1 - DEFINIÇÃO DA HIPÓTESE DE TRABALHO

A hipótese subjacente a esse estudo é de que a geometria de iluminação dos alvos afeta o registro de seu comportamento espectral em imagens orbitais do LANDSAT.

A irradiância na superfície do alvo varia em função de diversos fatores. Se a superfície for perfeitamente horizontal os registros da energia refletida pelo alvo sofrerão uma variação sazonal em decorrência da variação anual do ângulo de elevação e azimute solar no horário da passagem do satélite.

Se a superfície não for perfeitamente horizontal numa mesma data a irradiância no alvo variará em função da sua inclinação e orientação em relação a fonte. As variações de irradiância podem ser expressas como uma função do co-seno β ($\text{Cos } \beta$) definido em 2.17, termo esse que exprime o somatório dos diversos parâmetros que nela influenciam.

Partindo-se do princípio de que com a variação da irradiância, variará também a radiância da superfície através do termo co-seno procurou-se testar tal efeito sobre os registros digitais dos dados TM-LANDSAT.

3.5.2 - DEFINIÇÃO DA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ILUMINAÇÃO SOBRE OS REGISTROS DIGITAIS

Para o estudo do efeito da geometria de iluminação sobre os registros digitais havia duas abordagens possíveis: a) Tomar ima

gens em épocas diferentes, fazendo com que variasse o termo co-seno β a partir da variação do ângulo de elevação e azimute solar; b) Tomar apenas uma data, e variar o co-seno β através de amostras obtidas em áreas com diferentes orientações e inclinações topográficas.

A utilização do procedimento (a) acarretaria os seguintes problemas: 1) alteração das condições fenológicas do alvo de interesse; 2) alteração de outras condições ambientais (atmosfera, umidade, etc); 3) necessidade de adquirir amostras em superfícies horizontais. Tais problemas impediriam isolar o efeito da variação da geometria de iluminação da cena sobre os registros digitais nos dados TM-LANDSAT. Optou-se portanto pelo segundo procedimento, mantendo-se constante a posição da fonte e alterando-se a geometria de iluminação pela variação da posição do alvo.

3.5.3 - SELEÇÃO DOS ALVOS A SEREM ESTUDADOS

Tendo em vista a multiplicidade de fatores internos e externos que influem no comportamento espectral dos alvos naturais, optou-se por selecionar apenas dois alvos para esse estudo. Os alvos selecionados foram a cana-de-açúcar e o solo exposto. A seleção desses alvos deveu-se aos seguintes fatores:

- a) Representam condições extremas da superfície terrestre, uma vez que a maior parte dos alvos constituem um arranjo em proporções variadas de coberturas vegetais e coberturas pedológicas;
- b) A cultura da cana-de-açúcar no estágio adulto cobre uniformemente o solo, razão pela qual poder-se-ia avaliar o efeito da geometria de iluminação sobre a resposta de um dossel, sem interferência direta do solo;
- c) A cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ocupa áreas extensas e contínuas;

- d) A cana-de-açúcar é uma cultura de alta expressão econômica, considerando-se altamente prioritário e oportuno o seu estudo.

As amostras de cana-de-açúcar foram selecionadas na área teste de Iracemápolis descrita no item 3.1 tendo em vista a disponibilidade de mapas detalhados fornecidos pela usina Iracema com informações controladas a nível de talhão no tocante a variedade genética, estágio de desenvolvimento, número de cortes e práticas culturais.

O mês de maio foi selecionado em função da cana-de-açúcar apresentar-se num estágio de evolução fenológica anterior ao corte, no qual apresenta pouca ou quase nenhuma resposta devido ao solo.

Quanto ao alvo solo foi utilizada a imagem de maio por serem disponíveis dados de campo. Além disso para se tornarem comparáveis, os dados de cana-de-açúcar e solo era necessário manter semelhante as condições de iluminação no momento da passagem do satélite (elevação e azimute solar). Essa data foi particularmente favorável porque também na região de Itatiba corresponde ao período preparo do solo para as culturas de inverno.

3.5.4 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

De posse dos mapas de localização dos talhões de cana-de-açúcar, fornecidos pelo grupo Ometto (usina Iracema) selecionou-se a variedade NA 56-79, de ano, primeiro corte, para ser estudada, por ser a variedade de maior representatividade no país, o que possibilitaria a extração de um número maior de amostras.

Os talhões escolhidos foram demarcados sobre as cartas topográficas na escala 1:10.000. Para cada talhão calculou-se o termo co-seno levando-se em consideração o azimute e elevação solar, inclinação e orientação das vertentes, conforme equação 2.18, dados esses extraídos das cartas. As parcelas de solo exposto foram selecionadas com base em informações de campo e localizadas da mesma forma que a cultura da cana-de-açúcar.

Após a seleção de 72 amostras para cada um dos alvos a serem estudados procedeu-se a aquisição dos dados digitais no analisador de imagens multiespectrais.

3.5.5 - AQUISIÇÃO DE DADOS DIGITAIS

Utilizando-se o analisador IMAGE-100, foram obtidos os valores das respostas espectrais armazenadas sob a forma digital em fitas magnéticas compatíveis com computador.

Esse trabalho consistiu em determinar os níveis de cinza, numa escala de 0 (preto) a 255 (branco), e que se encontravam armazenados em fitas na forma original, sem as alterações promovidas pelo processamento fotográfico.

A localização dos pontos das amostras para obtenção das medidas foi feita no vídeo através do cursor luminoso com tamanho de quatro elementos de resolução de imagem.

Estas áreas foram localizadas no vídeo do IMAGE-100, com a imagem ampliada para a escala 1:15.000, e com o auxílio de cartas topográficas na escala 1:10.000 e 1:50.000, além de fotografias aéreas na escala 1:25.000.

Foram obtidas as coordenadas X e Y no vídeo do IMAGE-100, na escala 1:15.000. Tal procedimento se fez necessário haja visto a dificuldade em se localizar a amostra com apenas quatro pixels em uma escala 1:50.000 isto possibilitou a localização mais precisa de amostras no vídeo do IMAGE-100. Posteriormente transformou-se a imagem para a escala 1:50.000, e de posse das coordenadas X e Y localizou-se a área de interesse no vídeo do IMAGE-100, na escala 1:50.000 onde se obteve o nível digital. Este procedimento foi adotado para evitar a repetição de pixels, uma vez, que na escala 1:50.000 um pixel no terreno corresponde a um pixel no vídeo do IMAGE-100.

Através do programa "single pixel" foram obtidas as informações espectrais de amostras nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, sendo cada amostra caracterizada pela média das respostas espectrais de quatro elementos de imagem em cada banda.

3.5.6 - ANÁLISE DOS DADOS

De posse de todos os dados de variação de nível digital (DN) e de co-seno β , procedeu-se a análise de correlação linear simples à semelhança da abordagem adotada por Kowalik e Marsh (1982) no estudo desta equação.

O primeiro passo da análise estatística consistiu na aquisição dos coeficientes de correlação linear (r) entre os níveis digitais (DN) e co-seno β ($\text{Cos } \beta$) para diferentes subconjuntos das amostras coletadas.

O coeficiente de correlação linear tem a importante propriedade de ser adimensional e de variar entre -1 e +1. A vantagem de ser adimensional está no fato de seu valor não ser afetado pelas unidades adotadas. Resultam também, como consequência, que codificações lineares introduzidas nas variáveis para facilitar os cálculos não afetam o valor de " r ". É um coeficiente de fácil interpretação porque $r = -1$ corresponde ao caso de correlação linear negativa perfeita e $r = +1$, ao de correlação linear positiva perfeita. O significado de valores intermediários é deste modo rapidamente percebido.

Deve-se frisar, entretanto, que, muitas vezes, um alto valor do coeficiente de correlação, embora estatisticamente significativo, pode não implicar qualquer relação causa efeito, mas simplesmente a tendência que aquelas variáveis apresentam quanto à sua variação conjunta.

Análises estatísticas baseadas no coeficiente de correlação, em geral, são adequadas quando estão envolvidas duas variáveis

entre as quais não há relações de dependência funcional, embora possam ser correlacionadas.

Um ponto importante diz respeito a interpretação do valor de "r" obtido a partir de uma amostra. Verificou-se estando necessariamente entre -1 e +1, o valor de "r" por si só deve dar uma boa idéia do grau e do sinal da correlação linear. Não se deve entretanto esquecer que, em geral o valor de "r" é calculado com base nos "n" elementos de uma amostra aleatoria e que, portanto, representa apenas uma estimativa do verdadeiro coeficiente de correlação populacional.

A correlação entre os números digitais TM' e os valores do co-seno β foi realizada utilizando-se o algoritmo BASIS (Burroughs Advanced Statistical Inquiry System), que esta descrito em Burroughs (1975).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados espectrais que serviram de base para o presente trabalho são apresentados e discutidos neste capítulo

A Tabela 4.1 apresenta os valores de irradiância em W/m^2 para a área de estudo em função das diferentes orientações e inclinações da superfície topográfica, considerando a constante solar igual a $1353 (W/m^2)$. Valores calculados para o mês de maio e horário de passagem do satélite.

TABELA 4.1

VALORES DE IRRADIÂNCIA EM W/M^2 CALCULADOS PARA A ÁREA DE ESTUDO
NO MÊS DE MAIO E HORÁRIO DE PASSAGEM DO SATÉLITE

ORIENT. INC	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SUP. HORIZ.
4	807,50	826,74	801,69	747,02	694,76	675,52	700,57	755,24	752,96
8	858,09	896,49	846,52	737,45	633,18	594,78	644,76	753,83	
12	904,52	961,87	887,21	724,28	568,51	511,15	585,81	748,75	
16	946,53	1022,56	923,56	707,58	501,07	425,03	524,00	740,02	

Pela análise da Tabela 4.1, pode-se observar que a geometria de iluminação da cena afeta a quantidade de energia total disponível na superfície, uma vez que ao se variar a declividade e a exposição da superfície do alvo de estudo, está sendo alterado o ângulo de incidência da radiação eletromagnética.

É importante ressaltar que esse valor de irradiância é total (integrado em todos os comprimentos de onda) e que não se está considerando as perdas por absorção e espalhamento atmosférico, nem a irradiância difusa.

Ainda pela Tabela 4.1 verifica-se que os valores máximos de irradiância ocorrem quando a vertente está voltada para nordeste (NE) e que os valores mínimos ocorrem a sudoeste (SW). Para uma declividade de 16° a amplitude de variação de irradiância é de 597 W/m^2 , ou seja, a energia incidente sobre o alvo de interesse na vertente nordeste é mais do que o dobro da energia incidente sobre o mesmo alvo localizado na vertente sudoeste.

Se a radiância do alvo é função da reflectância e da irradiância, e se os números digitais são proporcionais a radiância (Kowalick et alii, 1982) é de se esperar que os números digitais que representam objetos colocados nessas posições da topografia sofram uma variação proporcional a irradiância admitindo que não há radiação difusa e que seu comportamento seja lambertiano.

Na Tabela 4.2 pode-se avaliar essas variações em termos relativos. Os dados contidos nesta tabela são percentagens de irradiância em relação a irradiância de uma superfície plana perpendicular à fonte, considerando que nesta superfície incidiria 100%. Calculado para o mês de maio e horário de passagem do satélite. A variação relativa da energia incidente é da ordem de 42% considerando as classes de declividade e orientação.

A Figura 4.1 ilustra melhor as variações contidas na Tabela 4.1. Pode-se observar que para superfícies de baixa inclinação a variação da orientação não altera substancialmente a irradiância (cerca de 10%). Outro aspecto interessante a observar é que para certas orientações a variação da declividade não afeta a incidência sobre a superfície. Nas superfícies com orientações sudeste (SE) e noroeste (NW) a irradiância não varia com a inclinação da superfície. Já, nas superfícies orientadas para nordeste (NE) e sudoeste (SW), são onde aparecem as maiores variações.

Convém destacar que estas variações são válidas para o mês de maio, outras épocas do ano possuirão estes picos de variação em vertentes orientadas segundo outras direções. Com isso pode-se concluir, que conforme a orientação preferencial do relevo da área a ser estudada tem-se uma época do ano mais propícia a extração de informações em imagens LANDSAT; considerações semelhantes foram feitas por vários autores, entre eles pode-se destacar Hilwig et alii (1974); e Yao (1983).

TABELA 4.2

VALORES PERCENTUAIS DE IRRADIÂNCIA CALCULADOS PARA A ÁREA DE ESTUDO

ORIENT. INC (°)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	X	SUP. HORIZ.
4	59,69	61,10	59,25	55,21	51,35	49,93	51,78	55,82	55,51	55,65
8	63,42	66,26	62,56	54,50	46,80	43,80	47,65	55,71	55,08	
12	66,85	71,09	65,57	53,53	42,02	37,78	43,30	55,34	54,43	
16	69,95	75,58	68,26	52,30	37,03	31,41	38,73	54,69	53,49	
X	64,97	68,51	63,91	53,88	44,30	40,73	45,36	55,39		

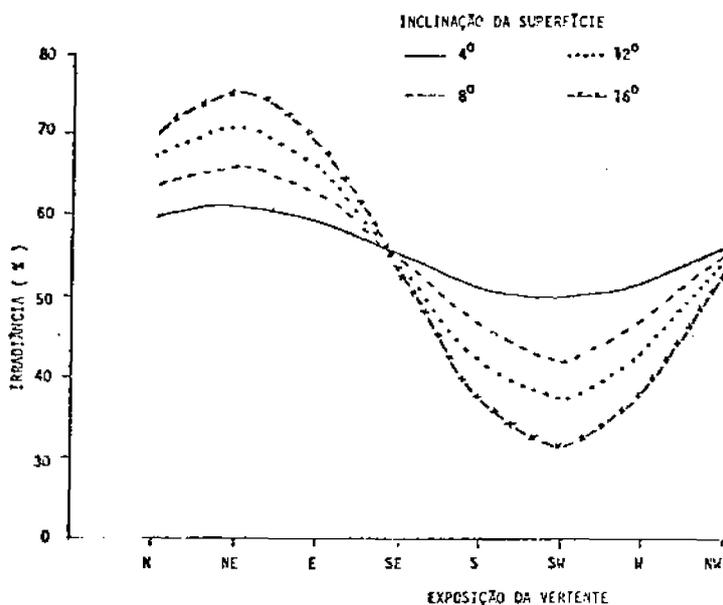


Fig. 4.1 - Variação da irradiância em função da orientação e inclinação da vertente.

Esta ampla variação da irradiância em função da inclinação e orientação do alvo em relação a fonte talvez explique a não adequação das técnicas de correção de efeitos topográficos a todas as cenas indiscriminadamente, (Holben e Justice, 1979; Holben e Justice, 1980 e Slater 1980).

Se todos os pressupostos adotados nesse estudo se verificassem, haveria uma alteração da radiância proporcional a irradiância. Assim sendo, haveria uma correlação alta e positiva entre o termo $\cos \beta$, que expressa a variação de irradiância solar devido a variação conjunta da declividade e orientação e os números digitais que variam proporcionalmente a radiância, (Kowalik e Marsh, 1982).

No Apêndice A, nas Tabelas A.1 e A.2 pode-se verificar as condições topográficas das áreas amostradas com o alvo solo exposto e cana-de-açúcar, bem como o $\cos \beta$ calculado em função da posição do Sol na data e horário de tomada das imagens.

A gama de variação dos valores de co-seno β para o solo exposto e a cana-de-açúcar, estão representados respectivamente nas Figuras 4.2 e 4.3.

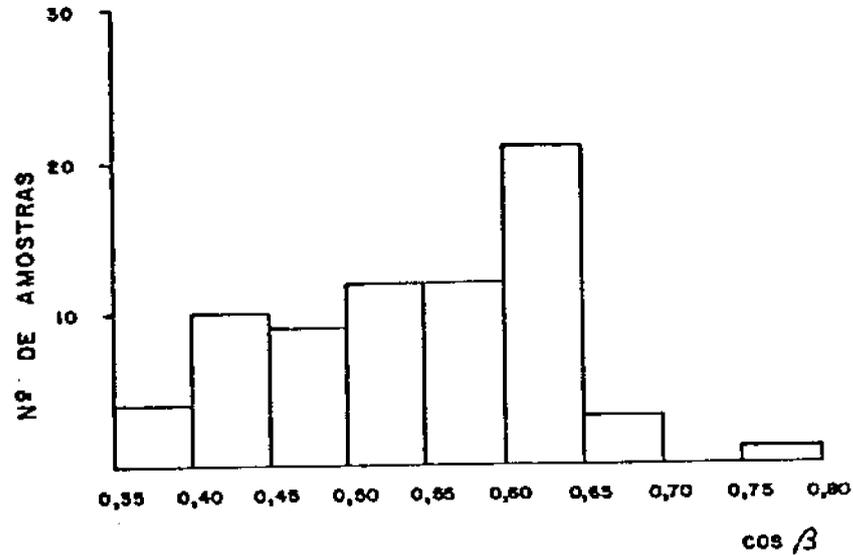


Fig. 4.2 - Frequências das amostras de solo segundo os valores de co-seno β .

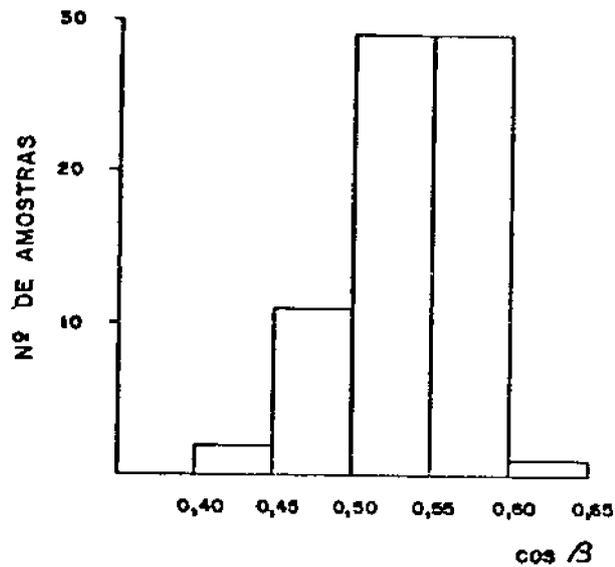


Fig. 4.3 - Frequências das amostras de cana-de-açúcar segundo os valores de co-seno β .

Com base nas Figuras 4.2 e 4.3, pôde-se verificar que as áreas amostradas com solo apresentam valores de co-seno β variando de 0,35 a 0,80, ao passo que para o alvo cana esta gama de variação de co-seno β é menor, 0,40 a 0,65. Porém em ambas as áreas mais de 80% das amostras apresentam valores de co-seno β variando entre 0,45 e 0,65, o que garante a semelhança topográfica entre as duas áreas.

Os números digitais para o alvo solo exposto e cana-de-açúcar extraídos nas áreas amostradas, nas seis bandas do TM/LANDSAT podem ser verificados no Apêndice B, respectivamente nas Tabelas B.1 e B.2.

Adquirido os números digitais em todas as bandas TM/LANDSAT em estudo (visível e infravermelho próximo), efetuou-se uma análise de correlação linear entre os números digitais de cada banda e os valores de co-seno β extraídos em função das condições topográficas e de iluminação.

Os valores dos coeficientes de correlação para os dois alvos segundo as bandas do TM são mostrados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA O SOLO E CANA-DE-AÇÚCAR EM CADA BANDA TM
(DN x COS β)

ALVO	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
SOLO	0,60386	0,62076	0,34520	0,79041	0,79143	0,68377
CANA	0,28903	0,33404	0,34169	0,18864	0,62196	0,60431

Na Tabela 4.3 alguns aspectos podem imediatamente serem destacados: a) o solo apresenta valores de correlação mais elevados que a cana-de-açúcar em todas as faixas espectrais estudadas; b) os valores de correlação variam espectralmente, (Bowers e Hanks, 1965; Egbert e Ula by, 1972; Smith et alii, 1975; Kriebel, 1976; Kimes et alii, 1980; Elia son et alii, 1981 e Kimes, 1983); c) a tendência de variação não é a mesma para o solo e a cana-de-açúcar. Tanto o solo quanto para a cana-de-açúcar, as bandas mais afetadas pelas condições de iluminação são aquelas que fornecem menos informações dos alvos. Por exemplo, para o alvo solo a banda TM3 é a que produz mais informações sobre o solo por coincidir com a região de absorção de ferro (Obukhov e Orlov, 1964; Bowers e Hanks, 1965; Crown e Powluk, 1974; Westin e Lemme, 1978 e Stoner et alii, 1980), conseqüentemente esta banda está menos sujeita as variações devido as condições de iluminação.

Com relação a cana-de-açúcar, a banda TM4 coincide com o pico de reflectância da vegetação, possuindo grande quantidade de informação intrínseca à vegetação sendo, portanto, menos influenciada pelas condições de iluminação. O mesmo acontece com as bandas TM1, TM2 e TM3 que estão situadas na região de absorção devido aos pigmentos das folhas (carotenos e clorofila) possuindo as condições de iluminação efeito secundário (Brennan e Bandeen, 1970; Colwell, 1974; Colwell, 1974b; Duggim, 1977; Chance e Lemaster, 1978; Kimes e Smith, 1980; Kimes et alii, 1980a e Kimes, 1983).

Nas correlações entre os números digitais e o co-seno β para o alvo solo, verifica-se que há dois grupos de correlações: a) um grupo de correlações mais altas referentes as bandas do TM1, TM2, TM4, TM5 e TM7; b) um grupo de correlações mais baixas referentes a banda do TM3.

Essa diferença é parcialmente suportada pelos dados encontrados na literatura: Stohr e West (1985) estudando o efeito do terreno e da visada sobre as respostas espectrais registradas em pastagem. Verificaram que a declividade e a orientação de vertente (que afeta o valor do co-seno β) tem considerável efeito sobre a resposta es

pectral em todas as bandas estudadas. Entretanto, observaram que com o aumento do comprimento de onda no visível os efeitos do terreno diminuíram. No entanto quando comparou-se esses efeitos na faixa do infravermelho observou-se que essas faixas são mais afetadas pela orientação e declividade que as faixas do visível.

A análise desses aspectos parece sugerir que numa dada cena alguns alvos tem seu comportamento espectral mais profundamente alterado pelas condições de iluminação, enquanto outros são pouco afetados. Pode-se dizer que o solo é mais afetado pela geometria alvo x fonte do que a cana-de-açúcar, esta possui mais dependência da geometria do dossel, configuração do plantio, dimensões e forma das folhas, posição da folha, orientação e inclinação da folha, índice de área folhar, ângulo de curvatura da folha, volume de biomassa, efeito do ciclo fenológico, etc., (Suits e Safir, 1972 e Vanderbilt et alii, 1981).

O menor coeficiente de correlação se verifica na faixa correspondente ao TM3, para o solo ($r = 0,3452$) e na faixa do TM4 para a cana-de-açúcar ($r = 0,18864$).

Na Tabela 4.4 pode-se observar que a variação do co-seno β explica 36% (TM1), 38% (TM2), 11% (TM3), 62% (TM4), 62% (TM5) e 46% (TM7) da variação do número digital das amostras de solo. No alvo cana-de-açúcar a variação do co-seno β explica 8% (TM1), 11% (TM2), 11% (TM3), 3% (TM4), 38% (TM5) e 36% (TM7).

TABELA 4.4

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA O SOLO E CANA-DE-AÇÚCAR NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

ALVO	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
SOLO	72	36,46	38,53	11,92	62,47	62,64	46,75
CANA	72	8,35	11,16	11,67	3,56	38,68	36,52

De modo a avaliar o efeito da inclinação da superfície sobre a correlação do termo co-seno β com os números digitais, as 72 amostras de solo e cana-de-açúcar foram separadas em classes de declividade (Tabela 4.5 e 4.6). Embora esta análise seja deficiente sob dois aspectos: a) tamanho pequeno de amostras por tratamento; b) tamanho desigual de amostras por tratamento, pode-se chegar a algumas considerações interessantes.

TABELA 4.5

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA O SOLO SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE

INC.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0° - 4°	11	-0,0980	-0,1503	-0,7754*	-0,6857*	0,4892	0,1752
4° - 8°	36	0,4879**	0,5388**	0,3278*	0,7163**	0,7273**	0,6849**
8° - 12°	20	0,7092**	0,7550**	0,3960	0,8502**	0,8674**	0,7985**

NS ** 0,01; * 0,05

TABELA 4.6

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE

INC.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0° - 4°	31	0,3812*	0,3516*	0,4232*	0,2664	0,5805**	0,6191
4° - 8°	38	0,3095	0,4399*	0,3517*	-0,0084	0,7089**	0,6706**

NS **0,01; * 0,05

Pela análise das Tabelas 4.5 e 4.6 observa-se que os valores de "r" para cada classe de declividade difere entre si de banda para banda, ou seja, modificando-se a inclinação da superfície a proporção da variação do número digital explicada pelo co-seno β se altera, e essa alteração é espectralmente variável.

É interessante observar que para o alvo solo na faixa referente ao TM1, TM2, TM3 e TM4, para a declividade de 0 a 4 graus, a correlação entre o co-seno β e os números digitais é negativa, contrariando a tendência geral dos dados e a teoria. Para essas amostras de solo um aumento do termo co-seno β está determinando uma diminuição do valor dos números digitais. Portanto, se a superfície apresenta pequena variação de inclinação, a variação do co-seno β estará vinculada a orientação.

No que se refere a cana-de-açúcar, pode-se observar com 99% de confiança que as bandas TM5 e TM7 tem uma maior dependência das condições topográficas (iluminação) do que as demais bandas.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 pode-se verificar o número de amostras de solo e cana-de-açúcar, segundo as classes de inclinação da superfície.

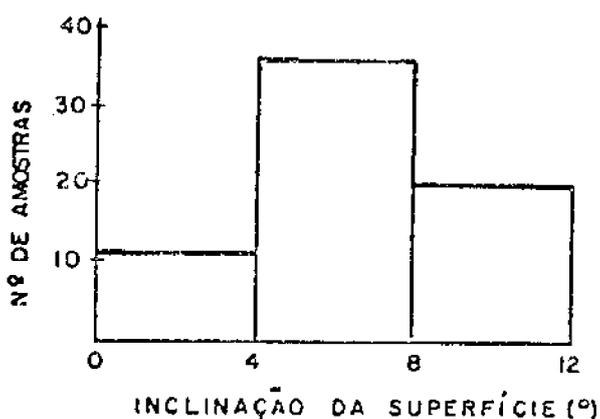


Fig. 4.4 - Frequência das amostras de solo segundo as classes de declividade.

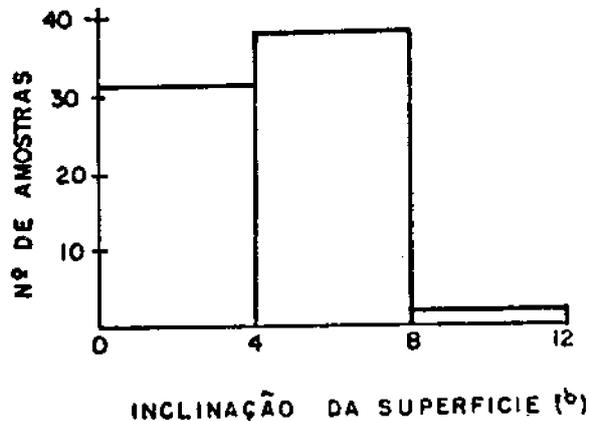


Fig. 4.5 - Frequência das amostras de cana-de-açúcar segundo as classes de declividade.

Nestas figuras verifica-se que as 72 amostras de solo estão dispostas em 3 classes de declividade, ao passo que o mesmo número de amostras de cana-de-açúcar estão dispostas em praticamente duas classes de declividade, pois a terceira classe apresenta um número muito reduzido de amostras. No entanto, tanto para o solo como para a cana-de-açúcar, a classe que apresenta maior número de amostras é a que possui declividade entre 4 - 8 graus.

Para o alvo solo, quando da análise da Tabela 4.4 foi observado que o co-seno β explica 36% da variação do número digital do TM1. O mesmo não se verifica quando se analisa o efeito co-seno β para amostras em superfícies de declividade de 0 - 4 graus (Tabela 4.7). A variação explicada é menor que 1% nessas circunstâncias, ou seja, em áreas planas, o efeito do termo co-seno β sobre os números digitais é irrelevante no caso da faixa correspondente ao TM1. Esse efeito aumenta com a declividade atingindo um coeficiente de determinação de 50% para inclinações da superfície de 8 a 12 graus.

Quando se compara a Tabela 4.4 com a Tabela 4.8 verifica-se muita semelhança entre os valores dos coeficientes de determinação para cada banda do TM, sem levar-se em consideração o efeito da inclinação da superfície, e também considerando-se este efeito. Isto demonstra

que a cana-de-açúcar, talvez pela sua distribuição sobre a superfície topográfica mascara o efeito topográfico, e apresenta um comportamento mais próximo do lambertiano.

TABELA 4.7

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA O SOLO
SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE

INC.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0° - 4°	11	0,96	6,26	60,12	47,02	23,93	3,07
4° - 8°	36	23,80	29,03	10,74	51,30	52,89	46,91
8° - 12°	20	50,29	57,00	15,68	72,28	75,23	63,76

TABELA 4.8

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR
SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE

INC.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0° - 4°	31	14,53	12,36	17,91	7,71	33,69	38,33
4° - 8°	38	9,58	19,35	12,36	0,007	50,25	44,97

Pela análise da Tabela 4.8, pode-se afirmar com um nível de confiança de 99% que em uma superfície com inclinação de 0 a 4 graus, nas bandas TM5 e TM7, essa inclinação é responsável por 33 a 38% da variação dos números digitais nas respectivas bandas. Já para as superfícies com inclinações de 4 a 8 graus, nas mesmas bandas, esta inclinação é responsável por 50 (TM5) e 44% (TM7) da variação dos números digitais.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam a média e o desvio padrão dos números digitais para o solo e cana-de-açúcar segundo as classes de declividade, para as bandas TM/LANDSAT em estudo.

TABELA 4.9

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS PARA O SOLO, SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

INC.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	\bar{X}	σ										
0° - 4°	56,93	1,14	26,27	1,14	33,29	2,59	35,57	4,22	84,20	9,25	30,80	4,50
4° - 8°	56,97	2,67	26,31	2,33	34,41	5,54	37,00	5,28	87,30	12,72	31,89	5,05
8° - 12°	55,73	2,73	25,73	1,97	32,49	4,34	34,71	5,79	80,34	13,94	28,86	5,63

TABELA 4.10

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS PARA A CANA-DE-AÇÚCAR SEGUNDO AS CLASSES DE DECLIVIDADE NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

INC.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	\bar{X}	σ										
0° - 4°	52,82	1,26	22,58	0,82	21,38	1,44	56,09	4,44	46,95	5,92	9,47	1,44
4° - 8°	52,67	1,42	22,57	1,27	21,70	2,70	52,97	4,92	43,23	4,84	9,13	1,72

Pela análise das Tabelas 4.9, 4.10 e da Tabela 4.2. pode-se verificar que de um modo geral, nas superfícies com maior irradiação, tem-se um maior valor do número digital em todas as bandas do TM.

Nestas Tabelas (4.9 e 4.10) observa-se que o desvio padrão dos números digitais é maior nas classes de maior inclinação, o que explicaria os problemas de classificação digital da cana-de-açúcar em áreas acidentadas (Batista et alii, 1983). Isto acontece, porque aumentando-se a variância interna da classe dificultará a separação entre as classes.

De modo a avaliar o efeito da orientação da superfície topográfica sobre as correlações do termo co-seno β com os números digitais, as 72 amostras de solo e cana-de-açúcar foram separadas em 7 diferentes classes de orientação (Tabela 4.11 e 4.12).

TABELA 4.11

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA O SOLO SEGUNDO 7 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
N	13	0,2347	0,4039	0,2429	0,7352 ^{**}	0,4388	0,3253
NE	17	0,1889	0,4698	0,2770	0,6677 ^{**}	0,0634	-0,2113
E	5	0,2937	0,4768	0,3837	0,7629	0,4011	0,2269
S	9	0,8733 ^{**}	0,5908	0,2500	0,7914 ^{**}	0,9465 ^{**}	0,8926 ^{**}
SW	4	0,9410 [*]	0,7742	0,7215	-0,7825	0,9965 [*]	0,9832 [*]
W	6	0,1380	0,8979 [*]	0,4466	0,0564	0,7856	0,7986
NW	13	0,3937	0,5322	0,4442	-0,0601	0,3415	0,3230

NS: ** 0,01; * 0,05

TABELA 4.12

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR
SEGUNDO AS 7 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
N	5	-0,9518**	0,4203	-0,0773	-0,1037	-0,3985	-0,2225
E	4	-0,5102	-0,8192	-0,7230	-0,6968	-0,7641	-0,5115
SE	20	0,2591	0,1494	0,2063	-0,1500	0,0710	0,0264
E	10	0,2026	0,2427	0,2094	0,1706	0,6664*	0,6453*
SW	9	-0,1159	-0,0493	-0,0468	-0,0020	0,1597	0,1149
W	8	0,3560	0,7330*	0,1046	0,2947	0,6667	0,2802
NW	14	0,1267	-0,1463	0,1475	-0,0112	0,4833	0,4633

NS: ** 0,01; * 0,05

Assim como a declividade, a orientação das vertentes também determinam variações no coeficiente de correlação, ou seja, modificando-se a orientação da superfície a proporção da variação do número digital explicada pela variação do co-seno β se altera espectralmente, e de forma bastante aleatória. Uma análise mais consistente destas tabelas é inviável, devido o pequeno número de amostras por tratamento.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a frequência das amostras de solo e cana-de-açúcar segundo as classes de orientação.

Pela análise das Figuras 4.6 e 4.7 observa-se que o número de amostras segundo as classes de orientação não é a mesma para o solo e cana-de-açúcar. O solo apresenta o maior número de amostras nas classes N, NE e NW, ao passo que a cana-de-açúcar possui o maior número de amostras nas classes SE, S e NW. Verifica-se também que na classe SE não se tem nenhuma amostra para o solo, o mesmo se verifica para a cana-de-açúcar, na classe NE.

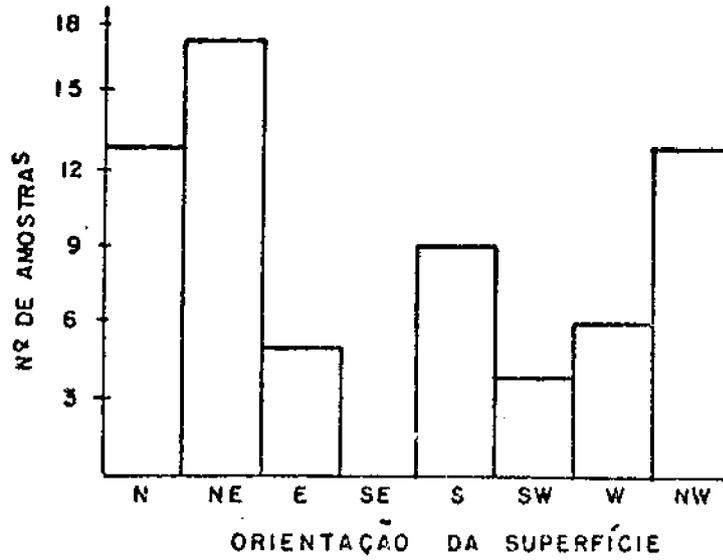


Fig. 4.6 - Frequência das amostras de solo segundo as classes de orientação.

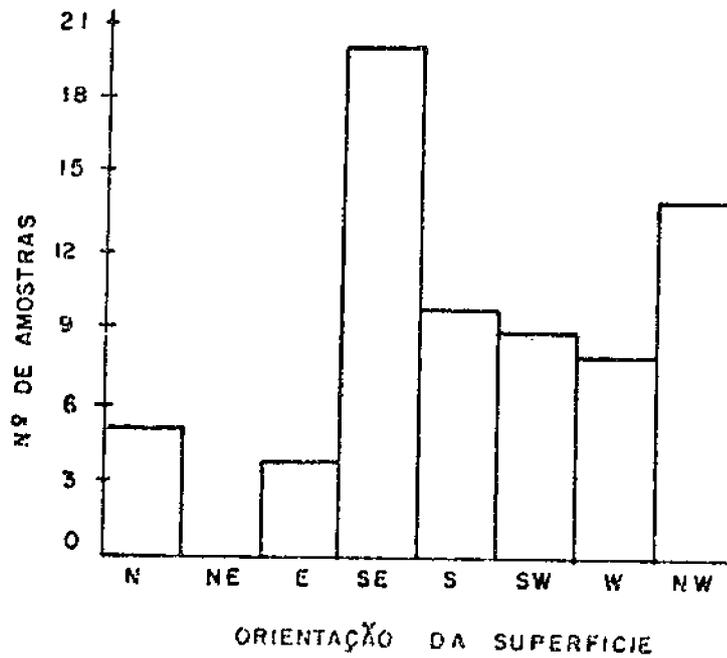


Fig. 4.7 - Frequência das amostras de cana-de-açúcar segundo as classes de orientação.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 estão localizadas as amostras de solo e cana-de-açúcar segundo as classes de orientação e inclinação da superfície.

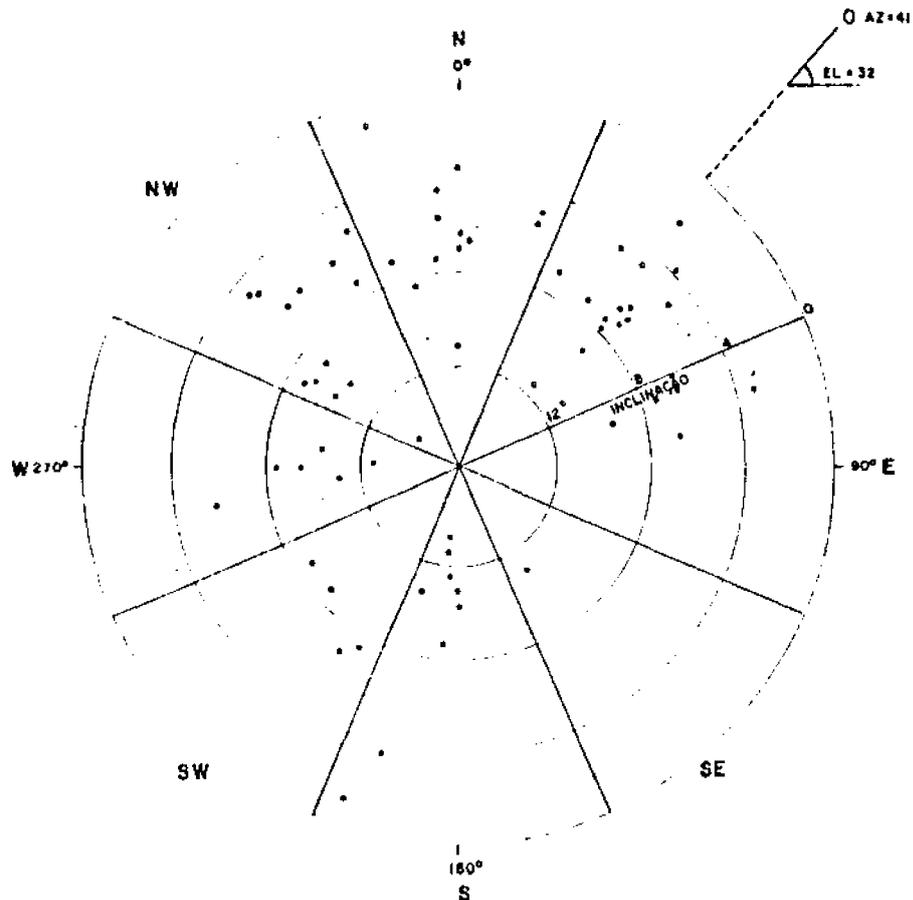


Fig. 4.8 - Localização das amostras de solo segundo a orientação e inclinação da superfície.

Estas figuras fornecem a distribuição das amostras de solo e cana-de-açúcar segundo a orientação e inclinação das vertentes. No caso do solo, verifica-se que o maior número de amostras estão localiza das nas inclinações de 4 - 8 graus e nas orientações de NE, N, NW e S. Para a cana-de-açúcar também o maior número de amostras estão localiza das na classe de 4 - 8 graus, porém as orientações onde aparecem a maior quantidade de amostras são SE, NW, S, SW e W.

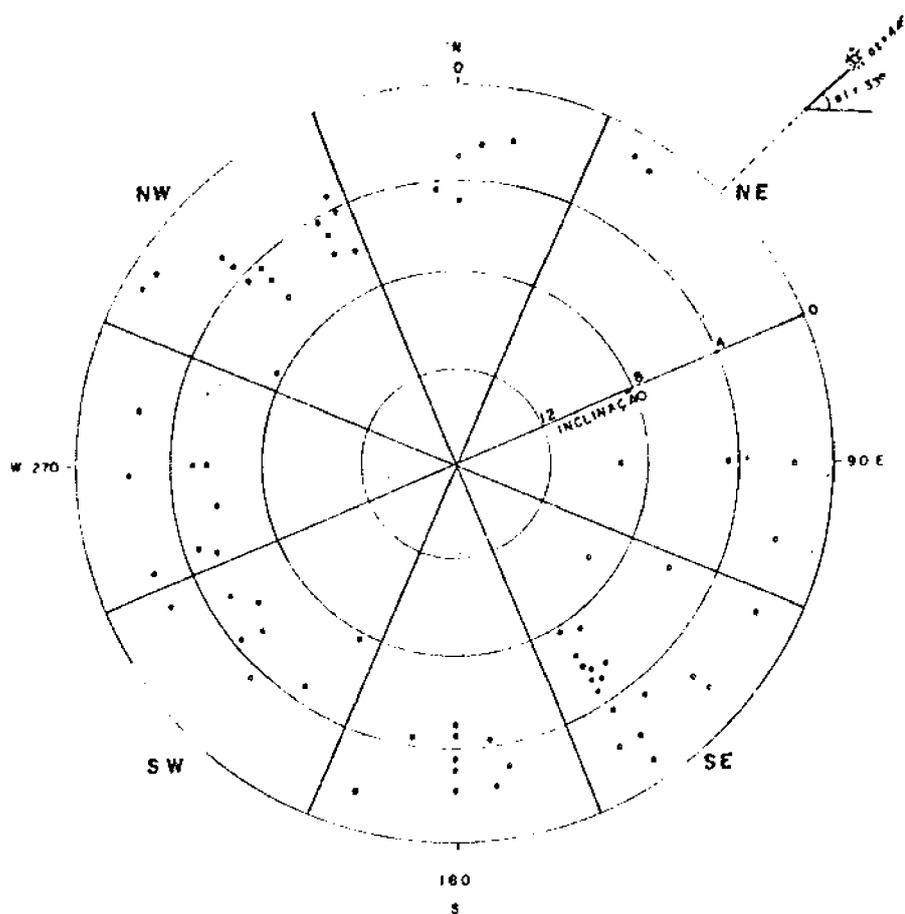


Fig. 4.9 - Localização das amostras de cana-de-açúcar segundo a orientação e inclinação da superfície.

Nas Tabelas 4.13 e 4.14, são apresentados os coeficientes de determinação para o solo e cana-de-açúcar.

TABELA 4.13

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA O SOLO
SEGUNDO 7 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	n	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
N	13	5,51	16,31	5,90	54,05	19,25	10,58
NE	17	3,57	22,07	7,67	44,58	0,40	4,46
E	5	8,62	22,73	14,72	58,20	16,09	5,15
S	9	76,26	34,90	6,25	62,63	89,58	79,67
SW	4	88,55	59,93	52,05	61,23	99,30	96,67
W	6	1,90	80,62	19,94	0,32	61,71	63,78
NW	13	15,50	28,32	19,73	3,61	11,66	10,43

TABELA 4.14

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR
SEGUNDO AS 7 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	N	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
N	5	90,59	17,66	0,60	1,07	15,88	4,95
E	4	26,03	67,11	52,27	48,55	58,33	26,16
SE	20	6,71	2,23	4,25	2,25	0,50	0,07
S	10	4,10	5,89	4,38	2,91	44,41	41,64
SW	9	1,34	0,24	0,22	0,00	2,55	1,32
W	8	12,67	53,73	1,09	8,68	44,45	7,85
NW	14	1,60	2,14	2,17	0,01	23,36	21,46

Pela análise da Tabela 4.13 obtida a partir dos dados de solo, pode-se em linhas gerais admitir-se que o efeito do co-seno β é muito mais pronunciado nas vertentes que se encontram com menor irradiância (SW, S e W). O que leva a concluir que os alvos colocados nestas orientações tem um comportamento anisotrópico mais acentuado do que os alvos que aparecem nas demais orientações.

Quando da análise espectral ou seja banda por banda, pode-se observar, por exemplo na banda 7, que as orientações que recebem menor irradiância aparecem com uma maior dependência do termo co-seno β ; em ordem decrescente de irradiância recebida tem-se (Tabela 4.2): NE, N, E, NW, W, S, SW, onde se verifica respectivamente os seguintes coeficiente de determinação: 4, 10, 5, 10, 63, 79, 96. Em linhas gerais o mesmo pode ser observado nas outras bandas.

Na Tabela 4.14, observam-se os coeficientes de determinação obtidos entre o co-seno β e os números digitais, da cana-de-açúcar onde se verifica que existe um comportamento totalmente aleatório, quanto as orientações e quanto as bandas. Esta aleatoriedade sugere que a cultura da cana-de-açúcar apresenta outros parâmetros tais como teor de umidade das folhas, orientação da folha, diferenças no vigor vegetativo, pequenas variações do tipo de solo, tratos culturais, etc. que exercem maior influência na resposta, do que os efeitos topográficos (Suits e Safir, 1972; Westin e Lemme, 1978). Entretanto, de forma alguma estes efeitos (topográficos) podem ser desprezados.

Na Tabela 4.15 e 4.16 pode-se verificar a média e o desvio padrão dos números digitais para o solo e cana-de-açúcar segundo as classes de orientação para as bandas do TM em estudo.

Analisando-se a Tabela 4.15 e a Tabela 4.2, verifica-se que nas orientações onde há uma maior irradiância, há também um maior valor do número digital em todas as bandas, o mesmo não acontece com a cana-de-açúcar (Tabela 4.16), porque esta apresenta outros fatores que exercem maior influência sobre ela.

TABELA 4.15

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS PARA O SOLO, SEGUNDO AS 7
CLASSES DE ORIENTAÇÃO NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

ORIENT.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
N	57,69	2,71	27,21	3,00	36,69	8,13	38,15	4,58	88,81	12,11	32,59	4,19
NE	58,50	1,94	27,19	1,40	34,59	3,01	39,89	4,25	96,96	7,18	35,69	3,84
E	55,85	1,24	25,25	0,94	30,55	1,94	42,40	2,27	91,15	4,70	31,85	1,87
S	54,47	2,06	24,30	1,32	32,31	3,94	28,56	2,45	70,08	9,12	25,64	4,79
SW	54,62	2,31	23,12	0,59	28,43	3,14	30,31	2,79	69,94	6,55	25,19	3,41
W	55,58	0,49	25,04	0,66	31,75	2,61	32,37	1,52	73,92	6,14	26,87	3,59
NW	54,31	2,39	24,67	1,38	32,08	3,40	34,12	4,70	74,52	8,08	26,48	3,56

TABELA 4.16

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS PARA A CANA-DE-AÇÚCAR, SEGUN
DO AS 7 CLASSES DE ORIENTAÇÃO NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

ORIENT.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
N	53,55	0,54	23,15	1,02	22,35	1,33	55,00	3,16	49,75	4,71	10,90	1,26
E	53,06	0,94	22,75	0,79	20,75	1,40	60,81	0,90	48,62	6,55	9,44	1,16
SE	53,03	1,26	23,22	1,19	22,41	2,29	55,81	4,91	48,01	3,82	10,14	1,32
S	52,95	0,87	22,03	0,78	20,50	2,12	55,10	6,07	44,18	4,95	8,48	1,25
SW	52,06	1,29	22,17	1,04	20,53	1,61	51,30	5,74	38,14	1,98	7,72	0,74
W	51,78	1,50	21,53	0,56	19,44	0,83	55,37	2,52	38,37	2,03	7,25	0,57
NW	52,70	1,64	22,55	0,67	21,91	1,05	51,63	3,35	45,29	4,30	9,93	1,16

Com intuito de aumentar o número de amostras por tratamento para se ter uma análise mais consistente, as amostras de solo e da cana-de-açúcar foram divididas em apenas 3 classes, em função da orientação das vertentes. As vertentes voltadas para o Sol (0°), as voltadas do lado oposto ao Sol (180°) e as vertentes intermediárias (90° e 270°).

Considerou-se vertentes voltadas para o Sol, aquelas cujos os azimutes encontravam-se compreendidos entre 359° - 89° (0°), as vertentes do lado oposto ao Sol as de azimutes entre 179° - 269° (180°) e as vertentes intermediárias, aquelas cujos os azimutes encontram-se respectivamente entre 89° - 179° (90°) e 269° - 359° (270°). Convém destacar que o azimute é contado a partir do norte e no sentido horário.

Nas Tabelas 4.17 e 4.18 pode-se observar as 3 classes de orientações com as médias e os desvios padrões dos números digitais para todas as bandas do TM em estudo, para o alvo solo e cana-de-açúcar.

TABELA 4.17

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS DO SOLO, EM 3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

ORIENT.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	\bar{X}	σ										
0°	58,12	2,17	27,26	2,17	34,98	6,11	46,65	3,65	94,24	8,06	34,54	3,72
180°	54,60	2,01	24,28	1,34	31,69	4,09	29,63	3,12	71,05	8,71	26,06	4,63
90° e 270°	55,07	2,25	24,83	1,28	32,21	3,08	33,33	4,00	76,12	8,88	27,62	4,21

TABELA 4.18

MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR,
EM 3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO NAS RESPECTIVAS BANDAS DO TM

ORIENT.	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	X	σ										
0°	53,37	0,65	22,83	1,00	22,08	1,36	56,33	1,08	50,17	4,65	10,65	1,30
180°	51,90	1,20	22,03	0,91	20,44	1,84	52,19	5,36	29,72	3,49	7,87	1,04
90° e 270°	52,95	1,30	22,71	1,06	21,63	1,97	54,80	5,55	46,08	5,01	9,58	1,46

Pela análise destas Tabelas (4.17 e 4.18), pode-se observar que as vertentes voltadas para o Sol (0°) são as que possuem os maiores valores dos números digitais em todas as bandas do TM, e as vertentes voltadas no sentido oposto ao Sol (180°) são as que apresentam os menores valores de números digitais, também em todas as bandas. As vertentes situadas em posições intermediárias (90° - 270°) apresentam valores intermediários entre os dois casos anteriores, (Egbert e Ulaby, 1972; Slater, 1980; Eliason et alii, 1981; Kollenkark et alii, 1982; Kowalik e Marsh, 1982; Stohr e West, 1985).

Para melhor se verificar o efeito topográfico sobre os números digitais, efetuou-se uma correlação linear simples entre o cosseno β e os números digitais de cada banda para as 3 classes de orientações, para o solo e cana-de-açúcar conforme Tabelas 4.19 e 4.20.

A partir da Tabela 4.19 chegou-se as seguintes conclusões: a) na classe 1 apenas a banda TM4 mostra-se dependente do efeito topográfico, com um nível de confiança de 99%; b) na classe 2 (vertentes voltadas no sentido oposto ao Sol), as bandas TM1, TM5 e TM7 mostraram ser dependentes do efeito topográfico com um nível de confiança de 99% e as

bandas TM2 e TM4 com um nível de confiança de 95%; c) na classe 3, as bandas TM2, TM3, TM5 e TM7 são dependentes do efeito topográfico podendo-se afirmar isto com uma confiança de 95%.

TABELA 4.19

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA O SOLO
SEGUNDO 3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	N	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0°	29	0,18061	0,21122	0,07191	0,51961**	0,19340	0,04171
180°	13	0,80397**	0,59865*	0,24997	0,58841*	0,92274**	0,85885**
90° e							
270°	26	0,18898	0,45019*	0,44725*	0,30831	0,44402*	0,33460*

N.S. * 0,05

** 0,01

TABELA 4.20

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR
SEGUNDO 3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	N	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0°	6	0,20377	0,51552	0,09846	0,15789	0,06198	0,37173
180°	18	0,08620	0,09236	0,00928	0,10145	0,48102*	0,28039
90° e							
270°	48	0,02269	0,28144*	0,28384*	0,12367	0,37328**	0,40913**

N.S. * 0,05

** 0,01

Pela análise desta tabela (4.20) verifica-se que na classe 1 (vertentes voltadas para o Sol) não existe um nível de confiança de 95% nenhum valor de correção significativa, ou seja, que realmente re presente a variação dos números digitais com o efeito topográfico. Isto talvez seja justificado pelo pequeno número de amostras desta classe. No que se refere a segunda classe (vertentes voltadas no sentido oposto ao Sol), somente a banda TM5 sofre influência do efeito topográfico a um nível de confiança de 95%.

As vertentes voltadas a 90° e 270° graus em relação ao Sol, verifica-se que nas bandas TM2 e TM3 existe dependência do efeito topográfico a um nível de confiança de 95%, já nas bandas TM5 e TM7 a um nível de confiança de 99%.

Com o intuito de se verificar qual a contribuição do efeito topográfico em cada banda nas diferentes classes, procurou-se analisar os coeficientes de determinação, para o solo e cana-de-açúcar conforme Tabela 4.21 e 4.22.

TABELA 4.21

COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA O SOLO SEGUNDO
3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0°	3,26	4,46	0,51	27,00	3,74	0,17
180°	64,64	35,84	6,25	24,62	85,14	73,76
90° e 270°	3,57	20,27	20,00	9,50	19,72	19,68

TABELA 4.22

COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO ($r^2 \times 100$) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR SEGUN
DO 3 CLASSES DE ORIENTAÇÃO

ORIENT.	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
0°	4,15	26,58	0,97	2,49	0,38	13,82
180°	0,74	0,85	0,00	1,02	23,14	7,86
90° e 270°	0,05	7,92	8,06	1,53	13,93	16,74

Pela análise da Tabela 4.21, pode-se verificar imediatamente que as vertentes voltadas no sentido oposto ao Sol (180°) são as que apresentam maior dependência do efeito topográfico, em todas as bandas espectrais, seguidas das vertentes com orientações 90° e 270°. As vertentes voltadas para o Sol são as que apresentam menor dependência do efeito topográfico, em quase todas as bandas, com exceção da banda TM4, (Kowalik e Marsh, 1982).

Conforme a Tabela 4.22 onde são mostrados os coeficientes de determinação para a cana-de-açúcar nas respectivas bandas e nas diferentes classes de orientação pode-se observar que, nenhuma classe de orientação e nenhuma banda possui um comportamento que justifique integralmente a influência do efeito do co-seno β sobre os números digitais, isto evidencia o fato de que uma cobertura vegetal mascara o efeito topográfico em qualquer que seja a orientação da superfície e intervalos espectral, porque existe outras variáveis agrônomicas tais como orientação das fileiras, espaçamento, biomassa, etc, que exercem maior influência no comportamento espectral da área do que as condições de iluminação.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sensoriamento remoto a nível orbital é altamente complexo em função de uma série de fatores que causam variabilidade no sinal (resposta) dos alvos da superfície terrestre. Neste trabalho, procurou-se entender melhor os efeitos de iluminação (topografia x fonte), suas variações e seus efeitos nos dados digitais do sensor TM/LANDSAT 5, no entanto, as considerações a seguir são baseadas em um modelo simplificado da equação básica para o cálculo da irradiância.

- A irradiância em uma superfície varia segundo a época do ano, latitude, horário e condições topográficas (orientação e inclinação da superfície). Para uma mesma latitude, e um mesmo horário, os fatores que levam a mudança da irradiância na superfície são: a época do ano e as condições topográficas.
- Para uma superfície horizontal (plana), e para o horário de passagem do satélite (9:45), os valores de irradiância possuem um mínimo no mês de junho e um máximo no mês de dezembro. Esta variação se torna tanto maior quanto maior for a latitude, considerando-se as mesmas condições topográficas.
- O co-seno β é um parâmetro que exprime o efeito combinado do Sol (azimute e elevação solar) e topografia (orientação e inclinação da superfície em que se encontra o alvo). Portanto, quanto maior o valor do co-seno β , maior será a irradiância na superfície.
- A geometria de iluminação da cena afeta a quantidade de energia total (integrada em todos os comprimentos de onda) disponível na superfície, uma vez que ao se variar a declividade e a orientação da superfície do alvo, está sendo alterado o ângulo de incidência da radiação eletromagnética.

- Para os dados em estudo, os quais foram obtidos no mês de maio, verifica-se que os valores máximos de irradiância ocorrem quando as vertentes estão voltadas para nordeste (NE) e os valores mínimos ocorrem para sudoeste (SW), tornando-se este efeito tanto mais acentuado quanto maior for a inclinação da superfície. Para vertentes localizadas entre Leste (E) - sudeste (SE) e oeste (W) - noroeste (NW) praticamente não existe variação da irradiância na superfície em função da inclinação da mesma.
- O solo apresenta valores de correlação entre o co-seno β e os números digitais mais altos do que a cana-de-açúcar em todas as faixas espectrais estudadas, e estas correlações variam espectralmente. Isto sugere que a cana-de-açúcar comporta-se como um alvo mais lambertiano do que o solo, ou seja, o solo é mais dependente do co-seno β .
- A declividade e a orientação das vertentes tem considerável efeito sobre a resposta espectral em todas as bandas, tanto para o solo quanto para a cana-de-açúcar, entretanto a faixa do infravermelho médio (TM 5 e TM 7) é mais afetada do que a faixa do visível e infravermelho próximo.
- Nas superfícies com inclinações onde temos uma maior irradiância vamos ter um número digital maior, em todas as bandas do TM em estudo, tanto para o solo quanto para a cana-de-açúcar.
- Modificando-se a orientação da superfície a proporção da variação do número digital explicada pela variação do co-seno β se altera espectralmente.
- O efeito do co-seno β é mais pronunciado nas vertentes onde temos uma menor irradiância.
- Nas orientações onde temos uma maior irradiância vamos ter um número digital maior para o solo, em todas as bandas do TM. Já

a cana-de-açúcar apresenta um comportamento um tanto aleatório ao analisarmos o efeito da orientação da superfície sobre os números digitais, tal comportamento ocorre em qualquer uma das bandas, isto sugere, que a cana-de-açúcar apresenta outros parâmetros tais como teor de umidade das folhas, orientação das folhas, diferenças no vigor vegetativo, pequena variação no tipo do solo, tratos culturais, etc., que exercem maior influência na resposta mascarando o efeito topográfico.

- Outra análise feita no presente trabalho, para os dois alvos, foi dividir-se as vertentes em apenas 3 classes de orientações; vertentes voltadas para o Sol (0°), as voltadas no sentido oposto ao Sol (180°) e as vertentes intermediárias (90° - 270°), onde concluiu-se o seguinte: a) tanto para o solo quanto para a cana-de-açúcar as vertentes voltadas para o Sol (0°) são as que apresentam os maiores números digitais; b) para o solo, as vertentes voltadas para o lado oposto ao Sol (180°) são as que apresentam a maior dependência do co-seno β em todas as bandas do TM, sendo este efeito mais acentuado nas bandas 5 e 7. O mesmo não se verifica para a cana-de-açúcar, apresentando esta um comportamento totalmente aleatório.

Os resultados apresentados evidenciam a importância de se considerar os aspectos topográficos no processo de interpretação de dados de sensoriamento remoto. Estes entretanto de forma alguma esgotam o assunto, novos testes deverão ser feitos para se alcançar uma melhor compreensão dos efeitos topográficos. Estes efeitos somente podem ser corretamente avaliados se outros parâmetros tais como: geometria do dossel (altura, forma, largura, densidade), configuração do plantio - linhas (largura, direção), dimensão e forma da folha, posição da folha (espassadas ou agrupadas) orientação e inclinação da folha. Índice de área folhar, Índice de ramos, ângulo de curvatura da folha, volume de massa, efeito do substrato sobre a cobertura, efeito do ciclo fenológico, microestrutura, umidade, condições atmosféricas, etc., são também avaliados.

Tendo em vista a complementação dos estudos desenvolvidos nesta pesquisa, torna-se necessário determinar com maior clareza a influência do efeito topográfico sobre o comportamento espectral dos alvos da superfície terrestre. Portanto, com a experiência adquirida através da realização deste trabalho, sugere-se a continuação desses estudos considerando-se algumas recomendações a seguir:

- estender os estudos entre o efeito topográfico e os números digitais para outros alvos, além dos aqui considerados, com um maior número de amostras por tratamento e em outras épocas do ano;
- realizar estudos de obtenção de números digitais em situações bem controladas e se possível acompanhadas de medidas radiométricas de campo;
- estabelecer modelos matemáticos que tentem explicar as variações dos números digitais em função das posições topográficas x iluminação.

Os aspectos relacionados a interação topográfica versus radiação eletromagnética crescem de importância na medida que novos sistemas de sensoriamento remoto orbital incorporam o conceito de visada lateral (SPOT) e que este campo de pesquisa apresenta um crescimento exponencial nos últimos anos, como o atesta a extensa bibliografia existente sobre o assunto, especialmente considerando o efeito de visada. Este representa um campo profícuo de pesquisa em sensoriamento remoto, cujos resultados podem ampliar o campo de aplicação desta tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H.; BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. Soil Science, 114(6):477-485, 1972.
- ALMEIDA, F.F.M. Boletim do Instituto Geofísico e geológico do Estado de São Paulo, Nº 41, p. 167-263, 1961.
- ANGSTROM, A. The albedo of various surface of ground. Geografiska Annaler, 7 (sf):323-342, 1925.
- ASHLEY, M.D.; RFA, J. Seasonal vegetation differences from ERTS imagery. Photogrammetric Engineering, 41(6):713-719, 1975.
- 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 e avaliação de áreas de cana-de-açúcar. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-1228-NTE/116).
- BARTLETT, D.S.; JOHNSON, R.W. Assessing impacts of off-nadir observation on remote sensing of vegetation: use of the suits model. International Journal of Remote Sensing, 7(2):247-264, 1986.
- BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOFF, S.; JONANNSEN, C.J.; ZACHARY, A. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. Proceedings Indiana Academy of Science, 79:413-422, 1970.
- BECK, R.H.; ROBINSON, B.F.; MCFEE, W.H.; PETERSON, J.B. Spectral characteristics of soils related to the interaction of soil moisture, organic carbonic and clay content. West Lafayette, IN, Purdue University, LARS, 1976.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. Soil Science, 100(sf):130-138, 1965.
- BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; STACK, K.; JONES, W.T. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. Washington, D.C., NASA Langley Research Center. June 1986 (NASARP-1139).
- BRENNAN, B.; BANDEEN, W.R. Anisotropic reflectance characteristics of natural earth surfaces. Applied Optics, 21(2):405-412, Feb. 1970.

- BUNNIK, N.J.J.; VERHOEF, W. The spectral directional reflectance of agricultural crops. Measurements on a wheat and grass canopy for some stage of growth. NIWARS Publication N^o 23, 1974.
- BURROUGHS. Burroughs Advanced Statistical Inquiry System (BASIS); user's manual. Detroit, MI, 1975.
- CHANGE, J.E.; LEMASTER, E.W. Plant canopy light absorption model with applications to wheat. Applied Optics, 17(16):2629-2636, Aug. 1978.
- COLWELL, J.E. Grass canopy bidirectional spectral reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT, 9., MI, Apr. 15-19, 1974. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1974.
- _____. Vegetation canopy reflectance. Remote Sensing of Environment, 3(3):175-183, 1974b.
- COULSON, K.L.; BOURICIUS, G.M.; GRAY, E.L. Optical reflection properties of natural surfaces. Journal of Geophysical Research, 70(18):4601-4611, Sept. 1965.
- COULSON, K.L. Effects of reflection properties of natural surfaces in aerial reconnaissance. Applied Optics, 5(6):905-918, June 1966.
- CRANE, R.B. Preprocessing techniques to reduce atmospheric and sensor variability in multispectral scanner data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7., Ann Arbor, MI, May 17-21, 1971. Proceedings. V. 2, p. 1345-1355.
- CROWN, P.H.; PAWLUK, S. Spectral signatures from selected soils in the Edmond-Vegreville area. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2., Ottawa, ON, 1974. Proceedings. Ottawa, University of Guelph, V. 1, p. 450-462, 1974.
- CURRAN, P.J. Problems in the remote sensing of vegetation canopies for biomass estimation. In; FULLER, R.M., ed. Ecological Mapping from Ground, air and space. Cambridge, MA, Institute of Terrestrial Ecology, 1981. 84 p.

- DEERING, D.W. on nadir viewing effects on spectral assessment of green biomass. In: Earth Survey Appl. Res. Report - 1979, edited by L. Carpenter. p. 8-20 to 8-24, 1980 (NASA TM 80642).
- DUGGIN, M.J. Likely effects of solar elevation on the quantifications of changes in vegetation with maturity using sequential Landsat imagery. Applied Optics, 16(3):521-523, Mar. 1977.
- _____ The effect of angular factors on popularly used indicators of vegetative visor. Proceedings of the Forty-Sieth Annual Meeting of ACSM - ASP, St. Louis, 9:14, p. 239, 1980.
- EATON, F.D.; DIRMHIRN, I. Reflected irradiance indicatrices of natural surfaces and their effect on albedo. Applied Optics, 18(7):944-1008, Apr. 1979.
- EGBERT, D.D.; ULABY, F.T. Effect of angles on reflectivity. Photogrammetry Engineering, 38(6):556-564, 1972.
- ELIASON, P.T.; SODERBLOM, L.A.; CHAVEZ, P.S. Extration of topographic and spectral albedo information from multispectral images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 47(11): 1571-1579, 1981.
- GAUSMAN, H.; CARDENAS, R.; GELBERMANN, A.H. Plant size, etc., and aerial films. Photogrammetric Engineering, 40(2):61-67, Jan. 1974.
- GENERAL ELETRIC (GE) Image-100 - Interative multispectral image analises system: user's manual. Daytona, FL, 1975.
- GOETZ, A.F.H.; BILLINGSLEY, F.C.; GILLESPIE, A.R.; ABRAMS, M.J.; SQUIRES, R.L.; SHOEMAKER, E.M.; LUCCHITTA, I.; ELSTON, D.P. Application of ERTS images processing to regional geological problems and geologic mapping in Northern Arizona. (JPL Technical Report 32 - 1597) 188 p. Pasadena, CA, NASA, 1975.
- HARALICK, R.M.; SHANMUGAN, K.S. Combined spectral and spatial processing of ERTS imagery data. In: SYMPOSIUM ON SIGNIFICANT RESULTS OBTAINED FROM THE EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE, 1., Maryland, Mar. 1973. Proceedings. V. 1, Sec. B. 1219-1228.

- HILWIG, F.W.; GOOSEN, D.; KATSIERIS, D. Preliminary results of the interpretation of ERTS-1 imagery for a soil survey of the Merida region, Spain. ITC Journal, (3):289-312, 1974.
- HOFFER, R.M.; JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L. ed. Remote Sensing in Ecology. Athens, GA., University of Georgia Press, 1969, 244 p.
- HOLBEN, B.N.; JUSTICE, C.O. Evaluation and modelling of the topographic effect on the spectral response from nadir pointing sensors. Washington, D.C., NASA, 1979 (NASA TM 80305).
- _____ An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. International Journal of Remote Sensing, 2(2):115-133, 1981.
- HUGLI, H.; FREI, W. Understanding anisotropic reflectance in mountainous terrain. Photogrammetry Engineering, 49(5):671-685, 1983.
- JACKSON, R.D.; PINTER JR., P.J.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configurations, sun elevation, and azimuth angle. Applied Optics, 16(22):3730-3732, Nov. 1979a.
- KIMES, D.S.; SMITH, J.A. Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies. Applied Optics, 19(16):2801-2811, Aug. 1980.
- KIMES, D.S.; SMITH, J.A.; RANSON, K.J. Vegetation reflectance as a function of solar zenith angle. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46():1563-1573, 1980a.
- KIMES, D.S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. Applied Optics, 22(9):1364-1372, May 1983.
- KOEPKE, P.; KRIEBEL, K.T. Influence of measured reflection properties of vegetated surfaces on atmospheric radiance and its polarisation. Applied Optics, 17(2):260-264, Jan. 1978.
- KOLLENKARK, J.C.; VANDERBILT, C.C. DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance Applied Optics, 21(7):1179-1184, Apr. 1982.

- KOWALIK, W.S.; MARSH, S.E. A relation between Landsat digital numbers, surface reflectance and the cosine of the solar zenith angle. Remote Sensing of Environment, 12(1):39-55, 1982.
- KOWALIK, W.S.; LYON, R.J.P.; SWITZER, P. The effects additive radiance terms on ratios of Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49(5):659-670, 1983.
- KRIEBEL, K.T. On the variability of the reflected radiation field due to differing distributions of the irradiation. Remote Sensing of Environment, 4:256, 1976.
- _____ Average variability of the radiation reflected by vegetated surfaces due to differing irradiances. Remote Sensing of Environment, 7(1):81-83, 1978a.
- _____ Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces. Applied Optics, 17(2):253-259, Jan. 1978b.
- MYERS, V.I.; ALLEN, W.A. Electrooptical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. Applied Optics, 7(9):1919-1838, 1968.
- NASA. Landsat data user notes. Washington, D.C., USGS/EDC, 1984.
- NOVO, E.M.L.M. Efeito das condições de iluminação da cena sobre técnicas de realce digital de imagens MSS/LANDSAT. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-2644-PRE/262).
- _____ Avaliação dos efeitos de variação sazonal do ângulo de elevação solar e azimute sobre processos de filtragem digital e classificação temática do relevo. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-2858-RPE/440).
- OBUKHOV, A.I.; ORLOV, D.S. Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigations. Soviet Soil Science, 1:174-184, 1964.
- OTT, W. PFEIFFER, B.; QUIEL, F. Directional reflectance properties determined by analysis of airborne multispectral scanner data and atmospheric correction. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, Avignon, Sept., 8-11, 1981. Spectral Signatures of Effects in Remote Sensing. Montfavet, INRA/CNES, 1981, p. 521-530.

- PETERSON, J.B.; ROBINSON, B.F.; BECK, R.H. Predictability of change in soil reflectance on Wetting. In: ANNUAL SYMPOSIUM MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 5., West Lafayette, 1979. Proceedings. West Lafayette, IN, Purdue University, 1980, p. 264-268.
- PINTER JR., P.J.; JACKSON, R.D.; IDS0, S.B.; REGINATO, R.J. Diurnal patterns of wheat spectral reflectance. IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers, 21:156-163, 1983.
- SLATER, P.N. Remote Sensing: optics and optical systems. London, Addison Wesley, 1980.
- SMITH, J.A.; OLIVER, R.E. Plant canopy models for simulations composite scene spectroradiance in the 0,4 to 1,95 micrometer region. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, MI. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1972, p. 1333-1353.
- SMITH, J.A.; BERRY, J.K.; HEIMES, F. Signature extension for sun angle. Vol 1. Final Report, Earth Observations Division, NASA, JSCF, NAS-14467, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1975.
- STOHR, C.J.; WEST, T.R. Terrain and look angle effects upon multispectral scanner response. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(1-4):229-234, 1985.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; BIEHL, I.I.; ROBINSON, B.F. Atlas of soil reflectance properties. West Lafayette, IN. Purdue University, Agricultural Experiment Station, 1980, 75 p. (Research Bulletin 962).
- SUITS, G.H.; SAFIR, G.R. Verification of a reflectance model for mature corn with applications to corn blight detection. Remote Sensing Environment, 2(3):183-192, Oct. 1972.
- SUITS, G.H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetative canopies. Remote Sensing of Environment, 2(3):175-182, Oct. 1972b.

- VANDERBILT, V.C.; KOLLENKARK, J.C.; BIENL, L.L.; ROBINSON, B.F.;
BAUER, M.E.; RANSON, K.J. Diurnal changes in reflectance factor
due to sun row direction interaction. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM
ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, Avignon, Sept.
8-11, 1981. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing.
Montfavet, INRA/CNES, 1981, p. 499-508.
- VINCENT, R.K. Spectral ratio imaging methods for geological remote
sensing from aircraft and satellites. In: SYMPOSIUM ON MANAGEMENT
AND UTILIZATION OF REMOTELY SENSED DATA. Proceedings. AMS, 1973.
p. 377-397.
- WESTIN, F.C.; LEMME, G.D. Landsat spectral signatures studies with
soil associations and vegetation. Photogrammetric Engineering
and Remote Sensing, 44(3):315-325, 1978.
- WIEGAND, C.L.; GAUSMANN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMANN, A.H.;
RICHARDSON, A.J. Vegetation density as deduced from ERTS - 1 MSS
response. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE - 1 Symposium
3., Washington, D.C., Proceedings. V. 1, p. 93-116, Dec. 1973.
- WIGTON, W.H.; STFEN, D.H.V. Crops identification and acreage
measurements utilizing ERTS imagery. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY
SATELLITE - 1 Symposium, 3., Washington, D.C. Proceedings.
V. 1, sec. A, p. 87-92, 1973.
- YAO, C.L. Estudos de correção atmosférica/Processamentos de imagens
no I-100. São José dos Campos, INPE, 1983 (INPE-2870-RPE/442).

APÊNDICE A

CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS DAS ÁREAS AMOSTRADAS
COM SOLO E CANA-DE-AÇÚCAR

TABELA A.1

CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS DAS ÁREAS AMOSTRADAS COM SOLO

AMOSTRA	INCLINAÇÃO (graus)	ORIENTAÇÃO (graus)	CO-SENO β
1	7,12	47	0,635
2	11,30	60	0,682
3	7,59	47	0,641
4	3,57	52	0,585
5	3,43	72	0,577
6	7,59	70	0,628
7	7,12	48	0,634
8	7,12	48	0,634
9	6,84	47	0,631
10	5,19	37	0,608
11	6,20	350	0,588
12	7,59	37	0,641
13	9,64	300	0,498
14	5,35	50	0,610
15	8,74	293	0,487
16	9,78	270	0,431
17	8,53	270	0,446
18	9,46	187	0,469
19	6,70	220	0,433
20	7,76	205	0,421
21	10,00	180	0,417
22	5,44	307	0,525
23	5,71	308	0,526
24	6,78	311	0,529
25	6,78	0	0,605
26	10,83	0	0,644
27	7,43	25	0,634
28	1,59	200	0,512
29	1,59	343	0,546
30	0,00	-	0,534
31	0,00	-	0,534
32	0,00	-	0,534
33	0,00	-	0,534
34	5,71	260	0,466
35	10,88	150	0,475
36	10,00	305	0,509
37	9,46	295	0,487
38	5,71	320	0,544
39	13,13	194	0,350
40	11,31	184	0,393
41	5,71	20	0,610

(continua)

Tabela A.1 - Conclusão.

AMOSTRA	INCLINAÇÃO (graus)	ORIENTAÇÃO (graus)	CO-SENO β
42	5,48	20	0,607
43	9,46	70	0,650
44	6,58	70	0,616
45	6,58	82	0,605
46	7,59	50	0,640
47	2,29	40	0,568
48	4,40	45	0,598
49	4,57	350	0,571
50	14,04	295	0,460
51	9,46	50	0,665
52	3,81	0	0,575
53	18,43	58	0,764
54	11,31	37	0,690
55	7,59	353	0,604
56	7,76	335	0,575
57	6,71	265	0,459
58	8,53	343	0,594
59	8,75	230	0,401
60	11,31	200	0,370
61	12,80	273	0,404
62	5,49	336	0,565
63	7,50	0	0,613
64	7,12	5	0,615
65	10,30	277	0,440
66	7,59	215	0,419
67	3,81	197	0,483
68	8,75	305	0,514
69	7,12	340	0,580
70	5,71	328	0,556
71	13,13	193	0,352
72	10,88	180	0,406

TABELA A.2

CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS DAS ÁREAS AMOSTRADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR

AMOSTRA	INCLINAÇÃO (graus)	ORIENTAÇÃO (graus)	CO-SENO β
1	3,43	315	0,554
2	3,27	0	0,588
3	2,48	150	0,544
4	5,71	150	0,529
5	8,53	90	0,635
6	4,08	320	0,559
7	5,04	320	0,560
8	5,19	225	0,477
9	5,04	270	0,502
10	6,11	330	0,576
11	2,29	180	0,530
12	1,84	90	0,573
13	1,63	30	0,577
14	3,01	180	0,523
15	4,39	250	0,496
16	3,81	140	0,548
17	1,91	115	0,563
18	1,68	195	0,533
19	3,58	315	0,554
20	2,49	10	0,584
21	2,60	170	0,532
22	1,59	135	0,554
23	1,91	100	0,570
24	2,86	165	0,533
25	5,71	150	0,529
26	4,76	150	0,534
27	5,71	140	0,544
28	8,53	120	0,579
29	5,71	330	0,575
30	4,76	195	0,493
31	3,43	280	0,526
32	1,36	25	0,573
33	3,34	5	0,591
34	1,43	300	0,549
35	4,08	330	0,569
36	5,44	150	0,531
37	7,76	150	0,519
38	5,71	150	0,529
39	7,12	140	0,540
40	2,29	135	0,554
41	2,04	155	0,544

(continua)

Tabela A.2 - Conclusão.

AMOSTRA	INCLINAÇÃO (graus)	ORIENTAÇÃO (graus)	CO-SENO β
42	3,58	150	0,540
43	4,51	320	0,560
44	4,29	355	0,594
45	4,40	0	0,599
46	3,81	330	0,568
47	4,76	320	0,559
48	5,71	320	0,560
49	4,40	320	0,559
50	5,19	233	0,478
51	5,35	208	0,477
52	1,55	310	0,553
53	3,57	180	0,516
54	4,76	180	0,503
55	1,43	135	0,554
56	4,08	170	0,519
57	4,08	90	0,595
58	2,86	245	0,515
59	2,86	250	0,516
60	2,38	265	0,528
61	7,76	295	0,512
62	5,71	230	0,469
63	3,81	215	0,499
64	7,59	205	0,446
65	8,36	205	0,434
66	4,76	248	0,489
67	5,35	270	0,498
68	5,71	115	0,579
69	5,35	140	0,544
70	4,29	180	0,508
71	4,51	235	0,489
72	5,71	260	0,485

APÊNDICE B

NÚMEROS DIGITAIS OBTIDOS DO SOLO E
CANA-DE-AÇÚCAR

TABELA B.1

NÚMEROS DIGITAIS OBTIDOS DO SOLO

AMOSTRA	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
1	61,00	29,00	37,00	44,00	105,00	38,25
2	60,75	29,25	39,50	45,50	109,25	39,25
3	60,50	29,50	40,25	44,50	107,75	39,25
4	56,00	25,50	29,50	41,50	87,75	30,75
5	55,50	25,00	30,00	40,50	90,50	32,00
6	58,00	27,00	33,75	43,25	98,25	34,75
7	58,25	27,25	35,00	39,25	102,25	38,75
8	58,00	26,75	33,50	36,25	98,00	37,50
9	58,25	26,50	34,00	36,25	99,00	38,75
10	59,00	26,75	33,50	35,25	100,25	37,50
11	59,00	27,00	35,00	37,50	101,00	39,25
12	59,00	26,50	33,75	43,50	92,50	33,50
13	52,25	23,25	25,25	36,50	77,50	26,25
14	55,25	25,25	30,75	37,00	82,00	28,00
15	55,25	24,75	30,25	35,75	82,00	31,00
16	55,75	24,75	30,50	31,50	74,25	26,25
17	56,50	25,25	31,00	31,75	70,00	25,50
18	55,25	24,00	28,00	31,25	73,50	25,75
19	56,25	23,25	29,50	29,25	76,75	29,00
20	56,00	23,50	28,25	30,00	71,00	25,00
21	53,75	23,00	29,00	20,25	71,75	26,25
22	55,50	24,75	31,25	36,50	78,00	28,50
23	55,75	25,50	30,50	35,50	75,75	26,50
24	57,50	26,75	33,00	37,75	78,75	27,00
25	58,25	27,00	34,00	41,50	90,00	33,75
26	56,75	27,25	34,25	42,00	91,00	33,50
27	58,50	27,25	34,75	41,00	91,50	32,75
28	59,00	26,25	35,00	31,00	88,00	35,25
29	57,75	25,25	35,00	31,50	86,50	34,00
30	57,75	28,25	35,50	36,25	74,75	25,25
31	56,75	26,50	32,00	35,75	75,75	26,25
32	57,50	27,75	35,50	37,25	79,25	26,00
33	56,75	27,50	34,75	37,50	80,00	28,25
34	55,50	26,00	35,50	31,00	80,00	32,00
35	55,00	25,75	34,75	29,00	83,75	31,75
36	55,75	25,75	36,25	34,25	86,25	32,00
37	52,25	23,75	34,75	27,75	65,50	22,75
38	53,25	24,50	35,75	29,25	59,75	25,75
39	52,50	23,75	31,50	25,00	64,25	22,50
40	54,00	24,25	34,75	27,99	62,50	21,00
41	63,00	34,50	56,60	44,50	110,00	37,75

(continua)

Tabela B.1 - Conclusão.

AMOSTRA	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
42	60,25	32,25	52,00	42,00	107,50	37,25
43	55,50	25,50	30,50	44,50	92,00	32,00
44	55,50	25,75	30,00	44,25	89,75	29,75
45	54,75	24,50	28,50	39,50	85,25	30,75
46	59,00	27,00	35,00	37,75	101,75	38,50
47	57,50	26,50	34,00	32,50	96,50	38,50
48	56,75	25,00	31,75	34,75	95,50	36,25
49	57,75	26,75	31,25	37,50	75,25	27,72
50	52,00	22,50	26,25	39,75	60,00	19,75
51	62,75	29,50	39,25	38,25	101,25	38,50
52	56,75	25,25	29,25	36,50	77,50	27,00
53	56,50	27,25	32,50	45,00	89,50	29,75
54	57,50	27,50	33,50	45,50	91,50	31,00
55	56,50	26,00	34,00	37,75	86,25	32,50
56	56,75	25,75	31,50	40,25	78,25	27,00
57	55,25	25,00	29,25	35,25	76,00	26,50
58	55,75	24,50	30,25	33,00	75,00	26,50
59	51,25	22,25	24,25	34,25	61,00	20,75
60	52,75	22,25	26,25	28,25	62,75	23,00
61	55,25	24,00	29,75	32,75	63,75	21,50
62	57,50	26,75	33,00	36,00	84,00	30,75
63	56,75	27,25	34,25	40,75	88,75	33,00
64	60,00	27,00	34,00	42,00	93,50	33,50
65	55,25	25,25	34,50	32,00	79,50	29,50
66	55,00	23,50	31,75	27,75	71,00	26,00
67	55,00	25,25	35,75	29,25	79,50	31,50
68	51,75	23,75	34,25	27,75	65,50	23,00
69	51,50	23,75	37,25	29,50	72,50	28,00
70	50,50	23,00	35,00	26,50	67,50	24,00
71	52,50	24,00	32,50	25,00	60,50	22,00
72	55,50	26,00	38,00	31,00	68,00	23,50

TABELA B.2

NÚMEROS DIGITAIS OBTIDOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

AMOSTRA	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
1	54,75	22,75	23,25	47,75	47,25	10,25
2	54,00	23,50	22,75	56,75	54,00	12,00
3	53,00	24,25	22,50	59,25	53,75	10,50
4	55,75	22,25	21,25	55,50	46,00	10,50
5	52,75	22,00	19,75	60,25	44,00	9,00
6	53,50	23,50	22,00	57,50	45,75	9,50
7	54,50	21,25	21,00	51,25	41,50	9,00
8	54,50	21,25	18,75	55,50	36,35	7,00
9	53,75	21,00	19,00	56,50	38,25	6,75
10	53,75	22,25	20,25	53,50	41,50	9,00
11	54,00	23,00	22,00	52,75	50,00	10,00
12	54,25	23,75	22,50	61,00	54,00	11,00
13	53,25	22,25	23,00	56,00	53,25	10,50
14	53,75	22,25	20,00	59,75	46,00	8,50
15	53,25	20,75	20,50	53,75	37,00	7,75
16	53,25	22,25	20,75	57,50	45,50	8,75
17	53,25	23,00	22,50	62,75	53,50	10,00
18	52,25	21,00	19,25	53,00	44,75	9,25
19	53,75	22,75	23,50	51,25	49,50	11,25
20	54,00	23,00	23,25	54,50	54,00	11,75
21	53,00	23,00	22,00	55,00	53,50	9,75
22	53,75	24,25	22,50	55,75	54,00	10,75
23	53,25	23,00	21,25	62,00	54,50	9,50
24	53,25	22,00	20,50	63,75	45,75	9,00
25	52,75	23,00	22,00	57,75	46,50	9,25
26	53,25	24,00	21,50	57,75	51,00	10,00
27	54,25	22,50	21,75	55,25	46,00	10,00
28	52,00	21,75	21,00	58,75	47,75	8,75
29	53,50	23,50	22,25	52,25	56,50	13,00
30	53,75	21,50	18,75	57,00	42,25	7,25
31	53,25	21,75	18,75	60,25	42,75	7,75
32	52,50	22,00	20,75	56,75	45,25	9,25
33	53,75	21,50	20,00	57,75	43,40	9,00
34	54,25	22,50	20,00	57,75	46,50	9,00
35	54,25	22,50	23,00	49,00	45,75	10,25
36	51,75	23,00	22,50	55,00	46,25	10,00
37	51,00	22,00	21,50	55,00	46,50	10,50
38	53,00	24,00	22,00	57,75	46,75	8,75
39	51,50	23,00	22,25	57,00	48,25	10,25
40	52,75	23,25	23,25	57,25	53,75	11,50
41	51,75	23,75	23,75	52,75	51,00	12,00

(continua)

Tabela B.2 - Conclusão.

AMOSTRA	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
42	51,75	22,50	21,00	59,75	45,25	9,25
43	52,75	22,75	22,50	51,00	44,75	10,00
44	53,25	23,50	23,00	49,75	46,25	10,25
45	52,75	24,25	22,75	56,25	51,00	11,50
46	51,50	22,50	22,25	49,50	41,50	9,50
47	51,50	23,00	22,00	52,75	43,00	9,25
48	51,75	21,75	21,75	47,25	45,50	10,75
49	50,25	21,75	21,00	50,00	46,50	9,75
50	50,00	20,50	19,50	55,00	36,50	7,50
51	50,75	21,50	18,75	57,00	40,00	7,25
52	49,50	22,00	20,25	56,00	40,25	8,50
53	53,00	21,00	19,75	54,75	38,50	7,00
54	51,00	21,50	17,75	59,00	37,50	6,75
55	52,25	22,00	19,25	61,25	41,00	7,75
56	52,75	22,00	19,75	55,25	41,00	7,50
57	52,00	22,25	19,50	60,00	42,00	8,25
58	52,00	22,50	20,75	55,25	40,75	8,25
59	49,50	22,00	20,00	54,00	38,00	8,00
60	51,50	22,50	20,25	53,25	39,25	7,00
61	52,00	23,25	22,00	49,50	39,75	9,00
62	52,00	22,75	19,50	52,50	39,50	7,25
63	51,50	21,75	21,25	43,75	35,00	7,25
64	52,25	23,00	22,25	43,00	37,50	8,75
65	52,50	22,25	20,50	55,00	38,00	7,25
66	51,50	21,50	19,50	56,25	36,50	6,75
67	50,50	21,50	18,00	56,50	36,50	6,50
68	55,25	26,50	29,00	44,00	49,50	12,50
69	54,50	25,00	27,75	42,75	46,50	12,75
70	52,75	23,00	25,25	40,75	42,50	9,75
71	53,00	24,00	23,50	44,75	39,75	9,00
72	51,00	21,25	19,50	52,50	38,75	7,50