

JURANDIR ZULLO JUNIOR / 84

CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS DE SATÉLITE E APLICAÇÕES

Este exemplar foi entregue ao final da tese defendida por JURANDIR ZULLO JUNIOR na data de 23/09/1994.
Julgadora em: Paulo Cesar Bezerra
Orientador

DISSERTAÇÃO DE DOUTORADO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

ORIENTADORES: Prof. Dr. PAULO CESAR BEZERRA (DCA/FEE/UNICAMP)
Prof. Dr. GÉRARD GUYOT (INRA/FRANÇA)

*Aos meus pais, Jurandir e Maria Aparecida,
à minha esposa, Maria do Rosário,
e ao Sérgio, meu irmão,
agradeço e dedico essa tese.*

Agradecço

aos Professores Paulo Cesar Bezerra e Gérard Guyot, pela dedicaçáo com que me orientaram durante todo o transcorrer do trabalho,

à UNICAMP, por todo apoio material e financeiro que viabilizou a realizaçáo desse trabalho,

ao projeto PRHAE/CNPQ do DCA/FEE/UNICAMP, pelo suporte financeiro nas viagens e estágios internacionais realizados,

ao Prof. Hilton Silveira Pinto e aos colegas do CEPAGRI - Claudir, Edilene, Lázaro, Giampaolo, Wilmo e Rosana - pela colaboraçáo recebida em todos esses anos,

aos Professores Léo Pini Magalhães, Archimedes Peres Filho, Beatriz Mascia Daltrini e Márcio Luiz de Andrade Neto, pela atençáo e sugestões feitas,

ao CTA/IAE/MAER, na pessoa do Major Luiz Carlos Barbosa Ribeiro, pelo apoio na realizaçáo das radiossondagens,

ao INPE, pela cessáo das imagens utilizadas e possibilidade de intercâmbio com seus pesquisadores,

ao INRA, especialmente os pesquisadores Xing-Fa Gu, Bernard Seguin e Paul Boissard, por todo apoio recebido nos estágios realizados,

ao IAC, pelo fornecimento de dados meteorológicos e cessáo da estaçáo de Cordeirópolis para realizaçáo de campanhas experimentais,

ao Departamento de Proteçáo ao Vôo do Aeroporto de Viracopos, pela possibilidade de utilizaçáo da pista para os trabalhos de campo,

à Sra. Isabel Gardenal de Arruda Amaral, pelo valioso trabalho de revisáo ortográfica,

à ASTEC/CAISM, pelas facilidades colocadas à realizaçáo do trabalho,

aos colegas Tatiana, Beraldo, Edson, Jorge, Leonardo, Belkacem, Marina, Dominique, Edgard, Aignes e Jerônimo, pelo apoio que deram em horas muito difíceis, e

a todos que de alguma forma contribuíram para a realizaçáo desse trabalho

Muito Obrigado

ÍNDICE

Introdução Geral	1
Capítulo 1. O Modelo 5S	5
1.1 Introdução	5
1.2 Espalhamento (difusão ou dispersão)	7
1.2.1 Espalhamento no sentido sol-terra	7
1.2.2 Espalhamento no sentido terra-satélite	10
1.3 Absorção	12
1.4 Espalhamento e Absorção	13
1.5 Descrição do programa que implementa o 5S	15
Capítulo 2. Metodologia do Trabalho Experimental	21
2.1 Introdução	21
2.2 Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos	21
2.2.1 Descrição	21
2.2.2 Metodologia experimental relativa aos componentes gasosos	23
2.2.2.1 Radiossondagens	23
2.2.2.2 Postos meteorológicos	26
2.3 Concentração dos aerossóis	29
2.3.1 Descrição	29
2.3.2 Metodologia experimental relativa aos aerossóis	32
2.3.2.1 Radiação difusa	36
2.3.2.2 Radiação global	38
2.4 Tipo dos aerossóis	39
2.5 Reflectância das áreas-testes	41
2.5.1 Descrição	41
2.5.2 Reflectância difusa ou hemisférica	45
2.5.3 Esfera integradora	46
Capítulo 3. Trabalho de Campo	47
3.1 Campanhas experimentais realizadas em 1991	47
3.1.1 Estação experimental do IAC (Cordeirópolis-SP) em 23/05/91	47
3.1.1.1 Parâmetros atmosféricos	47
3.1.1.2 Radiação solar	49
3.1.1.3 Reflectância	50
3.1.2 Aeroporto de Viracopos em 01/06/91	54
3.1.2.1 Parâmetros atmosféricos	54
3.1.2.2 Radiação solar	56
3.1.2.3 Reflectância	57
3.1.3 Estação experimental do IAC (Cordeirópolis-SP) em 08/06/91	58
3.1.4 Observatório a Olho Nu da UNICAMP em 13/06/91	58
3.1.4.1 Radiação solar	59
3.1.5 Aeroporto de Viracopos em 17/06/91	59

3.1.6	Aeroporto de Viracopos em 03/07/91	60
3.1.6.1	Parâmetros atmosféricos	60
3.1.6.2	Radiação solar	62
3.2	O trabalho experimental realizado em 1992	63
3.2.1	FEAGRI/UNICAMP em 13/07/92	64
3.2.1.1	Parâmetros atmosféricos	65
3.2.1.2	Radiação solar	65
3.2.2	Aeroporto de Viracopos em 21/07/92	68
3.2.2.1	Parâmetros atmosféricos	68
3.2.2.2	Radiação solar	69
3.2.2.3	Reflectância	71
3.2.3	Aeroporto de Viracopos em 06/08/92	71
3.2.3.1	Parâmetros atmosféricos	71
3.2.3.2	Radiação solar	72
3.2.4	FEAGRI/UNICAMP em 25/08/92	74
3.2.4.1	Parâmetros atmosféricos	74
3.2.4.2	Radiação solar	74
3.2.5	Aeroporto de Viracopos em 23//09/92	76
3.2.5.1	Parâmetros atmosféricos	76
3.2.5.2	Radiação solar	76
3.2.6	Aeroporto de Viracopos em 09/10/92	78
3.2.7	Estimativa da espessura ótica dos aerossóis a partir da radiação solar global	78
3.2.8	Radiação solar	82
3.2.9	Variabilidade espectral da pista de taxiamento	83
3.2.10	Avaliação da correção	86
3.2.10.1	Regra de decisão	86
Capítulo 4. SCORADIS		89
4.1	Introdução	89
4.2	Remoção dos efeitos da vizinhança	90
4.2.1	Metodologia	90
4.2.2	Cálculo da reflectância média	91
4.2.3	Equação de correção	96
4.3	Correção atmosférica	97
4.4	Descrição do sistema	98
4.4.1	Introdução	98
4.4.2	Tratamento de dados no Modelo 5S	100
4.4.3	Geração de tabelas de correção atmosférica	100
4.4.4	Processamento de imagens	101
Capítulo 5. Processamento das Imagens		107
5.1	Introdução	107
5.2	Correção das imagens em 21/07/92	109
5.2.1	Modelo atmosférico dos componentes gasosos	109
5.2.2	Concentração dos aerossóis	110
5.2.3	Parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S	111

5.2.4	Processamento das imagens	113
5.2.4.1	Imagens de radiância	113
5.2.4.2	Imagens de reflectância	114
5.2.4.3	Superfícies-testes	116
5.2.4.4	Avaliação da correção	119
5.3	Correção da imagem de 06/08/92	121
5.3.1	Modelo atmosférico dos componentes gasosos	121
5.3.2	Concentração dos aerossóis	122
5.3.3	Parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S	122
5.3.4	Processamento das imagens	124
5.3.4.1	Imagens de radiância	124
5.3.4.2	Imagens de reflectância	125
5.3.4.3	Superfícies-testes	129
5.3.4.4	Avaliação da correção	131
5.4	Comparação entre os resultados de 21/07 e 06/08/92	133
Capítulo 6. Aplicações		135
6.1	Índice de vegetação	135
6.1.1	Processamento da imagem de 21/07/92	137
6.1.2	Processamento da imagem de 06/08/92	141
6.1.3	Comparação entre as imagens de 21/07/92 e 06/08/92	143
6.2	Classificação das imagens	144
6.2.1	Classificação das imagens de radiância original e reflectância real	157
Conclusões Finais e Sugestões		161
Apêndice A. Conceitos e Definições Radiométricas		167
A.1	Ângulo sólido	167
A.2	Energia radiante	168
A.3	Fluxo radiante	169
A.4	Irradiância	169
A.5	Excitância	169
A.6	Intensidade radiante	169
A.7	Radiância	170
A.8	Albedo	171
A.9	Reflexão	171
A.10	Reflexão especular	171
A.11	Reflexão difusa	171
A.12	Reflexão perfeitamente difusa	172
A.13	Reflectância difusa	172
A.14	Reflectância bicônica	174
A.15	Fator de reflectância	176
A.16	Sensibilidade espectral do satélite Landsat	177

Apêndice B. Conceitos e Definições Atmosféricas	179
B.1 Aerossóis	179
B.2 Massa ótica de ar	179
B.3 Declinação solar	179
B.4 Ângulo zenital	180
B.5 Coeficiente D_s	180
B.6 Espessura ótica da atmosfera	180
B.7 Coeficientes de calibração	182
Bibliografia	185
Resumo	191

LISTA DE FIGURAS

1.1	Situação hipotética sem atmosfera	5
1.2	Contribuições à iluminação da superfície terrestre	9
1.3	Contribuições ao sinal medido pelo satélite	11
2.1	Perfis-padrões de pressão e temperatura da atmosfera tropical	22
2.2	Perfis-padrões de densidade de vapor d'água e ozônio da atmosfera tropical	23
2.3	Curva de Langley	31
2.4	Receptor hemisférico	34
2.5	Radiação solar global incidente no receptor hemisférico	34
2.6	Medição da radiação solar direta	35
2.7	Dimensões do conjunto tubo+receptor hemisférico	36
2.8	Radiação difusa incidente no receptor hemisférico	37
2.9	Radiômetro hemisférico-cônico	42
2.10	Calibração do radiômetro hemisférico-cônico	43
2.11	Radiômetro bicônico	43
2.12	Calibração do radiômetro bicônico	44
3.1	Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 23/05/91	48
3.2	Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 23/05/91	48
3.3	Localização dos pontos experimentais em 23/05/91	49
3.4	Medição da reflectância da amostra de solo na esfera integradora	51
3.5	Curvas de reflectância do solo em 23/05/91	52
3.6	Razão entre curvas de reflectância em 23/05/91	52
3.7	Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 01/06/91	55
3.8	Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 01/06/91	55
3.9	Localização dos pontos experimentais em 01/06/91	56
3.10	Reflectância do solo em 01/06/91	57
3.11	Variação horária da radiação global em 13/06/91	59
3.12	Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 03/07/91	60
3.13	Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 03/07/91	61
3.14	Variação horária da radiação solar global em 03/07/91	62
3.15	Variação horária da radiação difusa em 03/07/91	63
3.16	Radiação direta em 13/07/92	66
3.17	Variação horária da radiação direta em 13/07/92	66
3.18	Irradiância solar exoatmosférica	67
3.19	Curva de Langley para 550nm em 13/07/92	68
3.20	Variação horária da radiação global em 21/07/92	70
3.21	Variação horária da radiação direta em 21/07/92	70
3.22	Variação horária da radiação global em 06/08/92	72
3.23	Variação horária da radiação direta em 06/08/92	73
3.24	Variação horária da radiação global em 25/08/92	75
3.25	Variação horária da radiação direta em 25/08/92	75
3.26	Variação horária da radiação global em 23/09/92	77
3.27	Variação horária da radiação direta em 23/09/92	77
3.28	Análise de sensibilidade da reflectância real	80

3.29	Variabilidade espectral da pista de taxiamento	83
4.1	Superfície terrestre simplificada	92
4.2	Funções atmosféricas	93
4.3	Metodologia da correção radiométrica implementada no SCORADIS	99
5.1	Variabilidade espectral da espessura ótica em 21/07/92	110
5.2	Variabilidade espectral da espessura ótica em 06/08/92	121
5.3	Imagem de reflectância aparente (1) e reflectância real (2) em 06/08/92	127
6.1	Relação entre índice de vegetação e biomassa	140
A.1	Ângulo sólido	167
A.2	Intensidade radiante	170
A.3	Radiância	170
A.4	Reflexão especular e reflexão difusa	171
A.5	Superfície perfeitamente difusora	172
A.6	Ângulo sólido elementar	173
A.7	Sensibilidade espectral do satélite Landsat	178
B.1	Espessura ótica da atmosfera	180

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores-padrões dos parâmetros atmosféricos por área-teste	27
2.2	Concentrações volumétricas e do número de partículas dos componentes básicos dos aerossóis	39
2.3	Porcentagem dos componentes básicos nos modelos-padrões de aerossol	40
2.4	Concentração volumétrica dos componentes-básicos nos modelos-padrões de aerossol	40
3.1	Razões médias entre os valores experimentais e padrões em 23/05/91	49
3.2	Parâmetros da razão entre as curvas de reflectância de 23/05/91	53
3.3	Parâmetros da regressão linear entre as curvas de reflectância de 23/05/91	53
3.4	Reflectância do solo em 23/05/91	54
3.5	Razões médias entre os valores experimentais e os padrões em 01/06/91	56
3.6	Reflectância do solo em 01/06/91	58
3.7	Razões médias entre os valores experimentais e os padrões em 03/07/91	61
3.8	Parâmetros característicos dos dias de trabalho de campo	64
3.9	Parâmetros atmosféricos em 13/07/92	65
3.10	Parâmetros atmosféricos em 21/07/92	69
3.11	Parâmetros atmosféricos em 06/08/92	71
3.12	Reflectância da área agrícola em 06/08/92	73
3.13	Parâmetros atmosféricos em 25/08/92	74
3.14	Parâmetros atmosféricos em 23/09/92	76
3.15	Espessura ótica e razão entre valores experimentais e simulados de radiação solar	78
3.16	Espessuras óticas estimadas a partir do Modelo 5S	79
3.17	Diferenças absolutas da reflectância real	81
3.18	Razão entre a radiação direta experimental e a simulada pelo 5S	82
3.19	Razão entre a radiação global experimental e a simulada pelo 5S	82
3.20	Reflectância da pista de taxiamento por banda temática	83
3.21	Proporção entre os espectros de reflectância da pista de taxiamento	84
3.22	Regressão linear entre pares de espectros de reflectância da pista de taxiamento	85
5.1	Áreas-testes seleccionadas	108
5.2	Fatores de correção dos perfis atmosféricos em 21/07/92	110
5.3	Espessura ótica experimental e ajustada em 21/07/92	111
5.4	Parâmetros atmosféricos em 21/07/92 calculados pelo 5S	111
5.5	Parâmetros comuns a todas bandas temáticas em 21/07/92	112
5.6	Espessura ótica ajustada e simulada em 21/07/92	113
5.7	Parâmetros estatísticos das imagens de radiância em 21/07/92	113
5.8	Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de radiância em 21/07/92	114
5.9	Parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 21/07/92	114
5.10	Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 21/07/92	115
5.11	Radiância das superfícies-testes em 21/07/92	116

5.12	Reflectância das superfícies-testes em 21/07/92	117
5.13	Razão entre as reflectâncias das superfícies-testes vegetais em 21/07/92	118
5.14	Radiação global experimental em 21/07/92	119
5.15	Cálculo da reflectância-limite da água em 21/07/92	119
5.16	Reflectância da água em 21/07/92	120
5.17	Fatores de correção do perfil atmosférico em 06/08/92	121
5.18	Espessura ótica experimental e ajustada em 06/08/92	122
5.19	Parâmetros atmosféricos em 06/08/92 calculados pelo Modelo 5S	122
5.20	Dados comuns a todas bandas temáticas em 06/08/92	123
5.21	Espessura ótica ajustada e simulada em 06/08/92	124
5.22	Parâmetros estatísticos das imagens de radiância em 06/08/92	124
5.23	Diferenças entre os parâmetros das imagens de radiância em 06/08/92	125
5.24	Parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 06/08/92	125
5.25	Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 06/08/92	126
5.26	Radiância das superfícies-testes em 06/08/92	129
5.27	Reflectância das superfícies-testes em 06/08/92	130
5.28	Razão entre as reflectâncias das superfícies-testes vegetais em 06/08/92	131
5.29	Radiação global experimental em 06/08/92	131
5.30	Cálculo da reflectância-limite da água em 06/08/92	131
5.31	Reflectância da água em 06/08/92	132
5.32	Comparação entre as reflectâncias das superfícies-testes	133
6.1	Parâmetros estatísticos das imagens de NDVI de 21/07/92	138
6.2	Diferença real entre imagens de NDVI de 21/07/92	138
6.3	Índice de vegetação NDVI das superfícies-testes em 21/07/92	139
6.4	Variação porcentual do NDVI das superfícies-testes em 21/07/92	139
6.5	Parâmetros estatísticos das imagens de NDVI de 06/08/92	141
6.6	Diferenças reais entre imagens de NDVI de 06/08/92	141
6.7	Índice de vegetação das superfícies-testes em 06/08/92	142
6.8	Variação porcentual do NDVI das superfícies-testes em 06/08/92	142
6.9	Comparação entre o índice de vegetação NDVI de 21/07/92 e 06/08/92	143
6.10	Classificação não-supervisionada das imagens de radiância original ($NC(L_{sat})$)	158
6.11	Classificação não-supervisionada das imagens de reflectância real ($NC(\rho)$)	158
6.12	Coefficiente Kappa	159
B.1	Coefficientes de calibração e "Offset"	182

LISTA DE SIGLAS

5S	Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CEE	Comunidade Econômica Européia
CPQBA	Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Biológicas, Químicas e Agrícolas
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola
FORTTRAN	Formula translation
GMT	Greenwich Mean Time
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IAE	Instituto de Atividades Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
MAER	Ministério da Aeronáutica
NC	Nível de cinza
NDVI	Índice de vegetação da diferença normalizada
OBONU	Observatório a Olho Nu
SCORADIS	Sistema de correção radiométrica de imagens de satélite
SITIM	Sistema de Tratamento de Imagens
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
TM	Thematic Mapper
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização das informações captadas pelos satélites é cada vez mais importante e imprescindível nos vários campos da atividade humana, como, por exemplo, na meteorologia, geologia, planejamento urbano, agronomia e hidrologia. A agricultura, por ser uma atividade de ocupação extensiva e diversificada do solo, apresenta um potencial muito grande de consumo dos dados de sensoriamento remoto, principalmente se forem representados por grandezas físicas que se relacionam diretamente com o estado das superfícies imageadas, tais como a radiância e a reflectância. O acompanhamento da evolução de culturas agrícolas e o balanço energético do sistema terra-atmosfera são dois exemplos de aplicações importantes que utilizam a radiância e a reflectância das áreas de interesse obtidas a partir dos dados numéricos das imagens.

A relação entre os valores digitais das imagens e a reflectância ou a radiância das superfícies observadas é afetada pelas perturbações próprias do sensor, incluindo a resolução radiométrica e dinâmica dos dados, pelos efeitos devido à presença da atmosfera e, também, pelo perfil do relevo terrestre. O conhecimento destes fatores é, portanto, de grande importância para que seja possível distinguir as variações relacionadas com a captura dos dados pelos satélites, das variações referentes às próprias grandezas medidas e que realmente interessam nas aplicações.

Os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio, ozônio e dióxido de carbônio) e os aerossóis (pequenas partículas em suspensão) refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo. A mudança de caminho da radiação permite que raios de luz fora do cone de visão do satélite entrem neste cone e alterem a imagem real. Por outro lado, raios de luz, que originariamente estariam dentro deste cone, podem abandoná-lo, alterando também a imagem. Uma outra possibilidade é que um raio de luz penetre no cone de visão do satélite sem mesmo ter atingido o solo.

A sofisticação do problema da transferência radiativa através da atmosfera, a dificuldade em obter os dados atmosféricos necessários à correção das imagens e o custo computacional associado aos procedimentos de cálculo mais elaborados faz com que a correção atmosférica seja quase sempre desconsiderada ou, então, se baseie em métodos simplificados que chegam a produzir erros de estimativa da radiância e da reflectância terrestre superiores aos obtidos com as imagens originais. As aplicações que não necessitam de grande precisão radiométrica ou que estão interessadas apenas nas informações qualitativas fornecidas pelos dados de satélite podem desconsiderar, se for o caso, a correção atmosférica. Como exemplo deste tipo de aplicação, há os mapeamentos urbanos e a produção de imagens artísticas.

As aplicações de maior interesse prático atual, entretanto, baseiam-se no uso de imagens multitemporais obtidas de vários satélites para avaliar a evolução do tipo e do estado das superfícies terrestres. Neste caso, a correção atmosférica é imprescindível devido às variações das condições atmosféricas de uma data de aquisição de imagem para outra, ou da banda espectral de um satélite para outro, que afetam a qualidade dos resultados finais. A detecção de estresse hídrico, problemas fitossanitários ou incêndios, e o acompanhamento da evolução de uma cobertura vegetal são exemplos típicos deste tipo de aplicação que têm grande interesse hoje e que estimularam a realização do trabalho apresentado nesta dissertação. As aplicações envolvendo coberturas vegetais possuem um grande número de variáveis importantes que devem ser devidamente tratadas para que se obtenham resultados finais de boa qualidade. Um outro fator importante que motivou o desenvolvimento desta tese foi a necessidade de um maior conhecimento dos efeitos produzidos pela atmosfera tropical nas imagens de satélite.

Desse modo, o trabalho apresentado nesta dissertação procura contribuir para uma utilização efetiva e mais confiável do sensoriamento remoto nas aplicações, através de uma melhoria da qualidade das imagens, proporcionada pela remoção dos efeitos atmosféricos existentes nelas. Por melhoria entende-se uma maior representatividade do estado real das superfícies terrestres, proporcionada pelas imagens corrigidas em relação às imagens originais. O trabalho realizado abrangeu todas as etapas envolvidas na correção atmosférica: obtenção e tratamento dos dados de entrada no modelo de correção atmosférica; processamento das imagens; análise dos resultados obtidos, considerando a influência da correção em tratamentos-

padrões realizados com as imagens.

O capítulo 1 apresenta a descrição do modelo de transferência radiativa 5S, desenvolvido pelo Laboratório de Ótica Atmosférica de Lille (França), que foi utilizado como base do sistema computacional de correção radiométrica SCORADIS apresentado no capítulo 4. A utilização dos modelos de transferência radiativa, como base dos procedimentos de correção atmosférica, proporciona um aumento na precisão de cálculo dos valores de radiância e reflectância das superfícies terrestres a partir dos dados de satélite. O modelo 5S foi escolhido pelos resultados que ele tem apresentado, pela disponibilidade de um bom programa computacional para microcomputadores pessoais e também pela possibilidade de utilização de suas formulações analíticas para o cálculo da reflectância e radiância ao nível do solo. Por isso, ele tem sido bem aceito pela comunidade internacional de sensoriamento remoto.

O sistema SCORADIS trata, além dos efeitos relativos apenas à atmosfera, de um outro tipo de interferência decorrente da distribuição espacial dos alvos sobre a superfície terrestre. Isto é de grande importância no caso de imagens referentes a regiões heterogêneas observadas por satélites com alta resolução espacial. As imagens podem ser tratadas localmente pelo próprio sistema SCORADIS, ou remotamente através de tabelas de conversão calculadas por ele mesmo.

A coleta de dados em campo recebeu uma atenção muito especial neste trabalho para que se conhecesse, na prática, os diversos fenômenos físicos que atuam na formação das imagens pelos satélites, permitindo avaliar a importância, viabilidade, grandeza e sensibilidade dos parâmetros que os descrevem. O trabalho de campo foi efetuado a um custo adicional relativamente baixo, aproveitando-se toda a infra-estrutura das instituições envolvidas. A metodologia utilizada nas medições experimentais é descrita no capítulo 2. Os dados obtidos nas diversas campanhas realizadas e o processamento feito para que eles representassem os parâmetros necessários à correção são descritos no capítulo 3. Uma contribuição valiosa do trabalho experimental é a metodologia de determinação da espessura ótica dos aerossóis a partir dos dados de radiação solar global.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir da correção de duas imagens do

satélite Landsat captadas em passagens subseqüentes. O efeito da correção no cálculo do índice de vegetação e na classificação automática de padrões é descrito no capítulo 6. A conclusão geral faz uma análise dos resultados obtidos e das perspectivas futuras em relação ao trabalho realizado. O apêndice contém a descrição dos principais parâmetros e conceitos utilizados durante o trabalho.

CAPÍTULO 1

O MODELO 5S

(Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire)

O modelo 5S, desenvolvido pelo Laboratório de Ótica Atmosférica de Lille (França) para estimar o sinal recebido pelos satélites no espectro solar ($0,25\mu\text{m}$ a $4,00\mu\text{m}$) na ausência de nuvens, é detalhado neste capítulo a partir da descrição feita por Tanré et al. (1985, 1986 e 1990).

1.1. Introdução

Numa situação hipotética de ausência completa da atmosfera, toda a radiação solar atingiria diretamente a superfície terrestre. Uma parte desta energia seria absorvida pela superfície, enquanto que o restante seria refletido de volta ao espaço, conforme ilustra a figura 1.1:

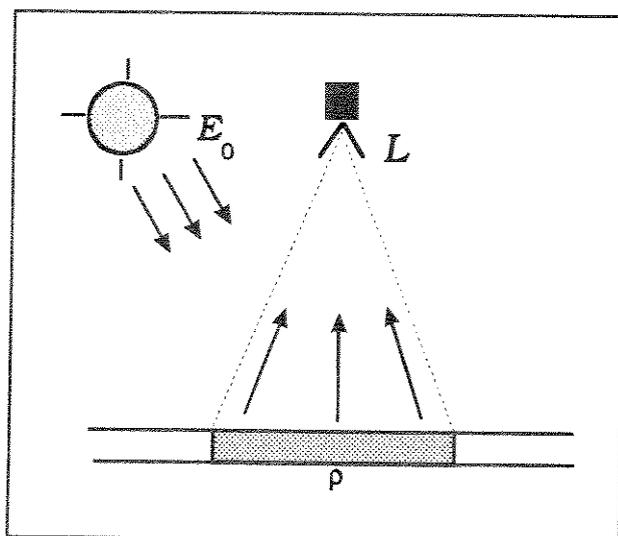


Figura 1.1 - Situação hipotética sem atmosfera.

sendo que:

$$I_0 = E_0 \cdot \cos(\theta_s) \cdot D_s \quad (1.1)$$

e

$$L = \frac{\rho J_0}{\pi} \quad (1.2)$$

onde: E_0 é a energia solar disponível em [$\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$];

I_0 é a energia solar que atinge uma superfície horizontal em [$\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$];

L é a radiância da superfície terrestre em [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$];

θ_s é o ângulo zenital do sol;

D_s é o fator de correção da constante solar;

ρ é a reflectância de uma superfície terrestre uniforme e lambertiana.

Neste caso, o sinal L registrado pelo satélite dependeria apenas do estado da área visada, uma vez que somente ela reenviaria os fótons em direção ao espaço.

A presença da atmosfera perturba a transmissão da radiação solar em seu meio, modificando as intensidades de energia que chegam diretamente à superfície terrestre e ao satélite. Esta atenuação na iluminação I_0 da superfície terrestre e no sinal L , registrado pelo satélite, é contrabalançada pela contribuição de outros tipos de radiação incidente e refletida que surgem com a presença da atmosfera.

O Modelo 5S considera que as perturbações causadas pela atmosfera devem-se à atuação dos processos de espalhamento e absorção na trajetória da radiação solar em direção à superfície da terra e no caminho da radiação refletida para o satélite. O Laboratório de Lille procurou estabelecer um equilíbrio entre a metodologia utilizada na formulação analítica do sinal recebido pelo satélite e a precisão numérica das soluções obtidas por esta formulação.

As principais simplificações teóricas feitas no desenvolvimento do Modelo 5S foram as seguintes:

- a) Tratamento, em separado, dos processos de espalhamento e absorção;
- b) Consideração de que apenas os conteúdos integrados verticalmente dos gases e aerossóis intervêm nestes processos;
- c) Suposição de que as superfícies terrestres são lambertianas;
- d) Definição da atmosfera como horizontalmente homogênea.

Embora os fenômenos de absorção e espalhamento sejam realmente combinados, a separação feita no Modelo 5S é justificada pois a maior parte da absorção gasosa ocorre em camadas superiores da atmosfera, enquanto que o espalhamento ocorre mais próximo da superfície do solo. Além disso a absorção gasosa é observada em comprimentos de onda onde o espalhamento devido aos gases é mínimo.

1.2. Espalhamento (difusão ou dispersão)

O espalhamento corresponde à mudança aleatória da direção de propagação da radiação solar devido a sua interação elástica com os componentes atmosféricos (moléculas e aerossóis). Os fótons não são perdidos, mas redistribuídos em todas as direções sem que haja mudança do comprimento de onda, provocando, com isso, uma atenuação do sinal na direção principal de propagação da radiação e um aumento em todas as outras direções.

1.2.1. Espalhamento no sentido sol-terra

A interferência do processo de espalhamento na transmissão da radiação solar em direção à terra permite distinguir três contribuições à iluminação da superfície terrestre: direta (ou solar), difusa (ou atmosférica) e ambiental.

A radiação direta corresponde à fração da radiação solar disponível no topo da atmosfera (I_0) que chega à terra sem ser atenuada (absorvida ou desviada) no caminho. Como a radiação solar possui uma direção de propagação muito bem definida, pode-se considerar radiação direta aquela que chega ao ponto da superfície terrestre para o qual está geometricamente determinada. Por isso, esta componente é considerada como a contribuição do sol à iluminação da superfície terrestre, sendo a única existente na ausência hipotética da atmosfera, conforme representado na figura 1.1. Matematicamente, tem-se que a radiação direta I_{dir} incidente na terra é definida por:

$$I_{dir} = t_{dir}(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.3)$$

sendo que: $t_{dir}(\theta_s)$ é o fator de transmissão direta para o ângulo zenital solar θ_s , definido como:

$$t_{dir}(\theta_s) = e^{-\tau/\cos(\theta_s)} \quad (1.4)$$

onde: τ é a espessura ótica da atmosfera.

A radiação difusa corresponde à radiação que provém de todas as outras direções que não a direção principal de propagação da radiação solar. Ela consiste da radiação solar que é desviada na atmosfera e que atinge a superfície terrestre em pontos que não faziam parte de sua direção de propagação inicial. Por isso, esta componente é considerada como a contribuição da atmosfera à iluminação da superfície terrestre. A radiação difusa I_{dif} incidente na terra é definida matematicamente, por:

$$I_{dif} = t_{dif}(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.5)$$

onde: $t_{dif}(\theta_s)$ é o fator de transmissão difusa na atmosfera.

Logo, a radiação solar I_{sol} que chega à terra vinda do espaço é igual a:

$$I_{sol} = I_{dir} + I_{dif} = T(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.6)$$

onde: $T(\theta_s)$ é o fator de transmissão total da radiação solar na atmosfera difusora para o ângulo zenital solar θ_s , definido por:

$$T(\theta_s) = t_{dir}(\theta_s) + t_{dif}(\theta_s) \quad (1.7)$$

Além das componentes direta e difusa descritas, o espalhamento atmosférico faz com que a iluminação de um determinado ponto da superfície terrestre receba uma contribuição proveniente da região aonde esteja localizado. Esta componente é denominada radiação ambiental e corresponde à radiação refletida pela superfície terrestre que, ao invés de partir em direção ao espaço, é desviada pela atmosfera de volta à terra. A radiação ambiental i_{amb}^1 , produzida por uma interação entre a radiação refletida e a atmosfera, é dada por:

$$i_{amb}^1 = s \cdot R^1 = s \cdot \rho_{med} \cdot I_{sol} = s \cdot \rho_{med} \cdot T(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.8)$$

onde: ρ_{med} é a reflectância média da superfície terrestre aonde está inserido o alvo de interesse e s é o albedo esférico da atmosfera.

Uma interação dupla corresponde a:

$$i_{amb}^2 = (s \cdot \rho_{med})^2 \cdot T(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.9)$$

Generalizando para o caso de n-interações, tem-se que:

$$i_{amb}^n = (s \cdot \rho_{med})^n \cdot T(\theta_s) \cdot I_0 \quad (1.10)$$

Logo, a radiação ambiental incidente num determinado ponto da superfície terrestre, localizado numa região com reflectância média ρ_{med} , é igual a:

$$I_{amb} = \sum_{n=1}^{\infty} i_{amb}^n = \sum_{n=1}^{\infty} (s \cdot \rho_{med})^n \cdot T(\theta_s) \cdot J_0 = \left\{ \frac{s \cdot \rho_{med} \cdot T(\theta_s)}{1 - \rho_{med} \cdot s} \right\} \cdot J_0 \quad (1.11)$$

Desse modo, a energia solar I_{tot} que chega efetivamente à superfície terrestre é igual a:

$$I_{tot} = I_{sol} + I_{amb} = I_{dir} + I_{dif} + I_{amb} = \left(\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_{med} \cdot s} \right) \cdot J_0 = \epsilon \cdot J_0 \quad (1.12)$$

onde: ϵ representa a eficiência da transmissão da radiação solar em direção à terra, através do sistema terra-atmosfera.

A figura 1.2 ilustra as radiações direta, difusa e ambiental que compõem a iluminação da superfície terrestre.

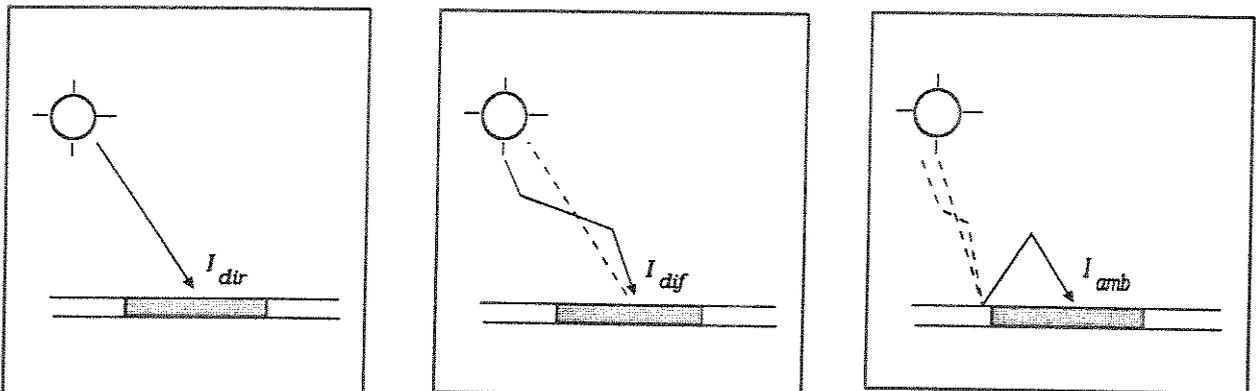


Figura 1.2 - Contribuições à iluminação da superfície terrestre.

1.2.2. Espalhamento no sentido terra-satélite

A atuação do espalhamento atmosférico na trajetória da radiação refletida em direção ao espaço permite distinguir também três contribuições principais na formação do sinal recebido pelos satélites: direta (ou do alvo), difusa (ou do ambiente) e atmosférica.

A componente direta corresponde à radiação refletida pela superfície terrestre que chega diretamente ao satélite sem ser atenuada no caminho. Ela representa a contribuição do alvo no sinal recebido pelo satélite, sendo o único sinal que chegaria ao satélite na ausência hipotética da atmosfera, conforme representado na figura 1.1. O sinal direto L_{dir} recebido de uma superfície terrestre com reflectância ρ é definido matematicamente como:

$$L_{dir} = \frac{t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho \cdot I_{tot}}{\pi} \quad (1.13)$$

onde: $t_{dir}(\theta_v)$ é o fator de transmissão direta para o ângulo zenital do satélite θ_v .

A componente difusa corresponde à radiação refletida pela superfície terrestre que, embora não tenha a direção do satélite, chega a ele por ter sido desviada na atmosfera. Trata-se de um termo que representa a interferência da vizinhança do alvo terrestre, sendo denominado contribuição ambiental. Matematicamente, tem-se que o sinal difuso L_{dif} é definido como:

$$L_{dif} = \frac{t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med} \cdot I_{tot}}{\pi} \quad (1.14)$$

onde: $t_{dif}(\theta_v)$ é o fator de transmissão difusa para o ângulo zenital θ_v do satélite e ρ_{med} é a reflectância média da superfície terrestre aonde está inserido o alvo de interesse.

A contribuição atmosférica corresponde à radiação solar que é desviada diretamente pela atmosfera em direção ao satélite sem nem mesmo atingir a superfície terrestre. Este termo de interferência não traz nenhuma informação da superfície visada e faz apenas o alvo parecer mais brilhante do que ele é na realidade, sendo o único sinal recebido pelo satélite ao visar um alvo extenso e completamente negro. Matematicamente, tem-se que o sinal puramente atmosférico L_{atm} é definido como:

$$L_{atm} = \frac{\rho_{atm} \cdot I_0}{\pi} \quad (1.15)$$

onde: ρ_{atm} é a reflectância da atmosfera.

A figura 1.3 ilustra as componentes, direta, atmosférica e ambiental, que formam o sinal recebido pelo satélite.

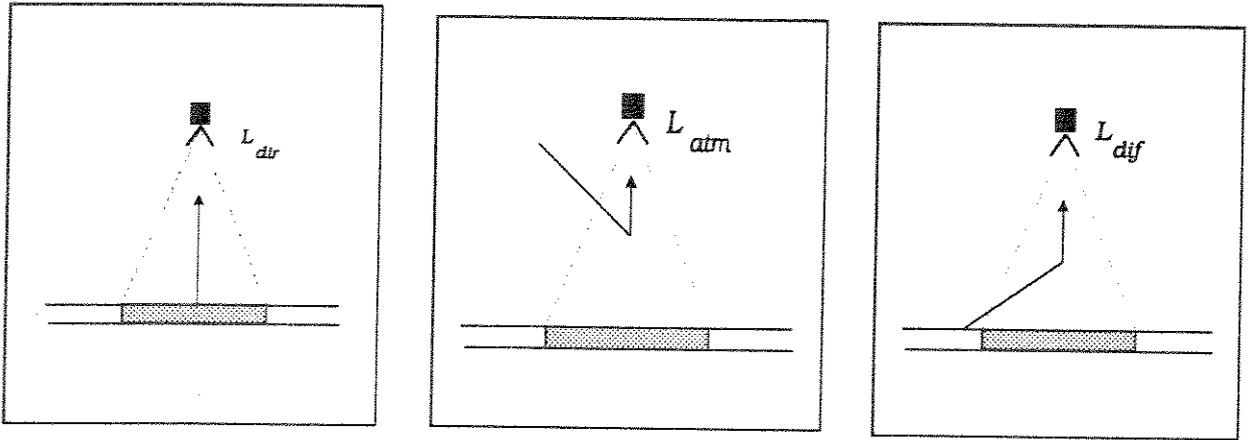


Figura 1.3 - Contribuições ao sinal medido pelo satélite.

Logo, o sinal L_{sat}^{esp} registrado pelo satélite, ao visar um alvo com reflectância ρ situado numa região com reflectância média ρ_{med} é igual a:

$$L_{sat}^{esp} = L_{atm} + L_{dir} + L_{dif} = \frac{\rho_{atm} \cdot I_0}{\pi} + \frac{t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho \cdot J_{tot}}{\pi} + \frac{t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med} \cdot I_{tot}}{\pi} \quad (1.16)$$

ou seja,

$$L_{sat}^{esp} = \frac{\rho_{atm} \cdot I_0}{\pi} + \frac{T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} + \frac{T(\theta_s) \cdot t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med} \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} \quad (1.17)$$

Dividindo-se o sinal L_{sat}^{esp} que chega ao satélite pela radiação solar I_0 disponível no topo da atmosfera, obtém-se a seguinte expressão para o cálculo da reflectância aparente do alvo, medida ao nível do satélite:

$$\rho_{sat}^{esp} = \frac{\pi \cdot L_{sat}^{esp}}{I_0} = \rho_{atm} + \frac{T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho}{1 - \rho_{med} \cdot S} + \frac{T(\theta_s) \cdot t_{diff}(\theta_v) \cdot \rho_{med}}{1 - \rho_{med} \cdot S} \quad (1.18)$$

1.3. Absorção

A estimativa do sinal que chega ao satélite é completada no Modelo 5s, com a avaliação dos efeitos provocados pela absorção atmosférica. A absorção é um processo de transformação da energia de um feixe luminoso em outras formas de energia, principalmente calor, com reemissão em comprimentos de onda maiores que os considerados pelo Modelo 5S (0,25 μ m a 4,00 μ m). Este processo depende dos componentes atmosféricos, principalmente gases (ozônio, vapor d'água, oxigênio e dióxido de carbono) e aerossóis, e das posições do sol e do satélite. A absorção gasosa varia bastante com o comprimento de onda, apresentando um espectro de raias muito rico, enquanto que a absorção devida aos aerossóis intervém em todo o espectro solar.

O Modelo 5S avalia as perdas de energia líquida associadas à absorção atmosférica, através de fatores de transmissão calculados apenas para os quatro gases principais (O₃, H₂O, O₂ e CO₂), e nas trajetórias diretas sol-terra e terra-satélite. Isto é justificado pelo fato de que os canais dos satélites costumam evitar as bandas de absorção molecular e porque a absorção pelos aerossóis é pequena. O fator de transmissão gasosa total t_g é o produto dos fatores de transmissão gasosa total de cada um dos quatro gases principais, isto é,

$$t_g = t_{g_d} \cdot t_{g_a} = \prod_{i=1}^4 (t_{g_{a_i}}(\theta_v, U_{g_i}) \cdot t_{g_{d_i}}(\theta_s, U_{g_i})) \quad (1.19)$$

onde: t_{g_d} é a transmitância gasosa no sentido sol-terra;

t_{g_a} é a transmitância gasosa no sentido terra-satélite;

θ_s é o ângulo zenital do sol;

θ_v é o ângulo zenital do satélite;

U_{g_i} é o conteúdo do i -ésimo gás.

1.4. Espalhamento e Absorção

A formulação completa do sinal L_{sat} registrado pelo satélite, considerando a heterogeneidade espacial da superfície terrestre e a interferência dos fenômenos de absorção e espalhamento atmosféricos, é dada por:

$$L_{sat} = t_g \cdot L_{sat}^{esp} = \frac{t_g \cdot \rho_{atm} \cdot I_0}{\pi} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho \cdot J_0}{\pi \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med} \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} \quad (1.20)$$

A reflectância aparente ρ_{sat} medida ao nível do satélite é calculada como:

$$\rho_{sat} = t_g \cdot \rho_{sat}^{esp} = t_g \cdot \rho_{atm} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v) \cdot \rho}{1 - \rho_{med} \cdot S} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med}}{1 - \rho_{med} \cdot S} \quad (1.21)$$

Rearranjando-se convenientemente os termos da equação (1.20) obtém-se a formulação analítica (1.22) da radiância realmente refletida pela superfície terrestre, em função da radiância que chega ao satélite e dos parâmetros atmosféricos e terrestres:

$$L = \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot \rho \cdot J_0}{\pi \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} = \frac{(\pi \cdot L_{sat} - t_g \cdot \rho_{atm} \cdot I_0) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S) - t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med} \cdot I_0}{\pi \cdot t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S)} \quad (1.22)$$

Logo, a reflectância real da superfície terrestre é igual a:

$$\rho = \frac{(\rho_{sat} - t_g \cdot \rho_{atm}) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot S) - t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dif}(\theta_v) \cdot \rho_{med}}{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot t_{dir}(\theta_v)} \quad (1.23)$$

A equação (1.22) pode ser utilizada para remover os efeitos atmosféricos existentes nas imagens de satélite, transformando os valores de L_{sat} obtidos a partir dos pontos da imagem original, em novos valores que estejam relacionados apenas com o estado real da superfície terrestre observada.

A formulação (1.20) do sinal registrado pelo satélite pode ser simplificada quando o alvo tiver raio superior a 1km, uma vez que, devido a grande dimensão destas superfícies, pode-se considerar que $\rho_{med} \approx \rho$. Isto significa que a radiação ambiental que chega ao centro de uma área extensa e o sinal difuso recebido pelo satélite são provenientes do mesmo tipo de

superfície que compõe o alvo observado. Neste caso, o sinal L_{sat}^l recebido pelo satélite a partir de alvos extensos é igual a:

$$L_{sat}^l = \frac{t_g \cdot \rho_{atm} \cdot I_0}{\pi} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v) \cdot \rho \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho \cdot s)} \quad (1.24)$$

onde: $T(\theta_v)$ é a transmitância atmosférica total no sentido terra-satélite definida por:

$$T(\theta_v) = t_{dir}(\theta_v) + t_{dif}(\theta_v) \quad (1.25)$$

A reflectância aparente ρ_{sat}^l de alvos extensos é escrita então como:

$$\rho_{sat}^l = t_g \cdot \rho_{atm} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v) \cdot \rho}{1 - \rho \cdot s} \quad (1.26)$$

A radiância L correspondente a um alvo extenso é definida por:

$$L = \frac{\pi \cdot L_{sat}^l - t_g \cdot \rho_{atm} \cdot I_0}{\pi \cdot t_g \cdot T(\theta_v)} \quad (1.27)$$

enquanto que a reflectância real é igual a:

$$\rho = \frac{\rho_{sat}^l - t_g \cdot \rho_{atm}}{(\rho_{sat}^l - t_g \cdot \rho_{atm}) \cdot s + t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \quad (1.28)$$

Embora estas formulações simplificadas sejam computacionalmente mais práticas que as originais, elas devem ser utilizadas com cuidado quando a área em estudo não for extensa. Como exemplo, tem-se que o erro δL_{sat} cometido sobre a simulação do sinal recebido pelo satélite, ao visar alvos pequenos ou médios, devido à utilização da expressão aproximada (1.24), é igual a:

$$\delta L_{sat} = L_{sat}^l - L_{sat} = \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot (\rho - \rho_{med}) \cdot (t_{dif}(\theta_v) + \rho \cdot s \cdot t_{dir}(\theta_v)) \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho \cdot s) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot s)} \quad (1.29)$$

1.5. Descrição do programa que implementa o 5S

O programa de computador desenvolvido pelo Laboratório de Lille, que implementa o 5S, foi escrito em linguagem FORTRAN, com base na formulação analítica do sinal recebido pelo satélite apresentada na equação (1.20). Dentre as suas possíveis aplicações, destacam-se as seguintes:

- a) Projeto de instrumentos óticos para sensoriamento remoto;
- b) Definição das bandas espectrais de futuros satélites;
- c) Determinação da ordem de grandeza dos efeitos atmosféricos nas imagens dos satélites;
- d) Avaliação dos parâmetros atmosféricos mais importantes para a correção das imagens;
- e) Fornecimento de parâmetros atmosféricos para aplicações que necessitem destes valores em seus cálculos.

Os dados de entrada necessários para os cálculos realizados pelo Modelo 5S são apresentados a seguir:

- a) Posição geométrica do sol e do satélite;
- b) Modelo atmosférico dos componentes gasosos descrito pelos perfis de pressão, temperatura, vapor d'água e ozônio;
- c) Tipo e concentração dos aerossóis;
- d) Banda espectral do satélite;
- e) Tipo e variação espectral da reflectância da superfície terrestre.

Para cada um dos itens acima existe uma série de condições-padrões pré-estabelecidas que podem ser utilizadas na definição dos dados de entrada.

Os parâmetros relacionados com o espalhamento atmosférico são calculados através de funções aproximadas, que são avaliadas em dez comprimentos de onda bem distribuídos pelo espectro solar (400, 488, 550, 633, 694, 860, 1.536, 2.250 e 3.750nm) e depois interpoladas de acordo com a banda espectral selecionada. Os fatores de transmissão gasosa são obtidos através de modelos estatísticos com resolução espectral da ordem de 5nm, fornecendo resultados com boa precisão numérica a baixo custo computacional. Por razões práticas, o

Modelo 5S considera que o alvo de interesse é circular, com raio \bar{r} e reflectância ρ , sendo circundado por uma vizinhança homogênea com reflectância ρ_{viz} . A reflectância média ρ_{med} da superfície terrestre é calculada então como

$$\rho_{med} = F(\bar{r}) \cdot \rho + (1 - F(\bar{r})) \cdot \rho_{viz} \quad (1.30)$$

onde: $F(\bar{r})$ descreve a contribuição relativa ao sinal difuso recebido pelo satélite, dos pontos situados a uma distância inferior a \bar{r} do centro do alvo de interesse.

Essa ponderação entre as reflectâncias ρ e ρ_{viz} é regulada pelo estado da atmosfera descrito através de $F(\bar{r})$ e tem o objetivo de representar a influência efetiva da heterogeneidade da superfície terrestre no sinal recebido pelo satélite.

O processamento feito pelo Modelo 5S pode ser esquematizado através do seguinte algoritmo:

Passo 0: Leitura dos dados de entrada;

Passo 1: Cálculo das funções atmosféricas em dez comprimentos de onda discretos;

Passo 2: Integração dos cálculos realizados no Passo 1 para a banda espectral selecionada;

Passo 3: Cálculo das funções de absorção gasosa;

Passo 4: Cálculo da irradiância solar espectral;

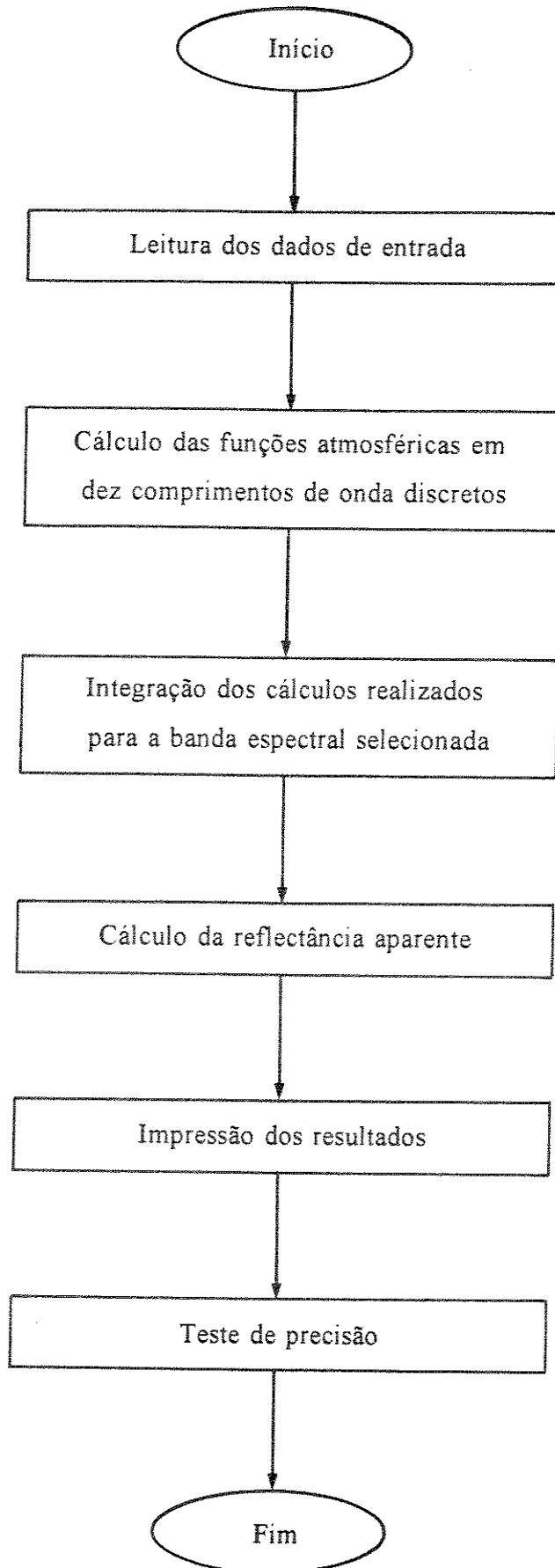
Passo 5: Interpolação das funções de espalhamento atmosféricas;

Passo 6: Cálculo da reflectância média da superfície terrestre;

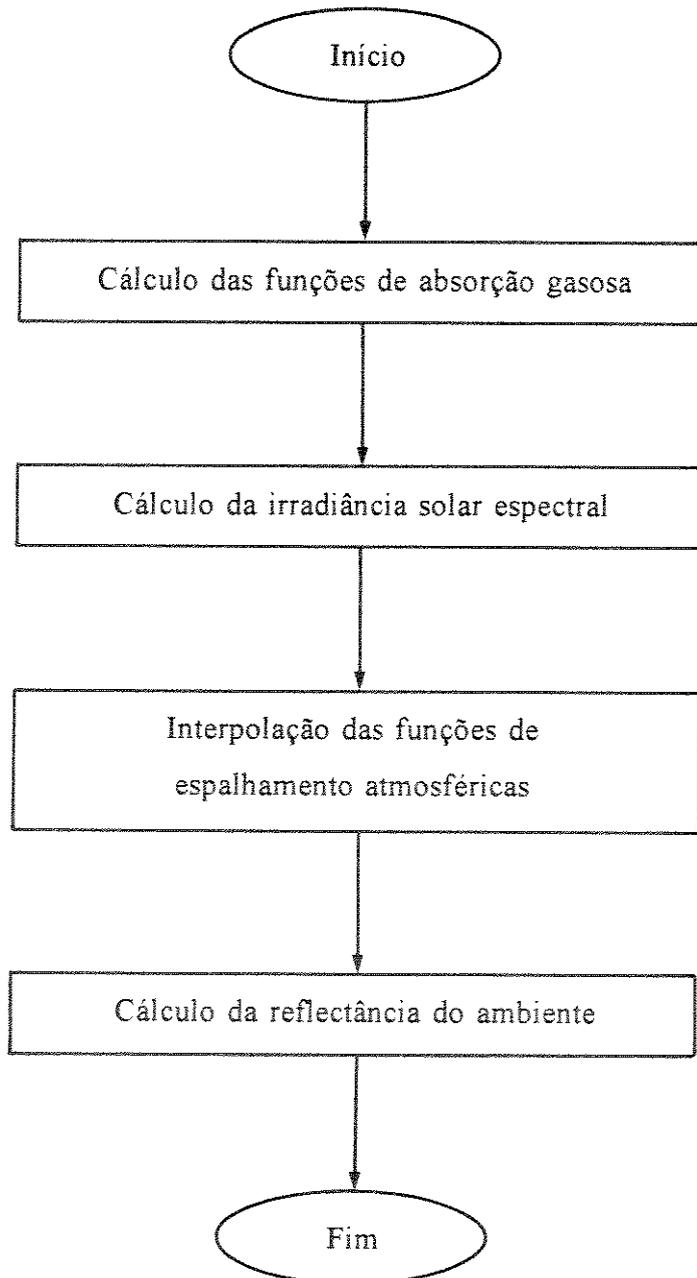
Passo 7: Cálculo da reflectância aparente;

Passo 8: Gravação dos resultados obtidos.

Esse algoritmo é representado esquematicamente através do seguinte fluxograma:



A integração dos cálculos para a banda espectral seleccionada pode ser representada pelo seguinte fluxograma:



A saída de resultados do Modelo 5S é feita através de uma listagem subdividida em quatro seções principais:

1. Dados de entrada:

Apresentação dos dados utilizados na definição do problema de simulação;

2. Simulação:

Fornecimento do resultado detalhado da simulação do sinal que chega ao satélite e da energia solar que atinge a superfície terrestre;

3. Parâmetros atmosféricos:

Listagem dos parâmetros atmosféricos utilizados na simulação apresentada na seção anterior;

4. Avaliação:

Apresentação dos parâmetros a serem utilizados para avaliação da precisão numérica dos resultados obtidos.

Esta organização dos resultados finais em forma de listagem atende plenamente os objetivos iniciais propostos para o Modelo 5S de ser uma ferramenta computacional destinada à simulação dos efeitos atmosféricos em sensoriamento remoto.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA DO TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho de campo teve como objetivo principal obter os dados de entrada necessários à correção radiométrica de imagens do satélite Landsat. Além disso, o trabalho experimental contribuiu para um melhor entendimento dos fenômenos que influenciam a formação das imagens pelos satélites e dos parâmetros físicos que os descrevem. A metodologia e os equipamentos utilizados para obter os dados de campo, juntamente com o modo de processamento destes dados, são apresentados detalhadamente neste capítulo.

2.1. Introdução

A Concentração dos Aerossóis foi o parâmetro que requereu mais atenção nas medidas de campo, por causa de sua importância para a correção radiométrica e também por ser de difícil estimativa devido à inexistência de medidas de rotina ou séries históricas. O Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos foi o segundo parâmetro que recebeu mais atenção nas medições experimentais porque, embora seja de grande importância para a correção radiométrica, ele é mais facilmente simulado do que a Concentração dos Aerossóis. A reflectância das áreas-testes selecionadas foi o terceiro parâmetro de importância no trabalho de campo, por causa da possibilidade de sua estimativa através de dados existentes na literatura. Além disso, a medição experimental precisa da reflectância das superfícies naturais é, por si só, uma tarefa que ocuparia toda a atenção do trabalho inicialmente proposto.

2.2. Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos

2.2.1. Descrição

O Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos é um parâmetro utilizado pelo Modelo 5S principalmente no cálculo das transmitâncias gasosas. Ele deve ser definido através dos perfis atmosféricos da pressão [hPa], da temperatura [K], da densidade de vapor d'água [g/m^3] e da densidade de ozônio [g/m^3], distribuídos em 34 altitudes-padrões diferentes:

- a) A cada 1km para as altitudes entre 0 e 25km, ou seja, a 0 (nível do mar), 1, 2,..., 24 e 25km;
- b) A cada 5km para as altitudes entre 30 e 50km, isto é, a 30, 35, 40, 45 e 50km;
- c) Nas altitudes de 70 e 100km, e também no infinito.

O modo mais indicado para a definição destes perfis atmosféricos é o dos dados coletados pelos balões-radiossondas. Como as radiossondagens nem sempre podem ser feitas, existem alguns tipos-padrões de atmosfera propostos na literatura utilizados também para definir o Modelo dos Componentes Gasosos. Dentre estes padrões, destacam-se o tropical, o das latitudes médias no verão e no inverno, o subártico no verão e no inverno, e o norte-americano. As figuras 2.1 e 2.2 apresentam os perfis-padrões da atmosfera tropical propostos por McClatchey et al. (1971).

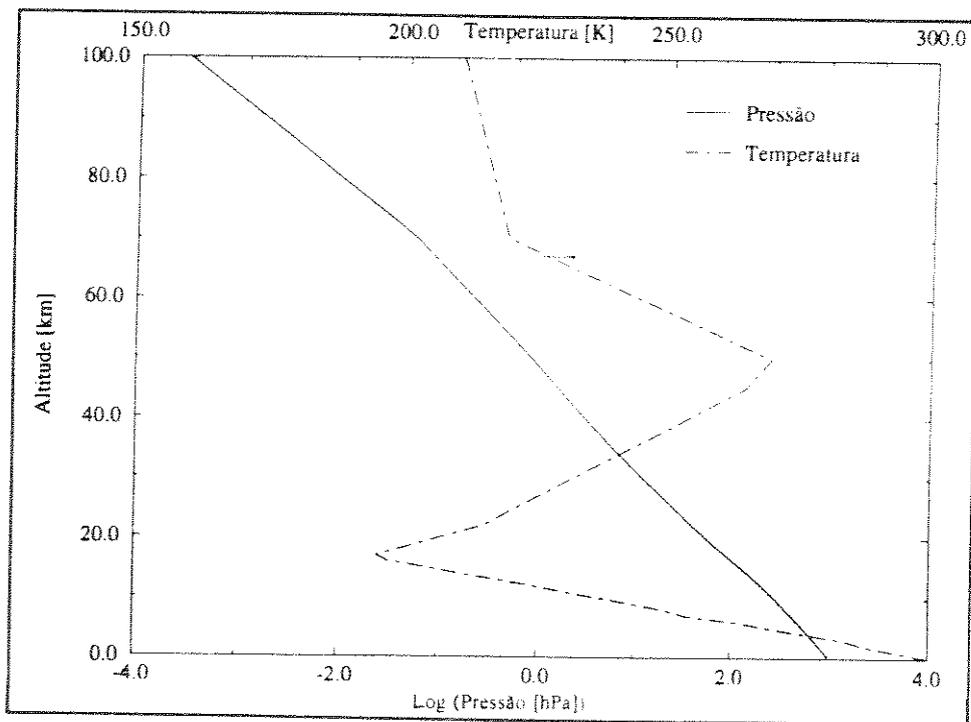


Figura 2.1 - Perfis-padrões de pressão e temperatura da atmosfera tropical

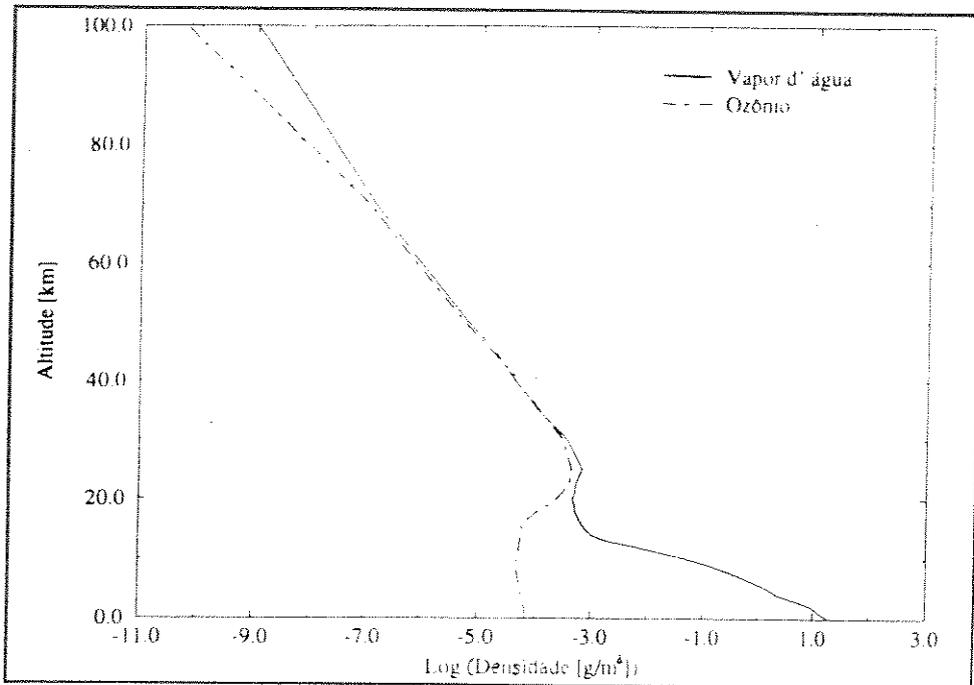


Figura 2.2 - Perfis-padrões de densidade de vapor d'água e ozônio da atmosfera tropical

2.2.2. Metodologia experimental relativa aos componentes gasosos

A obtenção dos valores necessários à definição dos perfis atmosféricos foi feita de dois modos distintos:

- a) Através do lançamento de balões de radiossondagem;
- b) Com base nos dados regulares de postos meteorológicos situados próximos aos locais de interesse.

2.2.2.1. Radiossondagens

As radiossondagens foram feitas através de um equipamento finlandês pertencente ao IAE/CTA/MAER, composto de três partes principais: um balão de hidrogênio, uma antena e um equipamento registrador. O balão era lançado ao ar levando consigo um conjunto de sensores. A cada dez segundos ele enviava à terra o valor da sua taxa de subida, da altitude [m], da pressão [hPa], da temperatura [°C], da umidade relativa [%], do ponto de orvalho [°C], da direção [°], velocidade [m/s] e estado do vento. Este equipamento não possuía registrador específico para o ozônio, que era outro parâmetro de interesse para o trabalho. Os valores

enviados pelo balão eram captados pela antena e armazenados no equipamento registrador. Depois de uma certa altitude, que dependia do estado geral da atmosfera, o balão estourava e a radiossondagem encerrava-se com a perda do conjunto de sensores.

A densidade de vapor d'água (UA) foi calculada em função da temperatura T e da umidade relativa UR através da seguinte equação apresentada por Campbell (1977):

$$UA[g/m^3] = \frac{2160,576 \cdot UR[\%] \cdot e^{\left(\frac{52,57633 - \frac{6790,4985}{T[K]} - 5,02808 \cdot \ln(T[K])}{T[K]}\right)}}{T[K]} \quad (2.1)$$

Os valores $V_{int}(z_{pad})$ utilizados para definir os perfis atmosféricos de pressão, temperatura e densidade de vapor d'água foram obtidos interpolando-se linearmente os dados, anterior $V(z_{ant})$ e posterior $V(z_{pos})$, a cada altitude-padrão alcançada pelo balão, ou seja,

$$V_{int}(z_{pad}) = \frac{(V(z_{pos}) - V(z_{ant})) \cdot (z_{pad} - z_{ant})}{(z_{pos} - z_{ant})} + V(z_{ant}) \quad (2.2)$$

A altitude máxima que um balão conseguiu atingir nas radiossondagens realizadas foi de 31km, enquanto que a menor foi de 3,6km. Deste modo, mesmo no melhor caso, os dados coletados foram insuficientes para definir os perfis atmosféricos completos nas 34 altitudes-padrões requeridas. Por esta razão, definiu-se uma metodologia de estimativa dos valores da pressão, temperatura e densidade de vapor d'água nas altitudes não alcançadas pelo balão. O método utilizado para contornar a falta de dados foi o da combinação dos valores experimentais obtidos em campo com os valores-padrões da atmosfera tropical propostos por McClatchey et al. (1971). O modelo tropical foi escolhido como base deste processo por ser, dentre os existentes no Modelo 5S, o mais representativo das condições atmosféricas observadas na região de Campinas, aonde foram feitos os trabalhos de campo.

Os valores $V_{ext}(z_{pad})$ de pressão, temperatura e densidade de vapor d'água, nas altitudes-padrões não alcançadas pelo balão, foram obtidos através da multiplicação dos valores-padrões tropicais $V_{trop}(z_{pad})$ por um coeficiente de extrapolação V_{corr} ou seja,

$$V_{\text{ext}}(z_{\text{pad}}) = V_{\text{cor}} \cdot V_{\text{trop}}(z_{\text{pad}}) \quad (2.3)$$

onde:

$$V_{\text{cor}} = \frac{\sum_1^{n_{\text{int}}} \frac{V_{\text{int}}(z_{\text{pad}})}{V_{\text{trop}}(z_{\text{pad}})}}{n_{\text{int}}} \quad (2.4)$$

sendo: n_{int} , o número de altitudes-padrões radiossondadas.

O coeficiente V_{cor} é o responsável pela combinação dos perfis tropicais-padrões com os dados experimentais de campo. Isto foi feito com o objetivo de dar mais realismo aos valores-padrões do modelo tropical empregados para suprir a inexistência dos dados experimentais de campo.

Uma outra limitação das radiossondagens foi a inexistência de um sensor específico para a medição da quantidade de ozônio. Por isso, o perfil atmosférico da densidade de ozônio foi definido de modo que a sua quantidade total, presente em uma coluna vertical da atmosfera (representada pela integral de seu perfil), fosse igual ao valor proposto por London et al. (1976), em função do mês e da latitude. Em termos práticos, tem-se que o valor $OZ(z_{\text{pad}})$ da densidade de ozônio, para cada uma das 34 altitudes-padrões z_{pad} , foi calculado como:

$$OZ(z_{\text{pad}}) = FC_{OZ} \cdot OZ_{\text{trop}}(z_{\text{pad}}) = \frac{OZ_{\text{London}}}{OZ_{\text{McClatchey}}} \cdot OZ_{\text{trop}}(z_{\text{pad}}) = \frac{OZ_{\text{London}}}{0,247} \cdot OZ_{\text{trop}}(z_{\text{pad}}) \quad (2.5)$$

onde: OZ_{London} é a quantidade total de ozônio tabelada por London et al. (1976) e $OZ_{\text{McClatchey}}$ é a quantidade total de ozônio para a atmosfera tropical de McClatchey et al. (1971).

Essa é a metodologia utilizada pelo Modelo 5S, quando se conhece apenas a quantidade total de ozônio existente numa coluna vertical da atmosfera. Os dados tabelados por London et al. (1976) são de boa qualidade e estão plenamente de acordo com o esperado na região de Campinas (Lazutim, 1993).

Como o ozônio é um assunto bastante estudado atualmente, há alguns arquivos disponíveis na rede INTERNET contendo dados a respeito da concentração de ozônio na

atmosfera. Um dos arquivos encontrados continha um volume razoável de dados obtidos por um satélite russo-americano em fase final de operação. Estes dados ainda estavam sendo consistidos, não havendo, portanto, confiança absoluta em sua utilização. Dentro de pouco tempo, entretanto, os bancos de dados de ozônio serão uma fonte útil à correção das imagens.

A UNICAMP instalou, em meados de 1993, um ozômetro russo para medir diariamente a concentração de ozônio em três horários diferentes. Trata-se de uma fonte de dados muito interessante, que poderá ser utilizada nas correções radiométricas futuras das imagens de satélite.

2.2.2.2. Postos meteorológicos

A metodologia empregada para definir o Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos na ausência de radiossondagens baseou-se na mesma idéia utilizada na extrapolação dos dados experimentais de radiossondagem, apresentada anteriormente. Foram utilizados os perfis-padrões do modelo tropical, corrigindo-os pelo fator V_{cor} , determinado experimentalmente a partir de uma única medida V_{exp} feita na altitude z_{ist} da área-teste considerada. Este poderia ser entendido como o caso extremo de uma radiossondagem contendo apenas um valor experimental medido. Deste modo, a partir das expressões (2.3) e (2.4), tem-se que:

$$V_{cor} = \frac{V_{exp}(z_{ist})}{V_{trop}(z_{ist})} \quad (2.6)$$

e, conseqüentemente:

$$V(z_{pad}) = V_{cor} \cdot V_{trop}(z_{pad}) = \frac{V_{exp}(z_{ist})}{V_{trop}(z_{ist})} \cdot V_{trop}(z_{pad}) \quad (2.7)$$

para as 34 altitudes-padrões z_{pad} .

Na altitude da área-teste tem-se que:

$$V(z_{ist}) = V_{cor} \cdot V_{trop}(z_{ist}) = \frac{V_{exp}(z_{ist})}{V_{trop}(z_{ist})} \cdot V_{trop}(z_{ist}) = V_{exp}(z_{ist}) \quad (2.8)$$

Observa-se, portanto, que a metodologia utilizada "amarra" os perfis-padrões tropicais da pressão, temperatura e densidade de vapor d'água ao valor destes parâmetros obtidos experimentalmente nas áreas-testes consideradas. O objetivo principal desta técnica foi o de representar mais fielmente o estado real da atmosfera a partir de um valor experimental de boa qualidade, considerando a ausência de radiossondagens detalhadas. Trata-se de uma aproximação bastante aceitável, sobretudo em situações de atmosfera estável, que é o mais provável ocorrer nos dias em que as imagens são disponíveis.

Os dados utilizados neste caso foram obtidos dos seguintes postos meteorológicos situados próximos aos locais de trabalho:

a) Fazenda "Santa Elisa"/IAC (22°54'S - 47°05'O - 669m):

Dados de pressão atmosférica [hPa] medidos diariamente às 10GMT;

b) FEAGRI/UNICAMP (22°49'S - 47°03'O - 606m):

Gráficos de temperatura [°C] e umidade relativa [%] registrados continuamente por um termoigrógrafo. Analisando-se visualmente algumas séries semanais de temperatura e umidade relativa medidas neste posto, concluiu-se que o termoigrógrafo funcionava satisfatoriamente. Um item de peso nesta análise foi que o higrógrafo atingiu várias vezes o fundo de escala, não sendo necessário, portanto, corrigir os dados registrados. O funcionamento deste posto é de nosso inteiro conhecimento, havendo uma grande confiança nos dados medidos.

A extrapolação dos valores medidos em uma estação para outra foi definida a partir dos seguintes valores-padrões propostos pelo modelo tropical para as áreas-testes consideradas:

Tabela 2.1 - Valores-padrões dos parâmetros atmosféricos por área-teste

Local	Lat.	Long.	Altit. [m]	Pressão [hPa]	Temp. [K]	Água [g/m ³]
FEAGRI	22°49'	47°03'	606	946,946	296,364	15,364
Viracopos	23°00'	47°01'	661	940,951	296,034	15,034
IAC	22°54'	47°05'	669	940,079	295,986	14,986

No caso da temperatura T e da densidade de vapor d'água UA , medidos apenas no posto meteorológico da FEAGRI/UNICAMP, obtiveram-se as seguintes equações para o cálculo de

seus valores no Aeroporto de Viracopos:

$$T_{VIRACOPOS} = \frac{296,034}{296,364} \cdot T_{FEAGRI} = 0,9989 \cdot T_{FEAGRI} \quad (2.9)$$

e

$$UA_{VIRACOPOS} = \frac{15,034}{15,364} \cdot UA_{FEAGRI} = 0,9785 \cdot UA_{FEAGRI} \quad (2.10)$$

Os valores da temperatura e da umidade relativa utilizados foram sempre a média dos cinco dados horários obtidos entre 11GMT e 15GMT, correspondentes ao período normal de medidas. A densidade de vapor d'água UA foi calculada através da equação (2.1), apresentada por Campbell (1977), a partir da temperatura T e da umidade relativa UR .

As imagens de satélite e os bancos de dados disponíveis em redes eletrônicas do tipo da INTERNET serão, num futuro próximo, alternativas interessantes à estimativa do teor de água na atmosfera, quando não forem feitas radiossondagens detalhadas.

No caso da pressão atmosférica, como os dados originais foram obtidos sempre da leitura diária feita às 10GMT no Posto Meteorológico da Fazenda "Santa Elisa" (IAC), tem-se que:

$$P_{FEAGRI} = \frac{946,946}{940,079} \cdot P_{IAC} = 1,0073 \cdot P_{IAC} \quad (2.11)$$

e

$$P_{VIRACOPOS} = \frac{940,951}{940,079} \cdot P_{IAC} = 1,00093 \cdot P_{IAC} \quad (2.12)$$

O valor obtido através destas equações foi acrescido em 2,6667hPa (\cong 2torr) para que ele estivesse mais próximo à média esperada para o período da manhã, por causa da elevação normal diária da pressão após o horário de 10GMT (Vianello et al., 1991).

O perfil de ozônio foi determinado da mesma forma utilizada no caso da realização das radiossondagens, descrita anteriormente.

Foram feitas algumas medições de pressão, temperatura e umidade relativa em superfície, com equipamento próprio. O aparelho para medir a pressão atmosférica foi um barômetro aneróide. A umidade relativa e a temperatura foram medidas através de um psicrômetro de Assmann, com aspiração forçada. Todos estes dados foram medidos à sombra, por uma das pessoas envolvidas no trabalho. A periodicidade das medidas variou bastante conforme a campanha por causa das atividades relacionadas com a obtenção dos espectros de radiação solar. Estes dados, entretanto, não foram utilizados por causa da pouca confiabilidade em sua qualidade.

Os dados registrados pela torre de controle do Aeroporto de Viracopos não foram utilizados por não estarem disponíveis todos os dias em que foram realizados os trabalhos de campo. Além disso, optou-se por utilizar a mesma fonte para cada tipo de dado necessário à correção, para haver uma maior uniformidade de informações.

2.3. Concentração dos aerossóis

2.3.1. Descrição

A concentração dos aerossóis pode ser definida de dois modos principais:

- a) A partir da visibilidade horizontal, expressa em [km];
- b) Através da espessura ótica da atmosfera para o comprimento de onda de 550nm.

A visibilidade horizontal é uma medida de rotina feita em aeroportos e postos meteorológicos. O operador registra o seu valor de acordo com a visão que tem de determinados pontos-padrões instalados a distâncias conhecidas. Árvores, construções e estradas, por exemplo, servem também de referência para medir a visibilidade, desde que se conheça a distância destes pontos até o local onde se fazem as leituras. O método de estimativa da concentração dos aerossóis, a partir da visibilidade horizontal, é bastante impreciso, causando erros da ordem de 50% (Deschamps et al., 1981). Mesmo assim, ele continua a ser largamente utilizado por causa da maior disponibilidade dos dados de visibilidade.

A espessura ótica, por sua vez, é uma grandeza variável no tempo e no espaço, sendo

pouco estudada por causa da dificuldade em determiná-la experimentalmente (Atzberger, 1990). O modo tradicional de obtenção da espessura ótica em superfície baseia-se na medição da energia solar direta através de um radiômetro para diferentes ângulos zenitais. Este método é baseado na seguinte formulação da Lei de Beer-Bouguer-Lambert, para a transmissão da radiação solar direta através da atmosfera:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \cdot D_s \cdot t_{g_{d\lambda}} \cdot e^{-\tau_{\lambda} \cdot m} \quad (2.13)$$

onde: I_{λ} é a radiação solar direta que chega à terra;

$I_{0\lambda}$ é a radiação solar disponível no topo da atmosfera (ou seja, é a irradiância solar exoatmosférica);

D_s é o fator de correção da constante solar em função da distância terra-sol;

$t_{g_{d\lambda}}$ é a transmitância gasosa espectral no sentido sol-terra;

τ_{λ} é a espessura ótica da atmosfera;

m é a massa ótica de ar;

λ é o comprimento de onda considerado.

Rearranjando-se adequadamente os termos da equação (2.13), tem-se que a espessura ótica da atmosfera é dada por:

$$\tau_{\lambda} = -\frac{1}{m} \cdot \ln\left(\frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda} \cdot D_s \cdot t_{g_{d\lambda}}}\right) \quad (2.14)$$

Existem expressões analíticas que permitem calcular diretamente, e com bastante precisão, o valor dos parâmetros m e D_s (ver Apêndice). Num caso mais simples, o valor de D_s pode ser aproximado por 1, enquanto que m , pela secante do ângulo zenital solar θ_s . Os valores de m e D_s utilizados foram sempre calculados através das fórmulas completas.

A transmitância gasosa $t_{g_{d\lambda}}$ é um pouco mais complicada de ser obtida com precisão, podendo ser calculada através de programas de simulação da transferência radiativa como o Modelo 5S, por exemplo. Neste caso, é preciso fornecer o Modelo dos Componentes Atmosféricos Gasosos do modo como foi descrito anteriormente. O valor de $t_{g_{d\lambda}}$ pode ser aproximado por 1, considerando que a precisão dos resultados finais será menor quanto menor

for a transmitância gasosa real. O valor de $t_{g\lambda}$ utilizado foi calculado sempre pelo Modelo 5S, considerando-se uma faixa espectral de 5nm centrada em torno de cada comprimento de onda de interesse. Este intervalo de 5nm foi utilizado por causa da existência de limitações de cálculo no Modelo 5S no tratamento de casos monocromáticos.

O parâmetro $I_{0\lambda}$ representa também, dentro do Método de Langley, o fator de calibração do radiômetro utilizado para medir a radiação direta espectral (Gu, 1991). Aplicando-se o logaritmo natural nos dois lados da equação (2.13) e rearranjando-se convenientemente os seus termos, tem-se que:

$$\ln\left(\frac{I_{\lambda}}{D_s \cdot t_{g\lambda}}\right) = \ln(I_{0\lambda}) - \tau_{\lambda} \cdot m \tag{2.15}$$

A partir dos valores experimentais de I_{λ} , obtidos para vários ângulos zenitais do sol durante um dia com atmosfera estável, é possível construir o gráfico apresentado na figura 2.3:

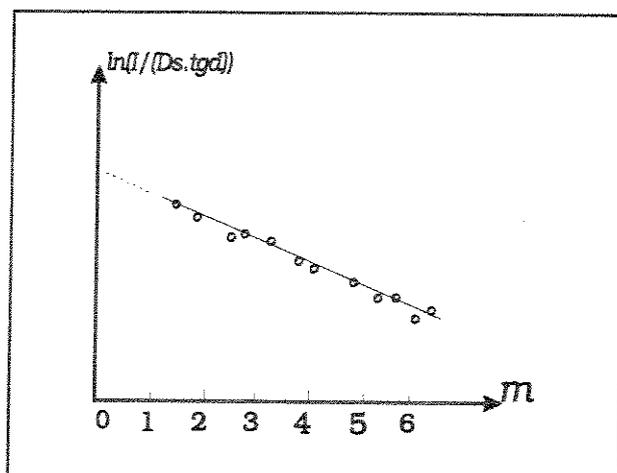


Figura 2.3 - Curva de Langley

O valor de $I_{0\lambda}$ é dado pela intersecção da reta de regressão com o eixo y. Embora m seja sempre maior ou igual a 1, por definição, esta extrapolação da reta de regressão corresponde ao ponto onde $\tau_{\lambda}=0$, ou seja, ao topo da atmosfera. A vantagem desta metodologia de obtenção de $I_{0\lambda}$, conhecida como Método da Curva de Langley, é que as medidas são todas feitas em superfície, sem a utilização de balões, foguetes, aviões e/ou satélites. O valor de $I_{0\lambda}$, determinado cuidadosamente com vários ângulos zenitais e atmosfera estável, é mais adequado

para o cálculo da espessura ótica do que os valores obtidos na literatura. Isto porque ele representa a sensibilidade do aparelho de medidas da radiação direta I_λ aos comprimentos de onda λ que compõem a sua faixa de operação. Caso o aparelho não tenha sido calibrado em campo, podem-se utilizar os valores experimentais da irradiância solar exoatmosférica que foram publicados por diversos autores. É importante ressaltar que a precisão dos resultados finais diminui um pouco com esta aproximação.

A radiação solar direta I_λ é o parâmetro mais importante das equações (2.14) e (2.15), e também o mais difícil de ser obtido experimentalmente por causa da pouca disponibilidade de equipamentos para este fim. Os pireliômetros de banda estreita e os fotômetros solares são aparelhos pouco acessíveis para a grande maioria dos laboratórios de sensoriamento remoto do mundo. Logo, a radiação direta não é um parâmetro medido rotineiramente e, por isso, não há dados facilmente disponíveis como no caso da visibilidade horizontal. Isto tudo limita a estimativa da concentração dos aerossóis a partir da espessura ótica, apesar de sua maior precisão matemática.

Uma alternativa que vem sendo testada com sucesso na Europa é a utilização das medidas de turbidez atmosférica feitas rotineiramente nos Centros Actinométricos da Meteorologia Nacional Francesa (Atzberger et al., 1991). Estas medidas são efetuadas três vezes por dia e se baseiam nos dados de radiação direta obtidos numa banda espectral larga (290nm a 630nm). Trata-se, portanto, de um método intermediário entre o da visibilidade horizontal e o da espessura ótica.

2.3.2. Metodologia experimental relativa aos aerossóis

A metodologia escolhida para o cálculo da Concentração dos Aerossóis foi a da medida direta da espessura ótica da atmosfera. Como não se dispunha de um pireliômetro de banda estreita, nem de um fotômetro solar, nem de dados de turbidez atmosférica, ou algo semelhante, foi preciso adequar o equipamento existente na UNICAMP para que se obtivessem os dados de radiação solar direta. O equipamento utilizado foi um espectrorradiômetro modelo LI1800 da LICOR que chegou à UNICAMP em abril de 1991, pouco antes do início dos trabalhos de campo.

Esse aparelho destina-se, originariamente, à medição de toda a energia eletromagnética que chega ao seu receptor na faixa espectral que vai de 300nm até 1.100nm, com precisão de 1nm. Ele é composto de três partes básicas: corpo principal, receptor de radiação e terminal de acionamento.

O corpo principal é formado por uma caixa metálica robusta, com dimensões 37x20x15cm e peso de 5kg, que contém a bateria, os sensores e os registradores muito bem acondicionados e protegidos, para possibilitar o seu uso em trabalhos de campo. Todos os dados coletados são armazenados pelo seu microprocessador interno numa memória com capacidade de 144Kb, suficiente para guardar até 100 espectros completos. Este microprocessador é dotado de uma linguagem própria cujos comandos definidos permitem acionar o equipamento, fazer alguns processamentos básicos e transferir os dados coletados para um microcomputador pessoal. Existe uma abertura na parte superior do corpo principal para a conexão do receptor de radiação. Em uma das laterais menores há uma reentrância onde localizam-se o botão de liga/desliga, o fusível e as tomadas para a conexão com o carregador da bateria, o terminal, o microcomputador e a impressora serial.

O terminal tem a função de controlar o funcionamento do aparelho, sendo construído para permitir também a sua utilização em campo. Ele tem a forma de uma caixa e contém um visor de cristal líquido com apenas duas linhas e um conjunto de teclas, similar ao encontrado habitualmente nos teclados de computador. No caso de medições em laboratório, ou quando se deseja transferir os dados registrados, ele deve ser substituído por um microcomputador com mais recursos. Os "notebooks", largamente utilizados hoje em dia, representam uma boa opção tanto para as medições em laboratório quanto para os trabalhos de campo.

O LI1800 tem um recurso muito interessante, principalmente para medidas estacionárias que é a possibilidade de programação dos horários a serem obtidos os espectros de radiação. Deve-se ter, todavia, muita atenção para que o equipamento esteja completamente preparado nos horários programados, uma vez que ele não emite sinal sonoro ou luminoso informando que começará registrar um novo espectro. O único modo de saber se ele está em operação é através do ruído produzido pelos filtros mecânicos em seu interior, pois o seu corpo principal não tem visor, nem luz de alerta. Este recurso foi empregado na primeira campanha realizada quando o terminal de campo ainda não havia chegado.

O LI1800 possui dois modelos de receptor de radiação construídos em teflon:

a) Padrão:

Tem 10cm de diâmetro e é acoplado diretamente no corpo principal do aparelho, sendo destinado às medições fixas;

b) Remoto:

Conecta-se através de um cabo de fibra ótica com 1,5m de comprimento, tendo 1,5cm de diâmetro.

Esses receptores de radiação são do tipo cosseno e possuem uma abertura ampla, da ordem de 180° , que capta a energia vinda de todos os ângulos do hemisfério, conforme ilustra a figura 2.4:

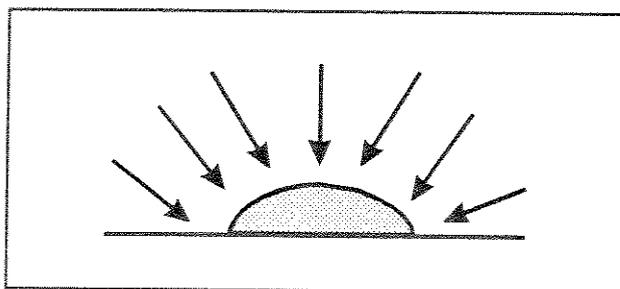


Figura 2.4 - Receptor hemisférico

No caso da energia solar, o sinal registrado pelo espectrorradiômetro é igual à radiação global, representada pela soma da radiação direta vinda do sol com a difusa proveniente de todos os ângulos do hemisfério, conforme apresentado na figura 2.5:

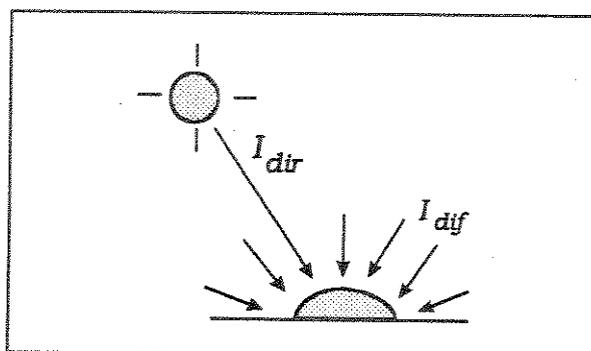


Figura 2.5 - Radiação solar global incidente no receptor hemisférico

Considerando que a radiação direta tem sempre uma direção de propagação muito bem definida, é possível medi-la com o LI1800, desde que se impeça, de alguma forma, a chegada da radiação difusa ao seu sensor. Isto pode ser conseguido, por exemplo, através do acoplamento de um tubo ao receptor hemisférico que limite ao máximo o seu ângulo de abertura, de modo que o sensor receba apenas a radiação direta quando o conjunto tubo+receptor for mirado para o sol, conforme representado na figura 2.6:

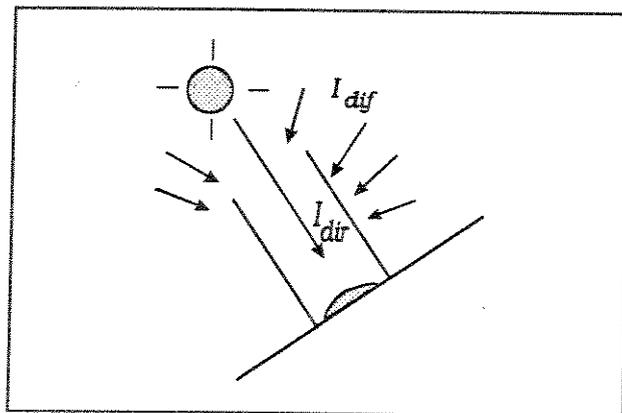


Figura 2.6 - Medição da radiação solar direta

Essa é uma metodologia que também foi adotada pelo INRA para medir a radiação direta a partir do seu radiômetro CIMEL. Um fato que motivou o desenvolvimento desta metodologia foi a possibilidade de obter espectros de radiação direta com a mesma precisão e na mesma faixa espectral utilizada originariamente para medir a radiação global.

O tubo adaptado ao LI1800 foi feito de metal e coberto por uma tinta preta fosca para evitar ao máximo as reflexões múltiplas da radiação solar em suas paredes internas. Na parte inferior do tubo foi soldada uma base metálica com as mesmas dimensões que a placa-suporte do receptor remoto do radiômetro, sendo conectada a esta através de três parafusos. Isto foi feito para facilitar a rápida montagem e desmontagem do conjunto, de modo a permitir a leitura alternada das radiações, global e direta, em um curto espaço de tempo. Na base do tubo foi colado um anel de borracha para impedir que o receptor remoto sofresse algum dano físico. Esta foi a adaptação que deu os melhores resultados, dentre as várias testadas. As dimensões do conjunto tubo+receptor são as seguintes:

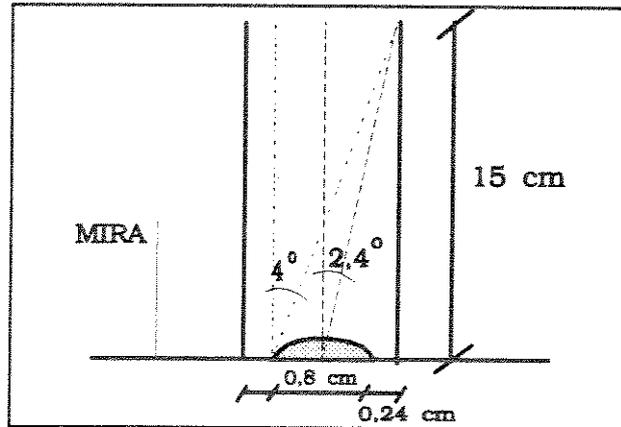


Figura 2.7 - Dimensões do conjunto tubo+receptor hemisférico

O ângulo de abertura de $2,4^\circ$ do tubo maior diminuiu bastante, segundo Atzberger (1990), a interferência da radiação difusa circunsolar nas medições da direta, mas aumenta a necessidade de posicionar corretamente o conjunto tubo+receptor em direção ao sol, para que o radiômetro receba exatamente a radiação direta. Esta preocupação com o posicionamento correto do conjunto tubo+receptor é explicada pelo fato de que a distância entre a terra e o sol é muito grande e, por isso, um pequeno desvio angular em terra pode significar uma variação substancial no espaço.

A visada inicial em direção ao sol foi feita utilizando-se a mira ao lado do tubo, até que ela não produzisse mais nenhuma sombra. Este posicionamento era então conferido para certificar se o ângulo de elevação do tubo, em relação ao horizonte, era o mesmo que o ângulo zenital solar calculado previamente, de minuto em minuto, para o período da manhã do dia considerado. Um fator que contribuiu bastante para o sucesso das medições feitas foi a grande mobilidade do tripé aonde foi instalado o receptor remoto do LI1800.

2.3.2.1. Radiação difusa

A adaptação do espectrorradiômetro descrita acima foi feita no segundo semestre de 1991, após o encerramento da primeira série de campanhas experimentais. Antes disso, entretanto, fez-se uma tentativa de determinar a radiação direta através da diferença entre as radiações, global e difusa, medidas experimentalmente em campo.

Essa é uma aproximação válida e comumente adotada por causa da facilidade de sua

implementação prática, porque é preciso dispor apenas de um anteparo que impeça a chegada da radiação direta ao receptor do radiômetro, conforme ilustra a figura 2.8:

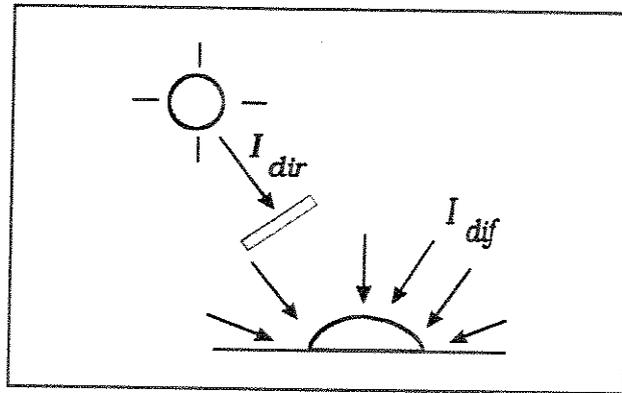


Figura 2.8 - Radiação difusa incidente no receptor hemisférico

O anteparo utilizado não pode ser muito grande a ponto de obstruir a chegada de uma parcela significativa da radiação difusa ao receptor, nem tão pequeno que permita a passagem da radiação direta. Esta metodologia foi testada em campo após a construção de um pequeno anteparo de cartolina preto de 3x3cm, que foi adaptado a um tripé da mesma forma que se fez com o receptor remoto do radiômetro. Uma das dificuldades práticas encontradas nesta metodologia foi a do ajuste correto e rápido do anteparo de modo a não haver uma diferença de tempo muito grande entre as medidas de radiação global e difusa. Um outro problema encontrado foi o da fixação adequada do anteparo para que o vento não o movimentasse e influísse nas medidas feitas. Estas duas dificuldades ocorreram principalmente porque se optou pela utilização de um pequeno anteparo para que os resultados obtidos fossem mais precisos.

A metodologia da radiação difusa não foi muito utilizada por dois motivos principais. O primeiro deles foi que ela ficou pronta praticamente no final do trabalho experimental feito em 1991, quando ainda não havia certeza sobre a precisão dos seus resultados e da sua eficiência. O segundo, e principal fator, referiu-se à preferência pelo desenvolvimento da metodologia de medição da radiação direta com o tubo negro limitante.

2.3.2.2. Radiação global

A radiação global foi medida em todas as campanhas, nos comprimentos de onda pares situados entre 330nm e 1.100nm, sempre com o receptor de radiação remoto. A placa metálica, na qual ele é fixado, foi adaptada a um tripé pertencente a outro aparelho, de modo a facilitar a realização das medidas, especialmente quanto ao nivelamento do receptor e à manutenção constante de sua posição durante as varreduras. Os espectros levaram sempre um minuto, no máximo, para serem obtidos.

O dado que realmente interessava à determinação da Concentração dos Aerossóis não era a radiação global, mas sim a radiação direta, que não pôde ser medida em 1991 com o equipamento disponível. Apesar desta limitação inicial, optou-se pela continuidade do trabalho de campo, determinando-se apenas a radiação global nas campanhas já programadas enquanto estudava-se algum meio viável de obter a radiação direta. Embora parecesse que os dados de radiação global não fossem muito úteis à correção atmosférica, eles foram normalmente coletados, pois acreditava-se na sua aplicação futura, em alguma metodologia ainda a ser desenvolvida, para a estimativa da Concentração dos Aerossóis. O que motivou a idéia acima foi o fato de que se o Modelo 5S, utilizado na metodologia de correção atmosférica implementada, funcionasse bem numa direção, então ele deveria funcionar também na outra, ou seja, se os dados de entrada, entre eles a Concentração dos Aerossóis, fossem tais que a diferença entre o valor da radiação global estimada pelo Modelo 5S e a medida experimentalmente fosse suficientemente pequena, poderia-se afirmar que a estimativa do sinal recebido pelo satélite também estaria correta.

A idéia proposta correspondia, portanto, à determinação do valor da Concentração dos Aerossóis que resultasse na estimativa da radiação global mais próxima à medida experimental de campo. Neste caso, os parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S seriam válidos para o procedimento de correção atmosférica utilizado. Uma das grandes vantagens desta metodologia é a simplificação dos equipamentos necessários à determinação dos dados de entrada na correção atmosférica.

2.4. Tipo dos aerossóis

O tipo dos aerossóis é outro parâmetro de grande importância à correção radiométrica das imagens de satélite, mas é também muito pouco conhecido e difícil de ser determinado experimentalmente. Ele deve ser definido a partir das porcentagens volumétricas dos seguintes componentes básicos definidos pela Comissão Internacional de Radiação (WMO, 1986):

- a) Minerais não-solúveis em água (Dust-Like component- D.L.);
- b) Minerais solúveis em água (Water Soluble component- W.S.): assim como o anterior corresponde ao que se conhece popularmente por poeira;
- c) Oceânicos (Oceanic component- O.C.): partículas geradas na superfície do mar pela ação do vento, consistindo de 30% de sal marítimo e 70% de água líquida;
- d) Orgânicos (Soot component- S.O.): é a fuligem gerada pelas atividades urbanas e industriais.

A tabela 2.2 apresenta as concentrações volumétricas (V_j) e do número de partículas (N_j) que caracterizam estes quatro componentes básicos:

Tabela 2.2 - Concentrações volumétricas e do número de partículas dos componentes básicos dos aerossóis

Parâmetro	Componente			
	D.L.	W.S.	O.C.	S.O.
$V_j[\mu\text{m}^3/\text{cm}^3]$	113,98352	113,98352E-06	5,14441	59,77735E-06
$N_j[\text{part}/\text{cm}^3]$	54,73400	1,86850E+06	276,0500	1,80582E+06

Dentre as combinações que podem ser feitas com estes elementos, destacam-se três que foram utilizadas para definir a composição-padrão dos aerossóis continentais, marítimos e urbanos. As tabelas 2.3 e 2.4 apresentam a porcentagem e a concentração volumétrica [$\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$], respectivamente, de cada componente básico nos três modelos-padrões de aerossol:

Tabela 2.3 - Porcentagem dos componentes básicos nos modelos-padrões de aerossol

Modelo	D.L.	W.S.	O.C.	S.O.
Continental	70	29	0	1
Marítimo	0	5	95	0
Urbano	17	61	0	22

Tabela 2.4 - Concentração volumétrica dos componentes-básicos nos modelos-padrões de aerossol

Modelo	D.L.	W.S.	O.C.	S.O.	Total
Continental	444,20	184,00	0,00	6,35	634,55
Marítimo	0,00	54,29	1031,71	0,00	1086,00
Urbano	34,36	123,30	0,00	44,47	202,13

A definição do tipo de aerossol foi feita a partir dos tipos-padrões propostos pelo Modelo 5S, analisando-se as condições geográficas, climáticas e de uso da terra na região de Campinas. A distância do Oceano Atlântico, a direção dos ventos e a presença de um grande obstáculo como a Serra do Mar, ao longo do litoral paulista, são condições naturais suficientemente fortes para inviabilizar a presença de componentes oceânicos no aerossol da região de Campinas.

O tipo urbano, por sua vez, destina-se principalmente a áreas industriais e densamente habitadas, conforme se observa pela importância da componente relacionada com atividades humanas (22% S.O.) na sua composição. O índice populacional e o industrial da área de trabalho não são tão altos como aqueles previstos pelo modelo urbano, sobretudo porque existe também uma ocupação agrícola bastante importante na região. Como os dados experimentais foram medidos no período do inverno, é perfeitamente aceitável esperar que os aerossóis desta época sejam compostos por 99% de minerais (70% D.L. + 29% W.S.), ou "poeira", conforme estabelece o modelo continental, devido às seguintes condições naturais observadas nesta época:

- a) Vegetação menos densa;
- b) Solos mais descobertos;
- c) Chuva menos intensa.

Deste modo, optou-se pela utilização do tipo continental de aerossol, por ser, dentre os três modelos citados acima, o mais factível para a região de Campinas, aonde foram feitos os trabalhos de campo.

2.5. Reflectância das áreas-testes

2.5.1. Descrição

O objetivo principal da medição experimental da reflectância das superfícies terrestres, no contexto da correção atmosférica, é obter subsídios que permitam analisar os resultados produzidos pelo tratamento das imagens. A avaliação é feita, normalmente, comparando-se os valores da reflectância calculados a partir das imagens com os obtidos experimentalmente em campo. A eficiência deste método está diretamente relacionada com uma série de fatores que podem alterar a precisão das medidas experimentais da reflectância (Gu et al., 1990), tais como:

- a) Características do radiômetro utilizado: linearidade de sua resposta em função do comprimento de onda, fundo de escala, variação térmica;
- b) Método empregado para as medidas da energia solar incidente;
- c) Variações espacial e temporal da reflectância da superfície;
- d) Calibração absoluta do radiômetro;
- e) Propriedades não-lambertianas da superfície.

O equipamento padrão para a medição experimental da reflectância costuma ter um receptor de radiação hemisférico voltado para o espaço, a fim de medir a energia solar incidente, e um receptor de radiação cônico (com ângulo de abertura inferior a 180°) voltado para baixo, para medir a energia refletida pelo alvo observado. A figura 2.9 ilustra a configuração padrão de um radiômetro de campo:

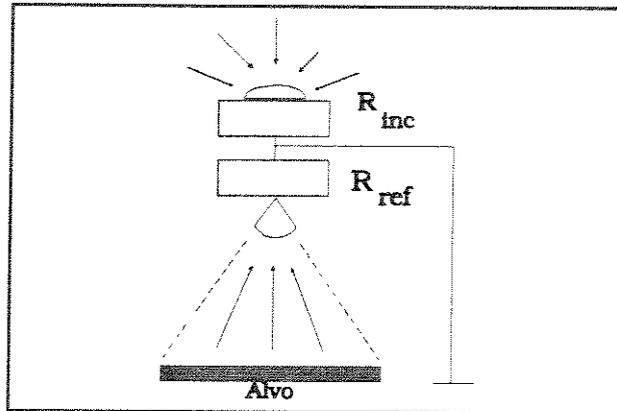


Figura 2.9 - Radiômetro hemisférico-cônico

A reflectância ρ do alvo é igual à razão entre estas duas medidas de energia (R_{inc} e R_{ref}), multiplicada pelo fator de intercalibração (FI) dos dois receptores de radiação total e refletida:

$$\rho = \frac{R_{ref}}{R_{inc}} \cdot FI \quad (2.16)$$

O coeficiente FI é dado pela razão entre a energia total R_{incp} incidente numa superfície reflectora padrão lambertiana (uma placa de sulfato de bário, por exemplo) e a radiação refletida R_{refp} por ela, multiplicada pela reflectância ρ_p desta superfície medida em laboratório. Esta definição de FI equivale à seguinte expressão matemática:

$$FI = \frac{R_{incp}}{R_{refp}} \cdot \rho_p \quad (2.17)$$

A figura 2.10 ilustra a metodologia de determinação do fator de intercalibração FI :

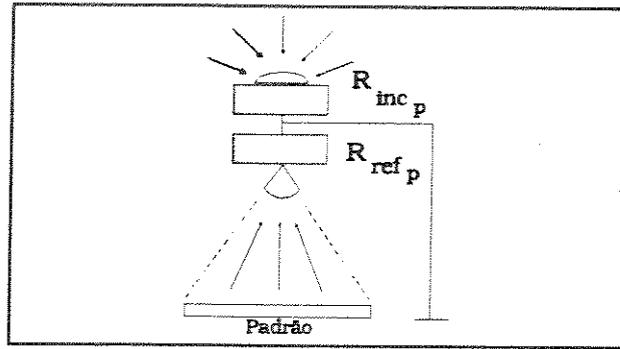


Figura 2.10 - Calibração do radiômetro hemisférico-cônico

As vantagens principais deste tipo de radiômetro, tais como a precisão dos dados obtidos, a rapidez e a facilidade da realização das medidas, devem-se à simultaneidade da leitura das energias incidente e refletida. Como exemplo de radiômetro deste tipo tem-se o CIMEL, que é um equipamento francês destinado à obtenção experimental da reflectância nos mesmos comprimentos de onda que o utilizado pelo três canais do satélite SPOT. A versão simplificada deste radiômetro possui apenas uma cabeça de leitura com dois receptores diferentes, um cônico e outro hemisférico, que são trocados a cada leitura desejada.

Existe um outro tipo padrão de radiômetro onde os dois receptores de radiação são cônicos e sempre voltados para baixo. Neste caso, a energia incidente é medida visando-se um dos receptores de radiação para uma superfície reflectora padrão lambertiana. A figura 2.11 apresenta um esquema deste tipo de radiômetro:

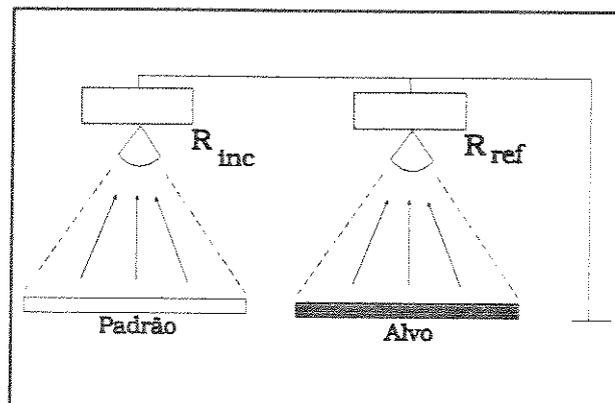


Figura 2.11 - Radiômetro bicônico

A reflectância ρ é calculada também pela equação (2.16), sendo que a principal diferença em relação ao radiômetro hemisférico-cônico está na determinação do fator de

intercalibração dos dois receptores de energia. A figura 2.12 ilustra o esquema de obtenção do valor de FI para o radiômetro bicônico:

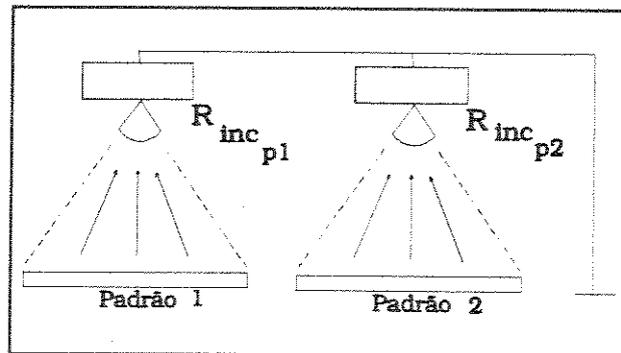


Figura 2.12 - Calibração do radiômetro bicônico

Neste caso tem-se que:

$$FI = \frac{R_{inc_{p2}}}{R_{inc_{p1}}} \cdot \rho_p \quad (2.18)$$

A configuração mais usual deste tipo de radiômetro é com apenas um receptor de radiação que é o responsável pela medição das energias incidente, com a superfície reflectora padrão, e refletida, visando diretamente o alvo. A desvantagem principal deste equipamento simplificado é a diminuição da precisão dos dados obtidos devido à impossibilidade de medições simultâneas das radiações incidente e refletida, principalmente em situações de iluminação variável (Duggin et al., 1983).

A precisão de estimativa da reflectância média de uma área-teste depende da quantidade de medidas feitas e de suas distribuições espacial e estatística, variando pouco com a dimensão da superfície visada. A quantidade de medidas experimentais necessárias para se estimar a reflectância média com precisão de 2,5% é da ordem de uma centena. A caracterização completa da reflectância de uma superfície natural deve considerar a sua variação espectral, angular, temporal e espacial (Gu, 1991).

Os dados de reflectância foram obtidos para superfícies de asfalto e solo pois se acreditava que por serem radiometricamente mais estáveis que superfícies vegetais, por

exemplo, seriam mais úteis para avaliar a correção radiométrica das imagens. Na prática entretanto isto não foi comprovado, principalmente porque não foi possível fazer um número de medidas conforme indicado acima para obter uma boa precisão. Os dados obtidos foram úteis para se determinar a variabilidade espectral das superfícies medidas.

2.5.2. Reflectância difusa ou hemisférica

O equipamento utilizado para as medidas da reflectância difusa das áreas-teste foi o espectrorradiômetro LI1800. A radiação global incidente foi medida com o receptor de radiação nivelado e voltado para o espaço, conforme descrito anteriormente, enquanto que a radiação refletida foi determinada com o mesmo receptor nivelado e voltado para baixo. A vantagem de se utilizar o mesmo equipamento para medir as radiações refletida e incidente é que não há necessidade de se fazer uma calibração absoluta dos radiômetros (Zibordi et al., 1991).

O problema principal da medida da radiação refletida com o receptor de radiação hemisférico é que ele pode captar a energia vinda de outros pontos, além daqueles situados na área de interesse. Para atenuar esta influência da vizinhança, coloca-se o receptor no centro das áreas-testes a uma altura conveniente com a extensão e homogeneidade das superfícies, para que o possível ruído seja proveniente do mesmo tipo de superfície que o alvo visado. A desvantagem principal desta metodologia é que ela diminui a representatividade de cada medida, requerendo um número maior de amostras para representar adequadamente a variabilidade espacial da reflectância do alvo de interesse. Esta maior quantidade de amostras, entretanto, nem sempre pode ser obtida pelos seguintes motivos:

- a) Utilização do LI1800 para outras finalidades com maior prioridade para o trabalho como a medida da radiação direta;
- b) Tempo gasto para movimentá-lo em função do seu peso e dimensão;
- c) Tempo necessário à obtenção de cada espectro.

A reflectância difusa foi calculada dividindo-se cada espectro de radiação refletida por um espectro da radiação global correspondente. Para que os resultados calculados fossem mais precisos, os dados de radiação incidente utilizados foram obtidos através da interpolação

linear entre os espectros imediatamente anterior e posterior ao horário do espectro de radiação refletida considerado. A reflectância difusa média por banda temática foi calculada ponderando-se o espectro da reflectância difusa média pelas funções-filtro das bandas temáticas do satélite Landsat apresentadas no Apêndice.

2.5.3. Esfera integradora

Além da medição em campo descrita acima, utilizou-se também, em algumas ocasiões, a esfera integradora para a determinação da variabilidade espectral da reflectância das áreas-testes em laboratório. A esfera integradora é um acessório do LI1800 difícil de ser encontrado nos laboratórios de sensoriamento remoto, que se destina à medição prática da reflectância, transmitância e absorvância dos materiais. A esfera do LI1800 é do tipo externa, dado que a amostra faz parte de sua parede. Neste caso, as propriedades de um material podem ser determinadas na esfera desde que seja possível colocar uma amostra que cubra completamente a pequena abertura existente na sua parede. Isto é fácil no caso de folhas médias e grandes, plásticos, sombrites, filmes e rochas, por exemplo, mas difícil no caso de líquidos, folhas pequenas e solos. A esfera é acoplada ao corpo principal do espectrorradiômetro no lugar do receptor remoto de radiação, através do cabo extensor de fibra ótica. A faixa espectral de operação da esfera vai de 400nm até 1.100nm.

A grande vantagem desse método é que a reflectância da superfície é mais facilmente determinada em laboratório pela esfera integradora do que em trabalhos de campo. O problema principal de utilização da esfera é a desconsideração de fatores importantes para a reflectância dos alvos naturais como a estrutura da superfície, por exemplo. Uma outra limitação desta metodologia é que a superfície medida deve ter características que viabilizem a determinação de suas propriedades radiométricas através da esfera integradora.

Foram feitas algumas medidas com amostras de solo da Estação de Cordeirópolis (IAC) e do asfalto da pista do Aeroporto de Viracopos. A amostra de solo utilizada foi acondicionada numa pequena lata e coberta com um filme plástico transparente para não sujar a parede da esfera. Esta película plástica também teve a sua reflectância e transmitância medidas para que se pudessem fazer as correções necessárias. As amostras do asfalto da pista eram na forma de pequenas pedras e, por isso, puderam ser medidas sem problemas.

CAPÍTULO 3

TRABALHO DE CAMPO

A descrição detalhada do trabalho experimental e dos resultados obtidos nas campanhas experimentais de 1991 e 1992 é feita neste capítulo.

3.1. Campanhas experimentais realizadas em 1991

As campanhas de 1991 foram programadas para dois locais distintos durante o período da seca (outono e inverno), devido à menor cobertura nebulosa observada nesta época no Estado de São Paulo e maior turbidez atmosférica. Foi escolhida a área do Aeroporto de Viracopos por sua boa localização nas imagens, por sua topografia suave e também por causa do lançamento dos balões-radiossonda pelos técnicos do IAE/CTA/MAER e do INPE. A segunda área selecionada foi um campo de solo nu existente na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), situada em Cordeirópolis.

No caso do Aeroporto de Viracopos, foram agendadas três campanhas nos dias 01/06, 17/06 e 03/07/91, enquanto que, para a estação do IAC em Cordeirópolis (SP), foram programadas as datas de 23/05 e 08/06/91. As campanhas de teste e calibração de alguns equipamentos utilizados e de avaliação das metodologias de medida foram feitas no Observatório a Olho Nu (OBONU), na FEAGRI e no CPQBA da UNICAMP.

3.1.1. Estação experimental do IAC (Cordeirópolis-SP) em 23/05/91

Esta foi a campanha que marcou o início efetivo das atividades práticas de coleta de dados em campo, tendo sido realizada em cooperação com o IAE/CTA/MAER e o INPE. A constante passagem de nuvens sobre o local, durante o período da manhã, prejudicou as medidas experimentais e impediu que se obtivesse uma imagem de boa qualidade.

3.1.1.1. Parâmetros atmosféricos

Um balão radiossonda foi lançado às 12:00GMT de uma área ao lado do anfiteatro da estação e chegou a altitude de 31.333m num tempo total de 1:48h de voo. Os dados de

pressão, temperatura e densidade de vapor d'água obtidos neste caso são apresentados nas figuras 3.1 e 3.2 através de linhas cheias. As linhas tracejadas correspondem aos perfis-padrões da atmosfera tropical.

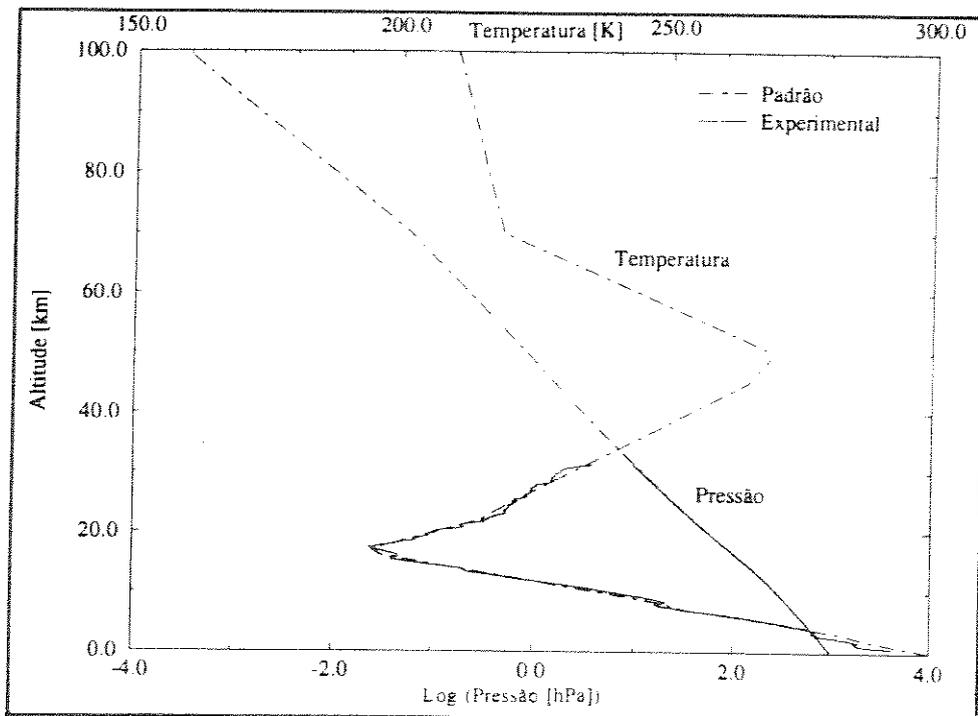


Figura 3.1 - Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 23/05/91

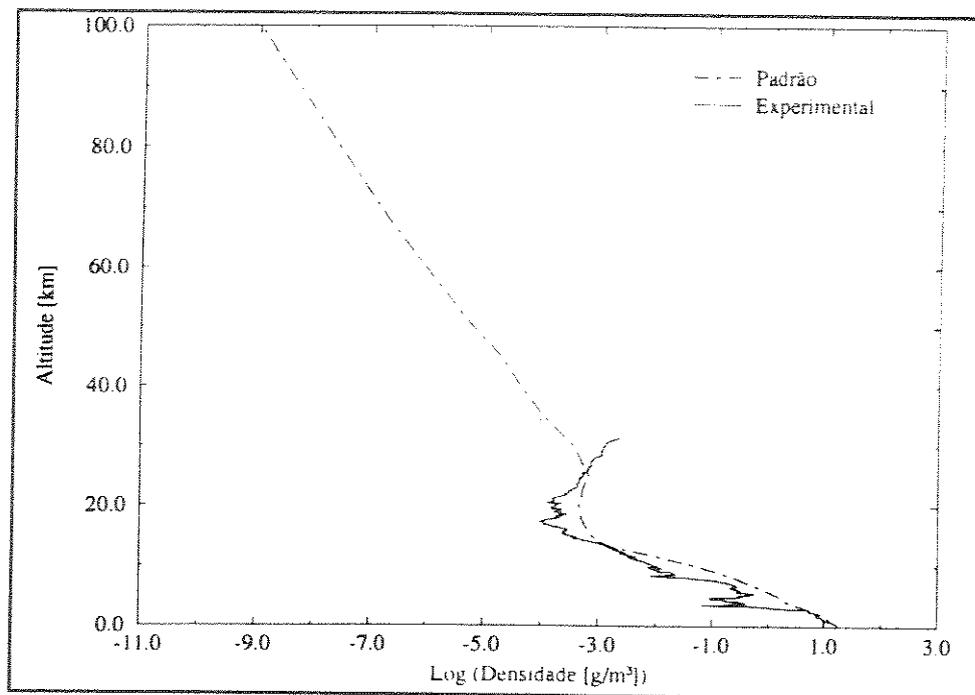


Figura 3.2 - Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 23/05/91

As razões médias entre os valores experimentais e os valores padrões tropicais, para a pressão, temperatura e densidade de vapor d'água, são apresentadas na tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Razões médias entre os valores experimentais e padrões em 23/05/91

Parâmetro	Razão Média
Pressão	$0,9902 \pm 0,0073$
Temperatura	$1,0001 \pm 0,0085$
Vapor d'água	$0,5788 \pm 0,6518$

Observa-se que os dados experimentais da pressão e da temperatura coincidiram bastante com os valores propostos por McClatchey et al. (1971), para uma atmosfera tropical, havendo uma diferença sensível no caso da densidade de vapor d'água, embora o perfil experimental acompanhe o perfil padrão. Essa maior variabilidade da densidade de vapor d'água, em comparação com os dados padrões, está perfeitamente dentro do esperado para este tipo de parâmetro.

3.1.1.2. Radiação solar

As medidas de radiação solar incidente e refletida foram feitas num campo plano com solo nu arado, situado no interior da área experimental da Estação. Este campo era cercado em toda a sua volta por vegetação, principalmente grama e laranjeiras, e tinha 250m de comprimento por 200m de largura. A umidade média do solo, determinada em laboratório a partir de quatro amostras, era de $10,81\% \pm 3,35$. Os dados foram coletados em cinco pontos centrais (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5), distribuídos ao longo do comprimento do campo, de acordo com o ilustrado na figura 3.3:

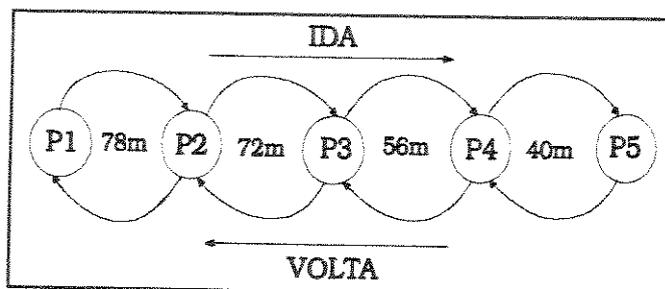


Figura 3.3 - Localização dos pontos experimentais em 23/05/91

As medições da radiação incidente e refletida foram feitas alternadamente, iniciando-se às 12:06GMT e encerrando às 12:57GMT, com um intervalo de três minutos entre cada uma delas. Isto foi definido previamente pois, como o terminal de campo ainda não estava disponível, foi preciso programar o espectrorradiômetro, através de um microcomputador pessoal, para que se pudessem fazer as medidas desejadas. O tempo de três minutos entre o início de cada nova medida era destinado ao deslocamento de um ponto a outro do campo, ao ajuste do aparelho e à coleta dos dados.

O equipamento foi instalado num suporte em forma de L invertido, construído com vigas metálicas perfuradas, que tinha 2,2m de altura e 1,3m de comprimento. O corpo principal do LI1800 prendia-se na haste principal, num gancho fixado a 1,5m da base, enquanto que o receptor de radiação estava no extremo do braço superior, a 1,3m da haste principal, limitado pela extensão do cabo de fibra ótica. Pode-se estimar que 75% da quantidade total de energia recebida pelo receptor de radiação era proveniente de uma área circular do terreno, com diâmetro de 7,5m aproximadamente (ver Apêndice). Por isso, o operador do aparelho utilizou roupas escuras com o objetivo de diminuir a interferência de sua presença dentro do campo de visão do receptor de radiação. O suporte metálico utilizado foi a melhor solução encontrada na época para medir as energias incidente e refletida com o equipamento disponível. As dificuldades encontradas na prática, devidas principalmente à dimensão e ao peso do LI1800, desmotivaram a utilização do suporte e fizeram com que outra alternativa fosse experimentada nas campanhas subseqüentes.

3.1.1.3. Reflectância

Dos nove pares de espectros de radiação coletados, apenas o par correspondente ao ponto P_4 , determinado no sentido de volta, não foi prejudicado pela passagem das nuvens durante o período de medidas. Os demais tiveram interferências das mais variadas durante as varreduras feitas para a energia incidente e a refletida e, por isso, não apresentaram valores confiáveis. A curva da reflectância obtida neste caso será apresentada mais adiante.

Uma amostra de solo foi acondicionada numa pequena lata e coberta com um filme plástico transparente, para ser medida na esfera integradora sem sujar a sua parede. A reflectância ρ_p , do filme plástico, determinado na própria esfera, variava de 6,9% (em 1.090nm)

a 8,31% (em 404nm). A sua transmitância T_p estava entre 89,39% (em 1.094nm) e 91,42% (em 422nm). A presença desta película plástica não era, portanto, desprezível e devia ser levada em consideração na estimativa da reflectância do solo pela esfera.

A forma de correção da reflectância do solo, devido à existência do filme plástico, baseou-se nas propriedades radiométricas do plástico medidas pela própria esfera. A figura 3.4 ilustra o modelo utilizado para fazer esta correção:

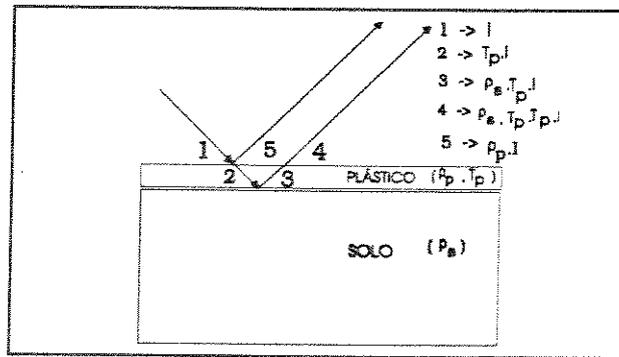


Figura 3.4 - Medição da reflectância da amostra de solo na esfera integradora

Sendo I a energia incidente na amostra de solo, tem-se que $(\rho_p \cdot I)$ é a energia refletida diretamente pela película de plástico, enquanto que $(T_p \cdot I)$ é a energia transmitida através dela para o solo. Sendo ρ_s a reflectância do solo, tem-se que a energia refletida por ele é igual a $(\rho_s \cdot T_p \cdot I)$ e a energia que deixa a amostra devida ao solo é dada por $(\rho_s \cdot T_p^2 \cdot I)$. Logo, a energia refletida total é igual a $(\rho_s \cdot T_p^2 \cdot I + \rho_p \cdot I)$ e a reflectância medida pela esfera é um valor aparente ρ_{ap} igual a $(\rho_s \cdot T_p^2 + \rho_p)$. Deste modo, tem-se que a reflectância ρ_s do solo é definida pela equação (3.1):

$$\rho_s = \frac{\rho_{ap} - \rho_p}{T_p^2} \tag{3.1}$$

A figura 3.5 apresenta as curvas da reflectância determinadas experimentalmente em campo e através da esfera integradora, com e sem a correção descrita acima, considerando que $T_p=90,0\%$ e $\rho_p=7,5\%$.

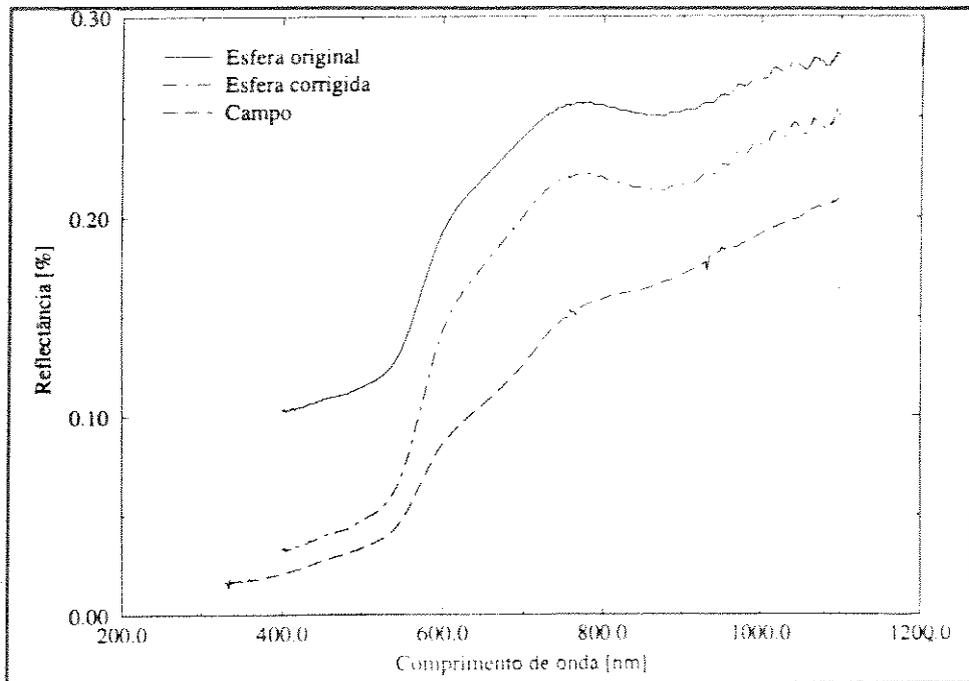


Figura 3.5 - Curvas da reflectância do solo em 23/05/91

Dividindo-se os espectros medidos na esfera pelo determinado em campo, obtiveram-se as seguintes curvas:

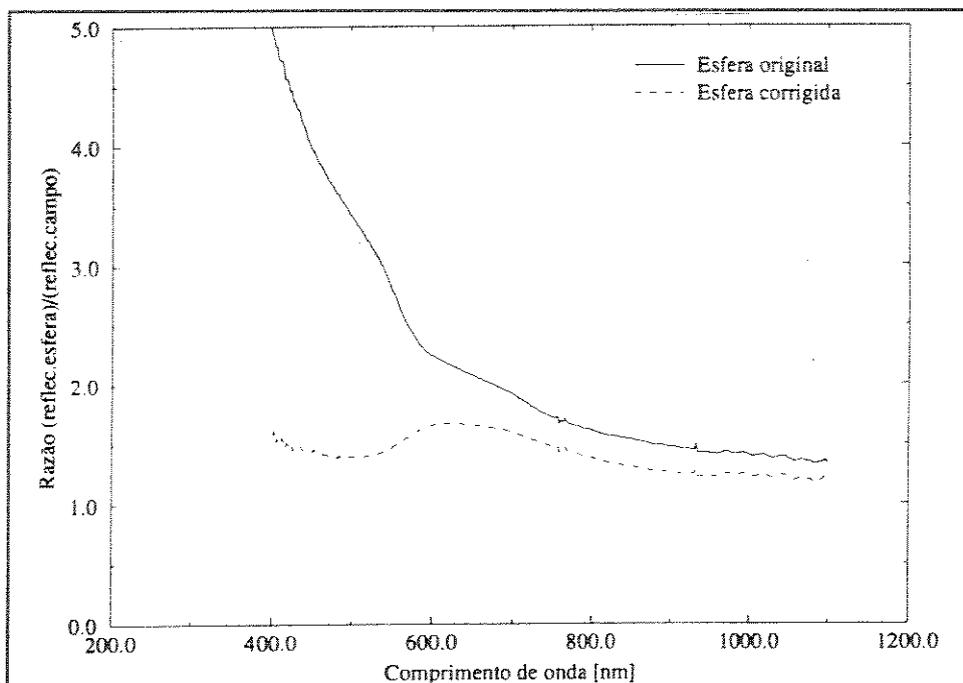


Figura 3.6 - Razão entre curvas de reflectância em 23/05/91

A tabela 3.2 contém os principais parâmetros relacionados a estas duas curvas anteriores:

Tabela 3.2 - Parâmetros da razão entre as curvas de reflectância de 23/05/91

ρ_{ESFERA}	Razão ($\rho_{ESFERA}/\rho_{CAMPO}$)					
	Média	DP	CV	Mín.	Máx.	Ampl.
Não Corrigida	2,148	0,939	43,73	1,333	4,966	3,632
Corrigida	1,408	0,154	10,90	1,180	1,676	0,496

Através destes parâmetros observa-se que a correção do espectro obtido na esfera, devido a presença da película plástica, produziu resultados mais próximos aos obtidos em campo do que os calculados sem a correção. Isto é mais nítido ainda nos comprimentos de onda correspondentes à faixa espectral do visível (entre 400nm e 700nm), conforme se observa na figura 3.6. A tabela 3.3 apresenta os valores da declividade (b), do intercepto (a) e do coeficiente de correlação (r) obtidos a partir da regressão linear entre os espectros medidos na esfera (variável independente) e o medido em campo (variável dependente). Estes cálculos foram feitos por comprimento de onda, totalizando 351 pontos de regressão para espectros variando de 400nm até 1.100nm com precisão de 2nm.

Tabela 3.3 - Parâmetros da regressão linear entre as curvas de reflectância de 23/05/91

ρ_{ESFERA}	a	b	r
Não corrigida	-0,0865 ± 0,0027	0,9833 ± 0,0122	0,9743
Corrigida	-0,0117 ± 0,0019	0,8037 ± 0,0100	0,9743

O menor valor do intercepto (a) mostra, também, que a correção aproximou o espectro medido na esfera com aquele determinado experimentalmente em campo. Os valores da reflectância para as bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landsat são apresentadas a seguir na tabela 3.4:

Tabela 3.4 - Reflectância do solo em 23/05/91

Tipo	Reflectância [%]		
	TM2	TM3	TM4
ρ_{ESFERA} (Não-corrigida)	15,84	22,38	25,30
ρ_{ESFERA} (Corrigida)	10,08	18,08	21,65
ρ_{CAMPO}	6,39	11,00	16,27

Desse modo, embora os valores numéricos da reflectância sejam diferentes nos três métodos, tem-se que a correção devido a presença da película plástica produziu valores mais próximos e mais coerentes com os medidos em campo. Infelizmente não foi possível obter um grande número de dados de campo e de laboratório que permitissem consolidar mais estes resultados. Ainda que as medidas na esfera não levem em consideração fatores importantes como a estrutura superficial do solo, por exemplo, elas podem ser úteis para determinar a variabilidade espectral das amostras consideradas.

3.1.2. Aeroporto de Viracopos em 01/06/91

Esta campanha também foi realizada em conjunto com técnicos do IAE/CTA/MAER e do INPE, e não teve problemas de cobertura de nuvens durante o período da manhã. A última chuva registrada no posto meteorológico da FEAGRI/UNICAMP, antes deste dia, foi de 4,6mm em 21/05. Desde então, a temperatura média foi de 21,0°C e a umidade relativa média, lida às 12GMT, foi de 66%.

3.1.2.1. Parâmetros atmosféricos

Um balão-radiossonda foi lançado às 12:03GMT da área próxima ao hangar antigo do Aeroporto e atingiu a altitude de 16.126m em 50 minutos de voo. Por causa da baixa altitude alcançada neste primeiro lançamento, foi feita uma segunda tentativa às 13:08GMT, com o balão atingindo uma altura menor ainda de 3.605m em cinco minutos de voo. Os dados de pressão, temperatura e umidade absoluta obtidos no primeiro voo são apresentados nas figuras 3.7 e 3.8 através de linhas cheias. As linhas tracejadas correspondem aos perfis-padrões da atmosfera tropical.

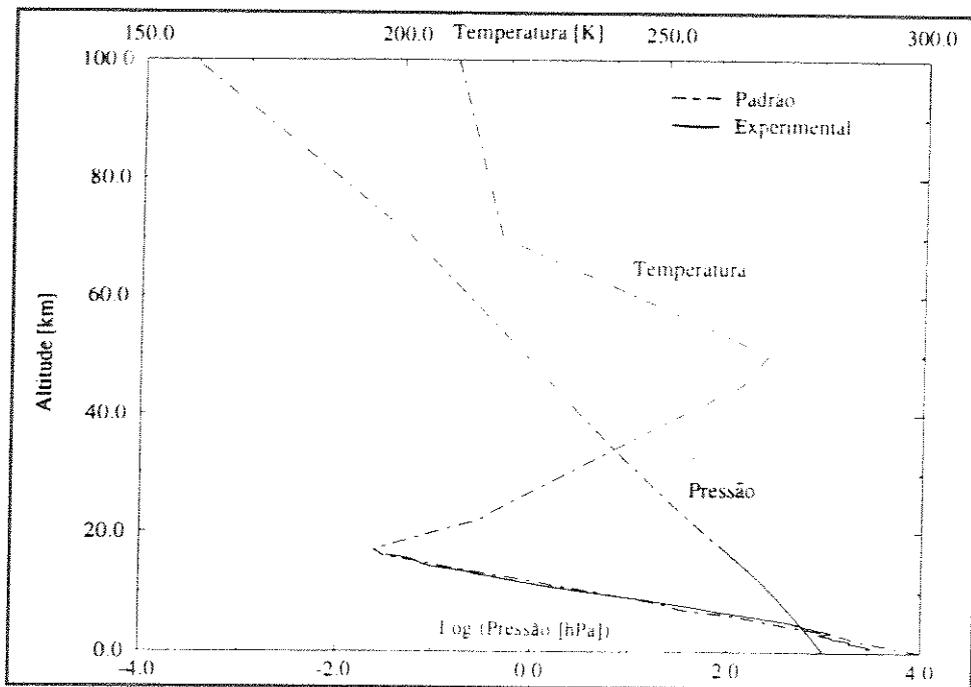


Figura 3.7 - Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 01/06/91

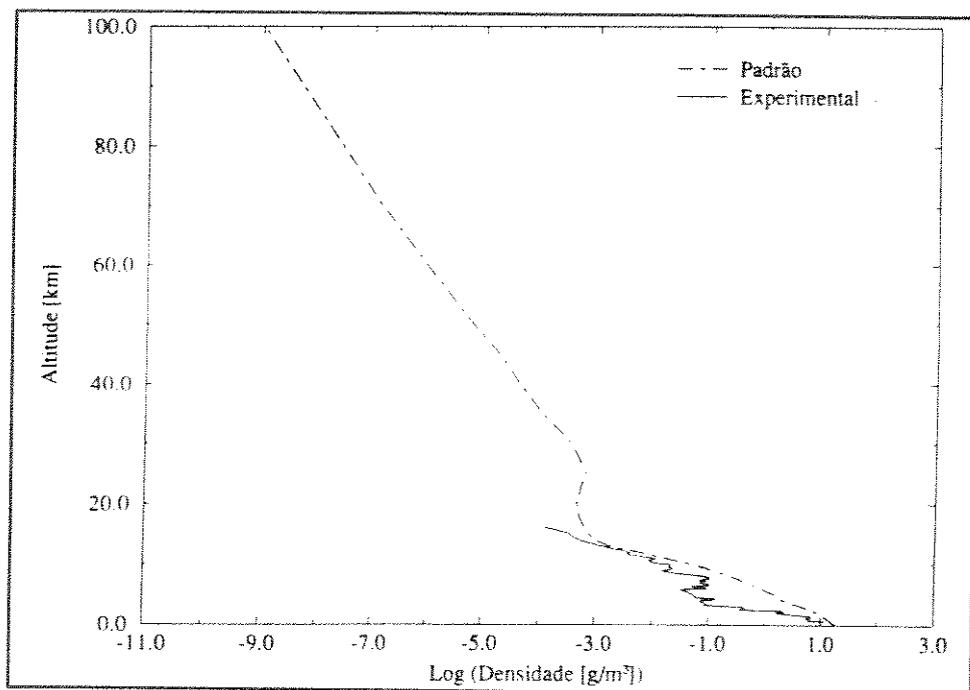


Figura 3.8-Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 01/06/91

As razões médias entre os valores experimentais e os valores-padrões tropicais da pressão, temperatura e densidade de vapor d'água são apresentadas na tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Razões médias entre os valores experimentais e os padrões em 01/06/91

Parâmetro	Razão Média
Pressão	1,0004 ± 0,0046
Temperatura	0,9992 ± 0,0113
Vapor d'água	0,3246 ± 0,2373

Observa-se que, assim como em 23/05/91, os dados experimentais da pressão e da temperatura coincidiram bastante com os do modelo tropical, diferindo, razoavelmente, no caso da densidade de vapor d'água.

3.1.2.2. Radiação solar

Os dados de radiação incidente e refletida foram coletados num campo utilizado para o cultivo da batata, situado na área do Aeroporto. Este campo tinha 350m de comprimento por 300m de largura e havia sido plantado recentemente, de modo que o solo estava arado, mas sem cobertura vegetal, numa situação semelhante à utilizada em Cordeirópolis-SP anteriormente. Os dados foram medidos em seis pontos centrais (P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆) marcados ao longo do comprimento do campo, de acordo com o caminhamento ilustrado na figura 3.9.

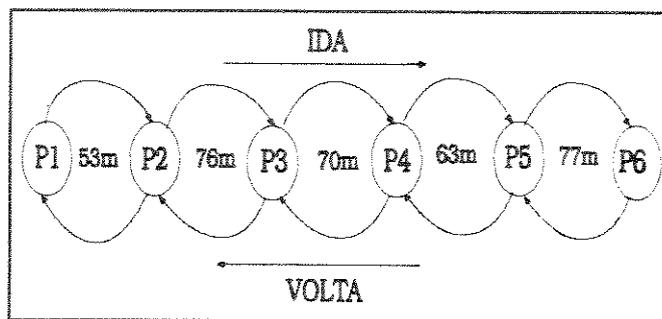


Figura 3.9 - Localização dos pontos experimentais em 01/06/91

As medições foram feitas por duas pessoas: uma para acionar o aparelho através do terminal de campo e outra para operá-lo e transportá-lo. A energia incidente total foi medida com o tripé, no qual foi instalado o receptor de radiação, aberto e colocado no solo juntamente com o corpo principal do LI1800 e o terminal de campo. A energia refletida foi medida com

o tripé fechado e seguro pela mão direita do operador, ficando a 1,3m de distância dele e a 1,5m de altura do solo. O corpo principal do LI1800 ficava preso através de uma alça no ombro esquerdo do operador. Estima-se que 75% da energia refletida captada pelo receptor hemisférico advinha de uma área com 5,5m de diâmetro no terreno (consultar Apêndice). Os dois operadores ficavam sempre postados de modo a não sombrearem o campo de visão mais próximo do receptor e assim, diminuir as suas interferências nas medidas.

A metodologia provocou uma diminuição na diferença de tempo entre a leitura de cada par de espectros de radiação total e refletida, contribuindo para um aumento na precisão dos resultados obtidos. Esta melhoria qualitativa foi auxiliada também pela inexistência de nuvens e maior estabilidade da radiação solar incidente durante o período de medidas.

3.1.2.3. Reflectância

A figura 3.10 apresenta a curva da reflectância difusa média calculada a partir dos 11 pares de espectros de radiação global e refletida obtidos.

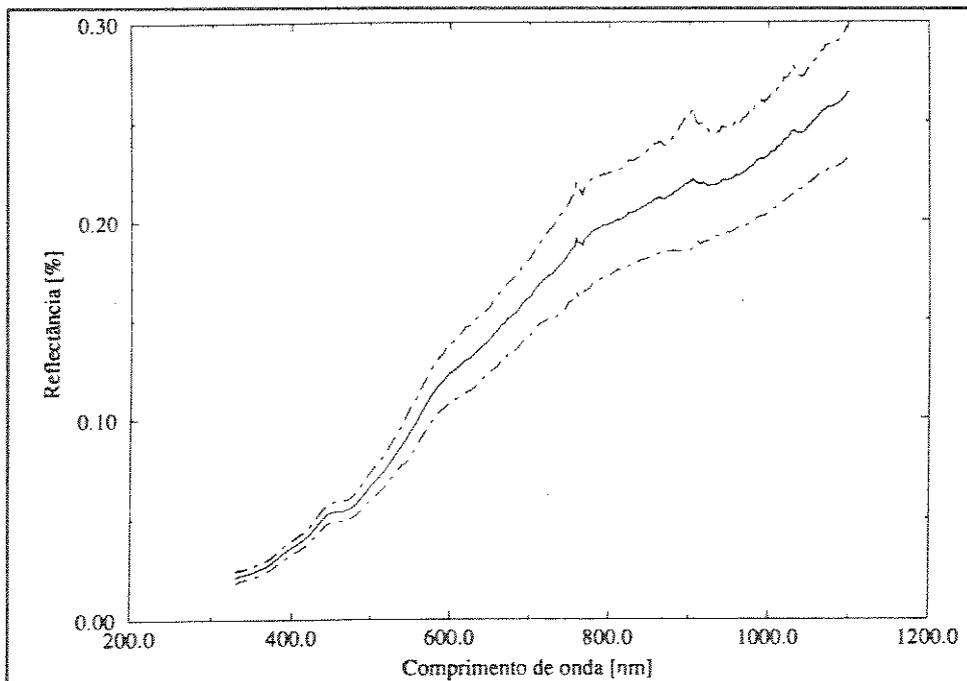


Figura 3.10 - Reflectância do solo em 01/06/91

O valor experimental da reflectância para cada banda temática do satélite Landsat é apresentado na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Reflectância do solo em 01/06/91

Reflectância [%]		
TM2	TM3	TM4
10,60 ± 1,28	14,56 ± 1,78	20,59 ± 2,78

3.1.3. Estação experimental do IAC (Cordeirópolis-SP) em 08/06/91

A segunda campanha programada para Cordeirópolis foi prejudicada pela densa cobertura nebulosa sobre esta região, que impediu completamente a obtenção da imagem pelo satélite. Como não havia possibilidade de obtenção de imagem, por causa das condições meteorológicas desfavoráveis, optou-se pela realização de medidas de energia incidente. Isto foi feito com o objetivo principal de conhecer o comportamento da radiação solar num dia diferente ao que se estava habituado a trabalhar, aproveitando que toda a aparelhagem já estava em campo. Os trabalhos foram interrompidos devido ao início de uma chuva que poderia danificar os equipamentos. Foram feitas oito medidas de radiação global das 12:16GMT às 12:23GMT, de minuto em minuto, com o equipamento permanecendo fixo no centro da área-teste.

3.1.4. Observatório a Olho Nu da UNICAMP em 13/06/91

O objetivo principal desta campanha foi o de coletar dados que permitissem conhecer o comportamento da radiação solar global durante a manhã de um dia típico do período de outono e inverno, sem a presença de nuvens. Dentre as várias aplicações possíveis destes dados, já se pensava na possibilidade de utilização da radiação solar global para a estimativa da espessura ótica da atmosfera.

3.1.4.1. Radiação solar

Os trabalhos começaram bem no início do dia, para que os dados correspondessem a uma faixa grande de ângulos de elevação solar. O tripé com o receptor hemisférico foi ajustado e nivelado no início dos trabalhos e assim permaneceu até o seu final. A figura 3.11 ilustra a variação da radiação solar global em 550nm, e nos comprimentos de onda correspondentes às bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landat.

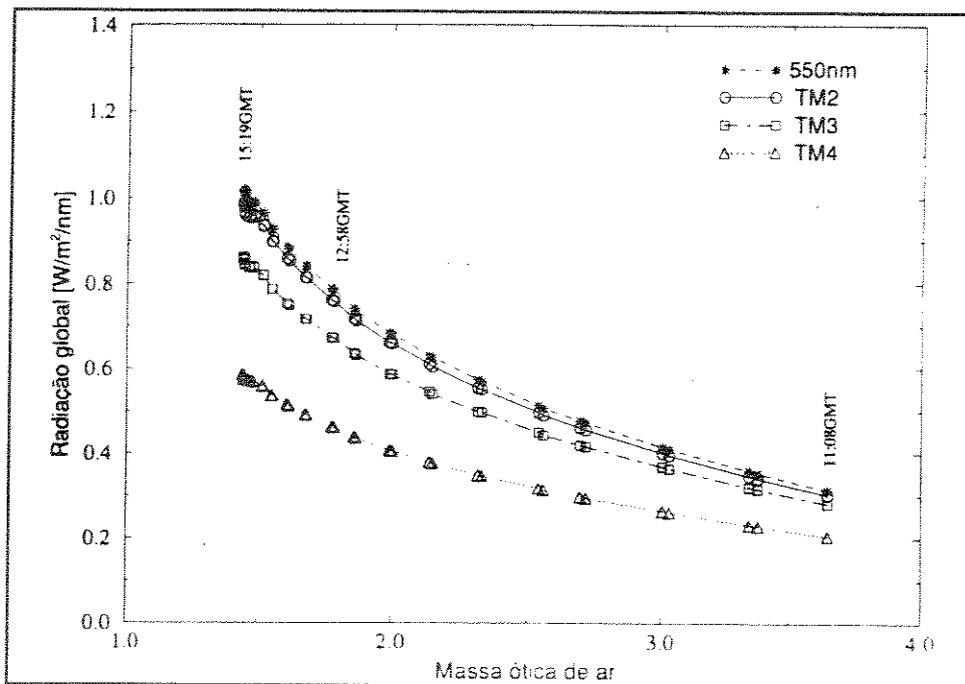


Figura 3.11 - Variação horária da radiação global em 13/06/91

3.1.5. Aeroporto de Viracopos em 17/06/91

A campanha de 17/06/91 foi prejudicada pelas operações que estavam sendo feitas no Aeroporto durante este dia, provocando um atraso no início dos trabalhos. Por isso, a radiação global foi medida de 12:56GMT até 14:19GMT, correspondendo a uma faixa restrita de ângulos de elevação solar, não tendo sido possível fazer nenhuma medida de radiação refletida. Não foram feitas radiossondagens neste dia.

3.1.6. Aeroporto de Viracopos em 03/07/91

A campanha realizada em 03/07 foi a última de 1991, caracterizando-se pelas medidas da radiação solar difusa.

3.1.6.1. Parâmetros atmosféricos

Esta foi também a última campanha em que os técnicos do IAE/CTA/MAER e do INPE fizeram radiossondagens. O balão lançado às 13:00GMT chegou até a altitude de 29.485m em 87 minutos de voo. Os dados coletados por este balão são apresentados nas figuras 3.12 e 3.13.

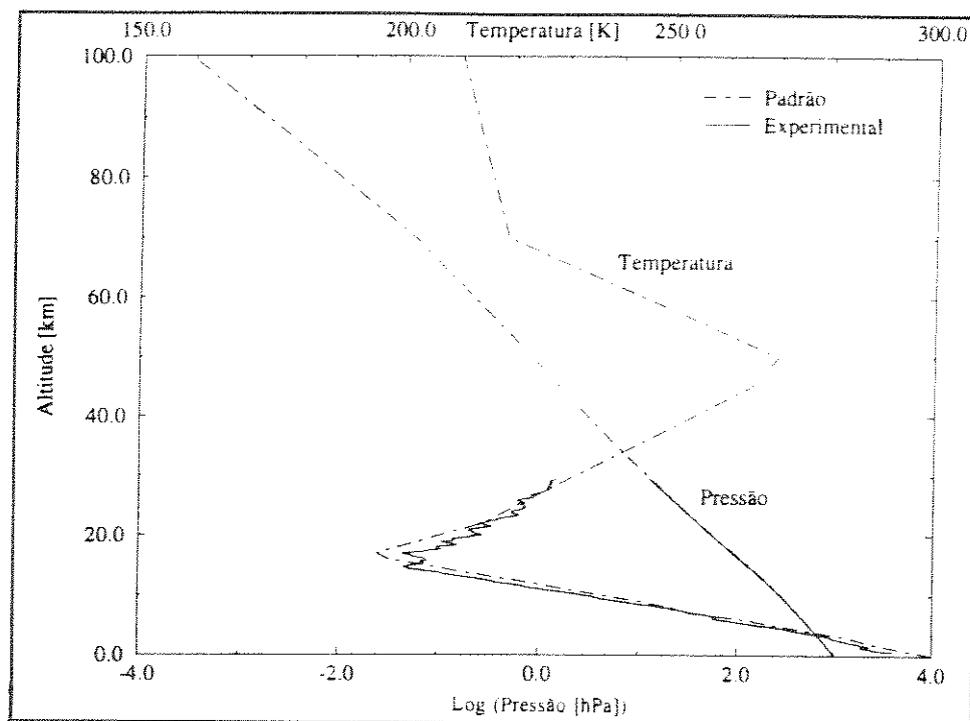


Figura 3.12-Perfis atmosféricos de pressão e temperatura em 03/07/91

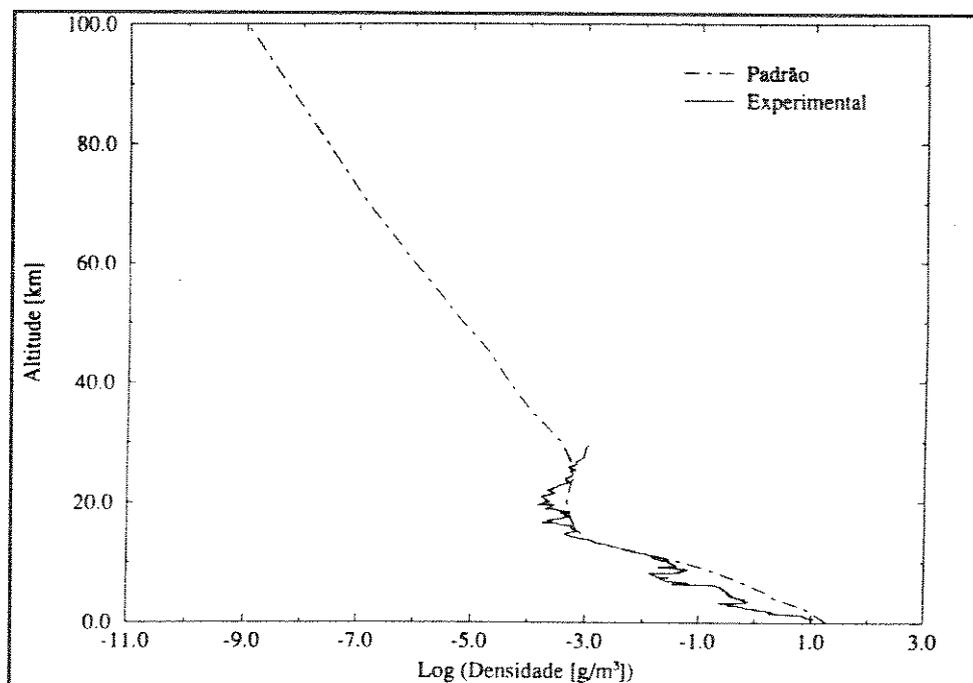


Figura 3.13-Perfis atmosféricos da densidade de vapor d'água em 03/07/91

As razões médias entre os valores experimentais e os valores-padrões tropicais da pressão, temperatura e densidade de vapor d'água são apresentadas a seguir na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Razões médias entre os valores experimentais e os padrões em 03/07/91

Parâmetro	Razão Média
Pressão	0,9844 ± 0,0111
Temperatura	0,9991 ± 0,0203
Vapor d'água	0,5366 ± 0,3156

Desse modo, observa-se que, assim como em 23/05/91 e 01/06/91, os dados experimentais da pressão e da temperatura coincidiram bastante com os do modelo tropical e diferiram no caso da densidade de vapor d'água, embora os perfis fossem semelhantes.

3.1.6.2. Radiação solar

As medidas da radiação solar foram prejudicadas pelo atraso no início dos trabalhos, que ocorreu devido à demora da autorização para entrada na pista. Além da radiação global, foram coletados também dados de radiação difusa através da obstrução da chegada da radiação direta ao receptor do radiômetro. Não foi possível medir a radiação refletida em nenhum local. As figuras 3.14 e 3.15 ilustram a variação das radiações, global e difusa, durante o período de medidas.

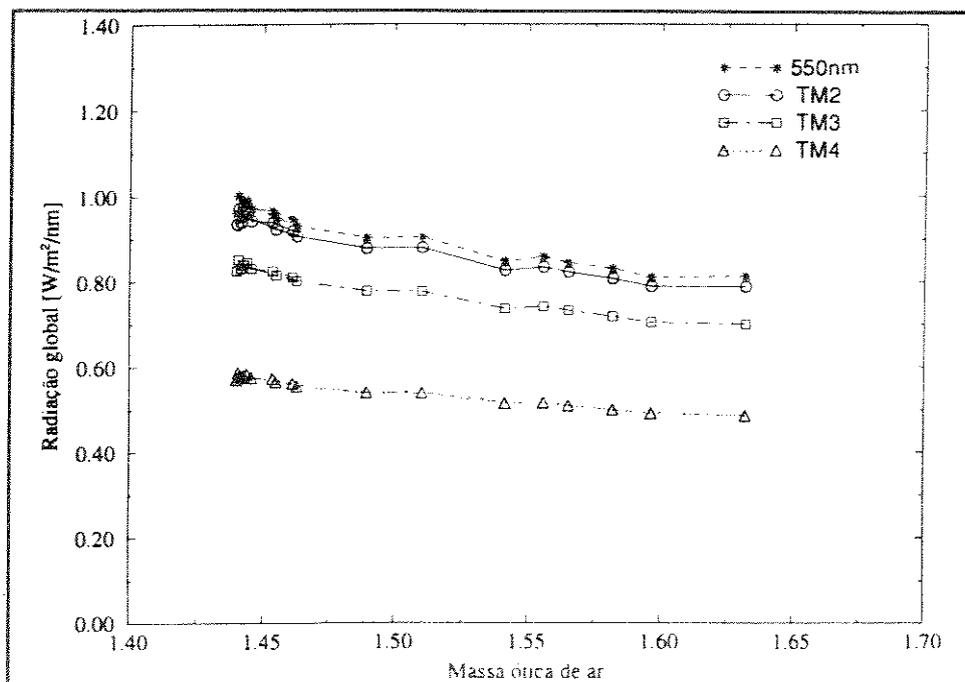


Figura 3.14 - Variação horária da radiação global em 03/07/91

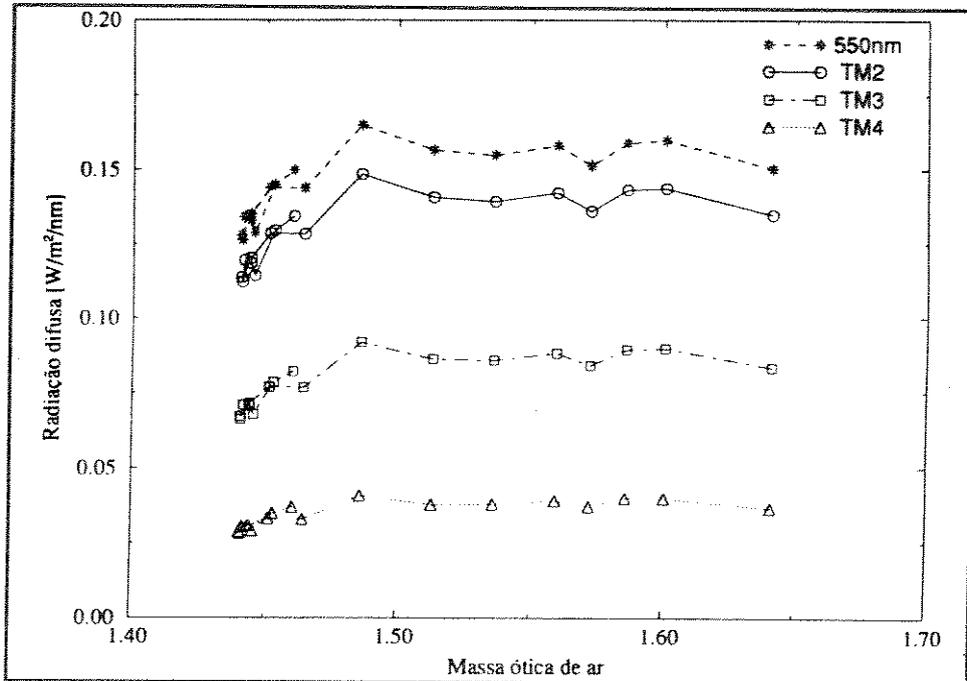


Figura 3.15 - Variação horária da radiação difusa em 03/07/91

3.2. O trabalho experimental realizado em 1992

Para o ano de 1992 foram programadas seis campanhas a serem realizadas exclusivamente no Aeroporto de Viracopos, em datas coincidentes com a passagem do satélite Landsat na órbita 219, e próximas aos solstícios de inverno e verão e ao equinócio de primavera. Estes eventos astronômicos foram escolhidos como referência para que se obtivessem imagens e dados com os mais variados ângulos de elevação solar possível. As datas programadas foram: 21/07, 06/08, 23/09, 09/10, 12/12 e 28/12.

As campanhas programadas para a época próxima ao solstício de verão não puderam ser realizadas devido às condições desfavoráveis do tempo nos dias pré-definidos. Isto já era esperado por causa da constante presença de nuvens sobre a região no período que vai de setembro até fevereiro. As campanhas de 12/12/92 e 28/12/92 seriam típicas do período de verão quando a radiação solar atravessa uma camada menor de atmosfera. O aumento das chuvas auxilia a dispersão dos poluentes que também diminuem com o fim das queimadas de cana-de-açúcar. Por outro lado existe uma concentração maior de vapor d'água na atmosfera.

Houve uma evolução sensível nas medidas de radiação solar, sobretudo com respeito

a adaptação do espectrorradiômetro para a leitura da radiação direta. Por outro lado, não foi possível lançar os balões de radiossondagem por causa da transferência do equipamento disponível em 1991 para outro local. Escolheu-se como área-teste principal uma parte da pista de taxiamento do Aeroporto que é coberta por um asfalto mais escuro e, por isso, mais facilmente identificada nas imagens de satélite. Por ser uma superfície opaca e fosca, o asfalto tende a se aproximar de um refletor difuso perfeito (Perdiz, 1990). Acreditava-se que a pista seria um alvo bastante adequado como referência para as correções a serem realizadas uma vez que ela não sofre modificações e tem a sua superfície continuamente controlada. Isto entretanto não se mostrou na prática.

A tabela 3.8 contém alguns parâmetros característicos dos dias de realização dos trabalhos de campo. Os dados de pressão atmosférica medidos às 10GMT no posto da Fazenda "Santa Elisa" (IAC), também foram incluídos por ser esta uma fonte comum a todas as campanhas.

Tabela 3.8 - Parâmetros característicos dos dias de trabalho de campo

Data	Local do Trabalho	Dia do Ano	Fator D_s	Declinação Solar [°]	Pressão [hPa]
13/07	FEAGRI	194	0,9676	22,09	950,667
21/07	Viracopos	202	0,9685	20,82	951,200
06/08	Viracopos	218	0,9719	17,15	952,800
25/08	FEAGRI	237	0,9787	11,21	948,533
23/09	Viracopos	266	0,9932	0,18	947,467
09/10	Viracopos	282	1,0023	-6,10	949,067

3.2.1. FEAGRI/UNICAMP em 13/07/92

O objetivo desta primeira campanha de 1992 foi o de calibrar o espectrorradiômetro LI1800 com a adaptação do tubo negro utilizado para medir a radiação solar direta. Os valores do coeficiente $I_{0\lambda}$ (irradiância solar exoatmosférica) determinados nesta calibração foram utilizados em todas as outras campanhas de 1992.

3.2.1.1. Parâmetros atmosféricos

A temperatura média dos dias 10, 11 e 12/07 foi de 18,3°C, havendo uma chuva total de 26mm registrada nos dias 7, 8 e 9/07/91. O céu permaneceu claro e sem nuvens durante toda a manhã. Os fatores de correção experimentais, necessários para definir o Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos utilizado no cálculo da transmitância gasosa, são apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Parâmetros atmosféricos em 13/07/92

Parâmetro	Dados Experimentais				Fator de Correção
	Originais		Locais	Padrão	
	Valor	Fonte			
Pressão [hPa]	950,667	IAC	959,333	946,946	1,0131
Temperatura[K]	290,95	FEAGRI	290,95	296,364	0,9817
Água [g/m ³]	11,02	FEAGRI	6,146	15,364	0,7173
Ozônio[cm.atm]	0,30	London et al. (1976)	0,31	0,247	1,2146

3.2.1.2. Radiação solar

O espectrorradiômetro foi instalado no interior do posto meteorológico da FEAGRI/UNICAMP e ali permaneceu durante todo o período de medidas. Foram obtidos 19 espectros de radiação direta, das 11:01GMT às 14:20GMT, a cada 10 minutos, em média. A figura 3.16 contém os espectros das 11:01GMT, 12:50GMT e 14:20GMT com o objetivo de ilustrar o comportamento da radiação direta durante o período de medidas.

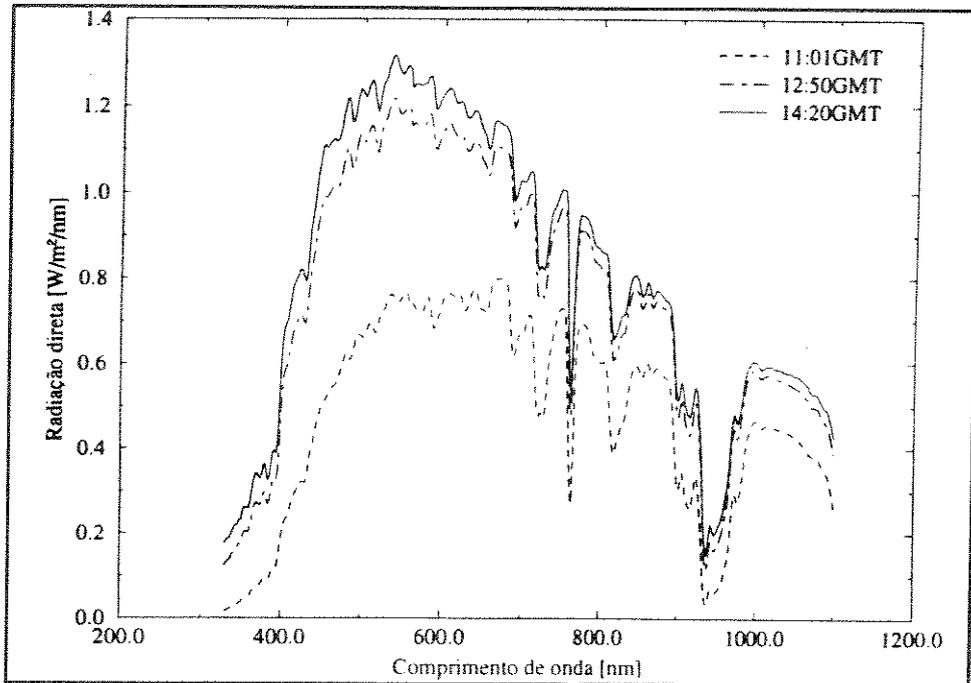


Figura 3.16 - Radiação direta em 13/07/92

A variação da radiação solar direta em função do horário de medida, em 550nm e nos comprimentos de onda correspondentes às bandas temáticas TM2, TM3 e TM4, do satélite Landsat, é apresentada na figura 3.17.

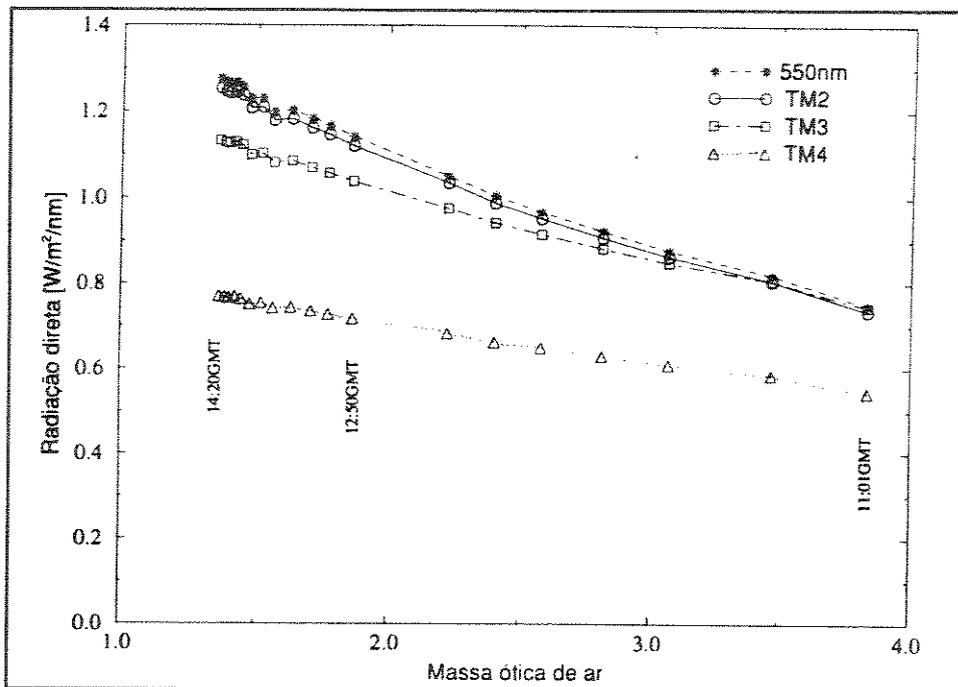


Figura 3.17 - Variação horária da radiação direta em 13/07/92

O valor de $I_{0\lambda}$ foi determinado para os comprimentos de onda pares, variando de 330nm até 1.100nm. O coeficiente de correlação obtido foi, na grande maioria dos casos, superior a 0,99 em módulo. Os comprimentos de onda próximos a 760nm e os superiores a 900nm, principalmente 930nm e de 1.076nm até 1.100nm, não apresentaram valores coerentes para $I_{0\lambda}$ embora, em muitos casos, tivessem um coeficiente de correlação alto. A perda de precisão dos resultados obtidos está diretamente relacionada com as características de funcionamento do espectrorradiômetro. Os problemas detectados devem-se, provavelmente, aos filtros de ordem, no caso de 760nm, e ao comportamento dos fotodiodos para os comprimentos de onda superior a 900nm. Observa-se ainda que em torno de 760nm e 930nm existem raias de absorção gasosa devida ao vapor d'água e ao oxigênio que também podem estar relacionadas com a perda de qualidade dos resultados obtidos nestes pontos (Biggar et al., 1990). A figura 3.18 permite comparar os valores experimentais obtidos para a irradiância solar exoatmosférica $I_{0\lambda}$ com aqueles determinados por Neckel et al. (1984) e utilizados pelo Modelo 5S:

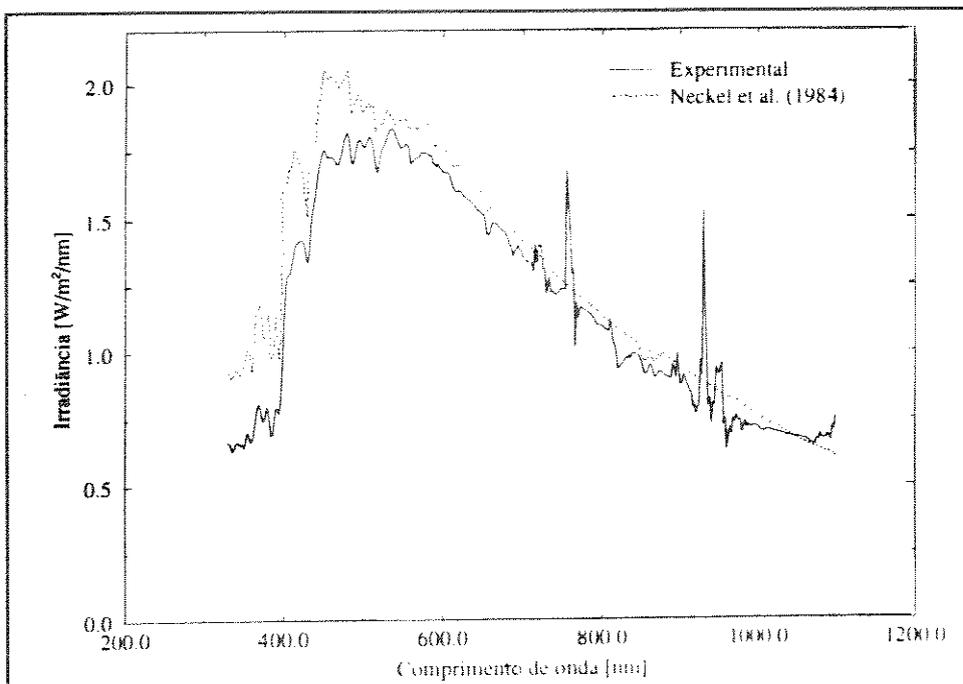


Figura 3.18 - Irradiância solar exoatmosférica

Para $\lambda=550\text{nm}$, que é o comprimento de onda de interesse para a correção, obteve-se o gráfico apresentado na figura 3.19 para a regressão linear entre m e $\ln(I_{\lambda}/(D_s t_{gd}))$:

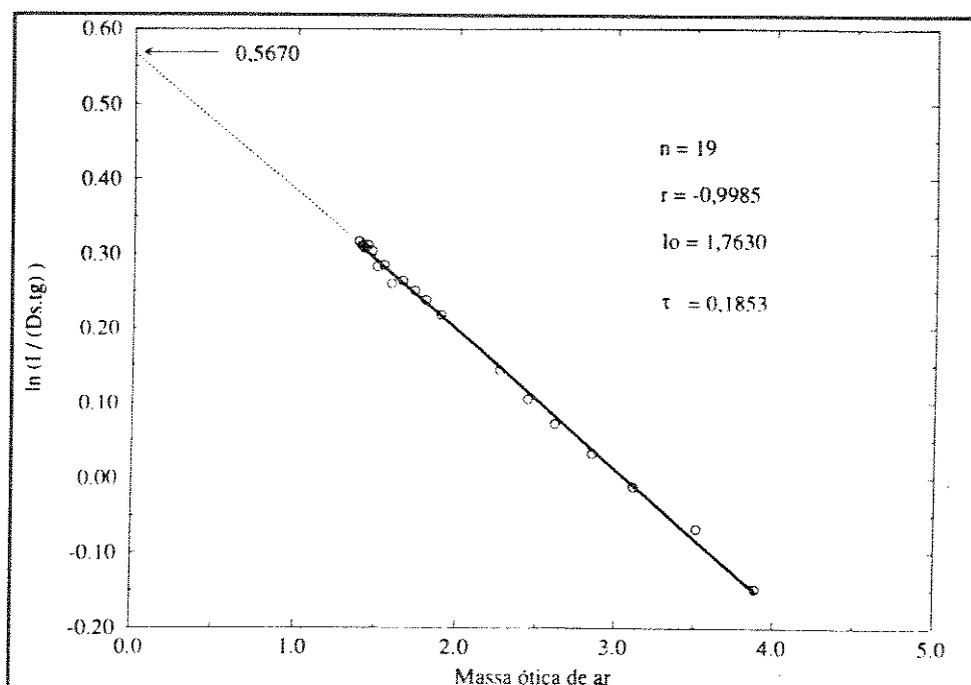


Figura 3.19 - Curva de Langley para 550nm em 13/07/92

A espessura ótica média dos aerossóis em 550nm, calculada com base nos dados de radiação direta, foi igual a 0,090 ($\pm 0,004$). A espessura ótica da atmosfera foi igual a 0,1852. A razão média entre a radiação direta obtida no campo com a simulada pelo Modelo 5S foi de 0,964 ($\pm 0,011$).

3.2.2. Aeroporto de Viracopos em 21/07/92

A campanha de 21/07 foi a primeira a ocorrer completamente dentro da pista de taxiamento do Aeroporto de Viracopos. Ela foi sincronizada com a passagem do satélite Landsat sobre a região de Campinas, correspondendo à sua órbita de número 219.

3.2.2.1. Parâmetros atmosféricos

O céu ficou claro na maior parte da manhã, registrando-se a presença de algumas nuvens num curto período de tempo próximo ao horário de passagem do satélite sobre a região de Campinas. A presença de nuvens, decorrente de uma ligeira instabilidade atmosférica, prejudicou um pouco a qualidade dos dados obtidos.

A tabela 3.10 contém os dados atmosféricos originais e os fatores de correção necessários à definição do Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos.

Tabela 3.10 - Parâmetros atmosféricos em 21/07/92

Parâmetro	Dados Experimentais			Fator de Correção	
	Originais		Locais		Padrão
	Valor	Fonte			
Pressão [hPa]	951,200	IAC	953,333	940,951	1,0132
Temperatura[K]	294,15	FEAGRI	293,826	296,034	0,9930
Água [g/m ³]	9,387	FEAGRI	9,185	15,034	0,6110
Ozônio[cm.atm]	0,30	London et al. (1976)	0,30	0,247	1,2146

3.2.2.2. Radiação solar

Os dados de radiação solar foram obtidos das 11:35GMT às 14:14GMT, perfazendo um total de 36 espectros medidos: 13 de radiação global, 14 de radiação direta e nove de radiação refletida. Estes dados foram coletados em nove pontos centrais, distribuídos ao longo da pista, com o objetivo de representar adequadamente a variabilidade espacial da reflectância da superfície. As radiações, global e direta, foram medidas com o equipamento fixo ao chão, enquanto que a radiação refletida foi medida com o espectrorradiômetro a 1,5m de altura da pista e a 1,3m de distância do operador. Os três tipos de radiação foram medidos alternadamente de modo a representar melhor a sua variação temporal. As figuras 3.20 e 3.21 apresentam os gráficos de variação das radiações, global e direta, durante o período de medidas, em 550nm e nos comprimentos de onda equivalentes às bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landsat. Observa-se nitidamente como a ligeira presença de algumas nuvens sobre o local interferiu na quantidade de radiação direta incidente na superfície terrestre. A radiação global, entretanto, não teve esta mesma sensibilidade.

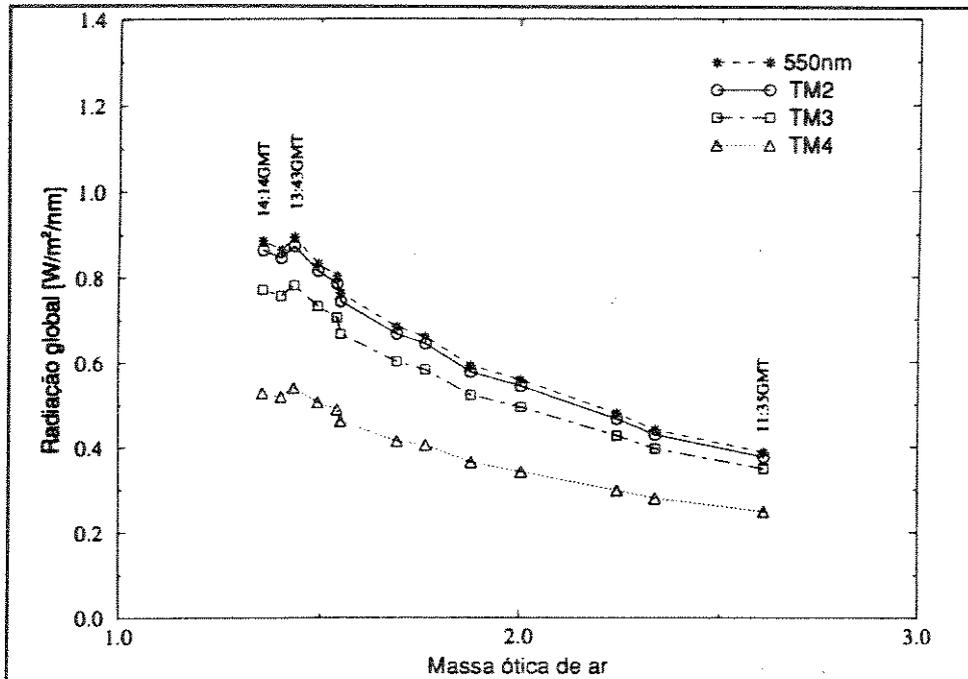


Figura 3.20 - Variação horária da radiação global em 21/07/92

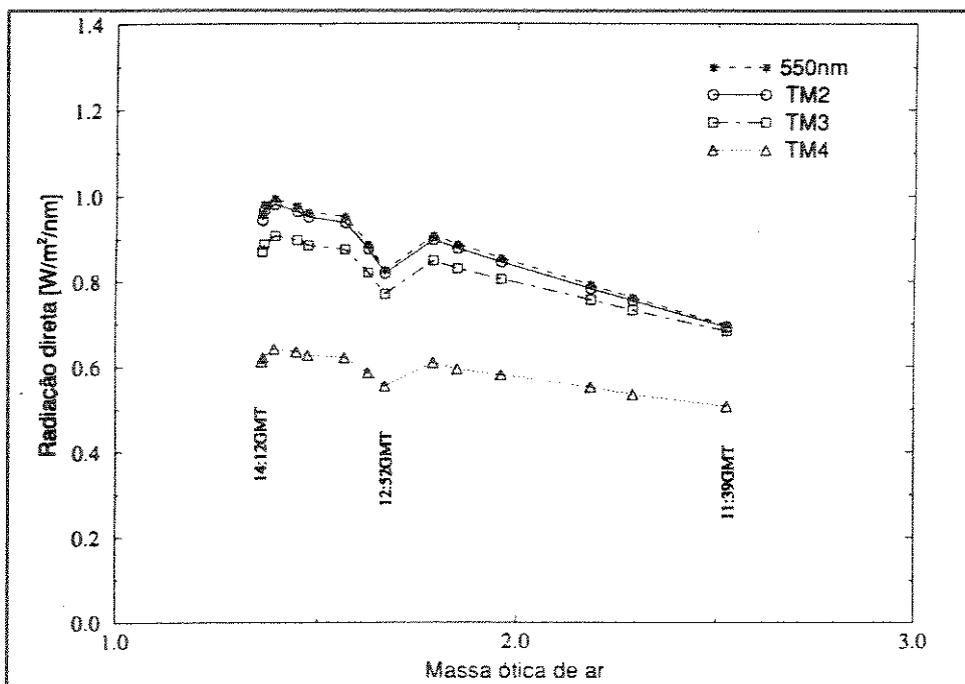


Figura 3.21 - Variação horária da radiação direta em 21/07/92

A espessura ótica média dos aerossóis em 550nm, determinada a partir dos dados de radiação direta, foi igual a 0,258 ($\pm 0,029$). A espessura ótica da atmosfera teve o valor de 0,352. A razão média entre a radiação direta obtida no campo com a simulada pelo Modelo

5S foi de 0,978 ($\pm 0,007$). No caso da radiação global, a razão média foi de 0,869 ($\pm 0,015$).

3.2.2.3. Reflectância

Foram coletadas, em pontos distintos, dez pequenas pedras do asfalto que cobre a pista de taxiamento do Aeroporto de Viracopos, com o objetivo de obter a reflectância da pista através de medidas na esfera integradora. O resultado destas medições é apresentado no item 3.2.9 juntamente com os espectros obtidos experimentalmente em campo.

3.2.3. Aeroporto de Viracopos em 06/08/92

Esta foi a segunda grande campanha de 1992 sincronizada com a passagem do satélite Landsat, tendo sido realizada num dia sem nuvens e com a atmosfera estável. Além da pista de taxiamento, foi utilizada uma segunda área-teste, situada próxima à pista, para as medidas da radiação refletida. A temperatura média observada, desde a medição anterior de 21/07, foi de 18,0°C, não sendo registrada chuva neste período entre as duas campanhas. A umidade relativa média das 12:00GMT, entre 22/07 e 05/08, foi de 68%.

3.2.3.1. Parâmetros atmosféricos

A tabela 3.11 apresenta os dados atmosféricos originais e os fatores de correção necessários à definição do Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos com base na altitude do Aeroporto de Viracopos.

Tabela 3.11 - Parâmetros atmosféricos em 06/08/92

Parâmetro	Dados Experimentais				Fator de Correção
	Originais		Locais	Padrão	
	Valor	Fonte			
Pressão [hPa]	952,800	IAC	955,333	940,951	1,0153
Temperatura[K]	293,55	FEAGRI	293,227	296,034	0,9905
Água [g/m ³]	11,503	FEAGRI	11,256	15,034	0,7487
Ozônio[cm.atm]	0,31	London et al. (1976)	0,31	0,247	1,2551

3.2.3.2. Radiação solar

A radiação solar foi medida em duas etapas: das 11:38GMT às 13:20GMT, na pista de taxiamento do Aeroporto; e de 14:03GMT até 15:15GMT, num terreno agrícola próximo à pista. Este campo estava arado e continha fileiras de soja em fase de emergência, situando-se ao lado da área utilizada na campanha de 01/06/91. Foram obtidos 33 espectros ao todo: 11 de radiação global, 11 de radiação direta, seis de radiação refletida na pista e cinco de radiação refletida no terreno agrícola. Estes dados foram coletados em pontos centrais distintos, distribuídos ao longo da pista e da área agrícola, com o objetivo de representar a variabilidade espacial da reflectância destas superfícies. A radiação refletida foi medida com o espectrorradiômetro a 1,5m de altura do solo e a 1,3m de distância do operador. As radiações, global e direta, foram medidas com o equipamento fixo ao chão. Os três tipos de radiação foram medidos alternadamente, de modo a representar adequadamente a sua variação temporal. As figuras 3.22 e 3.23 ilustram a variação das radiações, global e direta, de acordo com os dados apresentados acima.

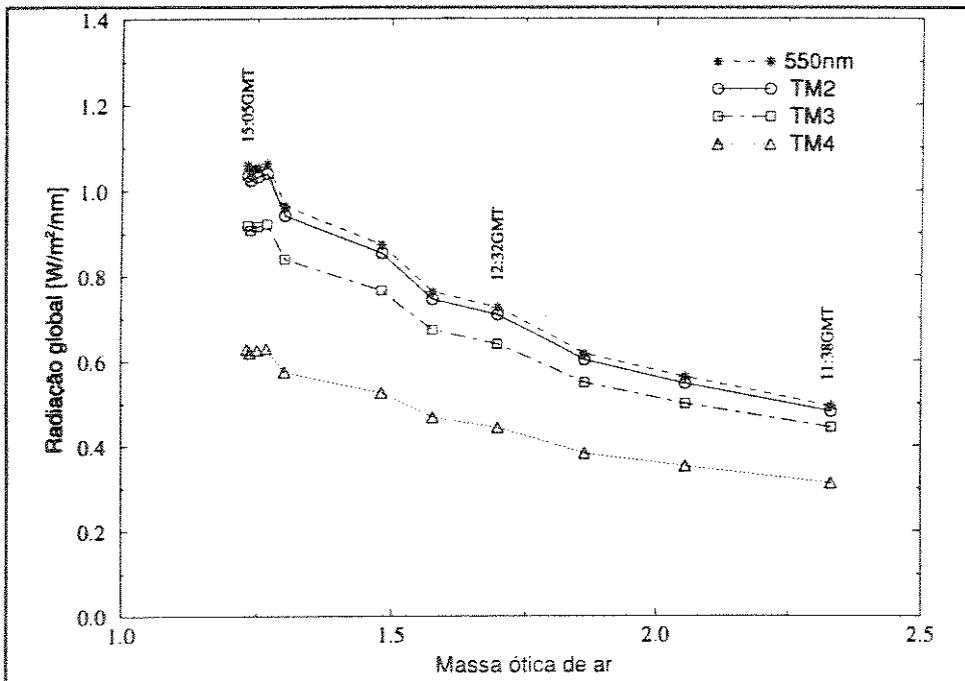


Figura 3.22 - Variação horária da radiação global em 06/08/92

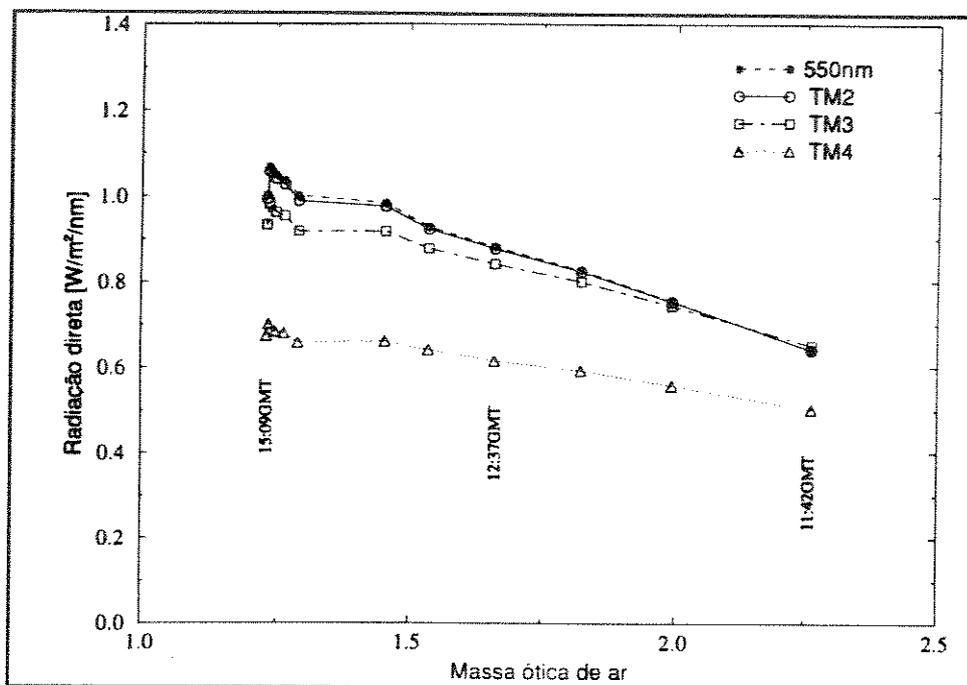


Figura 3.23 - Variação horária da radiação direta em 06/08/92

A tabela 3.12 apresenta a reflectância da área agrícola para as bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landsat.

Tabela 3.12 - Reflectância da área agrícola em 06/08/92

Reflectância [%]		
TM2	TM3	TM4
10,36 ± 0,26	13,18 ± 0,67	21,96 ± 0,74

A espessura ótica média dos aerossóis em 550nm calculada com base nos dados de radiação direta foi de 0,283 (±0,018). A espessura ótica da atmosfera teve o valor de 0,377. A razão média entre a radiação global obtida no campo com a simulada pelo Modelo 5S foi de 0,907 (±0,014). No caso da radiação direta, a razão média foi de 0,975 (±0,010).

3.2.4. FEAGRI/UNICAMP em 25/08/92

A campanha deste dia não foi inicialmente prevista, já que não havia passagem do satélite Landsat programada para 25/08/92 na órbita 219 (correspondente à região de Campinas). O objetivo principal deste trabalho foi o de acompanhar o comportamento da radiação solar durante todo o período da manhã, do mesmo modo que se fez em 13/06/91.

3.2.4.1. Parâmetros atmosféricos

A característica principal de 25/08/92 é que ele foi o primeiro dia após uma chuva de 14,4mm que caiu sobre a região depois de 50 dias de estiagem completa. Deste modo, ele apresentava condições favoráveis à existência de uma atmosfera limpa e clara. A tabela 3.13 contém os dados atmosféricos originais e os fatores de correção necessários à definição do Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos com base na altitude da FEAGRI/UNICAMP.

Tabela 3.13 - Parâmetros atmosféricos em 25/08/92

Parâmetro	Dados Experimentais			Fator de Correção	
	Originais		Locais		Padrão
	Valor	Fonte			
Pressão [hPa]	948,533	IAC	957,333	946,946	1,0110
Temperatura[K]	290,95	FEAGRI	290,95	296,364	0,9817
Água [g/m ³]	6,146	FEAGRI	6,146	15,364	0,4000
Ozônio[cm.atm]	0,31	London et al. (1976)	0,31	0,247	1,2551

3.2.4.2. Radiação solar

O espectrorradiômetro foi instalado no centro do posto meteorológico da FEAGRI/UNICAMP e ali permaneceu durante todo o transcorrer do trabalho, sendo operado por apenas uma pessoa. Foram feitos 12 espectros de radiação global e 12 de radiação direta, das 11:10GMT às 14:33GMT. As figuras 3.24 e 3.25 apresentam os espectros de variação da energia solar incidente em 550nm e para os comprimentos de onda correspondentes às bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landsat.

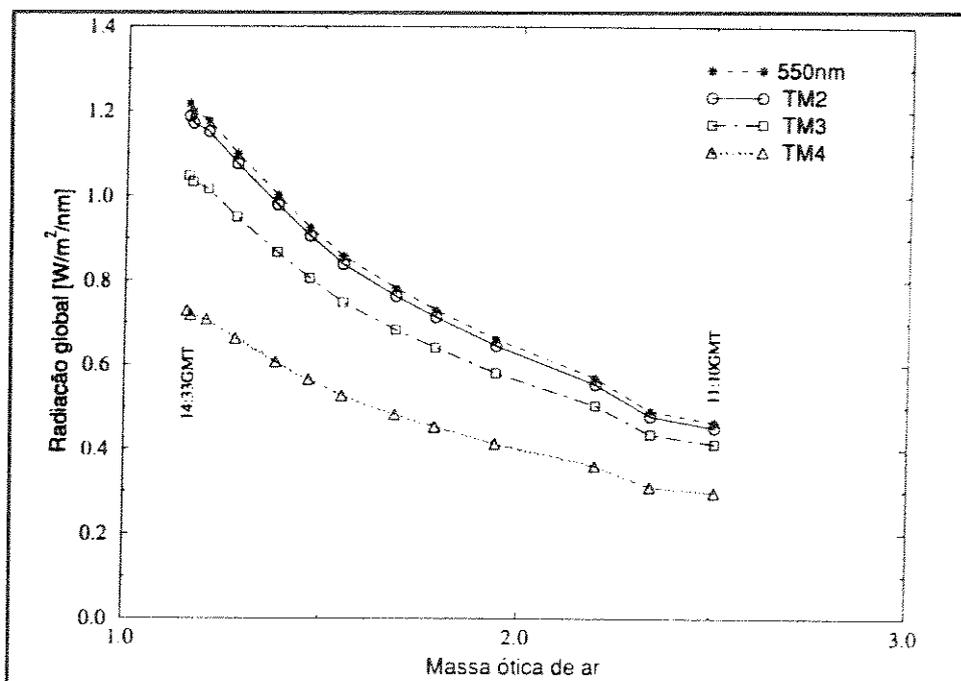


Figura 3.24 - Variação horária da radiação global em 25/08/92

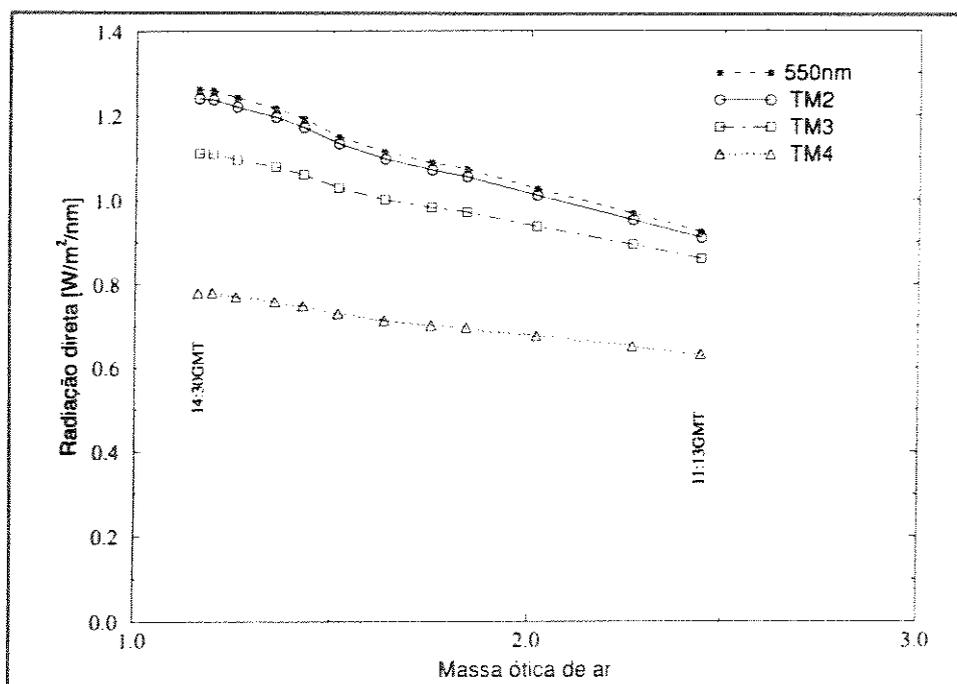


Figura 3.25 - Variação horária da radiação direta em 25/08/92

A espessura ótica média dos aerossóis em 550nm calculada com base nos dados de radiação direta foi igual a 0,138 ($\pm 0,005$). A espessura ótica da atmosfera foi igual a 0,233. A razão média entre a radiação direta obtida no campo com a simulada pelo Modelo 5S foi

de 0,963 ($\pm 0,006$). No caso da radiação global, a razão média foi de 0,911 ($\pm 0,010$).

3.2.5. Aeroporto de Viracopos em 23/09/92

O trabalho realizado em 23/09/92 foi similar ao das duas campanhas anteriores feitas no Aeroporto. Uma característica interessante desta campanha é que ela foi feita no dia do equinócio de primavera.

3.2.5.1. Parâmetros atmosféricos

Os dados atmosféricos originais e os fatores de correção necessários à definição do Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos a partir da altitude do Aeroporto são apresentados a seguir na tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Parâmetros atmosféricos em 23/09/92

Parâmetro	Dados Experimentais				Fator de Correção
	Originais		Locais	Padrão	
	Valor	Fonte			
Pressão [hPa]	947,467	IAC	950,000	940,951	1,0096
Temperatura[K]	299,35	FEAGRI	299,021	296,034	1,0101
Água [g/m ³]	10,653	FEAGRI	10,424	15,034	0,6934
Ozônio[cm.atm]	0,32	London et al. (1976)	0,32	0,247	1,2955

3.2.5.2. Radiação solar

Os dados de radiação solar foram obtidos apenas na pista de taxiamento do Aeroporto, das 11:50GMT às 14:23GMT, num total de 28 espectros: dez de radiação global, nove de radiação direta e nove de radiação refletida. De acordo com estes dados foram traçados os espectros de variação das radiações, global e direta, durante o período de medidas, apresentados nas figuras 3.26 e 3.27:

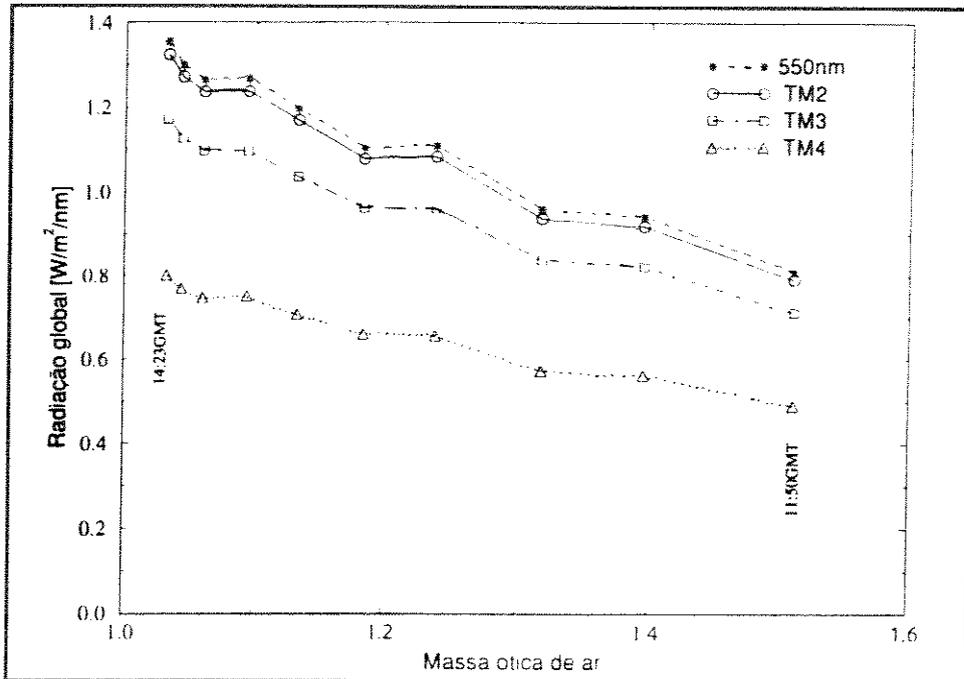


Figura 3.26 - Variação horária da radiação global em 23/09/92

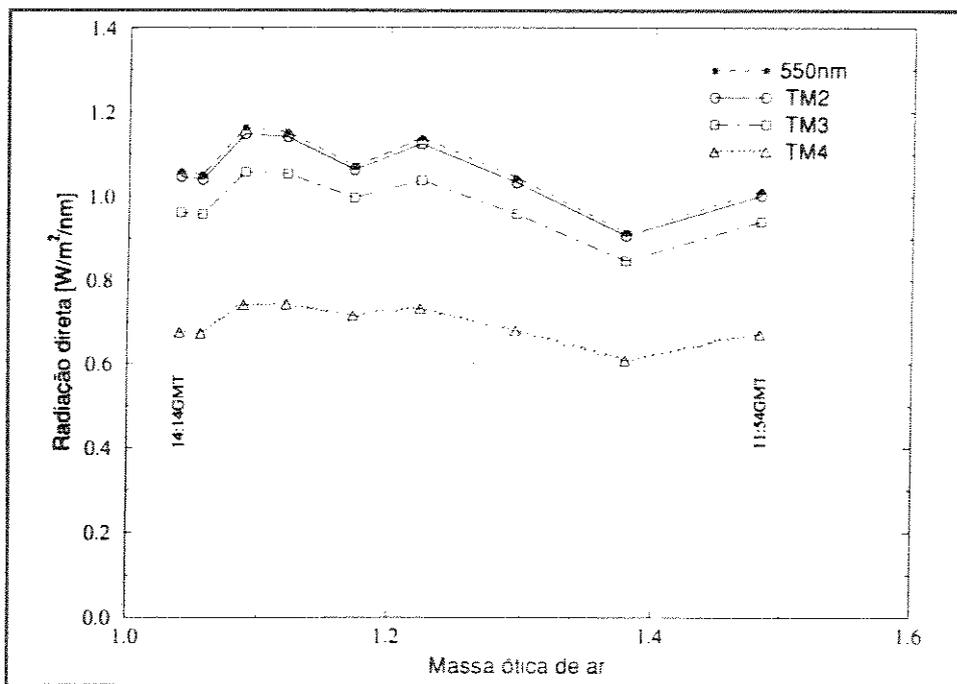


Figura 3.27 - Variação horária da radiação direta em 23/09/92

A espessura ótica média dos aerossóis τ_{aer} em 550nm calculada com base nos dados de radiação direta foi de 0,291 ($\pm 0,049$). A razão média entre a radiação direta obtida no campo com a simulada pelo Modelo 5S foi de 0,970 ($\pm 0,005$). No caso da radiação global, a

razão média foi de 0,900 ($\pm 0,015$).

3.2.6. Aeroporto de Viracopos em 09/10/92

O trabalho realizado neste dia foi prejudicado pelas nuvens durante o período da manhã, principalmente próximo ao horário de passagem do satélite Landsat. Amanheceu com poucas nuvens, que foram aumentando rapidamente, ao ponto de formar uma camada nebulosa densa sobre a área do Aeroporto de Viracopos, prejudicando as medidas experimentais e inviabilizando a obtenção de boas imagens pelo satélite. Mesmo assim, foram feitas medidas de radiação incidente e refletida com o objetivo de calcular a reflectância da pista.

Os dados de radiação solar global e refletida foram obtidos em sete pontos distintos da pista de taxiamento do Aeroporto, perfazendo um total de 14 espectros medidos. Não foi possível obter dados de radiação direta por causa da densa cobertura nebulosa sobre a região. A pressão atmosférica média local, no período da manhã, foi de 951,333hPa.

3.2.7. Estimativa da espessura ótica dos aerossóis a partir da radiação solar global

A tabela 3.15 apresenta os valores da espessura ótica da atmosfera e dos aerossóis, e da razão entre a radiação solar experimental e simulada pelo 5S para o comprimento de onda de 550nm.

Tabela 3.15 - Espessura ótica e razão entre valores experimentais e simulados de radiação solar

Data	τ		τ_{aer}		$I_{dir}^{EXP} / I_{dir}^{5S}$		$I_{glob}^{EXP} / I_{glob}^{5S}$	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13/07	0,185	0,004	0,090	0,004	0,964	0,011	-----	-----
21/07	0,352	0,029	0,258	0,029	0,978	0,007	0,869	0,015
06/08	0,378	0,018	0,283	0,018	0,976	0,010	0,909	0,014
25/08	0,233	0,005	0,138	0,005	0,963	0,006	0,911	0,010
23/09	0,383	0,049	0,291	0,049	0,970	0,005	0,900	0,015
Média					0,970	0,007	0,897	0,019

Observa-se que as espessuras ótica da atmosfera (τ) e dos aerossóis (τ_{aer}) apresentam um comportamento lógico de acordo com a evolução das condições meteorológicas, principalmente a ocorrência de chuvas no período das campanhas. Os valores menores de τ e τ_{aer} dos dias 13/07 e 25/08 refletem as chuvas registradas nos dias anteriores. O aumento da espessura ótica entre os dias 13/07 e 06/08 é coerente com a ausência completa de chuvas neste período.

A diferença de 3% entre a radiação direta experimental e a estimada deve-se às aproximações dos dados de entrada e às simplificações de cálculo feitas pelo Modelo 5S. O menor valor da razão entre a radiação global experimental e a estimada para o dia 21/07 deve-se, possivelmente, à presença de aerossóis mais absorventes que o tipo continental, utilizado como padrão em todos os dias. Uma outra hipótese, neste caso, refere-se a menor sensibilidade do espectrorradiômetro LI1800 para ângulos de elevação solar menores, que foram comuns em 21/07 pois a declinação solar era igual a 22,09°.

A tabela 3.16 apresenta os valores das espessuras óticas estimadas a partir do Modelo 5S, de modo que a radiação global simulada fosse igual a 110% da radiação global experimental. Isto equivale a utilizar um valor igual a 0,9 para a razão entre as radiações global experimental e a simulada. A diferença real entre os valores experimental e simulado foi calculado através da seguinte equação:

$$\Delta\tau_{aer} = \tau_{aer}^{5S} - \tau_{aer}^{EXP} \tag{3.2}$$

Tabela 3.16 - Espessuras óticas estimadas a partir do Modelo 5S

Data	τ_{aer}^{EXP}		τ_{aer}^{5S}		$\Delta\tau_{aer}$
	Média	DP	Média	DP	
21/07	0,258	0,029	0,350	0,013	0,092
06/08	0,283	0,018	0,261	0,013	-0,022
25/08	0,138	0,005	0,095	0,046	-0,043
23/09	0,291	0,049	0,287	0,016	-0,004

A seguir serão apresentados os resultados sobre a análise de sensibilidade da reflectância real ρ em função da variação da espessura ótica da atmosfera. O cálculo de ρ foi feito a partir da equação (1.28), reescrita abaixo como:

$$\rho = \frac{\rho_{sat} - t_g \cdot \rho_{atm}}{(\rho_{sat} - t_g \cdot \rho_{atm}) \cdot s + t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \quad (3.3)$$

Os parâmetros atmosféricos (t_g , ρ_{atm} , s , $T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$) foram determinados pelo Modelo 5S. Os cálculos foram feitos com três reflectâncias aparentes ρ_{sat} e três ângulos zenitais solar θ_s distintos. O Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos dos quatro dias considerados (21/07, 06/08, 25/08 e 23/09) permaneceu inalterado durante todos os cálculos, enquanto que a espessura ótica dos aerossóis variou de 0,05 para cada visibilidade utilizada. Para um dado par de valores ρ_{sat} e θ_s , tem-se que o cálculo da diferença absoluta da reflectância real pode ser esquematizada através do fluxograma apresentado na figura 3.28.

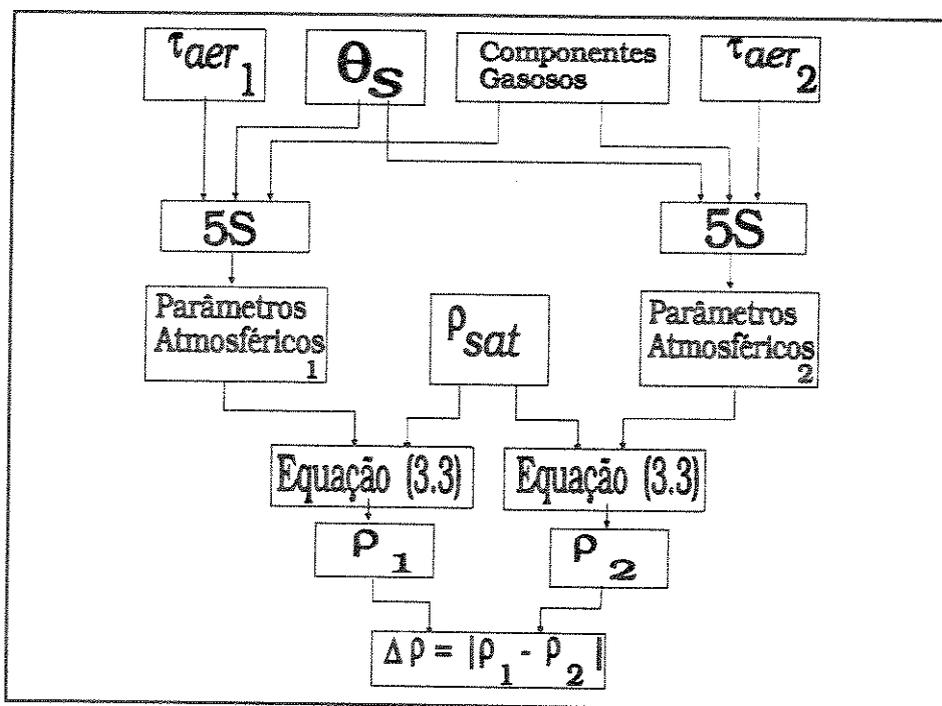


Figura 3.28 - Análise de sensibilidade da reflectância real

A tabela 3.17 contém as diferenças absolutas entre as reflectâncias reais calculadas de acordo com o esquema apresentado acima.

Tabela 3.17 - Diferenças absolutas da reflectância real

VIS	τ_{aer}	$\theta_s = 20^\circ$			$\theta_s = 40^\circ$			$\theta_s = 60^\circ$		
		$\rho_{sat} [\%]$			$\rho_{sat} [\%]$			$\rho_{sat} [\%]$		
		10	25	55	10	25	55	10	25	55
5	0,730	0,4	0,2	0,9	0,7	0,0	1,0	1,3	0,1	1,2
	0,780	0,5	0,2	0,9	0,8	0,0	0,9	1,4	0,1	1,2
	0,830									
20	0,208	0,2	0,2	0,7	0,4	0,2	0,8	0,7	0,0	1,1
	0,258	0,2	0,2	0,6	0,4	0,2	0,8	0,8	0,0	1,0
	0,308									
50	0,102	0,2	0,1	0,5	0,3	0,2	0,7	0,5	0,1	1,1
	0,152	0,2	0,2	0,6	0,3	0,1	0,7	0,6	0,1	1,1
	0,202									
200	0,045	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1	0,6	0,5	0,2	1,1
	0,095	0,2	0,2	0,5	0,2	0,1	0,7	0,5	0,1	1,1
	0,145									

A diferença absoluta máxima da reflectância real foi de 1,1%. Logo, a radiação solar global apresenta-se como uma alternativa possível à estimativa da espessura ótica dos aerossóis, permitindo que se façam correções atmosféricas das imagens de satélite com boa precisão, a partir de medidas simples de dados meteorológicos. As limitações principais desta proposição refere-se ao bom conhecimento que se deve ter da composição dos aerossóis e também da sensibilidade do aparelho de medidas da radiação solar quanto aos ângulos de elevação solar mais baixos. Esses resultados podem ser encontrados também em Zullo et al. (1994a).

3.2.8. Radiação solar

A tabela 3.18 apresenta os valores da razão entre a radiação direta experimental e a simulada através do Modelo 5S, para as bandas temáticas TM2, TM3 e TM4 do satélite Landsat.

Tabela 3.18 - Razão entre a radiação direta experimental e a simulada pelo 5S

Data	TM2	TM3	TM4
13/07	0,9944	0,9298	0,8860
21/07	1,0037	0,9230	0,8626
06/08	1,0083	0,9470	0,9122
25/08	0,9871	0,9156	0,8868
23/09	1,0005	0,9457	0,9101

No caso da radiação global, as razões são apresentadas na tabela 3.19:

Tabela 3.19 - Razão entre a radiação global experimental e a simulada pelo 5S

Data	TM2	TM3	TM4
21/07	0,9049	0,8797	0,8703
06/08	0,9465	0,9201	0,9132
25/08	0,9451	0,9183	0,9295
23/09	0,9354	0,9136	0,9047

Observa-se, nos dois casos, que a coincidência entre os dados experimentais e os simulados pelo Modelo 5S diminui com o aumento do comprimento de onda. Isto deve-se, possivelmente, a uma perda de precisão do espectrorradiômetro nos comprimentos de onda maiores, e, também, a imprecisões de cálculo do Modelo 5S. Os resultados da razão entre as radiações globais do dia 21/07 indicam que o sensor perde a sensibilidade com a diminuição do ângulo de elevação solar ou que ele foi um dia atípico, com uma composição de aerossóis diferente do tipo continental.

3.2.9. Variabilidade espectral da pista de taxiamento

Os resultados das medidas de reflectância feitas na pista de taxiamento do Aeroporto de Viracopos são apresentados neste item. A figura 3.29 apresenta as curvas experimentais médias correspondentes aos dados obtidos em 21/07, 06/08, 23/09 e 09/10/92.

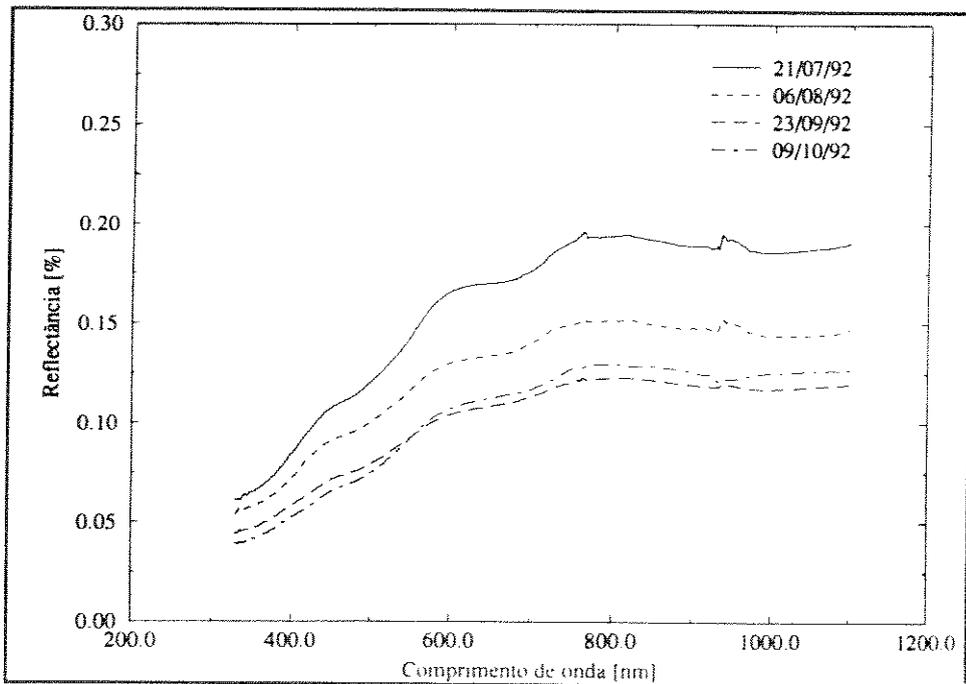


Figura 3.29 - Variabilidade espectral da pista de taxiamento

O valor experimental da reflectância por banda temática do satélite Landsat é apresentado a seguir na tabela 3.20.

Tabela 3.20 - Reflectância da pista de taxiamento por banda temática

Data	Pontos	Reflectância [%]		
		TM2	TM3	TM4
21/07	9	15,22 ± 1,69	17,09 ± 2,22	19,21 ± 2,85
06/08	6	12,16 ± 1,05	13,43 ± 1,26	14,98 ± 1,08
23/09	9	9,70 ± 0,65	10,90 ± 0,70	12,12 ± 0,78
09/10	7	9,80 ± 1,06	11,30 ± 1,37	12,78 ± 1,45
esfera	10	8,18 ± 2,09	8,73 ± 2,01	9,02 ± 2,02

Observa-se, novamente, uma discrepância maior dos resultados obtidos para o dia 21/07 com os calculados para os outros dias. Os valores de 23/09 foram os mais precisos, estando muito próximos aos observados em 09/10, quando o céu estava completamente encoberto durante o período que durou o trabalho. A redução gradativa no valor da reflectância com o passar do tempo indica uma possível influência da posição do sol nos resultados obtidos. Deste modo, pode-se estimar que a diferença entre os valores da reflectância obtidos a partir das curvas experimentais deve-se à combinação dos seguintes fatores:

- a) Propriedades não-lambertianas da superfície de asfalto da pista;
- b) Influência diferenciada de pontos externos à pista na medida da energia refletida por ela, de acordo com as condições atmosféricas do dia em que foi feito o trabalho;
- c) Quantidade de pontos medidos;
- d) Diminuição da sensibilidade do sensor com a diminuição dos ângulos de elevação solar.

A tabela 3.21 contém o valor da proporção entre os espectros médios originais da reflectância, apresentados anteriormente, para fins de análise qualitativa dos resultados. Estes cálculos foram feitos dividindo-se os espectros aos pares.

Tabela 3.21 - Proporção entre os espectros de reflectância da pista de taxiamento

Curvas		Proporção					
1ª(Num)	2ª(Den)	Média	DP	CV	Min.	Máx.	Ampl.
21/07	06/08	1,2501	0,0515	4,12	1,0830	1,3042	0,2212
21/07	23/09	1,5530	0,0587	3,78	1,3304	1,6277	0,2973
21/07	09/10	1,5407	0,0503	3,26	1,4840	1,6667	0,1827
21/07	esfera	1,9909	0,2016	10,13	1,4295	2,2362	0,8067
06/08	23/09	1,2426	0,0176	1,42	1,2115	1,2887	0,0772
06/08	09/10	1,2360	0,0902	7,30	1,1407	1,4588	0,3181
06/08	esfera	1,5754	0,1176	7,46	1,2207	1,7489	0,5282
23/09	09/10	0,9944	0,0657	6,61	0,9345	1,1620	0,2275
23/09	esfera	1,2673	0,1058	8,35	0,9881	1,3760	0,3879
09/10	esfera	1,3006	0,1637	12,59	0,8896	1,4663	0,5767

De acordo com esses valores pode-se considerar que as curvas da reflectância difusa, medidas em campo, são proporcionais entre si, em todo o espectro considerado; ou seja, elas têm formatos semelhantes que produzem resultados proporcionais na faixa espectral que varia de 330nm até 1.100nm. A proporcionalidade é menor entre as curvas medidas em campo e a determinada na esfera integradora. Trata-se de um resultado relevante uma vez que as medidas foram feitas em datas diferentes, espaçadas em até um mês e meio.

A tabela 3.22 contém os valores da declividade (b), do intercepto (a), e do coeficiente de correlação (r), obtidos através da regressão linear entre os pares de espectros médios da reflectância difusa. Estes cálculos foram feitos por comprimento de onda, totalizando 386 pontos por regressão, no caso dos dados de campo, para espectros variando de 330nm até 1.100nm, com precisão de 2nm. No caso das regressões envolvendo a curva obtida na esfera, foram utilizados 351 pontos, pois os espectros variavam de 400nm até 1.100nm, com a mesma precisão anterior de 2nm.

Tabela 3.22 - Regressão linear entre pares de espectros de reflectância da pista de taxiamento

Var.ind.	Var.dep.	a	b	r
21/07	06/08	0,0132	0,7093	0,9990
21/07	23/09	0,0089	0,5822	0,9996
21/07	09/10	-0,0073	0,7001	0,9978
21/07	esfera	0,0378	0,2724	0,9738
06/08	23/09	-0,0017	0,8195	0,9988
06/08	09/10	-0,0199	0,9834	0,9950
06/08	esfera	0,0313	0,3936	0,9762
23/09	09/10	-0,0181	1,2028	0,9985
23/09	esfera	0,0337	0,4667	0,9761
09/10	esfera	0,0424	0,3737	0,9727

Os pequenos valores do intercepto (a), e os altos valores do coeficiente de regressão (r), também indicam que as curvas experimentais médias da reflectância difusa são proporcionais e estão muito bem correlacionadas.

3.2.10. Avaliação da correção

A variação dos valores experimentais da reflectância difusa, obtidos nos trabalhos de campo, fez com que houvesse uma preferência pela análise qualitativa dos resultados da correção, ao invés da análise quantitativa prevista inicialmente. Deste modo procurou-se avaliar se a imagem corrigida era melhor ou não que a original, sem se preocupar em medir precisamente esta possível melhora. Isto foi feito considerando que o objetivo principal das correções feitas numa imagem é o de torná-las sempre o mais representativo possível do estado real da superfície terrestre observada. O método de avaliação utilizado baseia-se nos valores experimentais que puderam ser obtidos com mais segurança, qualidade e quantidade, que foi a radiação solar global I_{globm} .

3.2.10.1. Regra de decisão

Sejam duas imagens IM_1 e IM_2 de uma determinada região da superfície terrestre, das quais se obtêm os valores L_1 e L_2 da radiância de um mesma área-teste existente nelas, com reflectância real ρ . A partir destes dados é possível calcular as distâncias euclidianas d_1 e d_2 entre os valores da radiação solar global obtidos a partir das imagens (I_{glob1} e I_{glob2}) e os medido experimentalmente (I_{globm}), fazendo-se:

$$d_1 = |I_{glob1} - I_{globm}| = \left| \frac{\pi \cdot L_1}{\rho} - I_{globm} \right| = \frac{|\pi \cdot L_1 - \rho \cdot I_{globm}|}{\rho} \quad (3.4)$$

e

$$d_2 = |I_{glob2} - I_{globm}| = \left| \frac{\pi \cdot L_2}{\rho} - I_{globm} \right| = \frac{|\pi \cdot L_2 - \rho \cdot I_{globm}|}{\rho} \quad (3.5)$$

A melhor imagem foi definida como aquela com o menor valor da distância d entre a radiação solar global medida experimentalmente (I_{globm}) e a obtida da imagem (I_{glob1} ou I_{glob2}).

Assumindo, sem perda de generalidade, que $L_1 \geq L_2$, tem-se que:

a) $d_1 \geq d_2$ quando:

(i) $\rho \leq (\pi.L_2/I_{globm})$ ou

(ii) $(\pi.L_2/I_{globm}) \leq \rho \leq \{\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})\}$;

b) $d_1 \leq d_2$ quando:

(i) $(\pi.L_1/I_{globm}) \leq \rho$ ou

(ii) $\{\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})\} \leq \rho \leq (\pi.L_1/I_{globm})$.

Como $L_1 \geq L_2$, então:

$$(\pi.L_2/I_{globm}) \leq (\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})) \leq (\pi.L_1/I_{globm})$$

e, portanto, os itens (i) e (ii) acima podem ser combinados, nos casos (a) e (b), numa única expressão matemática.

Desse modo, sendo $L_1 \geq L_2$, tem-se que:

$$d_1 \geq d_2 \quad \text{se e somente se } \rho \leq \{\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})\}$$

e $d_1 \leq d_2 \quad \text{se e somente se } \rho \geq \{\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})\}$.

A partir deste resultado é possível formular o método de análise qualitativa dos resultados da correção nos seguintes passos:

1) cálculo da reflectância-limite ρ_{lim} :

$$\rho_{lim} = \{\pi.(L_1+L_2)/(2.I_{globm})\};$$

2) escolha da melhor imagem a partir da comparação entre a reflectância real ρ da área-teste, obtida experimentalmente ou na literatura, e o valor de ρ_{lim} , conforme a seguinte regra de decisão:

Se:

$$\rho \leq \rho_{lim},$$

então:

$d_1 \geq d_2$ e, portanto, a imagem IM_2 é melhor que a imagem IM_1 ,

caso contrário:

como $\rho \geq \rho_{lim}$ tem-se que $d_1 \leq d_2$ e, conseqüentemente, a imagem IM_1 é melhor que a imagem IM_2 .

Os dados originais da radiação solar global (I_{glob}) foram medidos para várias posições do sol (m) nos comprimentos de onda (λ) pares situados entre 330nm e 1.100 nm, formando, assim, um conjunto inicial de valores $I_{glob}(\lambda, m)$. A obtenção da radiação global por banda temática no horário de passagem do satélite (I_{globm}) foi feita com base nestes dados iniciais ($I_{glob}(\lambda, m)$), de acordo com o seguinte algoritmo:

1) cálculo da radiação global por banda temática ($I_{glob}(TMX, m)$) através da ponderação dos dados monocromáticos originais $I_{glob}(\lambda, m)$ pelas respectivas funções-filtros $S_{TM2}(\lambda)$, $S_{TM3}(\lambda)$ e $S_{TM4}(\lambda)$, conforme descrito pela equação (3.6):

$$I_{glob}(TMX, m) = \frac{\sum_{\lambda=330}^{1.100} (S_{TMX}(\lambda) \cdot I_{glob}(\lambda, m))}{\sum_{\lambda=330}^{1.100} S_{TMX}(\lambda)} \quad (3.6)$$

para $X = 2, 3$ e 4 e $m = m_1, m_2, \dots, m_n$;

2) obtenção das expressões analíticas da radiação global por banda temática ($I_{TMX}(m)$) em função da posição do sol descrita por m , através do ajuste de curvas aos valores de $I_{glob}(TMX, m)$ feito pelo programa AJUSTE (Zullo et al., 1987).

3) determinação de I_{globm} a partir das funções analíticas $I_{TMX}(m)$, fazendo-se $I_{globm} = I_{TMX}(m_{sat})$ para $X = 2, 3$ e 4 , onde m_{sat} corresponde ao horário de passagem do satélite.

CAPÍTULO 4

SCORADIS

(Sistema de COrreção RADIométrica de Imagens de Satélite)

O SCORADIS é um sistema computacional, desenvolvido como parte deste trabalho, destinado à correção radiométrica de imagens de satélite que tem como base a teoria e os parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S.

4.1. Introdução

A metodologia de correção implementada no SCORADIS é composta de duas etapas principais, que correspondem ao tipo de interferência atmosférica tratada.

Na primeira etapa são corrigidos os efeitos provocados pela vizinhança dos alvos terrestres observados, ficando inalteradas as interferências devidas apenas aos processos atmosféricos. Os pontos da imagem resultante deste tratamento continuam tendo a influência dos fenômenos de absorção e espalhamento atmosféricos, mas ficam livres da contribuição proveniente de seus alvos terrestres vizinhos. Isto faz com que os pontos da imagem corrigida tenham comportamento radiométrico equivalente ao apresentado pelos alvos extensos, embora representem superfícies terrestres médias ou pequenas, devido à resolução espacial do satélite.

Esse destaque aos efeitos da vizinhança foi feito porque eles são normalmente negligenciados pela dificuldade de descrever adequadamente a distribuição dos alvos sobre a superfície terrestre através da reflectância média ρ_{med} . Uma das vantagens principais desta pré-remoção dos efeitos da vizinhança é a simplificação do processo de correção atmosférica subsequente.

A segunda etapa da metodologia de correção destina-se, portanto, à remoção dos efeitos provocados apenas pelos fenômenos de absorção e espalhamento atmosféricos, considerando que os pontos da imagem correspondem a alvos terrestres extensos.

A subdivisão da correção radiométrica possibilita um acompanhamento mais detalhado de todo o processo de correção, permitindo que se avalie a influência de cada etapa nos

resultados finais.

No caso de imagens cujos pixels já correspondam a alvos extensos, devido à resolução espacial do satélite, diminui-se bastante o tempo de processamento, já que é necessário fazer apenas a correção atmosférica. Esta é, por exemplo, a situação das imagens dos satélites NOAA-AVHRR.

4.2. Remoção dos efeitos da vizinhança

4.2.1. Metodologia

A remoção dos efeitos da vizinhança corresponde, de acordo com a terminologia definida pelo Modelo 5S, ao processo de transformação do sinal aparente original L_{sat} em um valor equivalente L_{sat}^i . A equação utilizada neste processo é obtida diretamente da diferença δL_{sat} , definida na equação (1.29), fazendo-se

$$L_{sat}^i = L_{sat} + \delta L_{sat} \quad (4.1)$$

ou seja,

$$L_{sat}^i = L_{sat} + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot (\rho - \rho_{med}) \cdot (t_{dir}(\theta_v) + \rho_s \cdot t_{dir}(\theta_v)) \cdot I_0}{\pi \cdot (1 - \rho_s) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot s)} \quad (4.2)$$

Os sinais L_{sat}^i e L_{sat} são registrados nas imagens de satélite através dos valores digitais $NC(L_{sat}^i)$ e $NC(L_{sat})$, respectivamente, que são obtidos através das equações (4.3) e (4.4):

$$NC(L_{sat}^i) = L_{sat}^i \cdot A + Offset \quad (4.3)$$

e

$$NC(L_{sat}) = L_{sat} \cdot A + Offset \quad (4.4)$$

onde: A é o fator de conversão da radiância registrada pela banda temática do satélite em valores inteiros, variando de 0 a 255, ou seja, é o valor numérico da imagem por unidade de

radiância, expresso em [(Nível de Cinza).m².µm.sr.W⁻¹] e *Offset* é o valor digital correspondente à radiância nula, em [(Nível de Cinza)].

A correção dos efeitos da vizinhança é definida então, na prática, pela equação (4.5):

$$NC(L_{sat}^h) = NC(L_{sat}) + \frac{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot (\rho - \rho_{med}) \cdot (t_{diff}(\theta_v) + \rho \cdot s \cdot t_{dir}(\theta_v))}{(1 - \rho \cdot s) \cdot (1 - \rho_{med} \cdot s)} \cdot \frac{I_0 \cdot A}{\pi} \quad (4.5)$$

Essa equação pode ser simplificada, considerando que como o albedo esférico da atmosfera apresenta sempre valores numéricos muito pequenos, ele pode ser aproximado por zero. Deste modo, a função de conversão dos valores digitais $NC(L_{sat})$ é escrita como:

$$NC(L_{sat}^h) \approx NC(L_{sat}) + t_g \cdot T(\theta_s) \cdot (\rho - \rho_{med}) \cdot t_{diff}(\theta_v) \cdot \frac{I_0 \cdot A}{\pi} \quad (4.6)$$

Embora esta equação já esteja num formato computacionalmente mais adequado, é preciso ainda avaliar o termo $(\rho - \rho_{med})$ para que a expressão final de correção dependa apenas dos parâmetros atmosféricos e do valor digital das imagens.

4.2.2. Cálculo da reflectância média

A reflectância média ρ_{med} da superfície terrestre para observações verticais é definida pelo Modelo 5S através da seguinte expressão geral:

$$\rho_{med} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho(r, \theta) \cdot r \cdot p(r) \cdot dr \cdot d\theta \quad (4.7)$$

com:

$$r \cdot p(r) = \frac{r \cdot e(r, \theta, 0)}{t_{diff}(0)} \quad (4.8)$$

onde: (r, θ) são as coordenadas polares do ponto M^1 da superfície terrestre, considerando que o alvo está na origem $M(0,0)$;

$\rho(r, \theta)$ é a reflectância do ponto M^1 ;

$e(r,\theta,0)$ é a contribuição à transmissão difusa $t_{df}(0)$, por unidade de área, de uma fonte unitária isotrópica colocada em M^1 .

A formulação de ρ_{med} , efetivamente utilizada pelo Modelo 5S, é obtida supondo-se, por razões práticas, que a superfície terrestre seja composta por um alvo circular, de raio \bar{r} e reflectância ρ , circundado por uma vizinhança homogênea com reflectância ρ_{viz} . Isto é esquematicamente representado na figura 4.1:

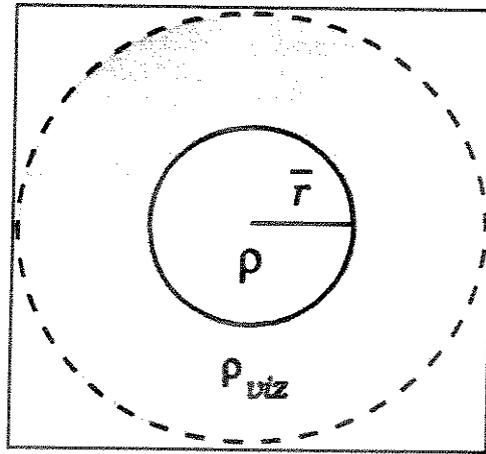


Figura 4.1 - Superfície terrestre simplificada

Nesse caso, como:

$$\begin{aligned} \rho(r,\theta) &= \rho \quad \text{para } 0 \leq r \leq \bar{r} \text{ e } 0 \leq \theta \leq 2\pi \text{ e} \\ \rho(r,\theta) &= \rho_{viz} \quad \text{para } r > \bar{r} \text{ e } 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned}$$

tem-se que:

$$\rho_{med} = \rho \cdot F(\bar{r}) + (1 - F(\bar{r})) \cdot \rho_{viz} \tag{4.9}$$

onde:

$$F(\bar{r}) = 2\pi \int_0^{\bar{r}} r \cdot p(r) \cdot dr \tag{4.10}$$

é a função que fornece a contribuição relativa a ρ_{med} dos pontos da superfície com distância inferior a \bar{r} da origem.

Desse modo, observa-se que $F(r)$ representa, em termos estatísticos, uma distribuição

acumulada associada à transmissão difusa de fótons em direção ao satélite. Esta função é calculada ponderando-se a contribuição relativa a ρ_{med} devida aos gases e aos aerossóis pelos respectivos fatores de transmissão difusa:

$$F(r) = \frac{t_{dif}^{gas}(\theta_v) \cdot F^{gas}(r) + t_{dif}^{aer}(\theta_v) \cdot F^{aer}(r)}{t_{dif}^{gas}(\theta_v) + t_{dif}^{aer}(\theta_v)} \tag{4.11}$$

onde: $F^{gas}(r)$ é a função atmosférica, considerando apenas os gases;

$F^{aer}(r)$ é a função atmosférica, considerando apenas os aerossóis;

$t_{dif}^{gas}(\theta_v)$ é o fator de transmissão difusa devido aos gases;

$t_{dif}^{aer}(\theta_v)$ é o fator de transmissão difusa devido aos aerossóis.

As funções $F^{aer}(r)$ e $F^{gas}(r)$ foram definidas no Modelo 5S para um perfil médio de gases e aerossóis calculados a partir dos modelos-padrões de atmosfera propostos por McClatchey et al. (1971):

$$F^{gas}(r) = 1 - 0,93 \cdot e^{-0,08r} - 0,07 \cdot e^{1,1r} \quad (r \text{ em [km]}) \tag{4.12}$$

e

$$F^{aer}(r) = 1 - 0,375 \cdot e^{-0,2r} - 0,625 \cdot e^{-1,8r} \quad (r \text{ em [km]}) \tag{4.13}$$

Analisando-se os gráficos destas duas funções, apresentados na figura 4.2, observa-se que os aerossóis têm um peso maior na difusão dos fótons em torno do alvo, enquanto que os gases influenciam a grande distância e mais suavemente.

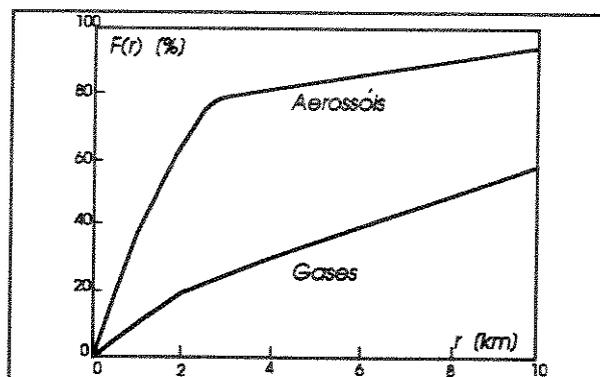


Figura 4.2 - Funções atmosféricas

Caso a superfície terrestre seja representada por pontos discretos, como nas imagens de satélite, por exemplo, tem-se que a reflectância média ρ_{med} é definida por:

$$\rho_{med} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \rho_{ij} p(r_{ij}) \quad (4.14)$$

onde: ρ_{ij} é a reflectância real do ponto com coordenadas (i,j) e $p(r_{ij})$ é a probabilidade que os fótons refletidos pelo ponto (i,j) contribuam ao sinal difuso recebido pelo satélite, ao visar o alvo localizado na origem $(0,0)$.

A distância r_{ij} do ponto (i,j) à origem $(0,0)$ é definida como:

$$r_{ij} = d \cdot \sqrt{i^2 + j^2} \quad (4.15)$$

onde: d é o valor da distância entre pontos adjacentes horizontais e verticais.

A probabilidade $p(r_{ij})$ pode ser definida a partir da função $F(r)$, fazendo-se:

$$p(r_{ij}) = \frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot F'(r_{ij}) \quad (4.16)$$

onde:

$$\xi = \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} F'(r_{ij}) \quad (4.17)$$

e

$$\bar{r} = d \cdot \sqrt{i^2 + j^2} \quad (4.18)$$

A principal dificuldade para a implementação computacional da equação (4.14) são os extremos infinitos das somatórias em i e j . Isto pode ser contornado assumindo que a partir de um certo raio \bar{r} a reflectância da superfície terrestre é constante e igual a ρ_{viz} .

Desse modo, como:

$$\sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} p(r_{ij}) = \frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} F^l(r_{ij}) = \frac{F(\bar{r})}{\sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} F^l(r_{ij})} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} F^l(r_{ij}) = F(\bar{r}) \quad (4.19)$$

tem-se que:

$$\rho_{med} = \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} \rho_{ij} p(r_{ij}) + \sum_{r_{ij} > \bar{r}} \rho_{viz} p(r_{ij}) = \frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} (\rho_{ij} F^l(r_{ij})) + \rho_{viz} (1 - F(\bar{r})) \quad (4.20)$$

A reflectância real ρ_{ij} pode ser calculada aproximadamente através da equação (4.21):

$$\rho = \frac{\rho_{sat} - t_g \cdot \rho_{atm}}{t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \quad (4.21)$$

que é obtida da formulação para alvos extensos, correspondente à equação (1.28), desprezando-se o albedo esférico da atmosfera. Deste modo, sendo:

$$\rho_{sat} = \frac{\pi \cdot L_{sat}}{I_0} = \frac{\pi \cdot (NC(L_{sat}) - Offset)}{A \cdot J_0} = \frac{(NC(L_{sat}) - Offset)}{K} \quad (4.22)$$

tem-se que a equação (4.21) é escrita como:

$$\rho = \frac{(NC(L_{sat}) - Offset) - K \cdot t_g \cdot \rho_{atm}}{K \cdot t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \quad (4.23)$$

onde:

$$K = \frac{A \cdot J_0}{\pi} \quad (4.24)$$

Substituindo a equação (4.23) em (4.20), tem-se que:

$$\rho_{med} = \frac{1}{K \cdot t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \cdot \left[\frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} (NC(L_{sat}) \cdot F^l(r_{ij})) + NC(L_{viz}) \cdot (1 - F(\bar{r})) - K \cdot t_g \cdot \rho_{atm} \right] \quad (4.25)$$

Logo,

$$\rho - \rho_{med} = \frac{1}{K.t_g.T(\theta_s).T(\theta_v)} \left[NC(L_{sat}) - \frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} (NC(L_{sat}) \cdot F^l(r_{ij}) - NC(L_{viz})(1 - F(\bar{r}))) \right] \quad (4.26)$$

4.2.3. Equação de correção

Substituindo (4.26) em (4.6), obtém-se a equação de correção dos valores digitais de uma imagem dos efeitos provocados pela vizinhança dos alvos terrestres:

$$NC(L_{sat})_{ij}^h = NC(L_{sat})_{ij} + \Delta NC(L_{sat})_{ij} \quad (4.27)$$

onde:

$$\Delta NC(L_{sat})_{ij} = \frac{t_{diff}(\theta_v)}{T(\theta_v)} \left[NC(L_{sat})_{ij} - \left(\frac{F(\bar{r})}{\xi} \cdot \sum_{r_{ij} \leq \bar{r}} (NC(L_{sat})_{ij} \cdot F^l(r_{ij}) + NC(L_{viz})_{ij} \cdot (1 - F(\bar{r}))) \right) \right] \quad (4.28)$$

Apesar das simplificações feitas no desenvolvimento desta equação, os resultados finais são plenamente satisfatórios, pois o fator de correção $\Delta NC(L_{sat})_{ij}$ obtido está diretamente relacionado com os parâmetros atmosféricos que descrevem a transmissão difusa dos fótons em direção ao espaço.

Em termos computacionais, a remoção dos efeitos da vizinhança de cada ponto (i,j) da imagem baseia-se no processo de convolução da imagem original com o filtro determinado pelas condições atmosféricas expressas em $F(r)$. A dimensão \bar{r} da janela de convolução deve ser escolhida cuidadosamente para que os resultados finais sejam obtidos com boa precisão numérica em um tempo de processamento aceitável. Uma propriedade muito interessante deste processo de convolução é que ele pode ser implementado em paralelo, reduzindo bastante o tempo total de execução do programa.

Considerando que a área ocupada pela janela de convolução é sempre muito inferior à área total da imagem, pode-se aproximar o valor de $NC(L_{viz})_{ij}$, correspondente à vizinhança homogênea de cada ponto da imagem, pelo valor médio da imagem.

Os valores digitais da imagem corrigida podem descrever também a reflectância aparente ρ_{sat}^i , considerando que como:

$$0 \leq \rho_{sat}^i = \frac{\pi \cdot L_{sat}^i}{I_0} = \frac{\pi \cdot (NC(L_{sat}^i) - Offset)}{A \cdot I_0} = \frac{NC(L_{sat}^i) - Offset}{K} \leq 1 \quad (4.29)$$

tem-se então que:

$$0 \leq NC(\rho_{sat}^i) = 255 \cdot \rho_{sat}^i = 255 \cdot \left(\frac{NC(L_{sat}^i) - Offset}{K} \right) \leq 255 \quad (4.30)$$

A conversão dos valores de radiância em reflectância corresponde à remoção da variabilidade radiométrica do sensor sobre os dados espectrais obtidos.

4.3. Correção atmosférica

A correção atmosférica implementada no SCORADIS é bastante simplificada a partir da hipótese de que os pontos da imagem correspondem a alvos extensos com raio superior a 1km. Isto equivale, de acordo com a terminologia utilizada pelo Modelo 5S, à transformação do sinal aparente L_{sat}^i para o valor da energia L realmente refletida pela superfície terrestre. Deste modo, de acordo com a equação da radiância real definida no Modelo 5S,

$$L = \frac{\pi \cdot L_{sat}^i - t_g \cdot \rho_{atm} \cdot I_0}{\pi \cdot t_{g_a} \cdot T(\theta_v)} \quad (4.31)$$

tem-se que o valor digital $NC(L)$ corrigido é dado simplesmente por:

$$NC(L) = \left(\frac{(NC(L_{sat}^i) - Offset) - K \cdot t_g \cdot \rho_{atm}}{t_{g_a} \cdot T(\theta_v)} \right) + Offset \quad (4.32)$$

Com base na equação (1.28), tem-se que os valores digitais da imagem corrigida podem representar a reflectância real ρ da superfície terrestre, fazendo-se:

$$NC(\rho) = 255 \cdot \left(\frac{(NC(L_{sat}) - Offset) - K \cdot t_g \cdot \rho_{atm}}{((NC(L_{sat}) - Offset) - K \cdot t_g \cdot \rho_{atm})s + K \cdot t_g \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)} \right) \quad (4.33)$$

É importante ressaltar que os valores de $NC(L)$ e $NC(\rho)$ independem da localização dos pontos na imagem. Isto permite calcular explicitamente a função de conversão dos valores digitais originais $NC(L_{sat})$ nos valores digitais corrigidos $NC(L)$ e $NC(\rho)$, conhecendo-se apenas os valores dos parâmetros atmosféricos. Estas funções de conversão podem ser escritas na forma de tabelas que associem, a cada valor digital original, o valor digital corrigido, calculado através das equações (4.32) e/ou (4.33). Com isso, a correção atmosférica fica sendo simplesmente um processo de substituição dos valores digitais da imagem de acordo com as tabelas de conversão calculadas previamente.

A grande vantagem desta metodologia é que ela pode ser utilizada para corrigir remotamente as imagens de satélite, dado que não é preciso conhecê-las para calcular as tabelas de conversão dos valores digitais. As tabelas de correção podem ser calculadas num local a partir dos dados de entrada no Modelo 5S e enviadas para onde estiverem as imagens a serem corrigidas, reduzindo bastante o volume de informações a ser transferido entre estações.

4.4. Descrição do sistema

4.4.1. Introdução

A metodologia de correção radiométrica implementada no SCORADIS pode então ser representada, de acordo com o que foi descrito nas seções anteriores, pelo esquema apresentado a seguir. Os números entre parênteses indicam a equação básica utilizada no processamento indicado.

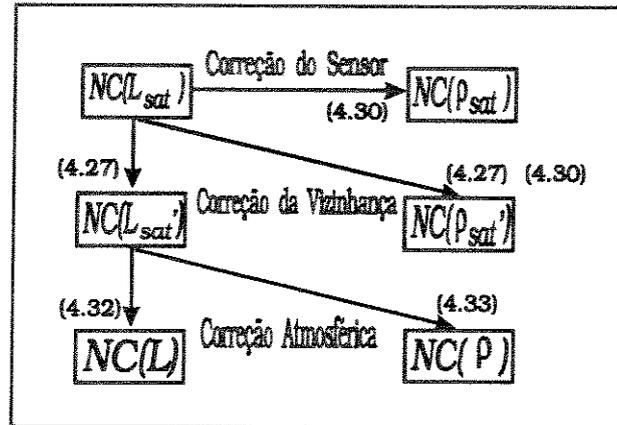


Figura 4.3 - Metodologia de correção radiométrica implementada no SCORADIS

A plataforma de desenvolvimento deste sistema foi uma estação de trabalho modelo Sparc 1+ da SUN, e a linguagem de programação utilizada foi o FORTRAN. Os parâmetros atmosféricos necessários à execução dos procedimentos de correção radiométrica são obtidos diretamente do Modelo 5S. Como ele não está preparado especificamente para este fim, foi preciso adaptá-lo para que forneça somente os dados desejados e bloqueie as demais saídas, não necessárias neste caso. A versão do Modelo 5S, utilizada pelo SCORADIS, foi adaptada da versão desenvolvida originariamente para microcomputadores pessoais.

O sistema é todo organizado através de módulos básicos de programação responsáveis pela execução de tarefas específicas dentro da metodologia de correção implementada. Esta modularização facilita a manutenção e a adaptação do sistema em outros equipamentos diferentes do que foi utilizado no seu desenvolvimento.

As opções principais de utilização do sistema são as seguintes:

1. Tratamento de dados no Modelo 5S;
2. Geração de tabelas de correção atmosférica;
3. Processamento de imagens.

4.4.2. Tratamento de dados no Modelo 5S

É destinado à geração do arquivo de entrada no Modelo 5S a partir dos dados fornecidos pelo usuário, via teclado. Isto é feito de modo interativo e amigável para facilitar a digitação dos dados e a gravação correta do arquivo de entrada no formato exigido pelo Modelo 5S. Logo, o Modelo 5S fica transparente ao usuário porque as informações necessárias para executá-lo são devidamente pedidas pelo programa, não havendo a necessidade de conhecê-lo bem para utilizá-lo corretamente. Isto supre uma das principais deficiências da versão original do Modelo 5S, que é a falta de uma rotina destinada à entrada interativa dos dados via teclado.

Existe ainda uma segunda opção neste módulo que permite utilizar o Modelo 5S na sua forma tradicional apenas para simular o sinal recebido pelo satélite em um determinada situação definida pelo usuário.

4.4.3. Geração de tabelas de correção atmosférica

Este módulo faz parte da metodologia de correção radiométrica implementada no SCORADIS e foi destacada numa opção a parte com o objetivo de oferecer subsídios à correção ou transformação remota das imagens de satélite.

As tabelas de correção/transformação calculadas podem ser as seguintes:

$$1. NC(L_{sat}) \rightarrow NC(\rho_{sat})$$

$$2. NC(L_{sat}^{-1}) \rightarrow NC(L)$$

$$3. NC(L_{sat}^{-1}) \rightarrow NC(\rho)$$

Os dados necessários à execução deste módulo são o nome do arquivo de entrada no Modelo 5S e o nome do arquivo aonde será gravada a tabela de correção escolhida.

4.4.4. Processamento de imagens

Este é o módulo principal do sistema, que motivou todo o seu desenvolvimento. As opções possíveis de sua utilização são as seguintes:

1. Cálculo da imagem de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$;

2. Correção dos efeitos da vizinhança

Tipo da imagem de saída:

a) Radiância $NC(L_{sat})$

b) Reflectância $NC(\rho_{sat})$;

3. Correção atmosférica

Tipo da imagem de saída:

a) Radiância $NC(L)$

b) Reflectância $NC(\rho)$;

4. Correção completa (vizinhança e atmosférica)

Tipo da imagem de saída:

a. Radiância $NC(L)$

b. Reflectância $NC(\rho)$.

O procedimento de correção implementado pode ser descrito através do seguinte algoritmo:

Passo 0: Entrada de dados:

- a) Tipo de correção: vizinhança, atmosférica ou completa (vizinhança e atmosférica);
- b) Tipo da imagem de saída: radiância ou reflectância;
- c) Nome do arquivo de entrada no Modelo 5S;
- d) Nome da imagem de entrada a ser corrigida;
- e) Número de linhas da imagem de entrada;
- f) Número de colunas da imagem de entrada;

Observação: o programa está preparado para processar imagens com até 3.600 colunas, dimensão horizontal máxima de uma imagem-quadrante do satélite Landsat.

g) Nome da imagem de saída;

h) Raio da vizinhança heterogênea em torno do alvo, em pixels (para a correção da vizinhança e para a correção completa).

Observação: a dimensão máxima aceita pelo programa é de 99 pontos.

Passo 1: Execução do Modelo 5S para obtenção dos seguintes parâmetros atmosféricos: $T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$, $t_{dir}(\theta_v)$, $t_{dif}(\theta_v)$, $t_{dif}^{gas}(\theta_v)$, $t_{dif}^{aer}(\theta_v)$, s , t_g , t_{ga} , ρ_{atm} , θ_s , E_0 , D_s ;

Passo 2: Se:

o tipo de correção escolhida for atmosférica ou completa,

então:

calcular a tabela de transformação dos valores digitais $NC(L_{sat})$ nos valores corrigidos de acordo com o tipo de imagem de saída desejado;

Passo 3: Se:

o tipo de correção escolhida for vizinhança ou completa,

então:

iniciar o processo de correção dos efeitos da vizinhança,

caso contrário:

ler a primeira linha da imagem;

O procedimento de iniciação citado acima é composto pelas seguintes tarefas:

1. Cálculo do valor digital médio da imagem;
2. Cálculo do filtro de convolução;
3. Leitura e armazenamento das primeiras w linhas da imagem, onde w é o tamanho da janela de convolução definida no Passo 0. Isto corresponde à formação de um "buffer" na memória composto por um conjunto mínimo de linhas, que são necessárias para agilizar o cálculo das convoluções que envolvem a remoção dos efeitos da vizinhança terrestre.

Passo 4: Leitura de uma linha da imagem de entrada;

Passo 5: Se:

o tipo de correção escolhida for vizinhança ou completa,

então:

calcular o valor de $NC(L_{sat})_{ij}$, definido pelas equações (4.27) e (4.28), para todos os pontos de uma linha da imagem;

Passo 6: Se:

o tipo de correção escolhida for atmosférica ou completa,

então:

transformar o valor de $NC(L_{sat})_{ij}$, calculado acima, de acordo com a tabela de conversão obtida no Passo 2, para todos os pontos de uma linha da imagem;

Passo 7: Gravar a linha processada nos Passos 4, 5 e 6 no arquivo de saída;

Passo 8: Se:

ainda houver mais linhas a serem lidas,

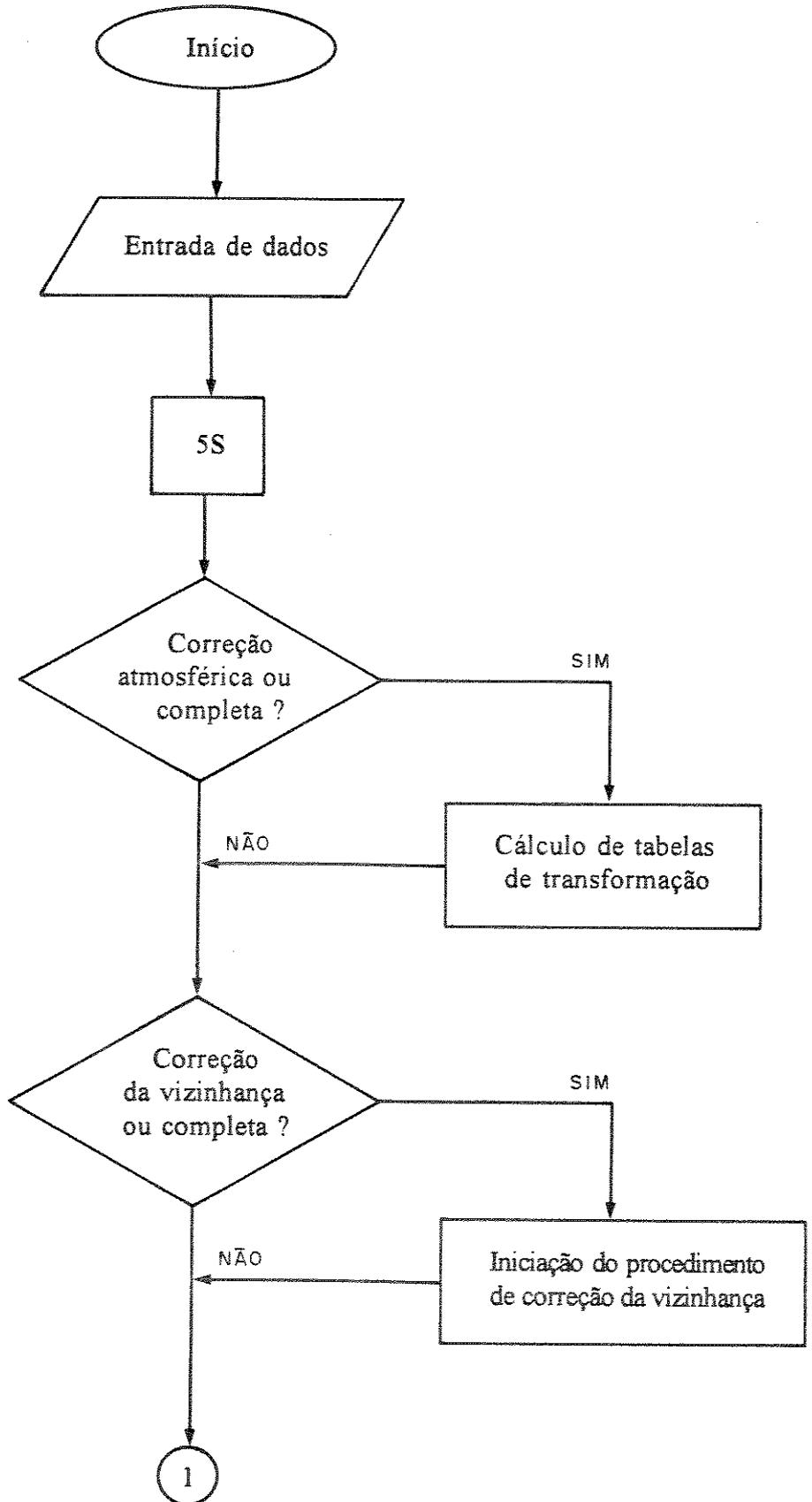
então:

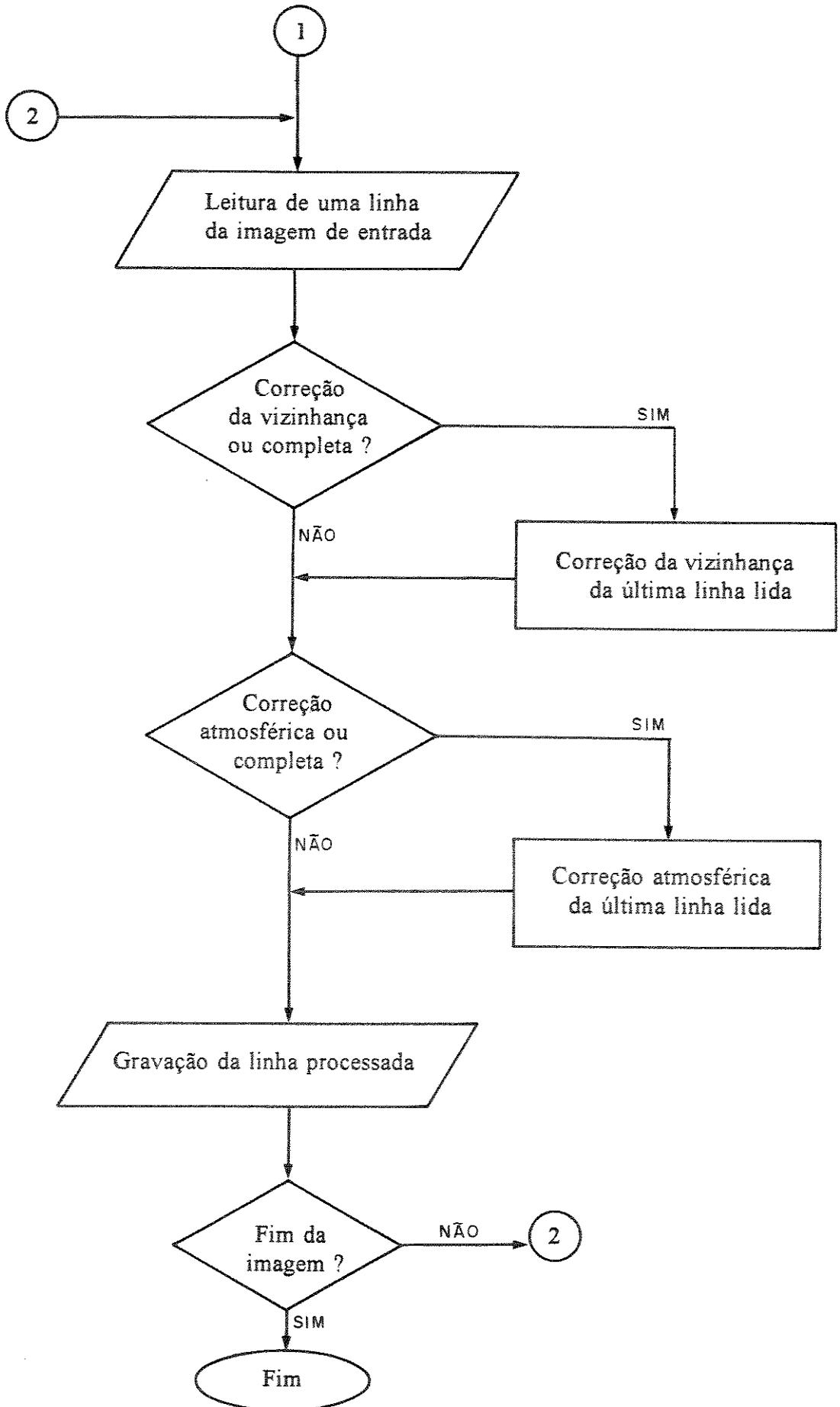
voltar para o Passo 4,

caso contrário:

fim.

Um exemplo de utilização da versão inicial do SCORADIS no tratamento de imagens do interior cearense captadas pelo satélite Landsat é apresentado por Zullo et al. (1993). Atualmente existe uma versão do sistema disponível também para estações de trabalho RISC/IBM. No futuro pretende-se adaptá-lo para ambientes tradicionais de processamento de imagens que facilitem a sua disseminação e utilização pela comunidade de sensoriamento remoto. O fluxograma seguinte descreve esquematicamente o procedimento de correção implementado.





CAPÍTULO 5

PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

A aplicação do sistema SCORADIS na correção radiométrica das imagens de satélite é apresentada neste capítulo. Foram utilizadas duas cenas captadas em datas subseqüentes pelo satélite Landsat no ano de 1992 correspondentes a uma das regiões onde foram feitos os trabalhos de campo. Os dados experimentais apresentados no capítulo 3 foram utilizados para definir os parâmetros atmosféricos necessários à correção e avaliação dos resultados obtidos.

5.1. Introdução

As imagens utilizadas possuem as seguintes características principais:

- a) Satélite: Landsat 5;
- b) Bandas temáticas:
 - 1. TM2 (0,52 μ m - 0,60 μ m: verde e amarelo);
 - 2. TM3 (0,63 μ m - 0,69 μ m: vermelho);
 - 3. TM4 (0,76 μ m - 0,90 μ m: infravermelho próximo);
 - 4. TM5 (1,55 μ m - 1,75 μ m: infravermelho médio);
- c) Órbita-ponto: 219.076 - Quadrante: A
- d) Coordenadas do centro da imagem: (23°S, 47°O);
- e) Datas e horário das passagens: 21/07/92 e 06/08/92 às 12:27GMT;
- f) Pré-tratamento: nenhum;
- g) Centro do recorte utilizado: Mata "Santa Genebra" (22°49' - 47°03');
- h) Dimensão do recorte: 512 x 512 pixels;

As bandas TM2, TM3 e TM4 foram escolhidas por serem similares às bandas XS1, XS2 e XS3 do satélite SPOT-HRV e, também, por estarem dentro da faixa espectral (300nm-1.100nm) abrangida pelo espectrorradiômetro LI1800/LICOR utilizado nas medições da radiação solar. A banda TM5 foi escolhida por sua utilidade na determinação da umidade e do vigor da vegetação. Ela se encontra numa faixa espectral em que a reflectância é determinada pelo conteúdo de água da planta. O canal TM2 é útil nos estudos de sanidade

vegetal, uma vez que ele engloba o pico de reflectância da vegetação na região do visível. A banda TM3 encontra-se na região espectral de alta absorção da clorofila, sendo útil na identificação das características fenológicas da vegetação e na diferenciação das espécies vegetais. O canal TM4 abrange o pico de reflectância da vegetação no espectro eletromagnético, sendo aplicado nas pesquisas em biomassa (Novo, 1989). A banda TM1 ($0,45\mu\text{m}-0,52\mu\text{m}$) não foi utilizada por conter muitas distorções que prejudicariam a qualidade dos resultados a serem obtidos. Este canal é normalmente utilizado para mapear as águas costeiras e diferenciar o solo da vegetação.

A área próxima à Mata "Santa Genebra" contém alguns alvos interessantes que puderam ser utilizados para mostrar os efeitos atmosféricos nas imagens de satélite e avaliar a qualidade dos tratamentos realizados, apesar da grande presença urbana nesta região. Foram selecionadas quatro superfícies-testes contendo as seguintes características principais:

Tabela 5.1 - Áreas-testes selecionadas

Tipo de Cobertura	Local	Tamanho [pontos]
Vegetação natural	Mata "Santa Genebra"	2.027
Água de lago	Fazenda "Rio das Pedras"	89
Cana-de-açúcar	Proximidades da Mata	1.134
Solo	Proximidades da Mata	322

A Mata "Santa Genebra" caracteriza-se por uma vegetação densa e exuberante, típicas da Mata Atlântica, da qual fazia parte, que vem sendo preservada exclusivamente para a realização de trabalhos científicos. O lago localizado na Fazenda "Rio das Pedras" é de origem natural, tendo 10m de profundidade no centro. A sua água está mais para limpa que para poluída, uma vez que, além de não haver descargas poluentes, a sua borda é bastante arborizada. A cana-de-açúcar situada ao redor da Mata "Santa Genebra" encontrava-se em fase de colheita na época em que foi feita a imagem. A superfície de solo considerada corresponde exatamente a uma área de cana-de-açúcar que foi colhida entre as duas datas de passagens do satélite (21/07/92 e 06/08/92).

O processamento realizado consistiu no cálculo das imagens de radiância real ao nível

do solo $NC(L)$, reflectância aparente ao nível do satélite $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real ao nível do solo $NC(\rho)$ com correção completa (efeitos da vizinhança e atmosférica) para o recorte utilizado. A dimensão da janela de convolução utilizada na remoção dos efeitos da vizinhança terrestre foi de 71 pixels, correspondendo a uma vizinhança heterogênea com aproximadamente 1km em torno de cada ponto a ser corrigido. O tempo de processamento de cada imagem na estação RISC/IBM foi de dez minutos, em média. Na estação SPARC/SUN esse tempo subiu para uma hora, aproximadamente.

O tratamento visual das imagens foi feito nos sistemas SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) e no KHOROS em estações de trabalho SPARC e RISC. A grande parte dos programas utilizados nos processamentos de dados e imagens, além do próprio sistema SCORADIS, foram de desenvolvimento próprio sempre utilizando linguagem FORTRAN para ambiente SUN e IBM.

A pista do Aeroporto de Viracopos não foi utilizada como referência uma vez que devido à sua dimensão e principalmente por causa de sua disposição na imagem ela praticamente não continha pixels puros. A superfície de asfalto onde foram feitas as medidas apresentou pouca sensibilidade à correção atmosférica, que é uma característica típica dos chamados alvos médios. Devido às suas dimensões, o efeito da FTM é superior aos efeitos atmosféricos. Além disso, não existiam outras superfícies que pudessem ser utilizadas, como no caso da imagem da Mata "Santa Genebra", devido principalmente à grande presença urbana na região.

5.2. Correção da imagem de 21/07/92

5.2.1. Modelo atmosférico dos componentes gasosos

Os fatores de correção utilizados para definir os perfis de pressão, temperatura, vapor d'água e ozônio a partir da atmosfera tropical estão na tabela 5.2, de acordo com os dados apresentados no capítulo 3:

Tabela 5.2 - Fatores de correção dos perfis atmosféricos em 21/07/92

Pressão	Temp.	Água	Ozônio
1,0132	0,9930	0,6110	1,2146

5.2.2. Concentração dos aerossóis

O valor da espessura ótica dos aerossóis em 550nm calculado a partir dos dados de radiação direta apresentados no capítulo 3 é de 0,258. A figura 5.1 descreve a variabilidade espectral da espessura ótica da atmosfera e dos aerossóis durante o período de medidas. As curvas apresentadas são do tipo alométrica curvilínea e foram calculadas pelo programa AJUSTE (Zullo et al., 1987) a partir dos dados originais da espessura ótica.

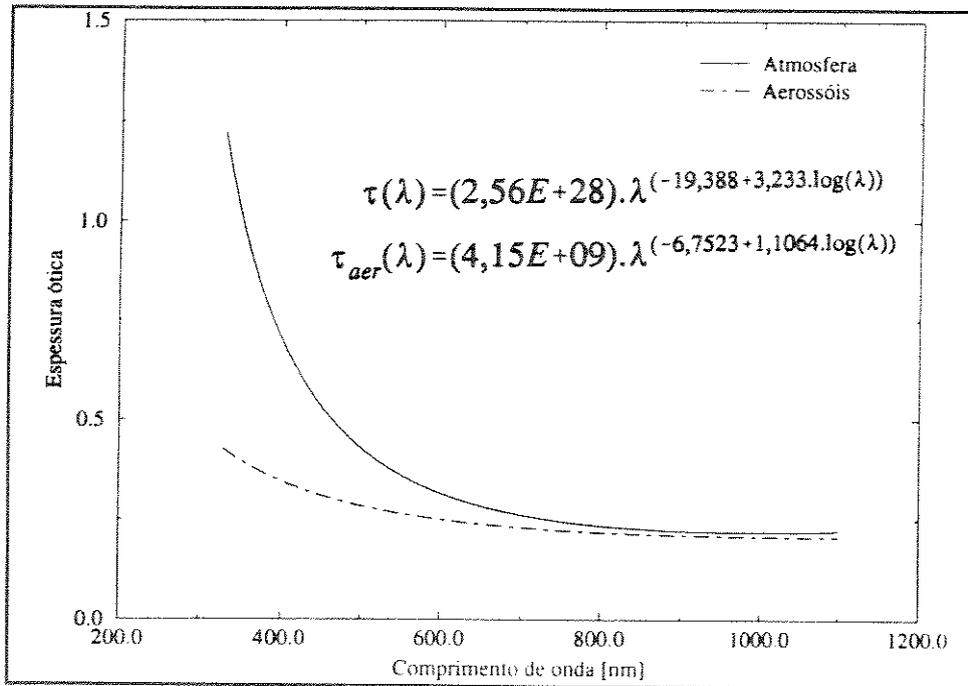


Figura 5.1 - Variabilidade espectral da espessura ótica em 21/07/92

Os valores médios experimental e ajustado da espessura ótica da atmosfera τ e dos aerossóis τ_{aer} são apresentados na tabela 5.3 para 550nm e para as bandas TM2, TM3 e TM4. Os valores ajustados estão muito próximos dos experimentais principalmente para os comprimentos de onda menores, de acordo com as diferenças entre eles calculadas através das equações (5.1) e (5.2):

$$\Delta Dif = \tau(aju) - \tau(exp) \tag{5.1}$$

e

$$\Delta Rel = \frac{\tau(aju) - \tau(exp)}{\tau(exp)} \cdot 100 \tag{5.2}$$

Tabela 5.3 - Espessura ótica experimental e ajustada em 21/07/92

Banda	τ				τ_{aer}			
	Exp.	Ajuste	ΔDif	ΔRel	Exp.	Ajuste	ΔDif	ΔRel
550nm	0,352	0,361	0,009	2,56	0,258	0,265	0,007	2,69
TM2	0,337	0,343	0,006	1,69	0,253	0,259	0,006	2,37
TM3	0,289	0,279	-0,010	-3,36	0,243	0,234	-0,009	-3,99
TM4	0,244	0,230	-0,014	-5,58	0,226	0,216	-0,010	-4,42

5.2.3. Parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S

A tabela 5.4 contém o valor dos parâmetros atmosféricos utilizados no processo de correção das imagens, que foram calculados no SCORADIS pelo Modelo 5S:

Tabela 5.4 - Parâmetros atmosféricos em 21/07/92 calculados pelo 5S (Parte I)

Parâmetro	Banda			
	TM2	TM3	TM4	TM5
$T(\theta_s)$	0,806	0,849	0,888	0,949
$T(\theta_v)$	0,912	0,934	0,953	0,978
$t_{dir}(\theta_v)$	0,718	0,776	0,842	0,938
$t_{dif}(\theta_v)$	0,194	0,159	0,111	0,040
$t_{dif}^{gas}(\theta_v)$	0,040	0,022	0,008	0,000
$t_{dif}^{aer}(\theta_v)$	0,165	0,140	0,103	0,040
t_g	0,900	0,922	0,917	0,895
t_{gd}	0,931	0,945	0,934	0,915

Tabela 5.4 - Parâmetros atmosféricos em 21/07/92 calculados pelo 5S (Parte II)

Parâmetro	Banda			
	TM2	TM3	TM4	TM5
t_{ga}	0,964	0,970	0,956	0,940
ρ_{atm}	0,059	0,040	0,021	0,005
s	0,130	0,097	0,060	0,017
E_0 [$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$]	1836,6	1549,3	1048,5	217,7
τ	0,333	0,255	0,188	0,065
τ_{gas}	0,085	0,046	0,018	0,001
τ_{aer}	0,248	0,208	0,170	0,064

Além desses parâmetros específicos, existem ainda os dados comuns a todas bandas temáticas consideradas apresentados na tabela 5.5:

Tabela 5.5 - Parâmetros comuns a todas bandas temáticas em 21/07/92

Parâmetro	Valor
Ângulo zenital solar (θ_s)	59,81°
Ângulo azimutal solar	46,08°
Ângulo zenital do satélite (θ_v)	0,00°
Ângulo azimutal do satélite	0,00°
Massa ótica de ar às 12:27GMT (m_{sat})	1,8641
Fator de distância terra-sol (D_s)	0,9685

Os valores da espessura ótica da atmosfera e dos aerossóis calculados pelo 5S e através do ajuste feito com os dados experimentais são apresentados na tabela 5.6. As diferenças reais ΔDif e relativa ΔRel foram calculadas através das equações (5.1) e (5.2). Nota-se que existe uma coincidência maior nos comprimentos de onda menores.

Tabela 5.6 - Espessura óptica ajustada e simulada em 21/07/92

Banda	τ				τ_{aer}			
	Ajuste	5S	ΔDif	ΔRel	Ajuste	5S	ΔDif	ΔRel
TM2	0,343	0,333	-0,010	-2,92	0,259	0,248	-0,011	-4,28
TM3	0,279	0,255	-0,024	-8,73	0,237	0,208	-0,029	-12,38
TM4	0,230	0,188	-0,042	-18,33	0,216	0,170	-0,046	-21,33

5.2.4. Processamento das imagens

5.2.4.1. Imagens de radiância

Os parâmetros estatísticos das imagens de radiância original $NC(L_{sat})$ e corrigida $NC(L)$ são apresentados a seguir na tabela 5.7:

Tabela 5.7 - Parâmetros estatísticos das imagens de radiância de 21/07/92

Banda	Imagem	Nível de cinza					
		Médio	DP	CV	Mín.	Máx.	Ampl.
TM2	$NC(L_{sat})$	25,09	3,67	14,61	17	109	92
	$NC(L)$	16,47	5,05	30,64	5	132	127
TM3	$NC(L_{sat})$	31,08	7,33	23,57	0	255	255
	$NC(L)$	25,20	9,42	37,36	0	255	255
TM4	$NC(L_{sat})$	38,45	7,60	19,77	10	136	126
	$NC(L)$	38,20	9,28	24,30	4	157	153
TM5	$NC(L_{sat})$	56,79	15,18	26,72	2	255	253
	$NC(L)$	60,34	17,16	28,43	0	255	255

As diferenças reais e relativa entre os valores dos parâmetros das imagens original $NC(L_{sat})$ e corrigida $NC(L)$ são apresentadas na tabela 5.8. Elas foram calculadas através das equações (5.3) e (5.4):

$$\Delta Dif_L = \text{Parâmetro}(NC(L)) - \text{Parâmetro}(NC(L_{sat})) \tag{5.3}$$

e

$$\Delta Rel_L = \frac{\text{Parâmetro}(NC(L)) - \text{Parâmetro}(NC(L_{sat}))}{\text{Parâmetro}(NC(L_{sat}))} \cdot 100 \quad (5.4)$$

Tabela 5.8 - Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de radiância de 21/07/92

Banda	Nível de cinza							
	Médio		DP		CV		Ampl.	
	ΔDif_L	ΔRel_L						
TM2	-8,62	-34,36	1,38	37,60	16,03	109,72	35	38,04
TM3	-5,88	-18,92	2,09	28,51	13,79	58,51	0	0,00
TM4	-0,25	-0,65	1,68	22,11	4,53	22,91	27	21,43
TM5	3,55	6,25	1,98	13,04	1,71	6,40	2	0,79

5.2.4.2. Imagens de reflectância

A tabela 5.9 apresenta os parâmetros estatísticos referentes às imagens de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$:

Tabela 5.9 - Parâmetros estatísticos das imagens de reflectância de 21/07/92

Banda	Imagem	Nível de cinza					
		Médio	DP	CV	Mín.	Máx.	Ampl.
TM2	$NC(\rho_{sat})$	29,82	4,78	16,01	19	139	120
	$NC(\rho)$	24,34	8,52	35,01	5	202	197
TM3	$NC(\rho_{sat})$	33,04	8,45	25,56	0	255	255
	$NC(\rho)$	32,06	13,02	40,61	0	255	255
TM4	$NC(\rho_{sat})$	51,74	10,92	21,10	11	191	180
	$NC(\rho)$	59,34	15,18	25,59	2	245	243
TM5	$NC(\rho_{sat})$	53,84	15,28	28,39	0	254	254
	$NC(\rho)$	63,53	18,99	29,89	0	255	255

As diferenças real e relativa entre os valores dos parâmetros das imagens de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$ são apresentados na tabela 5.10. Eles foram calculados através das equações (5.5) e (5.6):

$$\Delta Dif_{\rho} = \text{Parâmetro}(NC(\rho)) - \text{Parâmetro}(NC(\rho_{sat})) \tag{5.5}$$

e

$$\Delta Rel_{\rho} = \frac{\text{Parâmetro}(NC(\rho)) - \text{Parâmetro}(NC(\rho_{sat}))}{\text{Parâmetro}(NC(\rho_{sat}))} \cdot 100 \tag{5.6}$$

Tabela 5.10 - Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de reflectância de 21/07/92

Banda	Nível de cinza							
	Médio		DP		CV		Ampl.	
	ΔDif_{ρ}	ΔRel_{ρ}						
TM2	-5,48	-18,38	3,74	78,24	19,00	118,68	77	64,17
TM3	-0,98	-2,97	4,57	54,08	15,05	58,88	0	0,00
TM4	7,60	14,69	4,26	39,01	4,49	21,28	63	35,00
TM5	9,69	18,00	3,71	24,28	1,50	5,28	1	0,39

Observa-se que o desvio padrão e o coeficiente de variação sempre aumentam com a correção e que esse aumento é proporcional à importância do espalhamento atmosférico na banda temática considerada, segundo os parâmetros atmosféricos apresentados na tabela 5.4. O brilho médio da imagem varia de acordo com a importância da reflectância atmosférica e da transmitância gasosa. Quando a reflectância atmosférica é alta, tem-se uma variação negativa do brilho. Onde a transmitância gasosa é menor, tem-se um aumento do brilho. A amplitude dos níveis de cinza das imagens corrigidas nunca foram inferiores à amplitude dos níveis de cinza das imagens originais.

A partir dos resultados para as imagens de reflectância observa-se que na banda TM2 o efeito da reflectância atmosférica é mais forte que o da transmitância gasosa e do espalhamento. Na banda TM3 o espalhamento atmosférico é o efeito predominante, enquanto

que nas bandas TM4 e TM5 há um predomínio dos efeitos devido a transmitância gasosa. O valor da amplitude mostra que existem alguns pontos na imagem bastante sensíveis à correção radiométrica.

5.2.4.3. Superfícies-testes

Os valores médios da radiância das superfícies-testes de mata, água e cana existentes na imagem são apresentados na tabela 5.11. As diferenças real ΔDif_L e relativa ΔRel_L correspondem às equações (5.7) e (5.8):

$$\Delta Dif_L = L - L_{sat} \quad (5.7)$$

e

$$\Delta Rel_L = \frac{L - L_{sat}}{L_{sat}} \cdot 100 \quad (5.8)$$

Tabela 5.11 - Radiância das superfícies-testes em 21/07/92

Superfície	Banda	L_{sat}	L	ΔDif_L	ΔRel_L
		[W.m ⁻² .μm ⁻¹ .sr ⁻¹]			
Mata	TM2	24,97	9,09	-15,88	-63,60
	TM3	18,31	8,38	-9,92	-54,22
	TM4	35,74	36,00	0,26	0,74
	TM5	4,22	4,30	0,08	1,84
Cana	TM2	30,04	16,54	-13,50	-44,93
	TM3	22,04	13,22	-8,81	-40,00
	TM4	47,01	49,70	2,69	5,51
	TM5	5,10	5,30	0,20	3,42
Água	TM2	27,47	12,82	-14,65	-53,31
	TM3	20,83	11,67	-9,17	-44,00
	TM4	8,60	3,15	-5,45	-63,35
	TM5	0,38	0,00	-0,38	-99,15

Os valores médios da reflectância das superfícies-testes de mata, água e cana são incluídos na tabela 5.12. As diferenças real ΔDif_p e relativa ΔRel_p são formuladas pelas equações (5.9) e (5.10):

$$\Delta Dif_p = \rho - \rho_{sat} \tag{5.9}$$

e

$$\Delta Rel_p = \frac{\rho - \rho_{sat}}{\rho_{sat}} \cdot 100 \tag{5.10}$$

Tabela 5.12 - Reflectância das superfícies-testes em 21/07/92

Superfície	Banda	ρ_{sat} [%]	ρ [%]	ΔDif_p	ΔRel_p
Mata	TM2	8,81	4,63	-4,28	-48,58
	TM3	7,53	4,21	-3,32	-44,09
	TM4	21,93	25,48	3,55	16,19
	TM5	12,47	14,03	1,56	12,51
Cana	TM2	10,57	7,54	-3,03	-31,22
	TM3	9,21	6,69	-2,52	-27,36
	TM4	28,91	35,04	6,13	21,20
	TM5	15,13	17,32	2,19	14,47
Água	TM2	9,78	5,77	-4,01	-41,00
	TM3	8,67	5,81	-2,86	-32,99
	TM4	5,20	2,13	-3,07	-59,04
	TM5	1,17	0,22	-0,95	-81,20

A diminuição do valor da reflectância corrigida das superfícies vegetais nas bandas do visível (TM2 e TM3) deve-se à remoção da contribuição devida ao espalhamento atmosférico que é importante neste caso principalmente por causa do baixo valor da reflectância. O aumento da reflectância corrigida nas bandas do infravermelho (TM4 e TM5) deve-se à remoção dos efeitos devidos à absorção gasosa que são predominantes por causa da magnitude dos valores da reflectância. Esses resultados estão plenamente dentro do esperado

para superfícies vegetais (Guyot, 1989). O aumento da reflectância no visível e a diminuição no infravermelho, provocados pela atmosfera, faz com que as superfícies vegetais pareçam estarem menos ativas do que elas estão na realidade. No caso da água, como a reflectância é baixa, o espalhamento atmosférico é predominante em todas bandas. Desse modo, o lago aparentaria estar com concentrações maiores de partículas minerais, fitoplânctons e matéria orgânica do que ele realmente tem. A tabela 5.13 contém o valor da razão entre as reflectâncias aparente e real das superfícies de mata e cana. As diferenças real ΔDif_{raz} e relativa ΔRel_{raz} são calculadas através das equações (5.11) e (5.12):

$$\Delta Dif_{raz} = \text{razão real} - \text{razão aparente} \quad (5.11)$$

e

$$\Delta Rel_{raz} = \frac{\text{razão real} - \text{razão aparente}}{\text{razão aparente}} \cdot 100 \quad (5.12)$$

Tabela 5.13 - Razão entre as reflectâncias das superfícies-testes vegetais em 21/07/92

Banda	$\rho(\text{mata}) / \rho(\text{cana})$		ΔDif_{raz}	ΔRel_{raz}
	aparente	real		
TM2	0,833	0,614	-0,219	-26,29
TM3	0,818	0,629	-0,189	-23,11
TM4	0,759	0,727	-0,032	-4,22
TM5	0,824	0,810	-0,014	-1,70

Observa-se que a correção foi diferenciada para as duas superfícies vegetais principalmente nas bandas do visível (TM2 e TM3) que estão diretamente relacionadas com os pigmentos foliares e, conseqüentemente, com a atividade vegetal. Nesse caso, a correção permitiu distinguir melhor o estado vegetativo da mata e da cana, sendo de grande importância para os procedimentos de classificação automática das imagens.

5.2.4.4. Avaliação da correção

A radiação solar global I_{globm} registrada às 12:27GMT (horário de passagem do satélite) é apresentada na tabela 5.14, de acordo com os dados experimentais apresentados no capítulo 3:

Tabela 5.14 - Radiação global experimental em 21/07/92

Banda	I_{globm} [$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$]
TM2	642,34
TM3	580,93
TM4	403,23

A tabela 5.15 apresenta a planilha de cálculo da reflectância-limite (ρ_{lim}) para a área-teste de água:

Tabela 5.15 - Cálculo da reflectância-limite da água em 21/07/92

Banda	L_{sat}	L	I_{globm}	ρ_{lim} [%]
	[$W.m^{-2}.\mu m^{-1}.sr^{-1}$]		[$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$]	
TM2	27,47	12,82	642,34	9,85
TM3	20,83	11,67	580,93	8,79
TM4	8,60	3,15	403,23	4,58

Os valores de L_{sat} são maiores que os de L e, portanto, $L_1=L_{sat}$ e $L_2=L$ na metodologia de avaliação da correção descrita no item 3.2.10. Desse modo, a imagem corrigida é melhor que a original se $\rho \leq \rho_{lim}$. Comparando-se os valores calculados de ρ_{lim} com os propostos por Bowker (1985) e pelo Modelo 5S, observa-se que eles são superiores até mesmo para o caso de reservatórios com água turva, conforme a tabela 5.16:

Tabela 5.16 - Reflectância da água em 21/07/92

Banda	$\rho_{teórico}$ [%]			ρ_{sat} [%]	ρ [%]	ρ_{lim} [%]
	água limpa	água turva	água de lago			
TM2	5,51	8,01	8,10	9,78	5,77	9,85
TM3	3,83	7,21	6,50	8,67	5,81	8,79
TM4	0,00	3,69	2,50	5,20	2,13	4,58

Desse modo, a imagem corrigida é melhor que a original, mesmo supondo que a água da área-teste seja turva. Isto dá uma boa margem de segurança para a avaliação da correção, pois a água do lago está mais para limpa que para turva. Um outro resultado favorável à correção é a diminuição da reflectância da água na banda TM5 para um valor próximo de zero, que é o esperado neste caso.

Um outro aspecto a ser considerado na avaliação dos resultados é a variação lógica do nível de cinza médio (brilho) e do desvio padrão (contraste) proporcionado pela correção radiométrica. O aumento do contraste é proporcional à importância da espessura ótica dos aerossóis em cada banda. A variação do brilho médio das imagens está diretamente relacionada com a variação da transmitância gasosa e da reflectância atmosférica. A variação do brilho e a diminuição do contraste são efeitos clássicos e bem conhecidos da atmosfera nas imagens de satélite (Slater, 1980; Kaufman, 1985). Observa-se também um aumento na amplitude dos níveis de cinza das imagens corrigidas em comparação com as originais. A melhoria da qualidade visual da imagem corrigida, em comparação com a original, está diretamente relacionada com esta variação do brilho, do contraste e da amplitude dos níveis de cinza.

Desse modo, de acordo com todas essas análises, conclui-se que a imagem corrigida está mais próxima da realidade terrestre do que a imagem original.

5.3. Correção da imagem de 06/08/92

5.3.1. Modelo Atmosférico dos Componentes Gasosos

Os fatores de correção utilizados para definir os perfis de pressão, temperatura, vapor d'água e ozônio a partir da atmosfera tropical são apresentados na tabela 5.17:

Tabela 5.17 - Fatores de correção do perfil atmosférico em 06/08/92

Pressão	Temp.	Água	Ozônio
1,0153	0,9905	0,7487	1,2551

5.3.2. Concentração dos Aerossóis

O valor da espessura ótica dos aerossóis utilizado nos cálculos, de acordo com os dados apresentados no capítulo 3, é de 0,283. A figura 5.2 descreve a variabilidade espectral da espessura ótica da atmosfera e dos aerossóis durante o período de medidas determinadas a partir dos dados experimentais de radiação solar direta. As curvas apresentadas são do tipo alométrica linear e foram determinadas pelo programa AJUSTE (Zullo et al., 1987) a partir dos dados originais da espessura ótica.

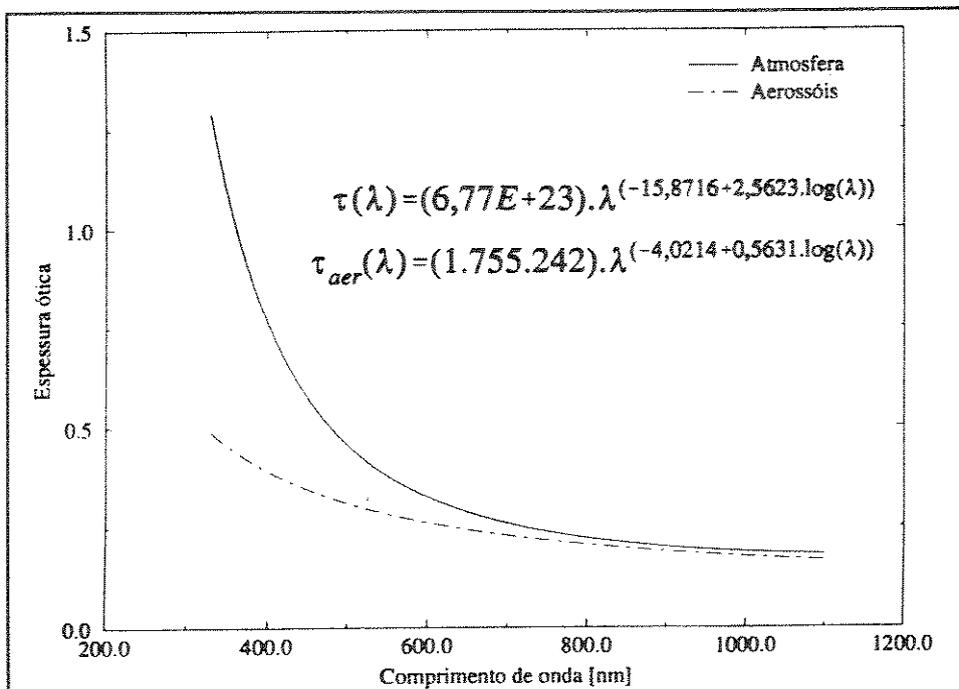


Figura 5.2 - Variabilidade espectral da espessura ótica em 06/08/92

A tabela 5.18 apresenta os valores médios da espessura ótica da atmosfera τ e dos aerossóis τ_{aer} para 550nm e para as bandas TM2, TM3 e TM4 calculadas a partir dos dados experimentais originais e ajustados. De acordo com as diferenças real e relativa entre eles, calculadas pelas equações (5.1) e (5.2), observa-se que o ajuste produziu valores muito próximos aos experimentais, principalmente para os comprimentos de onda menores.

Tabela 5.18 - Espessura ótica experimental e ajustada em 06/08/92

Banda	τ				τ_{aer}			
	Exp.	Ajuste	ΔDif	ΔRel	Exp.	Ajuste	ΔDif	ΔRel
550nm	0,377	0,376	-0,001	-0,34	0,283	0,284	0,001	0,21
TM2	0,358	0,355	-0,003	-0,59	0,273	0,275	0,002	0,88
TM3	0,296	0,278	-0,018	-5,31	0,250	0,241	-0,009	-3,40
TM4	0,229	0,213	-0,016	-7,24	0,212	0,200	-0,012	-5,34

5.3.3. Parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S

A tabela 5.19 contém o valor dos parâmetros atmosféricos utilizados no processo de correção das imagens, que foram calculados no SCORADIS pelo Modelo 5S:

Tabela 5.19 - Parâmetros atmosféricos em 06/08/92 calculados pelo Modelo 5S (Parte I)

Parâmetro	Banda			
	TM2	TM3	TM4	TM5
$T(\theta_v)$	0,810	0,851	0,890	0,949
$T(\theta_s)$	0,907	0,930	0,949	0,976
$t_{dir}(\theta_v)$	0,700	0,760	0,830	0,932
$t_{dif}(\theta_v)$	0,206	0,170	0,119	0,044
$t_{dif}^{gas}(\theta_v)$	0,040	0,022	0,008	0,001
$t_{dif}^{aer}(\theta_v)$	0,178	0,152	0,112	0,043
t_g	0,899	0,921	0,911	0,890
t_{gd}	0,933	0,946	0,930	0,911

Tabela 5.19 - Parâmetros atmosféricos em 06/08/92 calculados pelo Modelo 5S (Parte II)

Parâmetro	Banda			
	TM2	TM3	TM4	TM5
t_{ga}	0,962	0,968	0,951	0,935
ρ_{atm}	0,058	0,039	0,021	0,005
s	0,135	0,101	0,063	0,018
$E_0[W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$	1836,6	1549,3	1048,5	217,7
τ	0,357	0,275	0,188	0,071
τ_{gas}	0,085	0,046	0,018	0,001
τ_{aer}	0,272	0,229	0,170	0,070

Os dados comuns a todas as bandas temáticas consideradas são apresentados a seguir:

Tabela 5.20 - Dados comuns a todas bandas temáticas em 06/08/92

Parâmetro	Valor
Ângulo zenital solar (θ_s)	57,23°
Ângulo azimutal solar	49,14°
Ângulo zenital do satélite (θ_v)	0,00°
Ângulo azimutal do satélite	0,00°
Massa ótica de ar às 12:27GMT (m_{sol})	1,7368
Fator de distância terra-sol (D_s)	0,9719

A tabela 5.21 contém os valores da espessura ótica da atmosfera e dos aerossóis calculados pelo 5S e através do ajuste feito com os dados experimentais. Observa-se, através das diferenças real ΔDif e relativa ΔRel calculadas pelas equações (5.1) e (5.2), que existe novamente uma coincidência maior nos comprimentos de onda menores.

Tabela 5.21 - Espessura ótica ajustada e simulada em 06/08/92

Banda	τ				τ_{aer}			
	Ajuste	5S	ΔDif	ΔRel	Ajuste	5S	ΔDif	ΔRel
TM2	0,355	0,357	0,002	0,48	0,275	0,272	-0,003	-1,20
TM3	0,280	0,275	-0,005	-1,75	0,241	0,229	-0,012	-5,10
TM4	0,213	0,188	-0,025	-11,65	0,200	0,170	-0,030	-15,13

5.3.4. Processamento das imagens

5.3.4.1. Imagens de radiância

Os parâmetros estatísticos das imagens de radiância original $NC(L_{sat})$ e corrigida $NC(L)$ são apresentados na tabela 5.22:

Tabela 5.22 - Parâmetros estatísticos das imagens de radiância em 06/08/92

Banda	Imagem	Nível de cinza					
		Médio	DP	CV	Mín.	Máx.	Ampl.
TM2	$NC(L_{sat})$	29,57	3,91	13,23	19	155	136
	$NC(L)$	21,00	5,52	26,29	6	197	191
TM3	$NC(L_{sat})$	37,82	7,94	20,99	20	235	215
	$NC(L)$	32,24	10,35	32,11	9	255	246
TM4	$NC(L_{sat})$	42,24	8,04	19,04	11	209	198
	$NC(L)$	42,39	10,02	23,64	3	250	247
TM5	$NC(L_{sat})$	66,40	17,12	25,78	3	255	252
	$NC(L)$	71,22	19,59	27,50	0	255	255

As diferenças real e relativa entre os valores dos parâmetros das imagens de radiância original $NC(L_{sat})$ e corrigida $NC(L)$ são apresentados na tabela 5.23. Elas foram calculadas através das equações (5.3) e (5.4).

Tabela 5.23 - Diferenças entre os parâmetros das imagens de radiância em 06/08/92

Banda	Nível de cinza							
	Médio		DP		CV		Ampl.	
	ΔDif_L	ΔRel_L						
TM2	-8,57	-28,98	1,61	41,18	13,06	98,72	55	40,44
TM3	-5,58	-14,75	2,41	30,35	11,12	52,98	31	14,42
TM4	0,15	0,36	1,98	24,63	4,60	24,16	49	24,75
TM5	4,82	7,26	2,47	14,43	1,72	6,67	3	1,19

5.3.4.2. Imagens de reflectância

A tabela 5.24 apresenta os parâmetros estatísticos referentes às imagens de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$:

Tabela 5.24 - Parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 06/08/92

Banda	Imagem	Nível de cinza					
		Médio	DP	CV	Min.	Máx.	Ampl.
TM2	$NC(\rho_{sat})$	33,08	4,72	14,27	20	185	165
	$NC(\rho)$	29,51	8,38	28,40	7	255	248
TM3	$NC(\rho_{sat})$	37,79	8,43	22,31	19	248	229
	$NC(\rho)$	38,54	13,12	34,04	9	255	246
TM4	$NC(\rho_{sat})$	52,98	10,69	20,19	11	255	244
	$NC(\rho)$	61,44	15,05	24,50	2	255	253
TM5	$NC(\rho_{sat})$	59,05	15,97	27,05	0	235	235
	$NC(\rho)$	70,01	20,01	28,58	0	255	255

As diferenças real e relativa entre os valores dos parâmetros das imagens de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$ são apresentados na tabela 5.25. Eles foram calculados através das equações (5.5) e (5.6).

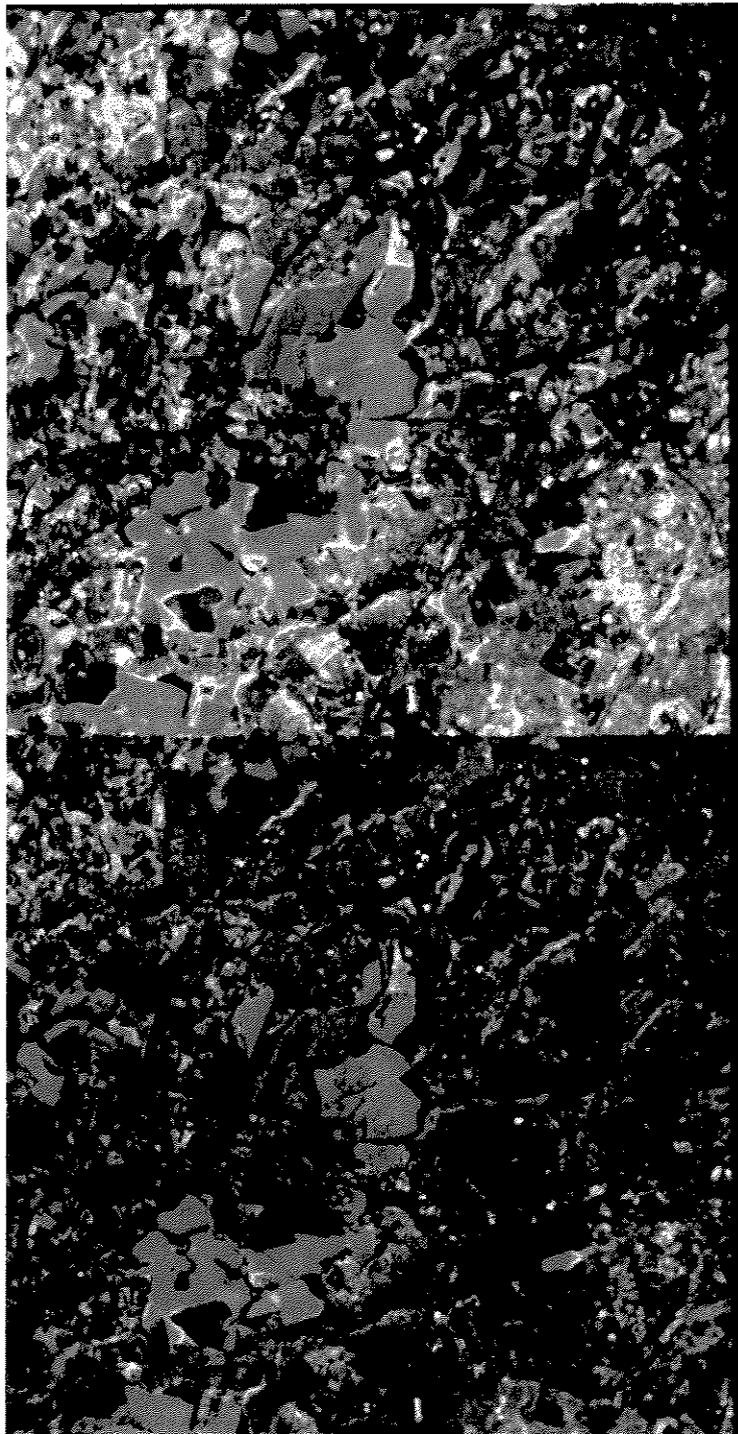
Tabela 5.25 - Diferenças entre os parâmetros estatísticos das imagens de reflectância em 06/08/92

Banda	Nível de cinza							
	Médio		DP		CV		Ampl.	
	ΔDif_{ρ}	ΔRel_{ρ}						
TM2	-3,57	-10,88	3,66	78,72	14,13	99,02	83	50,30
TM3	0,75	2,38	4,69	55,95	11,73	52,58	17	7,42
TM4	8,46	16,42	4,36	41,12	4,31	21,35	9	3,69
TM5	10,96	19,15	4,04	25,63	1,53	5,66	20	8,50

Os resultados obtidos são idênticos aos do dia 21/07/92 e, portanto, os comentários feitos após a tabela 5.10 são válidos também neste caso.

A figura 5.3 apresenta uma foto da combinação colorida entre as bandas TM5 (canal vermelho), TM4 (canal verde) e TM3 (canal azul) das imagens de reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$ do recorte centrado na Mata "Santa Genebra":

Figura 5.3 - Imagem de reflectância aparente (1) e reflectância real (2) em 06/08/92



(2)

(1)

5.3.4.3. Superfícies-testes

Os valores médios da radiância das superfícies-testes de mata, água, cana e solo são apresentados na tabela 5.26. As diferenças real ΔDif_L e relativa ΔRel_L são definidas pelas equações (5.9) e (5.10).

Tabela 5.26 - Radiância das superfícies-testes em 06/08/92

Superfície	Banda	L_{sat}	L	ΔDif_L	ΔRel_L
		[W.m ⁻² .μm ⁻¹ .sr ⁻¹]			
Mata	TM2	29,70	13,48	-16,22	-54,62
	TM3	22,36	11,46	-10,90	-48,75
	TM4	38,75	39,30	0,55	1,41
	TM5	4,87	5,01	0,14	2,94
Cana	TM2	36,19	22,50	-13,68	-37,81
	TM3	27,56	18,09	-9,47	-34,37
	TM4	52,50	56,40	3,91	7,44
	TM5	6,37	6,68	0,31	4,80
Água	TM2	31,22	15,22	-16,00	-51,24
	TM3	23,34	12,97	-10,37	-44,42
	TM4	9,50	2,72	-6,79	-71,40
	TM5	0,51	0,00	-0,50	-99,37
Solo	TM2	37,26	24,03	-13,24	-35,53
	TM3	41,60	36,54	-5,06	-12,17
	TM4	27,41	25,48	-1,93	-7,04
	TM5	7,09	7,57	0,48	6,83

Os valores médios da reflectância das superfícies-testes de mata, água, cana e solo são descritos na tabela 5.27. As diferenças real ΔDif_p e relativa ΔRel_p são formuladas pelas equações (5.9) e (5.10).

Tabela 5.27 - Reflectância das superfícies-testes em 06//08/92

Superfície	Banda	$\rho_{sat} [\%]$	$\rho [\%]$	ΔDif_{ρ}	ΔRel_{ρ}
Mata	TM2	9,68	5,88	-3,80	-39,26
	TM3	8,59	5,43	-3,16	-36,79
	TM4	22,03	25,80	3,77	17,11
	TM5	13,36	15,22	1,86	13,92
Cana	TM2	11,83	9,58	-2,25	-19,02
	TM3	10,49	8,50	-1,99	-18,97
	TM4	29,78	36,68	6,90	23,17
	TM5	17,57	20,26	2,69	15,31
Água	TM2	10,13	6,79	-3,34	-32,97
	TM3	8,95	6,00	-2,95	-32,96
	TM4	5,38	1,75	-3,63	-67,47
	TM5	1,49	0,19	-1,30	-87,25
Solo	TM2	12,15	10,31	-1,84	-15,14
	TM3	15,92	16,98	1,06	6,66
	TM4	15,56	16,82	1,26	8,10
	TM5	19,41	22,92	3,51	18,08

Esses resultados são idênticos aos obtidos com as imagens de 21/07 e, portanto, os comentários feitos após a tabela 5.12 são válidos. A tabela 5.28 contém a razão entre as reflectâncias das superfícies vegetais de mata e cana. As diferenças real ΔDif_{raz} e relativa ΔRel_{raz} são calculadas pelas equações (5.11) e (5.12).

Tabela 5.28 - Razão entre as reflectâncias das superfícies-testes vegetais em 06/08/92

Banda	$\rho(\text{mata})/\rho(\text{cana})$		ΔDif_{raz}	ΔRel_{raz}
	aparente	real		
TM2	0,818	0,614	-0,204	-24,94
TM3	0,819	0,639	-0,180	-21,98
TM4	0,740	0,703	-0,037	-5,00
TM5	0,760	0,751	-0,009	-1,18

Novamente, tem-se que a correção melhorou a diferenciação entre o estado das duas superfícies vegetais consideradas, sendo de grande importância para a classificação das imagens, conforme se observa no capítulo 6.

5.3.4.4. Avaliação da correção

Os valores da radiação solar global registrados no horário de passagem do satélite sobre Campinas (12:27GMT) são apresentados na tabela 5.29:

Tabela 5.29 - Radiação global experimental em 06/08/92

Banda	$I_{globm} [W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$
TM2	660,41
TM3	598,95
TM4	416,64

A tabela 5.30 apresenta a planilha de cálculo da reflectância-limite (ρ_{lim}) para a área-teste de água:

Tabela 5.30 - Cálculo da reflectância-limite da água em 06/08/92

Banda	L_{sat}	L	I_{globm}	ρ_{lim}
	$[W.m^{-2}.\mu m^{-1}.sr^{-1}]$		$[W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$	$[\%]$
TM2	31,22	15,22	660,41	11,05
TM3	23,34	12,97	598,95	9,52
TM4	9,50	2,72	416,64	4,61

Como os valores de L_{sat} são maiores que os de L tem-se que $L_1=L_{sat}$ e $L_2=L$ na metodologia de avaliação da correção descrita no item 3.2.10. Logo, a imagem corrigida é melhor que a original se $\rho \leq \rho_{lim}$. Comparando-se os valores calculados de ρ_{lim} com os propostos por Bowker (1985) e pelo Modelo 5S observa-se que eles são superiores até mesmo para o caso de reservatórios com água turva, conforme a tabela 5.31:

Tabela 5.31 - Reflectância da água em 06/08/92

Banda	$\rho_{teórico}$ [%]			ρ_{sat} [%]	ρ [%]	ρ_{lim} [%]
	água limpa	água turva	água de lago			
TM2	5,51	8,01	8,10	10,13	6,79	11,05
TM3	3,83	7,21	6,50	8,95	6,00	9,52
TM4	0,00	3,69	2,50	5,38	1,75	4,61

Desse modo, mesmo supondo que a água da área-teste escolhida seja turva, a imagem corrigida ainda é melhor que a original. Isto representa um caso extremo pois a superfície escolhida corresponde a um lago com água mais para limpa do que para turva. Ainda com relação à superfície de água tem-se novamente que a correção diminuiu o valor da reflectância na banda TM5, deixando-a muito próxima de zero que é o valor esperado neste caso. Nota-se também que a reflectância corrigida ρ está mais próxima dos valores-padrões para água de lago do que a reflectância aparente ρ_{sat} .

A diferença do brilho (média), contraste (desvio padrão) e amplitude entre as imagens originais e corrigidas foi idêntica ao ocorrido na imagem de 21/07/92. O mesmo se observa com relação às reflectâncias das superfícies-teste vegetais e aquática mostrando que os resultados também foram coerentes para os diferentes tipos de superfícies consideradas.

Logo, de acordo com todas essas análises, conclui-se que a imagem corrigida está mais próxima da realidade terrestre do que a imagem original.

As diferenças absoluta e relativa entre os valores da radiância e reflectância das áreas-teste, obtidas a partir das imagens original e corrigida, indicam que as superfícies de água são as mais adequadas para a análise dos resultados obtidos com a correção atmosférica de acordo

com a metodologia utilizada descrita no item 3.2.10. A seguir vem as superfícies vegetais, sendo que o solo considerado não é um bom alvo-teste neste caso.

5.4. Comparação entre os resultados de 21/07 e 06/08/92

A tabela 5.32 contém as diferenças real e relativa entre os valores de ρ_{sat} e ρ calculados a partir das imagens de 21/07 e 06/08/92 para as superfícies-testes de mata, água e cana. As equações (5.13) e (5.14) foram utilizadas nestes cálculos:

$$\Delta Dif = \rho(06/08) - \rho(21/07) \tag{5.13}$$

e

$$\Delta Rel = \frac{\rho(06/08) - \rho(21/07)}{\rho(21/07)} \cdot 100 \tag{5.14}$$

Tabela 5.32 - Comparação entre as reflectâncias das superfícies-testes

Superfície	Banda	ρ_{sat}				ρ			
		21/07	06/08	ΔDif	ΔRel	21/07	06/08	ΔDif	ΔRel
Mata	TM2	8,81	9,68	0,87	9,88	4,63	5,88	1,25	27,00
	TM3	7,53	8,59	1,06	14,08	4,21	5,43	1,22	28,98
	TM4	21,93	22,03	0,10	0,46	25,48	25,80	0,32	1,26
	TM5	12,47	13,36	0,89	7,14	14,03	15,22	1,19	8,48
Cana	TM2	10,57	11,83	1,26	11,92	7,54	9,58	2,04	27,06
	TM3	9,21	10,49	1,28	13,90	6,69	8,50	1,81	27,00
	TM4	28,91	29,78	0,78	3,01	35,04	36,68	1,64	4,68
	TM5	15,13	17,57	2,44	16,13	17,32	20,26	2,94	16,97
Água	TM2	9,78	10,13	0,35	3,58	5,77	6,79	1,02	17,68
	TM3	8,67	8,95	0,28	3,23	5,81	6,00	0,19	3,27
	TM4	5,20	5,38	0,18	3,46	2,13	1,75	-0,38	-17,8
	TM5	1,17	1,49	0,32	27,35	0,22	0,19	-0,03	-13,6

Observa-se que as diferenças real e relativa entre as reflectâncias reais das superfícies vegetais foram sempre superiores às da reflectância aparente. O efeito da atmosfera, neste caso, foi de diminuir as diferenças entre duas observações consecutivas correspondentes às mesmas superfícies. No caso da superfície de água observa-se uma sensibilidade diferente conforme a banda temática considerada. O fato das diferenças terem sido menores na banda TM5 para as imagens corrigidas é decorrente dos baixos valores da reflectância real neste caso quando chegaram muito próximo do desejado que é o valor zero. O aumento da reflectância das superfícies vegetais de uma data para outra é decorrente da diminuição das umidades do solo e da vegetação devido a ausência de chuvas neste período. A comparação entre os resultados multitemporais é melhor compreendida utilizando-se o índice de vegetação apresentado no capítulo 6.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÕES

O cálculo do índice de vegetação e a classificação automática de padrões são dois processamentos básicos feitos com as imagens de satélite que têm grande importância em aplicações de real interesse econômico. A influência da atmosfera nestes dois tratamentos é apresentada neste capítulo.

6.1. Índice de vegetação

O crescente interesse pela utilização do sensoriamento remoto na agricultura é justificado pelas vantagens que esta técnica proporciona à gestão dos recursos naturais, tais como:

- a) Disponibilidade de dados multiespectrais;
- b) Possibilidade de detecção rápida de mudanças das condições vegetais e terrestres;
- c) Realização de coberturas repetidas sobre uma mesma região;
- d) Facilidade de registro permanente das informações obtidas;
- e) Capacidade de integração de pesquisas existentes em sistemas de monitoramento.

Apesar de todos estes aspectos favoráveis, a aplicação prática do sensoriamento remoto na agricultura ainda é limitada por causa da natureza dinâmica e das propriedades inerentes dos materiais biológicos e vegetais, que a tornam bastante complexa. A reflectância espectral de um dossel vegetal é o resultado de interações complexas entre a radiação eletromagnética e a vegetação, dependendo igualmente de fatores externos, dificilmente controláveis, como das características do próprio dossel (Guyot et al., 1988).

O desenvolvimento do sensoriamento remoto agrícola tem se baseado na procura de relações funcionais entre as informações espectrais fornecidas pelos dados dos satélites, e os parâmetros biológicos representativos do estado real dos dosséis vegetais. Analisando-se os dados fornecidos pelas diferentes bandas espectrais dos satélites observou-se que 90% das informações sobre uma cobertura vegetal estão contidas nos canais vermelho ($0,65\mu\text{m}$ - $0,70\mu\text{m}$) e infravermelho próximo ($0,70\mu\text{m}$ - $1,3\mu\text{m}$), onde o contraste entre o solo e a vegetação é maior

(Guyot et al., 1988). Por esta razão, vários pesquisadores têm proposto, ao longo dos anos, diferentes combinações entre os dados de reflectância nos canais vermelho e infravermelho próximo, com o objetivo de minimizar os efeitos externos perturbadores das observações originais, e ressaltar as informações que realmente interessam. A combinação das bandas espectrais dos satélites é conhecida como índice de vegetação, havendo pelo menos cinquenta formulações diferentes na literatura (Baret, 1986). O aumento do número de canais, no cálculo do índice de vegetação, não produz informações suplementares substanciais sobre a vegetação, além das fornecidas pela combinação simples dos canais vermelho e infravermelho próximo.

Os índices de vegetação têm apresentado melhor correlação com vários parâmetros relacionados ao estado da vegetação, que as bandas espectrais individuais (Qi et al., 1993). Dentre estes parâmetros, destaca-se o índice de área foliar, a biomassa, a porcentagem de cobertura vegetal, a atividade fotossintética, a produtividade e a radiação fotossinteticamente absorvida. Embora os índices de vegetação possam ser utilizados para acompanhar a evolução das coberturas vegetais e estimar a biomassa e o rendimento final das culturas, eles ainda não são indicadores quantitativos muito confiáveis da produção vegetal. Por isso, eles têm sido utilizados mais frequentemente em sistemas de alerta de risco por apresentarem sensibilidade a diferentes fatores que afetam a vegetação, como o estresse hídrico, as deficiências minerais, e os ataques parasitários, principalmente em regiões de cobertura extensiva.

Vários autores já analisaram a influência dos diversos fatores externos (posição do sol e atmosfera) e internos (geometria do dossel e propriedades óticas das folhas e do solo) que influenciam o cálculo dos índices de vegetação, mostrando a importância de conhecê-los bem para estimar corretamente os parâmetros descritores do estado da vegetação. A importância da atmosfera neste assunto será mostrada aqui utilizando-se o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) que foi definido por Rouse et al. (1974) como sendo igual a:

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{Infravermelho}} - \rho_{\text{Vermelho}}}{\rho_{\text{Infravermelho}} + \rho_{\text{Vermelho}}} \quad (6.1)$$

A diferença normalizada tem se mostrado pouco sensível às propriedades óticas dos solos, bem sensível à vegetação emergente, um pobre discriminante de estresse, quando ele ocorre em altos valores de cobertura vegetal, e bem sensível à atmosfera (Jackson et al., 1983).

Os níveis de cinza $NC(NDVI)$ das imagens de diferença normalizada foram definidos como sendo iguais a:

$$NC(NDVI) = \frac{255 \cdot (NDVI + 0,5)}{1,5} \quad (6.2)$$

onde:

$$NDVI = \frac{NC(P_{TM4}) - NC(P_{TM3})}{NC(P_{TM4}) + NC(P_{TM3})} \quad (6.3)$$

com: P_{TM3} e P_{TM4} sendo a radiância ou a reflectância nas bandas temáticas TM3 (vermelho) e TM4 (infravermelho), respectivamente.

De acordo com a equação (6.2) tem-se que:

- a) $NC(NDVI) = 0$ quando $NDVI = -0,5$;
- b) $NC(NDVI) = 255$ para $NDVI = +1,0$.

Estes valores extremos do $NDVI$ foram escolhidos por serem os mais usuais de ocorrerem na prática, apesar dele poder assumir, teoricamente, valores entre -1,0 e +1,0. Esta redução no intervalo de abrangência do $NDVI$ permite obter imagens mais contrastantes, auxiliando, assim, na interpretação visual dos resultados obtidos.

6.1.1. Processamento da imagem de 21/07/92

A tabela 6.1 contém os parâmetros estatísticos das imagens de $NDVI$, que foram calculadas a partir das imagens de radiância original $NC(L_{sat})$, radiância corrigida $NC(L)$, reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$ descritas no capítulo 5.

Tabela 6.1 - Parâmetros estatísticos das imagens de NDVI de 21/07/92

Imagem	Nível de Cinza			
	Médio	DP	CV	Ampl.
$NC(L_{sat})$	102,52	24,98	24,36	200
$NC(L)$	120,20	34,62	28,80	220
$NC(\rho_{sat})$	121,53	25,86	21,28	212
$NC(\rho)$	135,59	35,60	26,26	235

De acordo com estes valores observa-se que a presença da atmosfera faz com que o índice de vegetação NDVI seja, na média, subestimado e que haja uma diferenciação menor entre os valores do NDVI das diversas superfícies existentes na imagem. A seguir são apresentados na tabela 6.2 os parâmetros estatísticos da diferença real, calculada ponto a ponto, entre os pares de imagens de NDVI.

Tabela 6.2 - Diferença real entre imagens de NDVI de 21/07/92

Imagem	Nível de Cinza			
	Médio	DP	CV	Ampl.
$NC(L) - NC(L_{sat})$	17,68	10,43	59,02	101
$NC(\rho_{sat}) - NC(L_{sat})$	19,01	1,49	7,86	23
$NC(\rho) - NC(L_{sat})$	33,07	11,69	33,35	152
$NC(\rho) - NC(L)$	15,39	2,49	16,17	77
$NC(\rho) - NC(\rho_{sat})$	14,06	10,73	76,32	140

É interessante observar como os tratamentos realizados nas imagens se refletem diretamente na diferença entre os valores do NDVI. A menor variabilidade entre as imagens de radiância original L_{sat} e reflectância aparente ρ_{sat} justifica-se pelo fato que a transformação de uma imagem para outra corresponde, basicamente, a uma mudança de unidades. Não existe um tratamento diferenciado pixel a pixel como ocorre no cálculo das imagens de radiância real e reflectância real. Os maiores valores do coeficiente de variação estão entre as imagens com maior diferença de tratamento entre elas, como $NC(L_{sat})$ e $NC(L)$, $NC(\rho_{sat})$ e $NC(L)$, $NC(\rho_{sat})$ e $NC(\rho)$.

A tabela 6.3 contém os valores do índice de vegetação NDVI para as superfícies-testes de mata, água e cana obtidos a partir das imagens de 21/07/92.

Tabela 6.3 - Índice de vegetação NDVI das superfícies-testes em 21/07/92

Superfície	Índice de Vegetação NDVI			
	$NC(L_{sat})$	$NC(L)$	$NC(\rho_{sat})$	$NC(\rho)$
Mata	0,361	0,607	0,484	0,713
Cana	0,405	0,589	0,513	0,677
Água	-0,300	-0,395	-0,257	-0,427

Estes resultados servem tanto para ilustrar a influência da atmosfera no cálculo do NDVI, como para auxiliar na demonstração que as imagens corrigidas são mais representativas do estado real da superfície terrestre que as imagens não-corrigidas. A diminuição do NDVI da água para valores próximos a -0,5 é o desejado para este tipo de superfície considerando-se os baixos valores de sua reflectância. O aumento do NDVI das áreas de mata e cana-de-açúcar é perfeitamente lógico, considerando-se que são vegetações densas e saudáveis (Jackson et al., 1983). Observa-se que o NDVI da mata é superior ao da cana quando calculado a partir de imagens corrigidas. Todos esses resultados estão plenamente de acordo com o que foi obtido por Gu et al. (1994) em experimentos realizados na região da Camargue (sul da França). Isto é muito importante para assegurar que os resultados obtidos nesta tese não se referem a um caso particular.

A tabela 6.4 apresenta a variação percentual do NDVI obtido a partir de uma imagem menos corrigida, em relação ao calculado através de uma outra imagem mais tratada que a primeira, para cada uma das áreas-teste consideradas.

Tabela 6.4 - Variação percentual do NDVI das superfícies-testes em 21/07/92

Superfície	Variação percentual			
	$L_{sat} \rightarrow L$	$L_{sat} \rightarrow \rho$	$\rho_{sat} \rightarrow \rho$	$L \rightarrow \rho$
Mata	68,14	97,51	47,31	17,46
Cana	45,43	67,16	31,97	14,94
Água	-31,67	-42,33	-66,15	-8,10

As menores diferenças do NDVI das superfícies vegetais foram entre as imagens de radiância (L) e reflectância real (ρ), enquanto que as maiores foram entre as imagens de radiância aparente (L_{sat}) e reflectância real (ρ). De modo geral, a variação percentual entre os valores do NDVI foi sempre elevada. Isto é muito importante considerando-se que os modelos de estimativa dos parâmetros de interesse agrônômico, a partir do NDVI, são geralmente descritos por funções exponenciais conforme ilustra a figura 6.1 apresentada por Tucker (1979).

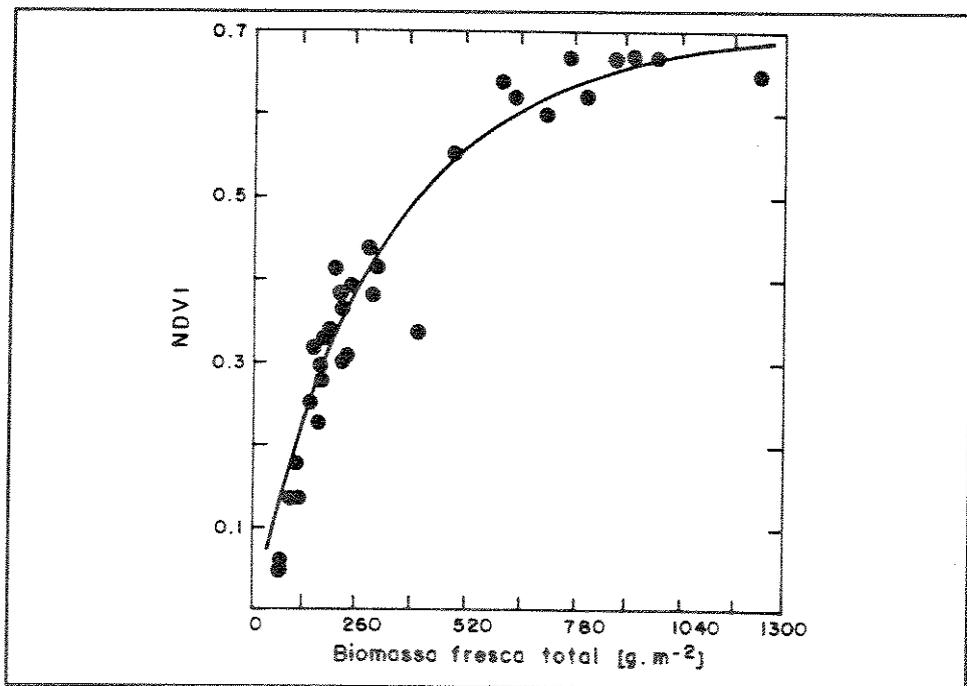


Figura 6.1 - Relação entre índice de vegetação e biomassa

Observa-se, a partir desta figura, que uma variação da ordem de 0,2 no valor do NDVI é importante no que se refere à estimativa da biomassa. Como exemplo tem-se que para $NDVI=0,4$ a biomassa estimada é igual a $261,09g.m^{-2}$, enquanto que para $NDVI=0,6$ a biomassa é de $627,30g.m^{-2}$. Logo, a diferença de estimativa da biomassa, nesse caso, é da ordem de 140%. Observa-se que os valores do NDVI utilizados nesse cálculo (0,4 e 0,6) foram escolhidos de acordo com os valores do NDVI das superfícies vegetais apresentados na tabela 6.3. Isto é válido para mostrar a importância da utilização de imagens corrigidas nas várias aplicações de real interesse prático, como a estimativa da biomassa, por exemplo, que foi considerada nesse caso.

6.1.2. Processamento da imagem de 06/08/92

A tabela 6.5 contém os parâmetros estatísticos das imagens de NDVI, que foram calculadas a partir das imagens de radiância original $NC(L_{sat})$, radiância corrigida $NC(L)$, reflectância aparente $NC(\rho_{sat})$ e reflectância real $NC(\rho)$ apresentadas no capítulo 5.

Tabela 6.5 - Parâmetros estatísticos das imagens de NDVI de 06/08/92

Imagem	Nível de Cinza					
	Médio	DP	CV	Min.	Máx.	Ampl.
$NC(L_{sat})$	93,87	22,57	24,05	8	169	161
$NC(L)$	108,23	31,15	28,78	0	205	205
$NC(\rho_{sat})$	112,50	23,31	20,72	16	186	170
$NC(\rho)$	123,61	31,70	25,64	0	219	219

Estes resultados são equivalentes aos obtidos para 21/07/92 onde se observa que a presença da atmosfera faz com que o índice de vegetação NDVI seja, na média, subestimado e que haja uma diferenciação menor entre os valores do NDVI das diversas superfícies existentes na imagem. A tabela 6.6 contém os parâmetros estatísticos da diferença real, calculada ponto a ponto, entre os pares de imagens de NDVI.

Tabela 6.6 - Diferenças reais entre imagens de NDVI de 06/08/92

Imagem	Nível de Cinza			
	Médio	DP	CV	Ampl.
$NC(L) - NC(L_{sat})$	14,36	9,21	64,10	84
$NC(\rho_{sat}) - NC(L_{sat})$	18,63	1,28	6,85	18
$NC(\rho) - NC(L_{sat})$	29,74	9,92	33,36	105
$NC(\rho) - NC(L)$	15,38	1,84	11,98	44
$NC(\rho) - NC(\rho_{sat})$	11,11	9,23	83,12	96

Estes resultados confirmam o que foi obtido para a imagem de 21/07/92 onde se nota como a diferença entre os tratamentos realizados se reflete diretamente na distinção entre os valores do NDVI. A seguir são listados os valores do índice de vegetação NDVI para as

superfícies-teste de mata, água, cana e solo obtidos a partir das imagens de 06/08/92.

Tabela 6.7 - Índice de vegetação NDVI das superfícies-testes em 06/08/92

Superfície	Índice de Vegetação NDVI			
	$NC(L_{sat})$	$NC(L)$	$NC(\rho_{sat})$	$NC(\rho)$
Mata	0,317	0,553	0,434	0,648
Cana	0,363	0,539	0,476	0,621
Água	-0,306	-0,433	-0,251	-0,475
Solo	-0,117	-0,090	-0,014	-0,006

A diminuição do NDVI da água para valores próximos a -0,5, devido a utilização de imagens corrigidas, é o esperado para este tipo de superfície considerando-se a diminuição dos valores da reflectância da água devido à correção. O aumento do NDVI das áreas de mata e cana-de-açúcar é perfeitamente lógico, considerando-se que são vegetações densas e saudáveis. Novamente tem-se que o NDVI da mata é superior ao da cana quando calculado a partir de imagens corrigidas e inferior em caso contrário. A pequena variação real do NDVI do solo confirma o fato relatado por Jackson et al. (1983) que esse índice é pouco sensível às propriedades óticas do solo.

A tabela 6.8 apresenta a variação porcentual do NDVI obtido a partir de uma imagem menos corrigida, em relação ao calculado através de uma outra imagem mais tratada que a primeira, para cada uma das áreas-teste consideradas.

Tabela 6.8 - Variação porcentual do NDVI das superfícies-testes em 06/08/92

Superfície	Variação porcentual			
	$L_{sat} \rightarrow L$	$L_{sat} \rightarrow \rho$	$\rho_{sat} \rightarrow \rho$	$L \rightarrow \rho$
Mata	74,45	104,42	49,31	17,18
Cana	48,48	71,07	30,46	15,21
Água	-41,50	-55,23	-89,24	-9,70
Solo	23,08	94,87	57,14	92,81

Os resultados são idênticos aos obtidos em 21/07/92. As maiores diferenças relativas

para o NDVI das superfícies vegetais foram entre as imagens de radiância aparente (L_{sat}) e reflectância real (ρ). As menores diferenças foram entre as imagens de radiância real e reflectância real. De modo geral, a variação percentual entre os valores do NDVI foi sempre elevada. Os resultados apresentados nesse item podem ser encontrados também em Zullo et al. (1994b).

6.1.3. Comparação entre as imagens de 21/07/92 e 06/08/92

A tabela 6.9 apresenta os valores do NDVI calculados a partir dos dados de reflectância aparente (ρ_{sat}) e reflectância real (ρ) obtidos a partir das imagens de 21/07/92 e 06/08/92. As diferenças real ΔDif e relativa ΔRel são formuladas pelas equações (6.4) e (6.5):

$$\Delta Dif = NDVI(06/08) - NDVI(21/07) \tag{6.4}$$

e

$$\Delta Rel = \frac{NDVI(06/08) - NDVI(21/07)}{NDVI(21/07)} \cdot 100 \tag{6.5}$$

Tabela 6.9 - Comparação entre o índice de vegetação NDVI de 21/07/92 e 06/08/92

Sup.	NDVI(ρ_{sat})				NDVI(ρ)			
	21/07	06/08	ΔDif	ΔRel	21/07	06/08	ΔDif	ΔRel
Mata	0,484	0,434	-0,050	-10,33	0,713	0,648	-0,065	-9,12
Cana	0,513	0,476	-0,037	-7,21	0,677	0,621	-0,056	-8,27

O índice de vegetação NDVI das superfícies vegetais decresce de uma data para outra indicando uma diminuição da atividade vegetal ocasionada pela menor umidade e, no caso da cana, pelas próprias características da cultura. Esses resultados estão plenamente de acordo com as conclusões feitas no capítulo 5 a partir dos valores de reflectância. No caso da mata tem-se que o NDVI calculado a partir da imagem corrigida evolui relativamente menos que utilizando-se a imagem original. No caso da superfície de cana acontece o inverso. Esses comportamentos estão de acordo com o tipo de superfície considerada uma vez que a mata apresenta uma vegetação mais estável que a da cana.

6.2. Classificação das imagens

A classificação ou segmentação é definida, genericamente, como sendo um processo de análise de dados que tem o objetivo principal de obter uma representação esquemática simples dos dados originais considerados. Ela tem grande aplicação em vários campos da ciência, sendo comumente utilizada em complementação a outros métodos estatísticos de análise (Roux, 1985). No caso específico do sensoriamento remoto, a classificação das imagens de satélite é de grande importância para os modelos de previsão do rendimento das culturas agrícolas, uma vez que os tratos culturais são feitos geralmente na escala das parcelas.

A atmosfera é um dos fatores que afeta a precisão dos processos de classificação das imagens de satélite, e, conseqüentemente, altera os resultados finais dos processamentos realizados com as imagens segmentadas. Turner et al. (1975) e Potter (1975) mostraram que a precisão da classificação de campos de trigo, milho e soja, feita a partir de imagens do satélite Landsat-MSS, diminuía drasticamente com o aumento da turbidez atmosférica. Nesta mesma linha de avaliação do efeito da atmosfera na classificação de cenas rurais, destaca-se também o trabalho de Fraser et al. (1977).

A influência da atmosfera na classificação das imagens de satélite será apresentada utilizando-se um sistema computacional próprio desenvolvido a partir do método de classificação não-supervisionada proposto por Pao (1989), com base na Teoria de Ressonância Adaptativa (ART2) descrita por Carpenter et al. (1987).

Dada uma imagem com l linhas, c colunas e N bandas espectrais, tem-se que cada um dos seus pontos ou pixels pode ser representado por um vetor real N -dimensional pertencente ao espaço de atributos ou padrões. A análise da distribuição dos padrões no espaço correspondente pode ser útil no processo de segmentação de uma imagem em regiões homogêneas, desde que se considere que os padrões que são de alguma forma similares entre si situam-se geometricamente próximos uns dos outros. O algoritmo básico de classificação de padrões proposto por Pao (1989) é o seguinte:

Passo 0: Utilizar o primeiro padrão de entrada X_0 como centro da primeira classe;

Passo 1: Apresentar um novo padrão $X_i=(x_{i1}, \dots, x_{iN})$;

Passo 2: Calcular a distância y_j do padrão de entrada X_i ao centro $B_j (b_{j1}, \dots, b_{jN})$ das M classes existentes:

$$y_j = d(B_j, X_i) \quad \text{para } j=1, \dots, M \quad (6.6)$$

Passo 3: Determinar a classe mais próxima do padrão de entrada X_i , isto é, encontrar y_k tal que:

$$y_k = \min\{y_1, \dots, y_M\} \quad (6.7)$$

Observação: Este passo corresponde à inibição lateral que é uma característica necessária à auto-organização dos padrões de entrada.

Passo 4: Se:

$$y_k \leq \gamma$$

(o padrão de entrada X_i realmente pertence à classe mais próxima, de acordo com o parâmetro de vigilância γ),

então:

ir ao passo 5,

caso contrário:

ir ao passo 6;

Observação: O parâmetro de vigilância γ determina o tamanho e a quantidade de classes e é uma das características principais deste algoritmo.

Passo 5: Atualizar o centro da classe B_k mais próxima devido à inclusão do padrão de entrada X_i , fazendo:

$$b_{kl} = \frac{n_k b_{kl} + x_{il}}{n_k + 1} \quad \text{para } l=1, \dots, N \quad (6.8)$$

Atualizar também o número de elementos da classe B_k ,

$$n_k = n_k + 1 \quad (6.9)$$

Se:

ainda houver padrões de entrada disponíveis,

então:

ir ao passo 1,

caso contrário:

finalizar o processo.

Passo 6: Criar uma nova classe fazendo:

$$M \leftarrow M+1 \quad (6.10)$$

e

$$b_{Ml} \leftarrow x_{ll} \quad \text{para } l=1, \dots, N \quad (6.11)$$

Se:

ainda houver padrões de entrada disponíveis,

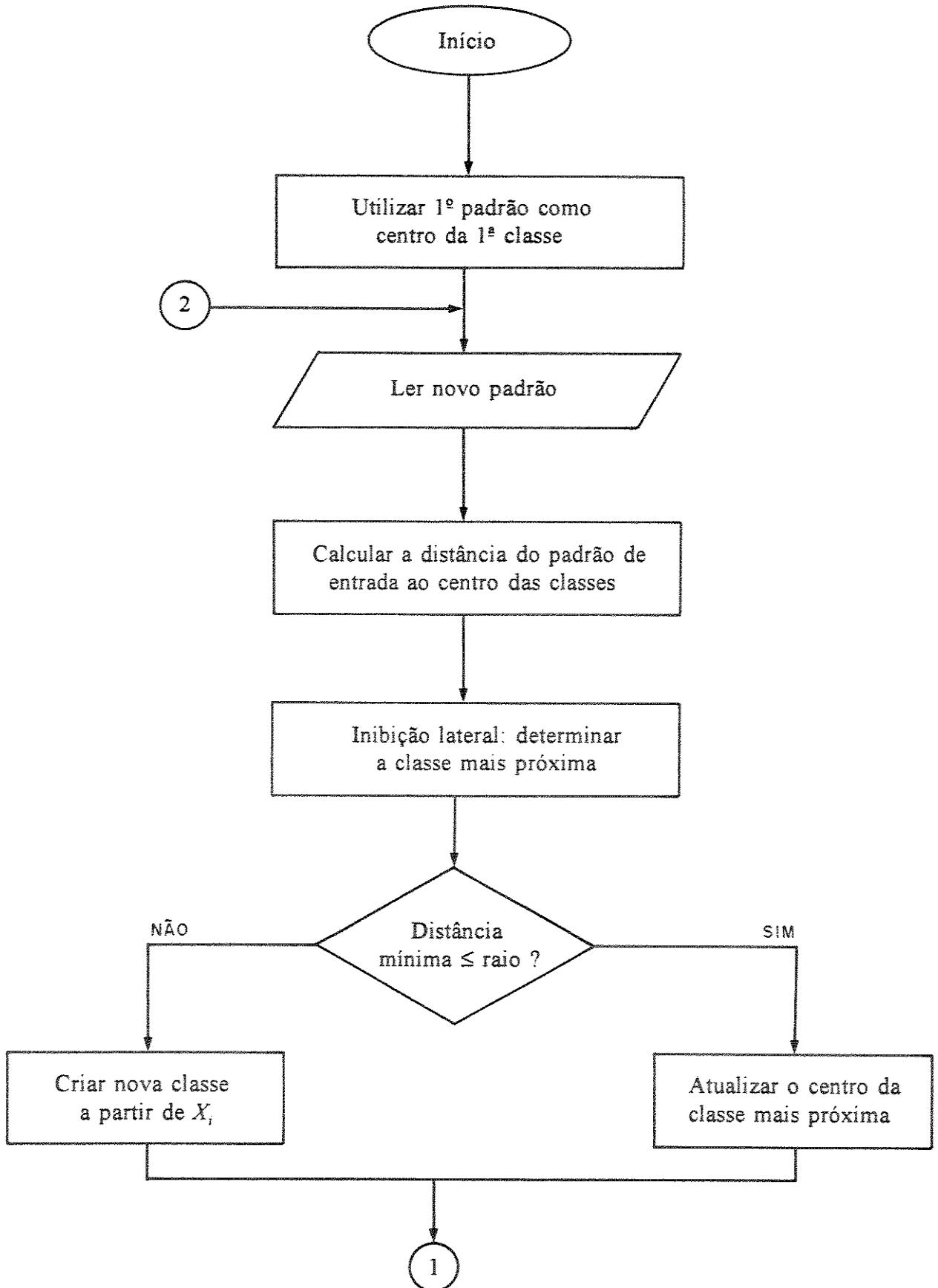
então:

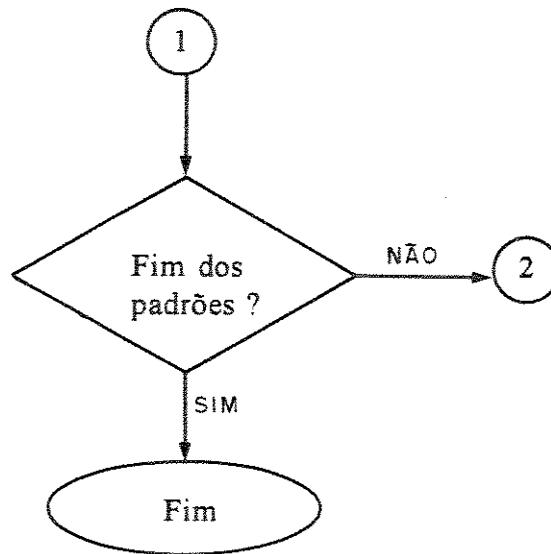
ir ao passo 1,

caso contrário:

finalizar o processo.

Esse algoritmo básico proposto por Pao (1989) pode ser ilustrado através do seguinte fluxograma:





O método básico proposto por Pao (1989) foi implementado com os seguintes recursos e controles adicionais para aumentar a eficiência e a qualidade dos resultados obtidos, considerando-se o interesse pela sua utilização na classificação de imagens de satélite:

a) Repetição iterativa do processo de classificação da imagem;

O objetivo principal desta técnica é permitir que um ponto pertencente a uma determinada classe, numa iteração, possa ser assinalado a outra classe mais próxima que tenha surgido após a sua leitura e classificação. Isto é muito importante para os pontos situados nas linhas iniciais da imagem, que são lidos numa etapa quando ainda existem poucas classes formadas. A possibilidade de existir uma classe mais próxima ao final do processamento decorre diretamente do fato que a classificação é feita em tempo real, à medida em que os padrões de entrada são lidos. A repetição do processamento, levando em consideração as classes criadas na iteração anterior, permite que os pontos se acomodem melhor entre as várias classes existentes. O centro dos classes criadas numa iteração são mantidos inalterados durante a iteração subsequente, sendo atualizados apenas no seu final. Um dos modos de encerramento do processo de classificação é quando o número de classes em duas iterações consecutivas for igual. Se não houve a criação de mais nenhuma classe, de uma iteração para outra, então os padrões devem estar devidamente colocados nas classes mais próximas e, portanto, o processo iterativo convergiu.

b) Aceitação de protótipos iniciais fixos;

O propósito desta técnica é permitir que se encontre os pontos da imagem relacionados a um determinado protótipo conhecido. Isto faz com que a classificação seja híbrida, com propriedades dos métodos supervisionados e dos não-supervisionados. Os protótipos fornecidos neste caso permanecem inalterados durante todo o processamento.

c) Aceitação de protótipos iniciais variáveis;

A diferença principal desta opção, em relação a anterior, é que os protótipos fornecidos podem ser alterados, servindo, desse modo, como sugestões iniciais de classes a serem formadas. Geralmente são padrões que não se conhece suficientemente bem a ponto de fixá-los durante todo o processamento. Os protótipos iniciais fixos e variáveis são de grande utilidade no processamento de imagens multitemporais.

d) Limitação do número de iterações a serem realizadas;

O controle do número máximo de iterações é outra forma utilizada para encerrar o processo iterativo de classificação, impedindo que haja um gasto excessivo de tempo desnecessário.

e) Limitação do número máximo de classes a serem criadas;

Este controle é útil para evitar que seja formado um grande número de classes muito pequenas sem relevância para o problema. Se o seu valor for nulo então só serão classificados os pontos pertencentes às classes cujos protótipos iniciais forem fornecidos, tornando-se assim, um método puro de classificação supervisionada.

f) Existência de quatro normas distintas para as medições de similaridade;

A possibilidade de utilização de normas distintas, de acordo com o interesse do trabalho, dá maior flexibilidade ao classificador. As normas disponíveis são as seguintes:

f.1) Norma do quarteirão:

$$d(P_1(x_1, \dots, x_n), P_2(y_1, \dots, y_n)) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (6.12)$$

f.2) Norma do tabuleiro de xadrez:

$$d(P_1(x_1, \dots, x_n), P_2(y_1, \dots, y_n)) = \max(|x_i - y_i|) \quad \text{para } i=1, \dots, n \quad (6.13)$$

f.3) Norma euclidiana:

$$d(P_1(x_1, \dots, x_n), P_2(y_1, \dots, y_n)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6.14)$$

f.4) Norma euclidiana normalizada:

$$d(P_1(x_1, \dots, x_n), P_2(y_1, \dots, y_n)) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{V * \sqrt{n}} \quad (6.15)$$

onde: V é o valor máximo do nível de cinza das bandas e n é o número de bandas.

A partir do algoritmo básico proposto por Pao (1989), e dos seis itens descritos acima, descreve-se, a seguir, o método de classificação implementado.

Passo 0: Leitura dos dados gerais do problema:

- a) Número de linhas e colunas da imagem;
- b) Número de atributos (bandas temáticas do satélite);
- c) Raio de confiança;
- d) Norma;
- e) Número máximo de iterações;
- f) Protótipos fixos durante toda a execução;
- g) Protótipos variáveis;
- h) Número máximo de classes a serem geradas;

Passo 1: Ler o valor dos pixels de uma linha completa em todas as bandas de entrada;

Passo 2: Obter, a partir de um pixel da última linha lida completamente, o padrão de entrada N-dimensional X_i ;

Passo 3: Gerar o primeiro protótipo a partir do primeiro pixel da imagem, desde que não haja ainda nenhum protótipo definido;

Passo 4: Calcular a distância, segundo a norma escolhida, entre o padrão X_i correspondente ao pixel de entrada e todos os protótipos existentes;

Passo 5: Inibição lateral: encontrar a classe cujo protótipo está mais próximo ao padrão de entrada X_i ;

Passo 6: Se:

a distância do protótipo mais próximo ao padrão de entrada for menor que o raio de confiança desejado,

então:

atualizar o centro geométrico da classe mais próxima com a inclusão do padrão de entrada X_i , desde que ela não tenha tido um protótipo inicial fixo,

caso contrário:

utilizar o padrão de entrada X_i como centro de uma nova classe desde que o número máximo de classes a serem geradas e o número máximo de classes existentes ainda não tiverem sido atingidas. Caso isto tenha ocorrido, o padrão de entrada é colocado na classe nula;

Passo 7: Se:

ainda houver pixels não-processados na última linha lida completamente,

então:

ir para o passo 2,

caso contrário:

gravar a linha processada completamente,

se:

ainda houver linhas a serem lidas,

então:

voltar ao passo 1,

caso contrário:

testar se o número máximo de iterações foi atingido ou se o número de classes foi igual ao da iteração anterior,

se:

pelo menos um desses controles for verdadeiro,

então:

fim,

caso contrário:

atualizar o centro geométrico das classes cujos protótipos iniciais não foram fixados inicialmente,

incrementar o número de protótipos fixos com a inclusão dos novos protótipos criados na iteração encerrada,

incrementar o número de iterações realizadas,

iniciar nova iteração a partir do passo 1.

O programa computacional que implementa este algoritmo foi desenvolvido em linguagem FORTRAN numa estação de trabalho SPARC/SUN. Além da imagem temática de saída, cujos pixels contêm o valor da classe a qual pertencem, o programa ainda emite um relatório contendo os seguintes parâmetros referentes ao problema e às classes formadas, para análise dos resultados obtidos:

- a) Dados de entrada;
- b) Iterações realizadas;
- c) Coordenadas do centro geométrico de cada classe;
- d) Variância dos pontos em relação ao centro geométrico da classe a qual pertencem, por banda e por classe;
- e) Valores máximo e mínimo das classes por banda;
- f) Razão entre a amplitude da classe e a amplitude da banda, considerando que a amplitude é a diferença entre os níveis de cinza máximo e mínimo da banda e da classe;
- g) Número de elementos da classe;
- h) Distância do ponto mais distante do centro geométrico da classe;
- i) Distância média dos pontos pertencentes a uma classe;
- j) Classes mais próxima e mais distante;

l) Variância relativa por banda e geral.

A variância relativa é definida por Johnson et al. (1982) através da equação (6.16):

$$VR = 1 - \lambda_w = 1 - \frac{MS_W}{MS_T} \quad (6.16)$$

onde: λ_w é o parâmetro denominado de Lambda de Wilk e

MS_B e MS_T representam as variâncias do agrupamento e da população, respectivamente, definidas por:

$$MS_B = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} \left(\sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^{n_c} n_i - n_c} \quad e \quad MS_T = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} \left(\sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - \bar{x})^2 \right)}{\sum_{i=1}^{n_c} n_i - 1} \quad (6.17)$$

sendo: n_i o número de elementos da i-ésima classe;

n_c o número de classes;

x_{ik} o k-ésimo padrão da i-ésima classe;

\bar{x}_i o valor médio da i-ésima classe;

\bar{x} o valor médio da população.

A variância relativa descreve a porcentagem da variabilidade dos dados originais explicada pela classificação. Desse modo, tem-se que quanto menor for o valor do Lambda de Wilk λ_w , maior será a variância relativa VR e, conseqüentemente, melhor será a classificação. Uma classificação ideal deve ter uma grande variabilidade entre classes e uma pequena variabilidade inter-classes.

O coeficiente Kappa, que é uma medida da concordância entre dois conjuntos de dados, é outro parâmetro normalmente utilizado para avaliar a precisão da classificação das imagens de satélite (Rocha, 1992). A base de cálculo deste índice é a matriz de confusão, cujas células ou entradas (i,j) contêm o número de pixels da j-ésima classe de referência que são assinalados à i-ésima classe de teste. Desse modo, o coeficiente Kappa é definido matematicamente pela equação (6.18):

$$Kappa = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2} \tag{6.18}$$

onde:

$$\theta_1 = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad e \quad \theta_2 = \frac{\sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2} \tag{6.19}$$

sendo: x_{ii} o número de elementos da ii -ésima célula da matriz de confusão;
 x_{i+} a somatória dos elementos pertencentes à i -ésima linha da matriz de confusão;
 x_{+i} a somatória dos elementos pertencentes à i -ésima coluna da matriz de confusão;
 N o número total de elementos da imagem.

O valor do Kappa varia entre zero e um, sendo normalmente multiplicado por 100 para expressar valores em porcentagem. O valor mínimo (zero) representa concordância casual, enquanto que o valor máximo (um) corresponde à concordância completa entre os dois conjuntos de dados.

A variância do Kappa pode ser calculada através da seguinte equação:

$$var(Kappa) = \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{\theta_1 \cdot (1 - \theta_2)}{(1 - \theta_2)^2} + \frac{2 \cdot (1 - \theta_1) \cdot (2 \cdot \theta_1 \cdot \theta_2 - \theta_3)}{(1 - \theta_2)^3} + \frac{(1 - \theta_1)^2 \cdot (\theta_4 - 4 \cdot \theta_2^2)}{(1 - \theta_2)^4} \right) \tag{6.20}$$

onde:

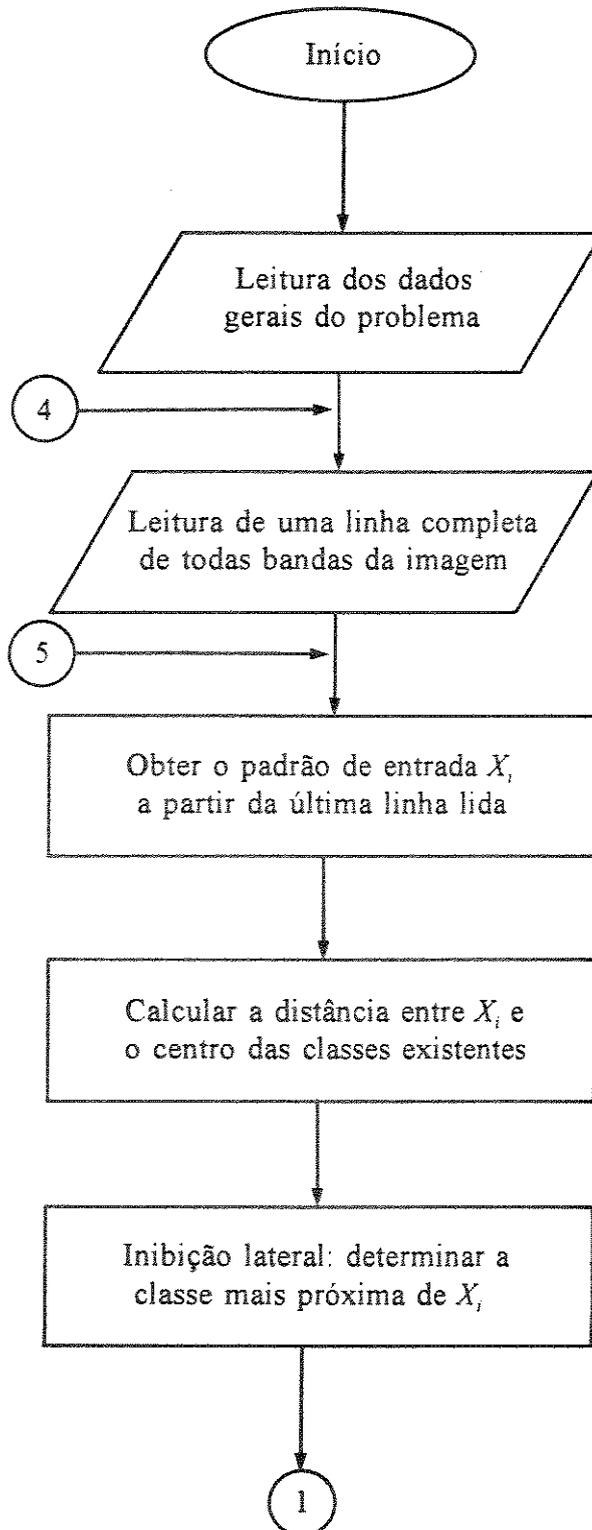
$$\theta_3 = \frac{\sum_{i=1}^r (x_{ii} \cdot (x_{i+} + x_{+i}))}{N^2} \quad e \quad \theta_4 = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (x_{ij} \cdot (x_{j+} + x_{+i}))}{N^3} \tag{6.21}$$

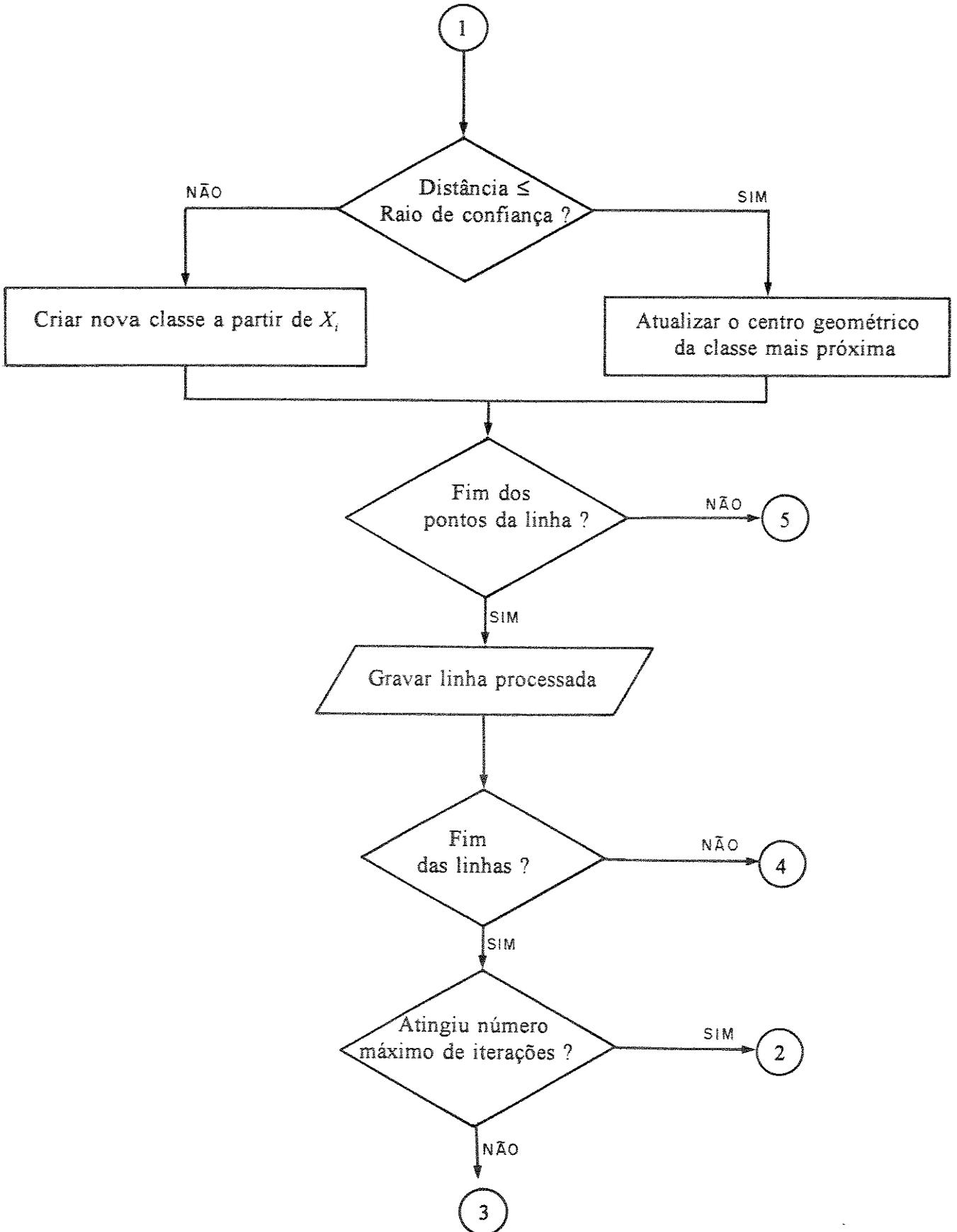
sendo: x_{j+} a somatória dos elementos pertencentes à j -ésima linha da matriz de confusão.

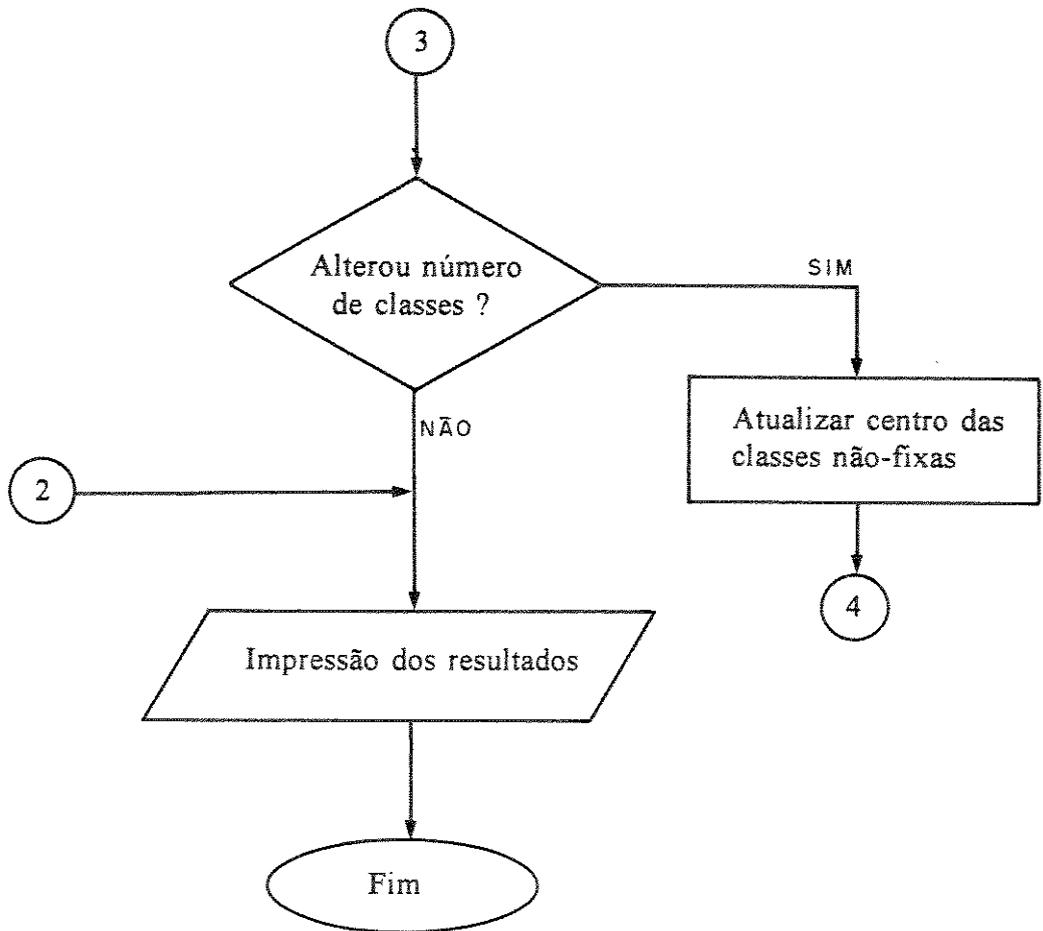
O coeficiente Kappa é utilizado neste contexto para comparar duas imagens classificadas, sendo que os pixels de uma delas formam o conjunto de padrões de referência,

enquanto que os pixels da outra formam o conjunto de padrões-teste.

O método de classificação implementado pode ser representado pelo seguinte fluxograma:







6.2.1. Classificação das imagens de radiância original e reflectância real

As imagens de radiância original ($NC(L_{sat})$) e reflectância real ($NC(\rho)$) foram classificadas através do método não-supervisionado, sem o fornecimento de protótipos fixos iniciais e variáveis, utilizando a norma euclidiana normalizada e raio de confiança igual a 0,090, 0,100, 0,125, 0,150, 0,175 e 0,200. Foram utilizadas as bandas temáticas TM2, TM3, TM4 e TM5 do satélite Landsat. Logo, os padrões de entrada a serem classificados pertencem ao espaço de dimensão 4. O número máximo de iterações permitido foi 10, enquanto que o número máximo de classes a serem geradas foi estabelecido em 60. As tabelas 6.10 e 6.11 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 6.10 - Classificação não-supervisionada das imagens de radiância original ($NC(L_{sat})$)

Raio	Iterações	Classes	Variância relativa [%]				
			TM2	TM3	TM4	TM5	Geral
0,090	3 (8,1min)	22	71,4	77,9	57,1	91,2	64,9
0,100	6 (14,1min)	20	70,8	76,5	57,3	91,1	64,7
0,125	2 (4,2min)	10	55,3	56,0	9,0	77,5	48,3
0,150	3 (5,3min)	9	54,8	55,1	9,0	75,7	47,3
0,175	2 (3,7min)	7	50,3	50,6	8,3	69,0	43,0
0,200	2 (3,7min)	6	45,6	47,8	8,1	69,0	42,5

Tabela 6.11 - Classificação não-supervisionada das imagens de reflectância real ($NC(\rho)$)

Raio	Iterações	Classes	Variância relativa [%]				
			TM2	TM3	TM4	TM5	Geral
0,100	4 (16,4min)	39	79,1	84,6	82,7	89,1	70,2
0,125	3 (8,0min)	21	74,3	78,4	67,2	85,2	64,0
0,150	5 (11,4min)	19	75,1	80,3	67,0	84,3	64,1
0,175	4 (7,9min)	14	70,7	76,1	59,0	77,9	58,6
0,200	4 (7,3min)	11	64,6	64,3	9,8	75,1	44,4

De acordo com esses valores tem-se que para um mesmo raio de confiança, o resultado obtido a partir da imagem de reflectância real foi melhor que o obtido com a imagem de radiância original. Isso fica mais evidente ainda a partir dos resultados referentes à banda TM4. A variância relativa de TM4 só atinge patamares mais elevados, no caso da imagem de radiância original, para os raios de confiança menores, e mesmo assim não consegue suplantar os resultados equivalentes à imagem de reflectância real. Isso tem grande influência no resultados finais da classificação pois a banda TM4 é importante para a distinção das superfícies vegetais. A diminuição do raio de confiança sempre melhora a classificação. Na imagem de reflectância real essa melhora é mais suave enquanto que no caso da radiância aparente observa-se uma melhora substancial diminuindo o raio de 0,150 para 0,125. De modo geral, o aumento do número de classes provocado pela diminuição do raio de confiança provoca um refinamento das classes existentes.

A tabela 6.12 contém o valor do coeficiente Kappa calculado a partir das imagens classificadas de radiância original (raio igual a 0,090 e 0,100) e reflectância real (raio igual a 0,100, 0,125 e 0,150).

Tabela 6.12 - Coeficiente Kappa

Imagem-teste ($NC(L_{sat})$)	Imagem-padrão ($NC(\rho)$)	Coeficiente Kappa
raio= 0,090	raio= 0,100	39,31
raio= 0,090	raio= 0,125	63,90
raio= 0,090	raio= 0,150	59,08
raio= 0,100	raio= 0,100	46,18
raio= 0,100	raio= 0,125	59,39
raio= 0,100	raio= 0,150	67,47

De acordo com esses resultados tem-se que mesmo as melhores classificações de cada tipo de imagem apresentam diferenças significativas entre si.

As superfícies-testes de mata, água, cana e solo foram utilizadas também para a análise dos resultados da classificação não-supervisionada das imagens. À superfície de água foi sempre assinalada uma única classe nas 5 imagens classificadas consideradas. As superfícies de cana e solo tiveram até três classes assinaladas dependendo da imagem considerada, havendo sempre uma predominante. A superfície-teste de mata é a que apresentou o comportamento mais atípico. A menos da imagem de reflectância real classificada com raio igual a 0,100, observou-se que as classes assinaladas à superfície de mata foram as mesmas da água e da cana. Esse resultado confirma a relação entre a qualidade da correção e a variância relativa das bandas temáticas classificadas. A imagem que apresentou os maiores valores da variância relativa, principalmente para a banda TM4, foi a imagem melhor classificada: reflectância real com raio de 0,100. Mesmo com um raio inferior (igual a 0,090) a classificação da imagem de radiância original não conseguiu distinguir a superfície de mata das superfícies de cana e água. Logo, o método de classificação não-supervisionado utilizado mostrou-se, de acordo com todos os resultados apresentados, sensível às interferências atmosféricas existentes nas imagens de satélite, principalmente para as superfícies-testes

vegetais consideradas. O raio de confiança é realmente o parâmetro-chave do método de classificação implementado, conforme fora salientado em sua descrição. O valor de 70% parece ser um bom limite inferior para a variância relativa.

CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

O trabalho realizado conseguiu tornar operacional a correção atmosférica das imagens de satélite. O fato dele ter sido feito sob condições de atmosfera tropical é uma contribuição importante ao estudo dos efeitos atmosféricos nas imagens de satélite, dado que a grande maioria dos trabalhos neste assunto são desenvolvidos nas condições de clima e disponibilidade de dados do hemisfério norte. A utilização do Modelo 5S como base do sistema de correção atmosférica mostrou-se adequada e confirma a boa aceitação que ele vem tendo da comunidade internacional de sensoriamento remoto.

O sistema computacional SCORADIS oferece outras opções de utilização além da correção atmosférica que motivou o seu desenvolvimento, tais como a simulação do sinal recebido pelo satélite a partir da superfície terrestre e a remoção dos efeitos da vizinhança terrestre. A possibilidade de obter imagens em níveis de radiância ou reflectância é outro aspecto relevante do sistema. O SCORADIS, da forma como foi concebido, tem muito ainda a crescer com a inclusão de outros módulos interessantes no tratamento das imagens de satélite. A sua adequação a ambientes que estão se tornando comuns na área de processamento de imagens, como o KHOROS por exemplo, é pensada para um futuro próximo. A versão inicial desenvolvida está disponível para estações SPARC/SUN e RISC/IBM. A paralelização do procedimento de convolução, utilizado na remoção dos efeitos da vizinhança, é outra alternativa viável que está sendo avaliada para torná-lo ainda mais rápido. A possibilidade de correção remota de imagens, a realização da correção em etapas e a variedade de satélites cujas imagens podem ser corrigidas pelo SCORADIS são outros fatores positivos deste sistema.

O tratamento específico dos efeitos decorrentes da vizinhança de cada alvo terrestre é uma contribuição a ser ressaltada neste trabalho. Estes efeitos são normalmente desconsiderados por causa da dificuldade em tratá-los adequadamente a um custo computacional razoável. A formulação de correção desenvolvida apresenta uma interpretação física coerente com os fenômenos que ela descreve.

Os trabalhos realizados em campo, apesar de toda a dificuldade envolvida em operações deste tipo, foram de grande importância para o conhecimento prático dos fenômenos

envolvidos na formação das imagens pelos satélites e também dos parâmetros que os descrevem. Aliás, o estudo dos efeitos atmosféricos nas imagens de satélite, não obstante a sua complexidade, tem a característica de proporcionar uma ampla visão dos processos envolvidos na captura das imagens pelos satélites, que são de grande utilidade também em outros trabalhos na área de sensoriamento remoto.

As radiossondagens realizadas indicam que os perfis atmosféricos e os valores de pressão e temperatura da atmosfera denominada de tropical pelo 5S são bem representativos para a região de Campinas. No caso do vapor d'água houve uma diferença sensível entre os valores-experimentais e os valores-padrões dessa atmosfera, principalmente em baixas altitudes, devido ao próprio comportamento do vapor d'água na atmosfera e à baixa umidade observada na época em que os dados experimentais foram obtidos. Os perfis, contudo, foram semelhantes. A coincidência entre os dados experimentais e os simulados pelo Modelo 5S para a radiação solar e a espessura ótica confirmam que o modelo tropical definido no 5S é válido nas condições de clima tropical em que o trabalho foi feito. A constatação prática da validade do modelo tropical é de grande interesse no contexto da correção radiométrica das imagens de satélite sendo, portanto, uma contribuição da tese para este assunto. A diminuição da equivalência entre os dados experimentais e os simulados com o comprimento de onda deve-se à perda de sensibilidade do LI1800 com o aumento do comprimento de onda e/ou às aproximações feitas pelo Modelo 5S. O espectrorradiômetro apresentou também uma perda de sensibilidade com o aumento do ângulo zenital solar.

A definição dos perfis atmosféricos utilizando o modelo tropical e dados coletados numa determinada altitude é uma metodologia adequada quando não forem feitas radiossondagens. A obtenção de dados atmosféricos, como as concentrações de vapor d'água e ozônio em bancos de dados existentes em redes eletrônicas, é outra alternativa válida na ausência de radiossondagens. Deve-se ter cuidado, porém, com a qualidade dos dados de domínio público que muitas vezes são colocados à disposição, mesmo estando em fase de consistência. A obtenção da concentração de vapor d'água através das imagens de satélites é outra opção a ser considerada também num futuro próximo.

A determinação dos perfis atmosféricos particulares de uma determinada região pode ser feita através da análise das radiossondagens realizadas rotineiramente em locais como

aeroportos, por exemplo. A caracterização dos perfis atmosféricos em função da época do ano pode ser de grande utilidade quando as radiossondagens não puderem ser feitas nos dias e locais desejados. Esta é uma sugestão de trabalho futuro que pode auxiliar na definição dos dados necessários à correção atmosférica das imagens de satélite.

O ozônio é um assunto bastante estudado atualmente e, por isso, observa-se um aumento na quantidade de dados disponíveis em comparação com o observado no início do trabalho. A própria UNICAMP instalou, em meados de 1993, um ozonômetro que obtém dados diários de concentração de ozônio em Campinas. Esta é uma fonte interessante de dados para correções futuras e que será útil para determinar os valores médios mensais da concentração de ozônio a serem empregados na ausência de dados locais. Existe ainda a possibilidade de instalação de um radiômetro na UNICAMP para a medição diária da radiação direta e, conseqüentemente, da espessura ótica da atmosfera. Esse trabalho está em fase final de testes e será de grande utilidade para orientar as correções radiométricas futuras e também para outras aplicações que necessitem de dados de turbidez atmosférica. A instalação de uma rede de fotômetros solares no Brasil, que está sendo feita pela NASA, INPE e CIMEL, representa um grande progresso no que se refere à obtenção dos dados necessários à correção radiométrica, mostrando a importância atual dos estudos atmosféricos no Brasil e no Mundo.

A adaptação feita no espectrorradiômetro LICOR/LI1800 foi bem sucedida no que se refere à medição da radiação solar direta. Todos os dados de radiação solar global e direta coletados experimentalmente já constituem um banco de dados que podem ser utilizados para outras aplicações além da correção atmosférica. A grande vantagem destes dados é que eles foram obtidos com uma boa precisão espectral da ordem de 2nm. Os programas utilizados no processamento dos espectros de radiação já formam um sistema de tratamento de dados experimentais.

O tipo de aerossol continental mostrou-se adequado à região de Campinas. A determinação da espessura ótica a partir da radiação global é uma grande contribuição deste trabalho que surgiu com a experiência acumulada nas medições experimentais. Ainda que o método proposto deva ser mais estudado e refinado, ele já se apresenta como uma alternativa para a obtenção precisa dos parâmetros necessários à correção atmosférica na ausência dos dados-padrões mais indicados. A vantagem da metodologia de estimativa proposta é que ela

baseia-se em medições de radiação global que são mais facilmente disponíveis que os dados de radiação direta ou turbidez atmosférica utilizados normalmente para determinar a espessura ótica. Isto considerando as condições de atmosfera tropical aonde foram realizados os trabalhos experimentais.

A espessura ótica é um dos parâmetros mais importantes para a correção atmosférica, mas é também um dos mais difíceis de serem obtidos experimentalmente. Deste modo, qualquer contribuição feita no sentido de sua determinação adequada acaba influenciando também na precisão final da correção atmosférica. Isto mostra que houve uma preocupação, dentro do trabalho, não só com o processamento das imagens, mas também com os dados necessários à alimentação do procedimento de correção utilizado.

A utilização da superfície de asfalto na pista do Aeroporto de Viracopos não foi adequada como referência à análise dos resultados da correção atmosférica. As dimensões da pista e a sua disposição na imagem inviabilizaram a obtenção de pixels puros que pudessem ser utilizados na avaliação da correção. A análise dos pixels menos contaminados mostrou que a sensibilidade da superfície de asfalto à correção era incompatível com a precisão com que os dados de reflectância foram obtidos em campo. As superfícies mais adequadas para o método de avaliação qualitativa da correção proposto são as de água e vegetação. O método para a avaliação dos resultados da correção é uma alternativa viável quando se têm bons dados de radiação solar global e não se dispõe de valores precisos de reflectância.

As medições de reflectância hemisférica são úteis para se determinar a variabilidade espectral da reflectância das superfícies de asfalto e solo. A obtenção de um valor preciso por banda temática, todavia, requer um grande número de medidas que não pode ser obtido com o espectrorradiômetro LICOR/LI1800 em um curto espaço de tempo. O peso e a dimensão do equipamento dificultam um pouco a sua rápida movimentação em campo. O LI1800 mostrou ser de grande utilidade para trabalhos de campo devido à sua rusticidade, principalmente quando não é necessário obter espectros rapidamente em vários pontos distintos. A esfera integradora é útil à determinação da variabilidade espectral. A metodologia empregada no caso de amostras de solo apresentou bons resultados, apesar da pouca quantidade de medidas feitas. A menor precisão do LI1800 para os comprimentos de onda superiores a 900nm deve ser considerada quando se estiver trabalhando nesta banda.

A utilização dos balões de ar quente tripulados nas atividades de campo foi bastante considerada no início do trabalho. Apesar de sua não utilização, por motivos operacionais, acredita-se que esta metodologia pode ser de grande utilidade principalmente na determinação da verdade terrestre e na obtenção de dados atmosféricos e radiométricos em altitude.

Com relação às aplicações consideradas tem-se que uma diferença da ordem de 0,2 entre o valor do índice de vegetação NDVI calculado a partir de imagens não-corrigidas e corrigidas é significativo e pode ocasionar erros superiores a 100% na estimativa da biomassa a partir do sensoriamento remoto. Esse fato ilustra bem a importância real da correção atmosférica na utilização adequada e confiável das imagens de satélite nas aplicações de real interesse econômico.

O método de classificação implementado apresenta boas perspectivas de utilização com imagens de satélite. Existem algumas melhorias que ainda podem ser feitas como a definição de uma fórmula empírica de cálculo do raio de confiança. A variância relativa e o índice Kappa são dois índices estatísticos que se mostraram úteis à avaliação das classificações. A classificação não-supervisionada mostrou-se sensível aos efeitos atmosféricos principalmente na distinção das superfícies vegetais consideradas (mata e cana). Os parâmetros utilizados pelo próprio método, como o raio de confiança, são de grande importância também na qualidade dos resultados finais.

Todas as melhorias individuais feitas nas imagens, por menor que possam parecer, acabam sendo importantes nos resultados finais alcançados a partir delas. A atmosfera, embora não seja o único efeito perturbador das imagens de satélite, deve ser considerada, principalmente no tratamento de imagens multitemporais. O trabalho realizado para imagens do satélite Landsat terá continuidade no tratamento de imagens do satélite NOAA-AVHRR, dentro do projeto de cooperação CEE-América do Sul (1994-1998) e do projeto de cooperação EMBRAPA-UNICAMP (1995-1999).

APÊNDICE A

CONCEITOS E DEFINIÇÕES RADIOMÉTRICAS

Os conceitos e as definições de algumas grandezas radiométricas de grande importância em sensoriamento remoto são apresentados a seguir.

A.1. Ângulo sólido (Ω)

O ângulo sólido representa o ângulo cônico definido a partir do centro de uma esfera pela razão entre a área da calota esférica A e o quadrado do raio r da esfera, conforme ilustra a figura seguinte:

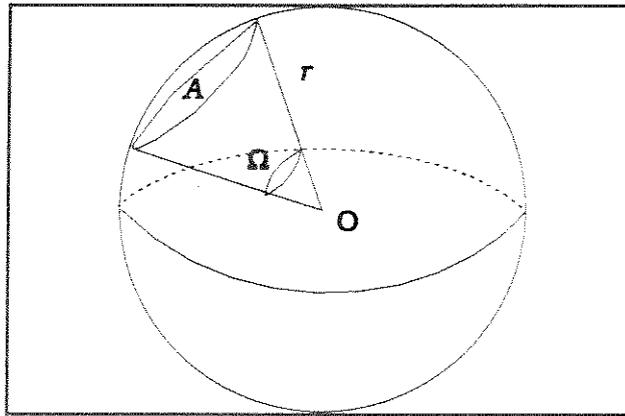


Figura A.1 - Ângulo sólido

Matematicamente, tem-se que:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (\text{A.1})$$

A unidade utilizada para medir o ângulo sólido é o esferorradiano (sr), sendo que no caso da esfera tem-se que $\Omega = (4.\pi)\text{sr}$. A fórmula exata de cálculo do ângulo sólido é igual, segundo Slater (1980), a:

$$\Omega = 2.\pi.(1 - \cos(\theta)) \quad (\text{A.2})$$

onde: θ é o ângulo plano de abertura do ângulo sólido.

Para ângulos sólidos pequenos, que é o usual em sensoriamento remoto, pode-se aproximar a área da calota esférica pela do círculo, na equação (A.1). Neste caso tem-se que:

$$\Omega = \frac{\text{Área do Círculo}}{r^2} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \text{sen}^2(\theta)}{r^2} = \pi \cdot \text{sen}^2\theta \quad (\text{A.3})$$

O campo de visão CV de um receptor hemisférico, para um dado ângulo sólido Ω definido a partir de um ângulo plano θ , é a razão entre Ω e o ângulo sólido hemisférico Ω_H . Isto é expresso matematicamente pela equação (A.4):

$$CV = \frac{\Omega}{\Omega_H} = \frac{\pi \cdot \text{sen}^2(\theta)}{\pi \cdot \text{sen}^2(90^\circ)} = \text{sen}^2(\theta) \quad (\text{A.4})$$

Considerando que o receptor hemisférico está a uma altura h da superfície terrestre, tem-se que, para um dado diâmetro d desta superfície, o ângulo plano θ é calculado como:

$$\theta = \arcsen\left(\frac{d}{\sqrt{4 \cdot h^2 + d^2}}\right) \quad (\text{A.5})$$

Nesse caso, a expressão (A.4) para o campo de visão CV pode ser reescrita como:

$$CV = \text{sen}^2(\theta) = \frac{d^2}{4 \cdot h^2 + d^2} \quad (\text{A.6})$$

A.2. Energia Radiante (Q)

A energia radiante é a energia capaz de realizar trabalho, aquecer ou provocar mudança de estado físico que é transportada na forma de ondas eletromagnéticas. A sua unidade de medidas é o Joule.

A.3. Fluxo Radiante (ϕ)

O fluxo radiante é a taxa de variação da energia radiante no tempo:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{A.7})$$

onde: $[\phi] = \text{W}$.

A.4. Irradiância (E)

A irradiância é o fluxo radiante proveniente de todo hemisfério que incide numa superfície, por unidade de área desta superfície:

$$E = \frac{d\phi_i}{dA} \quad (\text{A.8})$$

com: $[E] = \text{W.m}^{-2}$

A.5. Excitância (M)

A excitância é o fluxo radiante emitido dentro de um hemisfério por uma superfície, por unidade de área desta superfície. Matematicamente, tem-se que:

$$M = \frac{d\phi_r}{dA} \quad (\text{A.9})$$

onde $[M] = \text{W.m}^{-2}$.

A.6. Intensidade radiante (I)

A intensidade radiante é o fluxo radiante procedente de uma fonte pontual por unidade de ângulo sólido medido numa determinada direção θ considerada:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (\text{A.10})$$

com: $[I] = \text{W.sr}^{-1}$.

A figura A.2 ilustra o conceito de intensidade radiante.

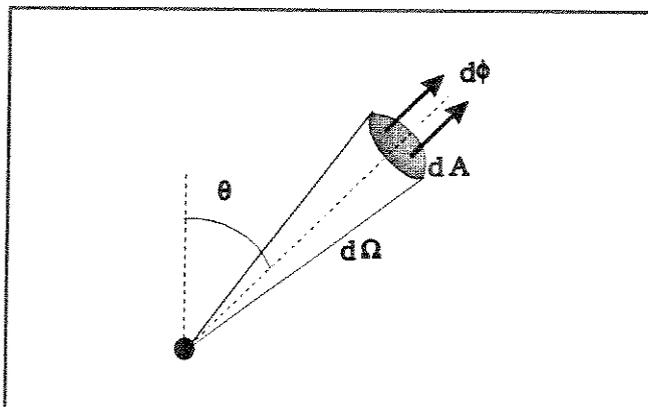


Figura A.2 - Intensidade radiante

A.7. Radiância (L)

A radiância de uma fonte extensa é a intensidade radiante proveniente desta fonte em uma dada direção θ por unidade de área perpendicular a esta direção. Em termos matemáticos, tem-se que:

$$L = \frac{I}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta} \quad (\text{A.11})$$

onde: $[L] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

A figura A.3 ilustra o conceito de radiância.

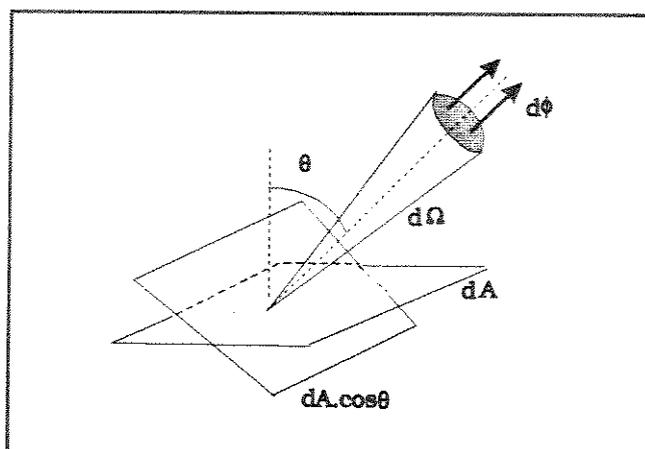


Figura A.3 - Radiância

A.8. Albedo

O albedo representa a fração da radiação solar que é refletida por uma superfície no hemisfério, ou seja, ele é o valor médio da reflectância de uma superfície na faixa espectral que varia de $0,3\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$.

A.9. Reflexão

A reflexão é o processo pelo qual o fluxo radiante, incidente numa superfície ou meio estacionário, deixa o lado incidente desta superfície ou meio estacionário sem mudança de frequência (Nicodemus, 1977).

A.10. Reflexão especular

Uma superfície é um reflector especular quando os ângulos de incidência e reflexão da energia radiante obedecem as leis geométricas da reflexão, ou seja, quando os ângulos de incidência e reflexão são exatamente iguais e situados num plano perpendicular à superfície (Guyot, 1989).

A.11. Reflexão difusa

Uma superfície é um reflector difuso quando a energia radiante incidente reflete em múltiplas direções devido às irregularidades da própria superfície ou por ela ser constituída de um material óticamente heterogêneo. Um reflector difuso pode ser composto, teoricamente, por reflectores especulares infinitamente pequenos tendo orientação e inclinação aleatórias (Guyot, 1989). A figura A.4 ilustra os conceitos de reflexão especular e difusa.

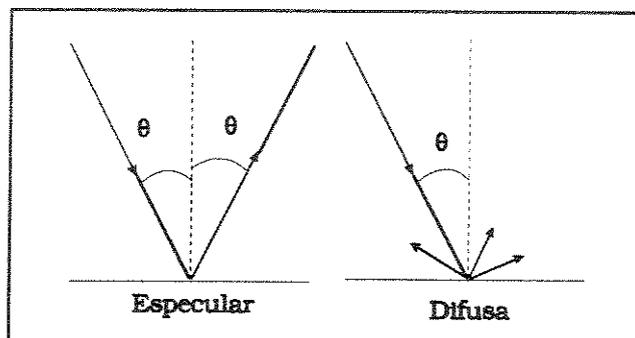


Figura A.4 -Reflexão especular e reflexão difusa

A.12. Reflexão perfeitamente difusa

Uma superfície é perfeitamente difusora (ou lambertiana) quando a intensidade radiante I_θ , que provem dela em qualquer direção, varia com o cosseno do ângulo θ entre esta direção e a normal à superfície, ou seja,

$$I_\theta = I_0 \cdot \cos\theta \quad (\text{A.12})$$

Esta equação corresponde à formulação matemática da Lei dos cossenos ou Lei de Lambert. No caso da radiância L_θ tem-se que:

$$L_\theta = \frac{I_\theta}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{I_0 \cdot \cos\theta}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{I_0}{dA} \quad (\text{A.13})$$

isto é, ela é constante para qualquer ângulo θ , de reflexão, independentemente, portanto, da direção de observação. A figura A.5 representa esquematicamente este conceito:

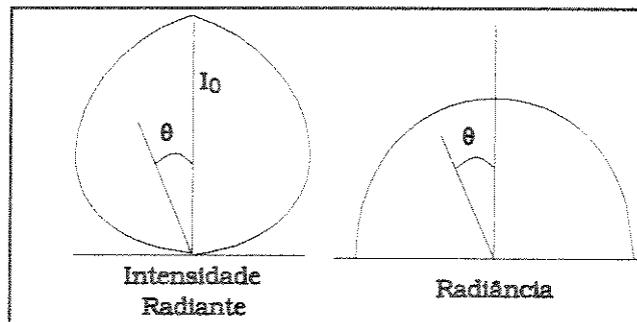


Figura A.5 - Superfície perfeitamente difusora

A.13. Reflectância Difusa (ρ)

A reflectância difusa ρ de uma superfície é definida como a relação entre o fluxo $d\phi_r$, refletido pela superfície e o fluxo $d\phi_i$, nela incidente (Perdiz, 1990 e Steffen, 1989):

$$\rho = \frac{d\phi_r}{d\phi_i} \quad (\text{A.14})$$

No caso de um elemento de superfície dA , tem-se que a reflectância difusa espectral $\rho(\lambda)$ pode ser expressa como:

$$\rho(\lambda) = \frac{d\phi_r(\lambda)}{d\phi_i(\lambda)} = \frac{d\phi_r(\lambda)/dA}{d\phi_i(\lambda)/dA} = \frac{M(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (\text{A.15})$$

onde: $M(\lambda)$ é a excitância e $E(\lambda)$ é a irradiância espectral do elemento de superfície. Os valores de $\rho(\lambda)$ estão compreendidos entre zero e um. É importante salientar que a geometria dos fluxos incidente e refletido não foi considerada nestas definições.

De acordo com a definição matemática da radiância, expressa pela equação (A.11), tem-se que o fluxo refletido pelo elemento dA de uma superfície lambertiana, em qualquer direção θ em relação à normal à superfície, é dado por:

$$d^2\phi_r = L \cdot d\Omega_r \cdot dA \cdot \cos\theta_r \quad (\text{A.16})$$

O ângulo sólido elementar $d\Omega_r$, é calculado de acordo com a geometria apresentada na figura A.6:

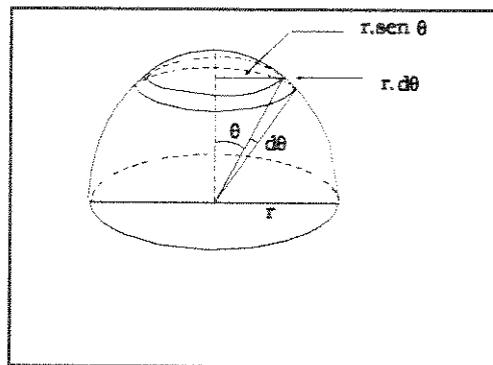


Figura A.6 - Ângulo sólido elementar

Neste caso, tem-se que:

$$d\Omega_r = \frac{\text{Área do Anel}}{r^2} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot r \cdot \text{sen}\theta_r) \cdot (r \cdot d\theta_r)}{r^2} = 2 \cdot \pi \cdot \text{sen}\theta_r \cdot d\theta_r \quad (\text{A.17})$$

Substituindo (A.17) em (A.16) tem-se então que:

$$d^2\phi_r = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot dA \cdot \sin\theta_r \cdot \cos\theta_r \cdot d\theta_r \quad (\text{A.18})$$

O fluxo total $d\phi_r$, refletido num hemisfério é obtido integrando-se a equação anterior para θ_r , variando de 0 a $\pi/2$:

$$d\phi_r = \pi \cdot L \cdot dA \quad (\text{A.19})$$

O fluxo total $d\phi_i$, incidente no elemento de superfície dA é dado diretamente pela definição da irradiância expressa pela equação (A.8):

$$d\phi_i = E \cdot dA \quad (\text{A.20})$$

Logo, a reflectância difusa ρ de uma superfície lambertiana é igual a:

$$\rho = \frac{d\phi_r}{d\phi_i} = \frac{\pi \cdot L \cdot dA}{E \cdot dA} = \frac{\pi \cdot L}{E} \quad (\text{A.21})$$

No caso espectral tem-se que:

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi \cdot L(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (\text{A.22})$$

A.14. Reflectância bicônica

A reflectância bicônica é uma extensão da reflectância difusa para o caso em que a geometria dos fluxos incidente e refletido são importantes em sua determinação. Matematicamente, tem-se que:

$$\rho(\Omega_p, \Omega_r) = \frac{d\phi_r(\Omega_r)}{d\phi_i(\Omega_i)} = \frac{\int_{\Omega_r} L_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot (\cos\theta_r \cdot d\Omega_r)}{\int_{\Omega_i} L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot (\cos\theta_i \cdot d\Omega_i)} = \frac{\int_{\Omega_r} L_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot d\omega_r}{\int_{\Omega_i} L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot d\omega_i} \quad (\text{A.23})$$

onde: Ω_i e Ω_r são os ângulos sólidos que contêm os fluxos incidente ($d\phi_i$) e refletido ($d\phi_r$);

$d\omega_i$ e $d\omega_r$ são os ângulos sólidos projetados;

θ_i e θ_r são os ângulos zenitais de incidência e reflexão;

φ_i e φ_r são os ângulos azimutais de incidência e reflexão;

L_i e L_r são as radiâncias incidente e refletida contidas nos ângulos sólidos.

Um conceito teórico importante, decorrente da geometria dos fluxos incidente e refletido, é o da função de distribuição da reflectância bidirecional f_r , definida por:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_p, \varphi_p; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{dE_i(\theta_p, \varphi_p)} = \frac{dL_r(\theta_p, \varphi_p; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{L_i(\theta_p, \varphi_p) \cdot \cos\theta_r \cdot d\Omega_i} \quad (\text{A.24})$$

Esta função descreve a contribuição de cada elemento da irradiância incidente L_i para a formação da radiância final refletida L_r pelo elemento de superfície dA , tendo a dimensão de $[\text{sr}^{-1}]$. Ela é a quantidade básica que descreve geometricamente as propriedades refletoras de uma superfície uniforme e isotrópica, considerando que a irradiância seja também uniforme sobre toda esta superfície. Para um dado par de direções tem-se que a função f_r representa a concentração de reflectância por esferorradiano, tendo valores entre zero e infinito (Nicodemos, 1977).

A partir da equação (A.24) pode-se reescrever a definição geral (A.23) da reflectância bicônica através da seguinte expressão:

$$\rho(\Omega_p; \Omega_r) = \frac{d\phi_r(\Omega_r)}{d\phi_i(\Omega_i)} = \frac{\int_{\Omega_p, \Omega_i} \int f_r(\theta_p, \varphi_p; \theta_r, \varphi_r) \cdot L_i(\theta_p, \varphi_p) \cdot d\omega_r \cdot d\omega_i}{\int_{\Omega_i} L_i(\theta_p, \varphi_p) \cdot d\omega_i} \quad (\text{A.25})$$

Se a radiação incidente for uniforme e isotrópica de modo que $L_i(\theta_p, \varphi_p) = L_i$ tem-se então que:

$$\rho(\Omega_p; \Omega_r) = (1/\omega_i) \cdot \int_{\Omega_p, \Omega_i} \int f_r(\theta_p, \varphi_p; \theta_r, \varphi_r) \cdot d\omega_r \cdot d\omega_i \quad (\text{A.26})$$

onde:

$$\omega_i = \int_{\Omega_i} d\omega_i = \int_{\Omega_i} \cos\theta_r d\Omega_i \quad (\text{A.27})$$

A.15. Fator de Reflectância (*FR*)

O fator de reflectância *FR* é a razão entre o fluxo refletido $d\phi_r$, por um elemento dA da superfície em um cone, pelo fluxo radiante $d\phi_{r,id}$ que seria refletido no mesmo ângulo sólido por um reflector perfeitamente difusor, considerando as mesmas condições de iluminação (Guyot, 1989). Este conceito surgiu devido à dificuldade em medir experimentalmente o fluxo incidente num ângulo sólido, conforme a definição da reflectância bicônica. Matematicamente, esta definição é escrita como:

$$FR = \frac{d\phi_r}{d\phi_{r,id}} = \frac{\int_{\Omega_r} L_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot \cos\theta_r \cdot d\Omega_r}{L_{id} \int_{\Omega_r} \cos\theta_r \cdot d\Omega_r} = \frac{\overline{L_r(\Omega_r)}}{L_{id}} \quad (\text{A.28})$$

onde: Ω_r é o ângulo sólido utilizado para medir o fluxo refletido e L_{id} é a radiância do reflector lambertiano branco.

Caso se meça a radiação incidente diretamente, ao invés de usar uma superfície de referência, tem-se que L_{id} é substituído por E/π nesta expressão (Guyot, 1989), resultando na seguinte equação:

$$FR = \frac{\pi \cdot \overline{L_r(\Omega_r)}}{E} \quad (\text{A.29})$$

Esta equação para o fator de reflectância é equivalente às definições (A.21) e (A.22) da reflectância difusa, caso a superfície observada seja lambertiana.

Com base na definição (A.24) da função de distribuição da reflectância bidirecional f_r , pode-se reescrever mais formalmente o fator de reflectância FR através da equação (A.30):

$$FR(\Omega_i; \Omega_r) = \frac{d\phi_r}{d\phi_{r,id}} = \frac{\int_{\Omega_i, \Omega_r} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cdot L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot d\omega_i \cdot d\omega_r}{\left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \int_{\Omega_i, \Omega_r} L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot d\omega_i \cdot d\omega_r} \quad (A.30)$$

considerando que $f_r = 1/\pi$ para um reflector difuso ideal (Nicodemos, 1977).

Caso L_i seja constante tem-se que:

$$FR(\Omega_i; \Omega_r) = \left[\frac{\pi}{(\omega_i \cdot \omega_r)} \right] \cdot \int_{\Omega_i, \Omega_r} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cdot d\omega_i \cdot d\omega_r \quad (A.31)$$

A partir destas equações tem-se que a função de distribuição bidirecional f_r e o fator de reflectância bidirecional FR estão relacionados do seguinte modo:

$$FR(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi \cdot f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \quad (A.32)$$

A.16. Sensibilidade espectral do satélite Landsat

Os valores médios por banda temática do satélite Landsat, que são de grande importância para a interpretação das medidas experimentais realizadas, foram calculados ponderando-se os dados monocromáticos originais dos parâmetros atmosféricos de interesse, pelas funções-filtro $S_{TM2}(\lambda)$, $S_{TM3}(\lambda)$ e $S_{TM4}(\lambda)$ descritas na figura A.7:

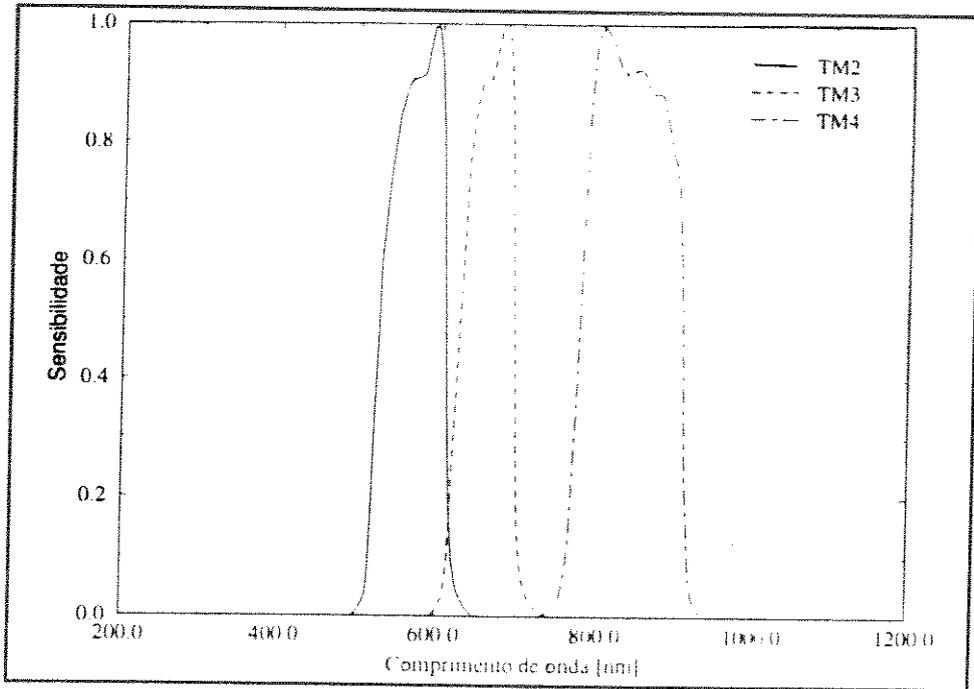


Figura A.7 - Sensibilidade espectral do satélite Landsat

Seja um determinado parâmetro atmosférico Ψ , como a radiação solar, por exemplo, que tenha sido medido em várias posições do sol e em comprimentos de onda λ distintos, formando um conjunto inicial de valores $\Psi(\lambda, m)$. O cálculo do valor médio $\Psi(TMx, m)$ por banda temática é formalizada através da expressão (A.33):

$$\Psi(TMx, m) = \frac{\sum_{\lambda=330}^{1,100} (S_{TMx}(\lambda) \cdot \Psi(\lambda, m))}{\sum_{\lambda=330}^{1,100} S_{TMx}(\lambda)} \quad (A.33)$$

para $x = 2, 3$ e 4 e $m = m_1, m_2, \dots, m_n$;

APÊNDICE B

CONCEITOS E DEFINIÇÕES ATMOSFÉRICAS

B.1. Aerossóis

Os aerossóis são partículas materiais, distintas da água e do gelo, presentes na atmosfera com raio variando geralmente de $0,1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$.

B.2. Massa ótica de ar (m)

A massa ótica de ar unitária para uma determinada localidade é definida como sendo o caminho vertical da superfície terrestre até o topo da atmosfera (Robinson, 1966). Desse modo, para um determinado ângulo zenital do sol θ_s , tem-se que a massa ótica de ar relativa m_r é definida por:

$$m_r = \frac{1}{\cos(\theta_s) + 0,15 \cdot (93,885 - \theta_s)^{-1,253}} \quad (\text{B.1})$$

A massa ótica de ar real absoluta m é obtida corrigindo-se o valor relativo m_r em função da pressão atmosférica:

$$m = m_r \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (\text{B.2})$$

onde: P é a pressão atmosférica na estação ou área-teste e P_0 é a pressão atmosférica padrão de 1013,25 mb.

B.3. Declinação solar

A declinação solar é o ângulo entre a linha que liga o centro do sol ao centro da terra e o plano do Equador. Corresponde, em termos de um observador na terra, à latitude aonde o solo está passando.

B.4. Ângulo zenital

O ângulo zenital é o ângulo formado entre as linhas normal do local e a que liga o centro do sol ou do satélite ao local.

B.5. Coeficiente D_s

O fator de correção da constante solar é definido em função da distância terra-sol por:

$$D_s = \frac{1}{(1 - 0,01673 \cdot \cos[0,9856(J - 4)])^2} \quad (\text{B.3})$$

onde: J é o número do dia do ano contado a partir de 1º de janeiro, (ou seja, é o dia juliano).

Observa-se que este coeficiente varia de 0,9674 (em 6/julho) até 1,0343 (em 4/janeiro).

B.6. Espessura ótica da atmosfera

A espessura ótica da atmosfera é uma grandeza física adimensional que descreve a resistência provocada pela atmosfera à propagação da radiação solar em seu meio (Quenzel, 1983). Isto pode ser melhor entendido a partir da Lei de Beer-Bouguer-Lambert, que trata da atenuação de uma onda plana, com radiância inicial L_λ , ao atravessar a camada de uma substância de densidade ρ e espessura ds , conforme a figura B.1.

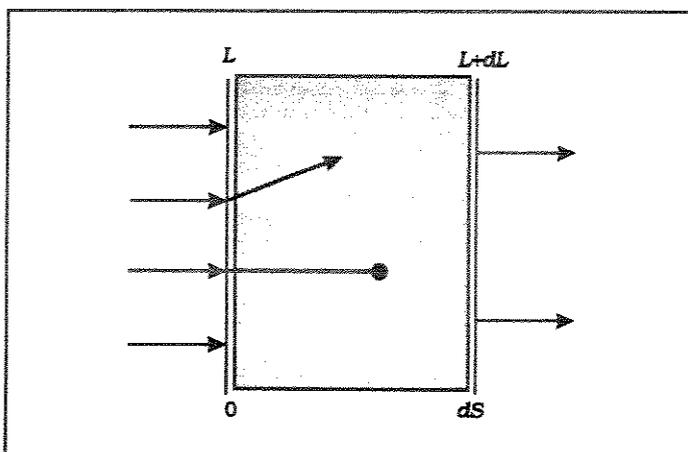


Figura B.1 - Espessura ótica da atmosfera

Sob as condições encontradas na atmosfera, a atenuação dL_λ é proporcional à radiância inicial L_λ , à extensão ds da camada, à densidade ρ da substância e às propriedades condutivas desta substância, descritas pelo fator de proporcionalidade χ_λ . Isto é representado, matematicamente, por

$$dL_\lambda = -\chi_\lambda \cdot \rho \cdot L_\lambda \cdot ds \quad (\text{B.4})$$

que corresponde à forma diferencial da Lei de Beer-Bouguer-Lambert.

A integração de (B.4) para um caminho finito s :

$$\int_{L_{0\lambda}}^{L_\lambda} \frac{dL_\lambda}{L_\lambda} = -\int_0^s \chi_\lambda \cdot \rho \cdot ds \quad (\text{B.5})$$

resulta na formulação matemática tradicional da Lei de Beer-Bouguer-Lambert:

$$L_\lambda = L_{0\lambda} \cdot \exp[-(\chi_\lambda \cdot \rho \cdot s)] \quad (\text{B.6})$$

Rearranjando esta expressão para:

$$\exp[-(\chi_\lambda \cdot \rho \cdot s)] = \frac{L_\lambda}{L_{0\lambda}} \quad (\text{B.7})$$

observa-se que o termo $\exp(-\chi_\lambda \cdot \rho \cdot s)$ representa a fração da radiação incidente $L_{0\lambda}$ que não é atenuada (absorvida ou espalhada) ao atravessar a camada de espessura s , correspondendo, desse modo, à transmitância T_λ da camada.

O produto $(\chi_\lambda \cdot \rho)$ é denominado de densidade ótica, enquanto que o expoente $(\chi_\lambda \cdot \rho \cdot s)$ é definido como sendo a espessura ótica τ_λ da camada de comprimento s . A relação matemática existente entre a transmitância e a espessura ótica da camada, descrita por:

$$T_\lambda = \exp[-(\chi_\lambda \cdot \rho \cdot s)] = \exp[-\tau_\lambda] \quad (\text{B.8})$$

auxilia no entendimento do significado físico do conceito de espessura ótica. À medida em que o valor de τ_λ diminui, e se aproxima de zero, o valor da transmitância T_λ aumenta e se aproxima de 1. Isto corresponde a uma camada óticamente pouco espessa, que não oferece

muita resistência à propagação da radiação em seu meio. No caso contrário, quanto maior for o valor da espessura ótica, menor será o valor da transmitância e camada será óticamente bastante espessa. Em termos práticos tem-se que uma unidade da espessura ótica corresponde a uma transmitância de aproximadamente 37%.

No caso do Modelo 5S tem-se, segundo Tanré et al. (1986), que a espessura ótica da atmosfera (τ) é a soma da espessura ótica dos aerossóis (τ_{aer}) com a dos gases (τ_{gas}), ou seja,

$$\tau = \tau_{aer} + \tau_{gas} \quad (\text{B.9})$$

onde:

$$\tau_{gas} = \lambda^{-4,09} \quad (\text{B.10})$$

por causa da teoria utilizada para descrever o espalhamento devido aos gases, que se baseia no fato que as moléculas de ar tem um raio pequeno, algo em torno de 10^{-4} μm , em comparação com os comprimentos de onda λ .

B.7. Coeficientes de Calibração

A tabela B.1 apresenta os valores do coeficiente de calibração A e do "Offset", para as bandas temáticas dos satélites Landsat-TM, SPOT-HRV e NOAA-AVHRR, que são utilizados no SCORADIS:

Tabela B.1 - Coeficientes de calibração e "Offset" (Parte I)

Satélite	Banda	A	Offset
Landsat	TM1	1,341 ²	2,26 ¹
	TM2	0,689 ³	2,22 ¹
	TM3	0,919 ³	2,37 ¹
	TM4	1,091 ³	2,36 ¹
	TM5	7,502 ²	3,14 ¹
	TM7	16,535 ²	3,44 ¹

Tabela B.1 - Coeficientes de calibração e "Offset" (Parte II)

Satélite	Banda	<i>A</i>	<i>Offset</i>
SPOT	XS1	0,500 ³	0,00 ³
	XS2	0,316 ³	0,00 ³
	XS3	0,525 ³	0,00 ³
NOAA	AVHRR1	1,780 ³	0,00 ³
	AVHRR2	2,260 ³	0,00 ³

sendo ¹ Slater (1987), ² Gu (1990) e ³ Gu (1991).

BIBLIOGRAFIA

- Atzberger, C., 1990; *Integration de Mesures de Trouble Atmosphérique dans un Modèle de Correction Atmosphérique des Données du Satellite SPOT*, Certificat d'Université de Télédetection, Montpellier, 46p.
- Atzberger, C., Guérif, M., Gu, X.F., 1991; Estimation of the Aerosol Optical Thickness from Broadband Turbidity Measurements -Application to the Atmospheric Correction of SPOT Images, *Colloque International de Signatures Spectrales d'Objets en Télédetection*, Courchevel, 14-18 janeiro 1991, Ed. ESA SP-319:37-40.
- Baret, F., 1986; *Contribution au suivi radiométrique de cultures de cereales*. Tese de Doutorado, Paris, 186p.
- Biggar, S.F., Gellman, D.I., Slater, P.N., 1990; Improved Evaluation of Optical Depth Components from Langley Plot Data, *Remote Sensing of Environment* 32:91-101.
- Bowker, D.E., Davis, R.E., Myrick, D.L., Stacy, K., Jones, W.T., 1985; Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing, *NASA Reference Publication* N° 1139, 184p.
- Campbell, G.S., 1977; *An Introduction to Environmental Biophysics*, New York, Springer-Verlag, 159p.
- Carpenter, G.A., Grossberg, S., 1987; ART2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns, *Applied Optics* 26, 4919-4930.
- Deschamps, P.Y, Herman, M., Tanré, D., 1981; Influence de l'atmosphère en télédetection des ressources terrestres. Modélisation et possibilités de correction. *Colloque International de Signatures Spectrales d'Objets en Télédetection*, Avignon, 8-11 setembro 1981, Les Colloques de l'INRA N° 5, Ed. INRA Publ. Paris: 543-558.
- Duggin, M.J., Cunia, T., 1983; Ground Reflectance Measurement Techniques: a Comparison, *Applied Optics* 22(23), 3771-3777.

- Fraser, R.S., Bahethi, O.P., Al-Abbas, A.H., 1977; The effect of the Atmosphere on the Classification of Satellite Observations to Identify Surface Features, *Remote Sensing of Environment* 6:229-249.
- Gu, X.F., 1990; *Comunicação Pessoal*.
- Gu, X.F., 1991; *Étalonnage et Intercomparaison des Données Satellitaires en Utilisant le Site Test de La Crau*. Tese de Doutorado, Université Paris VII, 260p.
- Gu, X.F., Guyot, G., 1994; Interest of Radiometric Corrections for Environmental Monitoring, *International Symposium on Resource and Environmental Monitoring - ECO-RIO 1994*, Rio de Janeiro 26-30 setembro 1994.
- Gu, X.F., Guyot, G., Verbrugge, M., 1990; Evaluation of Measurement Errors on the Reflectance of "La Crau", the French SPOT Calibration Area, *Proceedings of the 10th EARSEL Symposium*, Toulouse 5-8 junho 1990, 121-133.
- Guyot, G., 1989; *Signatures Spectrales des Surfaces Naturelles*, Caen, Paradigme, 178p.
- Guyot, G., Seguin, B., 1988; Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. *Agronomie* 8(1),1-13.
- Jackson, R.D., Slater, P.N., Pinter, P.J.Jr., 1983; Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices Through Clear and Turbid Atmospheres, *Remote Sensing of Environment* 13:187-208.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W., 1982; *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice-Hall, New-Jersey, 594p.
- Kaufman, Y.J., 1985; The Atmospheric Effect on the Separability of Field Classes Measured from Satellites, *Remote Sensing of Environment* 18:21-34.
- Lazutim, L., 1993; *Comunicação pessoal*.
- London, J., Bojkov, R.J., Oltmans, S., Kelley, J.I., 1976; Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967. *NCAR Technical Note* N° 113+STR.

- McClatchey, R.A., Fenn, R.W., Selby, J.E.A., Volz, F.E., Garing, J.S., 1971; *Optical properties of the atmosphere*, AFCRL-TR-71-0279, Environment Research Paper, N° 354, L.G. Hancock Field, Bedford, Massachusetts.
- Moran, M.S., Jackson, R.D., Slater, P.N., Teillet, P.M., 1991; Comparison of atmospheric correction procedures for visible and near-ir satellite sensor output, *Colloque International de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Courchevel, 14-18 janeiro 1991, Ed. ESA SP-319:7-12.
- Neckel, H., Labs, D., 1984; The solar radiation between 3.300 and 12.500 Ångström. *Solar Physics* 90:205-258.
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W., Limperis, T., 1977; *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*, National Bureau of Standards, USA.
- Novo, E.M.L.M., 1989; *Sensoriamento Remoto-Princípios e Aplicações*, Editora Edgard Blücher Ltda., 308p.
- Pao, Y.H., 1989; *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*, Addison-Wesley, 309p.
- Perdiz, V.A., 1990; Reflectância: Teoria Geral e Uso da Esfera Integradora, *VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Manaus, 476-484.
- Potter, J.F., 1975; Haze and Sun Angle Effects on Automatic Classification of Satellite Data-Simulation and Correction, *Proceedings of the SPIE* 51, 73-83.
- Qi, J., Huete, A.R., Moran, M.S., Chehbouni, A., Jackson, R.D., 1993; Interpretation of Vegetation Indices Derived from Multi-temporal SPOT Images, *Remote Sensing of Environment* 44:89-101.
- Quenzel, H., 1983; Scattering, Absorption, Emission and Radiative Transfer in the Atmosphere, *Optical Remote Sensing of Air Pollution*, Ispra, 12-15 abril 1983, Elsevier Science Publishers:1-25.
- Robinson, N., 1966; *Solar Radiation*, Haifa, Israel, Elsevier, 347p.

- Rocha, J.V., 1992; *The influence of ground survey size on accuracy of area estimates from satellite images*. Tese de Doutorado, Silsoe College, 244p.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., 1974; *Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Nasa/GSFC TYPE III, Final Report*, Greenbelt, MD, PP371.
- Roux, M., 1985; *Algorithmes de Classification*, Masson, 151p.
- Slater, P.N., 1980; *Remote Sensing-Optics and Optical Systems*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 575p.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Holm, R.G., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.S., Palmer, J.M., Yuan, B., 1987; *Reflectance and Radiance-based Methods for the In-Flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors. Remote Sensing of Environment*, 22:11-37.
- Steffen, C.A., 1989; *Reflectância, Nota Técnica LARAD Nº 1/89*, INPE, 10p.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y., 1985; *Effets Atmosphériques en Télédétection - Logiciel de Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire. Colloque International de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Les Arcs, 16-20 dezembro, Ed. ESA SP-247:315-319.
- Tanré, D., Deroo, C., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y., 1986; *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. User's Guide*, L.O.A., Lille, 264p.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y., 1990; *Description of a Computer Code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S Code. Int.J.Remote Sensing*, 11(4):659-668.
- Tucker, C.J., 1979; *Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment* 8:127-150.

- Turner, R.E., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Thomson, F.J., 1974; Influence of the Atmosphere on Remotely Sensed Data, *Proceedings of the SPIE* 51, 101-114.
- Vianello, R.L., Alves, A.R., 1991; *Meteorologia Básica e Aplicações*, Viçosa, Imprensa Universitária, 449p.
- WMO (World Meteorological Organization), 1986; A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. *World Climatic Program*, WCP-112, WMO/TD-Nº 24.
- Zibordi, G., Melloni, G.P., 1991; Correction of Bihemispherical Reflectance Measurements for Noncosine Response of 2π Steradian Optics: A Methodology and Its Application to Antarctic Surfaces, *Remote Sensing of Environment* 37:55-62.
- Zullo, J. Jr., Arruda, F.B., 1987; Programa Computacional para Ajuste de Equações em Dados Experimentais, *Boletim Técnico* Nº 113, Campinas, Instituto Agrônômico, 31p.
- Zullo, J. Jr., Bezerra, P.C., 1993; Correção Atmosférica de Imagens de Satélite Utilizando o 5S, *VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, 7p.
- Zullo, J. Jr., Gu, X.F., Guyot, G., 1994a; Estimation de l'épaisseur optique des aérosols à partir de la mesure de l'éclairement spectral global, *Colloque International de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Val d'Isère, 17-21 janeiro 1994, 173-178.
- Zullo, J. Jr., Guyot, G., Gu, X.F., Bezerra, P.C., 1994b; Importância da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação a partir de imagens de satélite, *XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Campinas, 18-21 julho, 12p.

RESUMO

A utilização das informações captadas pelos satélites é cada vez mais importante e imprescindível nos vários campos da atividade humana. A relação entre os valores digitais das imagens e a reflectância ou a radiância das superfícies observadas é afetada pelas perturbações próprias do sensor, pelos efeitos devido à presença da atmosfera e pelo perfil do relevo terrestre.

O trabalho apresentado nesta dissertação contribui para uma utilização efetiva e mais confiável do sensoriamento remoto nas aplicações práticas, através de uma melhoria da qualidade das imagens proporcionada pela remoção dos efeitos atmosféricos existentes nelas. Por melhoria entende-se uma maior representatividade do estado real das superfícies terrestres proporcionado pelas imagens corrigidas em relação às imagens originais. O trabalho abrangeu todas as etapas envolvidas na correção atmosférica: obtenção e tratamento dos dados de entrada no modelo de correção atmosférica, processamento das imagens, análise dos resultados obtidos considerando a influência da correção em tratamentos padrões realizados com as imagens.

O sistema computacional SCORADIS, desenvolvido como parte do trabalho, destina-se à correção atmosférica das imagens, simulação do sinal recebido pelo satélite a partir da superfície terrestre e à remoção dos efeitos da vizinhança terrestre. A base deste sistema é o modelo de transferência radiativa 5S, desenvolvido pelo Laboratório de Ótica Atmosférica de Lille (França).

A coleta de dados em campo recebeu uma atenção muito especial para que se conhecesse, na prática, os diversos fenômenos físicos que atuam na formação das imagens pelos satélites. Uma contribuição decorrente do trabalho experimental é a metodologia de determinação da espessura ótica dos aerossóis a partir dos dados de radiação solar global. Verificou-se, na prática, que o modelo denominado de tropical pelo 5S representou adequadamente as condições de clima tropical em que foram feitos os trabalhos.

Todas as melhorias individuais feitas nas imagens são importantes nos resultados finais dos processamentos feitos a partir delas, tais como o cálculo do índice de vegetação e a classificação automática de padrões. A atmosfera, embora não seja o único efeito perturbador das imagens de satélite, deve ser considerada principalmente no tratamento de imagens multitemporais.