



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

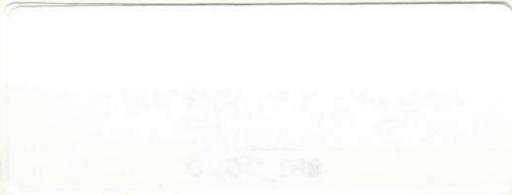
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

**CORREÇÃO ATMOSFÉRICA EM IMAGENS LANDSAT CONTAMINADAS
POR EFEITO DE ADJACÊNCIA**

Morgana Lígia de Farias Freire

Campina Grande / Paraíba

Dezembro de 1996



Morgana Lúgia de Farias Freire

CORREÇÃO ATMOSFÉRICA EM IMAGENS LANDSAT CONTAMINADAS
POR EFEITO DE ADJACÊNCIA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Meteorologia da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências para a
obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Radiação na Atmosfera e Sensoriamento Remoto

Orientador: Eduardo Jorge de Brito Bastos

Co-orientador: Tantravahi Venkata Ramana Rao

Campina Grande / Paraíba

Dezembro de 1996



F866c Freire, Morgana Lígia de Farias.
Correção atmosférica em imagens landsat contaminadas por efeito de adjacência / Morgana Lígia de Farias Freire. - Campina Grande, 1996.
98 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

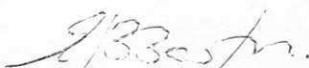
1. Radiação da Atmosfera. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Correção Atmosférica. 4. Dissertação - Meteorologia. I. Bastos, Eduardo Jorge de Brito. II. Rao, Tantravahi Venkata Ramana. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

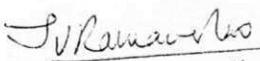
CDU 551.508.85(043)

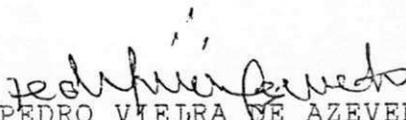
CORREÇÃO ATMOSFÉRICA EM IMAGENS LANDSAT CONTAMINADAS POR EFEITO
DE ADJACÊNCIA.

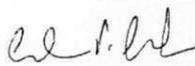
MORGANA LÍGIA DE FARIAS FREIRE

DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM 10/12/96


EDUARDO JORGE DE BRITO BASTOS
Orientador


TANTRAVAHÍ VENKATA RAMANA RAO
Co-Orientador


PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Membro


ARTÊMIO PLANA FATTORI
Membro

CAMPINA GRANDE
DEZEMBRO - 1996

*A minha mãe Maria José,
minha avó Trifina, e meu avô
José Costa (In Memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Eduardo Jorge de Brito Bastos, pela imprescindível orientação, pelo apoio e pelos incentivos recebidos.

Ao Dr. Tantravahi Venkata Ramana Rao, pela orientação e apoio recebido.

Ao Dr. Artêmio Plana Fattori, pelas sugestões de grande utilidade para realização dessa pesquisa.

Ao Dr. Juan Carlos Ceballos, pelos incentivos recebidos.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas pelo carinho e convivência.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), pelo fornecimento de dados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo

Ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal da Paraíba que, através da Coordenação de Pós-Graduação em Meteorologia permitiu a realização desse trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em particular, a Divisão de Meteorologia por Satélite (DMS), pelo apoio e acolhimento durante o período de permanência na instituição; a Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), que permitiu cursar a disciplina "Comportamento Espectral de Alvos"; e, ao Laboratório de Radiometria (LARAD), pelo processamentos dos dados de reflectância.

Aos meus amigos, companheiros de incontáveis momentos, pelo apoio e incentivos recebidos, que chegar até aqui sem vocês teria sido mais difícil.

A minha família, pela confiança, pela colaboração e constante incentivo.

RESUMO

Neste trabalho é implementado um modelo físico de correção atmosférica que considera a influência da adjacência na reflectância aparente do alvo, para avaliar os efeitos da composição molecular e de aerossóis em imagens de satélite. O modelo simula o sinal detectado pelo sensor como uma função de sucessivas ordens da interação da radiação solar com o sistema terra-atmosfera. O modelo foi aplicado a imagens LANDSAT-5 TM, para "pixels" do açude de São Gonçalo, localizado no interior do Estado da Paraíba. O efeito de adjacência é computado através da reflectância da superfície adjacente (vegetação+solo) e de funções relacionadas com o tamanho do alvo. Os parâmetros ópticos dos aerossóis (fator de assimetria, albedo de espalhamento simples) foram retirados da literatura, exceto a profundidade óptica, que foi avaliada através de dados piranométricos. Diferentes métodos de solução da Equação de Transferência Radiativa (ETR) e funções de fase dos aerossóis foram utilizados para determinar a reflectância intrínseca da atmosfera. O modelo é discutido através da comparação com dados de reflectância medidos "in situ". Diante das análises dos resultados, elegeu-se um "Single Scattering" para determinar a reflectância da atmosfera, e a aproximação dupla de Henyey-Greenstein para a função de fase dos aerossóis. Os valores de reflectância correspondente a água (açude de São Gonçalo) obtidos pelo modelo, foram satisfatórios, e demonstraram claramente a influência da adjacência. O modelo também foi empregado para simular a reflectância planetária detectada pelos sensores, considerando vários alvos característicos da região de estudo. Os resultados demonstram que a atmosfera é predominante em alvos de baixa reflectância, mesmo onde os valores de profundidade óptica dos aerossóis são muito baixos; o contrário acontece em alvos de média reflectância, onde a reflectância predominante é a do alvo.

551.508.85

ATMOSPHERIC CORRECTION IN THE LANDSAT IMAGERY
CONTAMINATED BY THE BACKGROUND EFFECT

ABSTRACT

A physical model of atmospheric correction which considers the influence of background contamination on the apparent reflectance of a target, is implemented to evaluate the effects of molecular composition and aerosols in the satellite imagery. The model simulates the signal detected by the sensor as a function of successive orders of interaction of the solar radiation with the earth-atmosphere system. It was applied to the images TM of LANDSAT-5, for the pixels on São Gonçalo reservoir, which is located in the interior of the State of Paraíba. The effect of the adjacency is computed from the reflectance of the surface background (vegetation + soil) and the functions related to the size of the target. The aerosol's optical parameters (asymmetry factor, single scattering albedo) were obtained from the literature. The optical depth is evaluated through the pyranometer data. Different methods of solution of the Equation of Radiative Transfer (ETR) and, the aerosol's phase functions were utilized to determine the intrinsic reflectance of the atmosphere. The model is discussed by comparison with the reflectance data measured "in situ". From the analyses of the results, the single scattering model used to determine the atmospheric reflectance with the two-term approximation of Henyey-Greenstein for the phase function of the aerosols, were selected. The reflectance values of water evaluated for São Gonçalo reservoir were satisfactory and they show clearly the background influence. The model was also employed to simulate the planetary reflectance detected from the sensors, considering the different characteristic targets of the region under study. The results show that the atmospheric reflectance is predominant for low reflectance targets and it is true even in the case of lower values of the aerosol's optical depth. Exactly the opposite occurs in the case of the medium reflectance targets where the predominant reflectance is that of the target.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
CAPÍTULO 1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	01
CAPÍTULO 2 - <u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	03
CAPÍTULO 3 - <u>MÉTODOS DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA</u>	11
3.1 - Métodos Alternativos.....	11
3.1.1 - Método do Histograma Mínimo	11
3.1.2 - Método da Interseção em Y	12
3.1.3 - Método da Regressão Linear.....	14
3.2 - Método Físico.....	16
3.3 - Análise dos Métodos.....	17
CAPÍTULO 4 - <u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA I: MÉTODO FÍSICO</u>	18
4.1 - Método Físico de Correção Atmosférica	18
CAPÍTULO 5 - <u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA II: PROCESSOS RADIATIVOS</u> <u>DO SISTEMA TERRA-ATMOSFERA</u>	27
5.1 - Propriedades Ópticas da Atmosfera.....	27
5.1.1 - Espalhamento Atmosférico.....	27
5.1.1.1 - Espalhamento Molecular	28
5.1.1.2 - Espalhamento por Aerossóis	31
5.1.2 - Absorção Gasosa.....	35
5.1.3 - Funções de Transmissão Difusa	36
5.1.4 - Albedo Esférico da Atmosfera.....	36

5.1.5 - Reflectância da Atmosfera.....	37
5.2 - Propriedades Ópticas da Superfície	41
5.2.1 - Comportamento Espectral de Alvos	41
5.2.2 - Reflectância do Alvo	43
5.2.2.1 - Água.....	43
5.2.3 - Reflectância da Vizinhança.....	45
5.2.3.1 - Vegetação.....	45
5.2.3.2 - Solo.....	47
CAPÍTULO 6 - <u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	49
6.1 - Dados Disponíveis	49
6.1.1 - Imagens de Satélite	49
6.1.2 - Dados Experimentais	53
6.1.2.1 - Reflectância Espectral Bidirecional.....	53
6.1.2.2 - Dados de Radiação Global e Difusa	55
6.1.2.3 - Pressão à Nível da Superfície	56
6.2 - Implementação do Modelo	57
6.3 - Aplicação do Modelo	61
CAPÍTULO 7 - <u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	62
7.1 - Aplicação à Atmosfera Rayleigh.....	62
7.2 - Testes dos Métodos de Determinação da Reflectância da Atmosfera	64
7.3 - Correção Atmosférica com Efeito de Adjacência	71
7.4 - Análise do Efeito de Adjacência	73
7.5 - Simulação da Reflectância: Sistema Terra-Atmosfera	75
7.5.1 - Reflectância Planetária	75
7.5.2 - Reflectância Detectada pelo Sensor.....	80
CAPÍTULO 8 - <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u> ..	86
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	89

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Histograma correspondente a uma imagem bruta.....	12
3.2 - Histograma de uma imagem corrigida.....	12
3.3 - Representação gráfica da radiância (L^*) versus reflectância (ρ)	14
3.4 - Representação gráfica de uma banda genérica j sobre a banda do canal 4.....	16
4.1 - Esquema das contribuições da reflectância detectada pelo sensor.....	22
4.2 - Funções de vizinhança Rayleigh (F^R) e de aerossóis (F^a).....	24
5.1 - Curva da reflectância espectral bidirecional para o açude de São Gonçalo, no Estado da Paraíba.....	44
5.2 - Curva da reflectância espectral bidirecional para a vegetação (caatinga) em torno do açude de São Gonçalo, no Estado da Paraíba.....	46
5.3 - Curva de reflectância espectral do solo.....	48
6.1 - Imagens do açude de São Gonçalo no canal 1 do sensor TM do satélite LANDSAT-5	51
6.2 - Fluxograma das opções propostas para o cálculo de reflectância da atmosfera	58
6.3 - Fluxograma da implementação do modelo de correção atmosférica com efeito de adjacência (MCA-CA).....	60
7.1 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é a água.....	77
7.2 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é a vegetação.....	77
7.3 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é o solo	78
7.4 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação.....	78
7.5 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+solo .	79

7.6 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de vegetação+solo	79
7.7 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação+solo	80
7.8 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é a água	82
7.9 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é a vegetação	82
7.10 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é o solo	83
7.11 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação	83
7.12 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+solo	84
7.13 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de vegetação+solo	84
7.14 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação+solo	85

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
6.1 - Características espectrais do sensor TM (LANDSAT).....	50
6.2 - Coeficientes de calibração para bandas espectrais do sensor TM.....	52
6.3 - Valores de reflectância correspondentes a verdade terrestre.....	55
6.4 - Valores e desvios da profundidade óptica dos aerossóis para bandas do TM...	56
7.1 - Valores de reflectância do sensor, da atmosfera e da vizinhança para o alvo 6 considerando uma atmosfera Rayleigh	63
7.2 - Valores de reflectância do sensor, da atmosfera e da vizinhança para o alvo 7 considerando uma atmosfera Rayleigh	64
7.3 - Valores de reflectância do sensor, da atmosfera e da vizinhança para o alvo 6 considerando uma atmosfera de ar e aerossóis	66
7.4 - Valores de reflectância do sensor, da atmosfera e da vizinhança para o alvo 7 considerando uma atmosfera de ar e aerossóis	67
7.5 - Valores de reflectância do alvo para os alvos 6 e 7	69
7.6 - Valores de reflectância do alvo para vários percentuais de solo e vegetação da vizinhança, aplicados aos alvos 6 e 7.....	70
7.7 - Valores de reflectância da atmosfera, do sensor e do alvo obtidos pelo MCA-CA para vários alvos sobre à água	72
7.8 - Valores de reflectância do alvo quando não se considera o efeito de adjacência e das percentagens de contribuição do alvo e da vizinhança sobre à água.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

- a** - Constante de calibração ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1} count^{-1}$), índice (aerossol)
- b** - Constante de calibração, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
- f** - Peso da delta de Dirac em aproximação delta da função de fase do aerossol
- f'** - Peso da delta de Dirac em aproximação delta da função de fase da mistura de ar + aerossóis.
- F** - Função de vizinhança
- g** - Fator de assimetria da função de fase
- g₁, g₂** - Fatores de assimetria associada a função de fase dupla de Henyey-Greentein
- g*** - Fator de assimetria da função de fase remanescente
- L'** - Radiância detectada pelo sensor quando os efeitos de absorção gasosa não são incluídos, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
- L*** - Radiância detectada pelo sensor, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
- P_a** - Função de fase do aerossóis
- P_o** - Pressão atmosférica ao nível médio do mar, mb
- P_R** - Função de fase Rayleigh
- P** - Pressão atmosférica em um dado nível, mb
- \tilde{P}^*** - Função de fase remanescente para mistura
- r** - Raio do alvo, km
- R** - Índice associado aos parâmetros Rayleigh
- S** - Albedo esférico da atmosfera
- S_o** - Constante solar, $W m^{-2} \mu m^{-1}$
- t_d** - Transmitância difusa
- t_g** - Transmitância gasosa
- T** - Transmitância
- Z** - Ângulo zenital do satélite
- Z_o** - Ângulo zenital do sol

Z^* - Ângulo de dispersão

Gregos

- α - Parâmetro “peso” associado a função de fase dupla de Henyey-Greentein
- δ - Fator de depolarização
- λ - Comprimento de onda, μm ou nm
- μ - Cosseno do ângulo zenital do satélite
- μ_0 - Cosseno do ângulo zenital do Sol
- μ^* - Cosseno do ângulo de dispersão
- ρ - Reflectância do alvo quando o efeito de adjacência não é considerado
- ρ^{alvo} - Reflectância do alvo
- ρ^{atm} - Reflectância intrínseca da atmosfera
- ρ^{viz} - Reflectância da região adjacente ao alvo (vizinhança)
- ρ' - Reflectância detectada pelo sensor quando os efeitos de absorção gasosa não são incluídos
- ρ° - Reflectância detectada pelo sensor
- $\langle\rho\rangle$ - Reflectância média
- τ - Espessura óptica vertical ou profundidade óptica
- ϕ - Ângulo azimutal do satélite
- ϕ_0 - Ângulo azimutal do Sol
- ω - Albedo de espalhamento simples

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto fundamenta-se na identificação e discriminação entre alvos, em que a radiância detectada por um sensor é a base do processo. O mecanismo de aquisição de dados seria ideal se os conteúdos espectral e temporal da informação sempre permanecessem inalterados. Todavia, isto não ocorre, pois entre o sensor e a superfície há um meio extremamente dinâmico, a atmosfera, que interage com a radiação eletromagnética. Tal interação provoca alterações na propagação do fluxo de radiação proveniente de um alvo. Como consequência desse processo de interação, a distribuição de radiância da superfície observada por um sensor espacial é diferente da radiância intrínseca da superfície. Esse efeito tem mostrado que os dados obtidos através de sensores remotos são apenas aparentes, o que afeta diretamente as aplicações do sensoriamento remoto à Meteorologia e aos Recursos Naturais.

A reflectância espectral é um elemento do comportamento espectral de cada feição da superfície. Os fatores que influenciam a determinação da reflectância e, conseqüentemente, as características espectrais, são a geometria de aquisição dos dados, os parâmetros relativos ao alvo, os quais incluem-se o efeito de adjacência (vizinhança), e os parâmetros atmosféricos tais como: umidade atmosférica, concentração e tipo de aerossóis, pressão à superfície, cobertura de nuvens, etc. (Bokwer et al., 1985; Novo, 1992).

A reflectância obtida através de sensores aéreos ou orbitais é alterada principalmente devido aos efeitos atmosféricos. Os principais fatores atmosféricos que causam a perda de nitidez na imagem e a deformação do brilho superficial são o espalhamento molecular, o espalhamento por aerossóis e a absorção pelos gases atmosféricos. Além disso, os efeitos causados por objetos próximos ao alvo podem também contaminar o sinal detectado pelos sensores, devido à interação da radiação

proveniente da vizinhança do alvo com a atmosfera. Para tal, o sensor TM (Thematic Mapper) a bordo do satélite da série LANDSAT que possui uma alta resolução da superfície da terra, é muito propício.

Na determinação das propriedades de alvos através do sensoriamento remoto por satélite, deve-se incluir as interferências produzidas pela atmosfera. Para isso, é necessário conhecer as propriedades ópticas e os processos de interação da radiação solar com a atmosfera. Deste modo, pode-se desenvolver métodos que se baseiam na transferência radiativa, capazes de corrigir os efeitos produzidos pela atmosfera nos dados de imagens.

Sendo assim, com a finalidade de uma melhor identificação, discriminação e estudo das propriedades físicas, químicas e biológicas de alvos naturais através de imagens de satélites, esse trabalho tem como objetivo adaptar o método físico desenvolvido por Tanré et al. (1986) e Vermote (1990) em alvos de baixa reflectância como a água, para remoção dos efeitos produzidos pela atmosfera em imagens de satélite LANDSAT-5 TM, contaminadas pelo efeito de adjacência.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em estudos do comportamento espectral de alvos admite-se que a reflectância dos objetos é um indicativo de suas propriedades químicas e físicas, não considerando os efeitos da atmosfera (Gilbert et al., 1994), o que gera dificuldades para o Sensoriamento Remoto (Slater, 1980; Aranuvachapun, 1986; Chuvieco, 1990 e Soufflet et al., 1991).

Além de filtrar os efeitos atmosféricos para avaliar parâmetros de superfície, o Sensoriamento Remoto é também utilizado para estimar parâmetros da atmosfera, desde que se conheça as propriedades radiativas de alvos. Este último aspecto tem sido empregado para estimativa da espessura óptica dos aerossóis, por Tanré et al. (1988), para dados do TM do satélite LANDSAT-5; Aranuvachapun (1986) e Franca & Cracknell (1992), para dados do CZCS do satélite NIMBUS-7; e Holben et al. (1992), para dados do AVHRR do satélite NOAA.

Nesse contexto, é relevante ressaltar o uso de satélites para estimativa e monitoramento de impactos ambientais em nível regional e global. Salientando que as propriedades de reflexão das superfícies naturais são importantes devido às suas influências no saldo de radiação à superfície e no processo de evaporação. Além disso, a reflectância superficial é utilizada em modelos de transferência radiativa, ou na determinação do albedo de superfícies, úteis para modelagem climática.

O objetivo das técnicas de correção atmosférica é reduzir o efeito da interferência sobre os valores de nível de cinza obtidos pela imagem de uma dada cena (Novo, 1992). Os métodos mais completos de correção atmosférica baseiam-se na teoria da transferência radiativa e são denominados de métodos físicos. Existem também aqueles simplificados que supõem a interferência da atmosfera como aditiva. Nestes métodos, assume-se que o valor mínimo de nível de cinza identificado em cada

banda representa a quantificação da interferência da atmosfera. Dessa forma, após a identificação desse valor, o nível de cinza é subtraído de toda a cena. Esses são denominados de métodos alternativos de correção atmosférica.

Existem ainda aproximações que utilizam informações do solo ou de superfície d'água, para obter a correção dos efeitos atmosféricos. Para tal, realiza-se uma seleção de locais de prova em que suas propriedades de reflectância são medidas "in situ", durante a passagem do satélite. Estas propriedades são utilizadas para deduzir a reflectância superficial de outros "pixels" da imagem.

Um exemplo da aplicação dessa aproximação é o trabalho de Mekler e Joseph (1983). Estes autores estabeleceram um método empírico para calcular a reflectância superficial a partir de imagens LANDSAT. O método é baseado na solução exata da equação de transferência radiativa para intensidade emergente, onde não é necessário o conhecimento de propriedades ópticas da atmosfera, e consiste em determinar a reflectância superficial de um ponto, desde que sejam conhecidas as reflectâncias de três pontos da imagem.

Uma outra solução alternativa é apresentada por Caselles e García (1989), que desenvolveram um método baseado na transferência radiativa, onde o efeito da perturbação atmosférica em duas diferentes imagens é estimada, tomando-se uma imagem como referência. Assim, o efeito atmosférico é determinado de modo relativo, pelo uso dos valores da reflectância aparente da superfície do solo, que são consideradas invariáveis com o tempo e, conseqüentemente, não são necessários dados de entrada.

Por sua vez, para estimar a reflectância da atmosfera são utilizadas outras aproximações, a partir da seleção de elementos escuros na imagem, tais como: lagos, rios, vegetação densa, etc., em que as propriedades de reflectância média sejam conhecidas. Segundo Gilabert et al. (1994), a maior parte dos modelos de transferência radiativa requerem dados de entrada que em geral não são facilmente

avaliados. Em virtude dessas dificuldades, eles propõem um método de correção atmosférica que é baseado em um modelo de transferência radiativa para avaliar a reflectância superficial em imagens LANDSAT-TM, mas que apenas requer "inputs" que são comumente avaliados (dados climatológicos) ou a existência de superfícies de baixa reflectância na imagem. A existência destas superfícies permite determinar a radiância produzida pela atmosfera, e assim, as propriedades ópticas dos aerossóis.

Zagolski e Gastellu-Etchegorry (1995) desenvolveram um algoritmo para correção de imagens AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer), incluindo o efeito de adjacência. A metodologia é baseada na inversão do modelo atmosférico 5S-Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (Tanré et al., 1986) através de um procedimento que utiliza o princípio de Gauss Seidel. As características ópticas da atmosfera são estimadas a partir da visibilidade e de medidas do perfil atmosférico dos constituintes responsáveis pela absorção e pelo espalhamento. Também, devido a variabilidade espacial dos aerossóis um procedimento foi desenvolvido para determinar a espessura óptica dos aerossóis diretamente a partir da imagem, neste caso, supõe-se que a presença de alvos escuros, como vegetação densa escura, ou superfícies d'água, são determinadas de um modo interativo.

O modelo 5S (Tanré et al., 1986) é um código de transferência radiativa bastante difundido na comunidade científica, cujo objetivo é a simulação de sinais de satélites ambientais (satélites meteorológicos e de satélites de recursos naturais, como LANDSAT-5), sua maior utilização tem sido para estimativa de radiação solar na superfície, para calibração vicária e para correção atmosférica (Bastos, 1994). Entretanto, a correção atmosférica não é realizada diretamente, mas sim executando-o para diferentes reflectâncias superficiais e diferentes modelos de aerossóis, as equações de correção são deduzidas através de análise de regressão linear (Lima, 1995). Neste caso, a atmosfera é empregada como a principal informação e sua presença é considerada através das propriedades ópticas de seus constituintes.

Ainda, Milovich et al. (1995) aplicaram a metodologia do 5S para determinar a reflectância da superfície e, particularmente, para avaliar a contribuição da reflectância da vizinhança tanto no nível do sensor, como na superfície da terra. A reflectância da vizinhança no nível do sensor é obtida usando um método numérico que estima a contribuição dos "pixels" vizinhos, tendo a imagem como fonte de informação. Daí, determina-se a reflectância da vizinhança no nível da superfície, usando os parâmetros ópticos da atmosfera. A idéia da função de vizinhança utilizada, é semelhante ao 5S; o método foi aplicado em imagem LANDSAT-5 MSS, sobre áreas urbanas, durante o inverno e o verão. A reflectância da atmosfera foi determinada assumindo um aerossol do tipo urbano com visibilidade de 20 km e com auxílio de perfis atmosféricos de latitudes médias para inverno e verão.

Diante do contexto, sugere-se toda uma metodologia de correção atmosférica, incluindo o efeito de adjacência quando se pretende quantificar estes efeitos na assinatura espectral de alvos. Uma expressão analítica da reflectância detectada pelo satélite para superfícies heterogêneas e não lambertiana é apresentada por Tanré et al. (1979), onde o efeito de adjacência é analisado através da reflectância da vizinhança e de uma função que depende da dimensão do alvo (Tanré et al., 1981). O efeito de adjacência é bem caracterizado por Tanré et al. (1981), sua importância é evidenciada por Slater et al. (1987), Arino et al. (1991) e Richter (1990).

Richter (1990) apresenta um método de correção atmosférica para imagens LANDSAT-5 TM, que utiliza o código LOWTRAN-7 (Kneizys et al., 1988). Este código pode ser usado para calcular a radiância detectada pelos sensores do satélite, ou para calcular a radiância proveniente da atmosfera, considerando a superfície como um corpo negro (reflectância nula). A determinação da reflectância da superfície baseia-se na obtenção da reflectância planetária para diferentes modelos de atmosfera, com vários tipos de aerossóis e espessuras ópticas, ou dados atmosféricos reais como os de radiossondagem. Neste caso, se a reflectância planetária obtida com o LOWTRAN é consistente com a obtida pela imagem, em cada banda espectral, são determinadas equações lineares que relacionam a reflectância superficial com a reflectância planetária. O efeito de adjacência é

computado de forma aproximada, considerando-se a média da reflectância dos “pixels” vizinhos, e uma função peso, a qual depende das transmitâncias direta e difusa.

Os trabalhos de Soufflet et al. (1991) e Tanré et al. (1992) aplicam correção atmosférica às imagens NOAA/AVHRR. Nestes trabalhos, a influência da atmosfera é avaliada para determinação do Índice de Vegetação Diferencial Normalizado (NDVI). O método apresenta uma equação geral que considera o efeito de adjacência, os efeitos atmosféricos de absorção, atenuação e espalhamento, e os efeitos da reflectância bidirecional nas bandas do espectro solar do sensor AVHRR. Segundo Tanré et al. (1992), devido à resolução espacial apresentada pelo sensor AVHRR do satélite NOAA, o efeito de adjacência pode ser desprezado na maioria de suas aplicações.

Um modelo atmosférico é um pré-requisito chave para a correção atmosférica de cenas, na medida que ele modela os efeitos atmosféricos e possibilita que os mesmos sejam considerados na correção de efeitos, topográficos, de iluminação e de geometria de visada. Uma maneira simplificada de correção atmosférica são os métodos que utilizam informações intrínsecas das próprias imagens. Estes métodos não se baseiam na transferência de radiação, eliminando-se assim a necessidade de dados auxiliares, tais como: perfil vertical do vapor d’água e aerossóis, composição molecular da atmosfera, etc. Todavia, suas limitações são devido à presença de alvos específicos, como corpos d’água nas imagens analisadas. Por outro lado, existem aqueles que convertem radiância em reflectância a partir de dados radiométricos das próprias imagens ou medidas “in situ” (Slater et al., 1987; Chavez 1989 e Hill & Aifadopoulou, 1990), sendo todos eles denominados de métodos alternativos de correção atmosférica.

Um caso particular de correção atmosférica a dados do sensor TM LANDSAT e do sensor AVHRR NOAA foram aplicados por Kaufman e Sendra (1988), e Popp (1995). O método de Kaufman e Sendra, é baseado na equação de transferência radiativa para correção atmosférica no espectro solar, e depende

unicamente das informações de imagens (alvos escuros) e da climatologia da área (características atmosféricas ou dados de superfície disponíveis). Já o método de Popp, é também baseado na transferência radiativa, mas inclui todos os processos de espalhamento múltiplo sem qualquer aproximação. Para correção das imagens são necessários a extração de dados auxiliares sobre o estado da atmosfera. O efeito de adjacência é caracterizado através de uma aproximação analítica, que representa a fração da radiação refletida pela vizinhança do alvo, a qual depende do tamanho do alvo e das condições atmosféricas: espessura óptica e escala de altura (Rayleigh e de aerossóis).

No âmbito nacional, algumas pesquisas foram desenvolvidas aplicadas apenas ao sensor TM do satélite LANDSAT-5. Com o objetivo de estimar a reflectância de alvos a partir da reflectância detectada pelo sensor, os primeiros resultados foram obtidos por Ceballos e Bastos (1988). Para tanto foi desenvolvido um modelo simples aplicado a uma atmosfera "limpa e seca", apesar da simplicidade da abordagem, estes autores obtiveram resultados consistentes com os de McClatchey et al. (1972), para uma condição de solo+vegetação.

Em seguida, Ribeiro (1992) efetua correção atmosférica, utilizando dados de radiossondagem e o código LOWTRAN-6 (Kneizys et al., 1983) para calcular a transmitância atmosférica. O LOWTRAN constitui-se de um modelo de transferência radiativa que no espectro solar restringe-se a determinação da transmitância (fator fundamental em correção atmosférica) e da radiância emergente da atmosfera devido ao espalhamento atmosférico (ar e aerossóis), não considerando os efeitos da interação da radiação solar com o alvo. Este autor, em seu trabalho, fez uma avaliação qualitativa dos resultados obtidos, pois a idéia básica era apenas remover o efeito de névoa, causado pelo espalhamento atmosférico, onde observou um aumento de contraste entre a imagem bruta e a imagem corrigida.

A aplicabilidade do método alternativo desenvolvido por Chavez (1988, 1989), foi avaliado por Chen et al. (1995), para região Amazônica. O método baseia-se na determinação dos valores de correção para todas as bandas espectrais, de

acordo com o nível de aerossóis da banda inicial e um modelo de espalhamento pré-selecionado. Neste caso, os valores de correção são correlacionados entre as bandas conforme o modelo escolhido. Os resultados demonstram que as contribuições dos aerossóis em relação à banda inicial (banda 1) foram bastantes divergentes, comparando-se com os modelos de espalhamento sugeridos por Chavez. Apesar de ser uma abordagem aperfeiçoada do método do histograma mínimo, obteve-se uma “super correção atmosférica” para as bandas do TM independentemente do modelo de espalhamento escolhido, devido aos efeitos de espalhamento serem simplificados para região tropical.

Mais recentemente, Lima (1995) utilizou um modelo de dispersão de primeira ordem proposto por Ceballos e Bastos (1988) aplicados a alvos homogêneos, não considerando os efeitos de sua vizinhança, para determinar a reflectância da superfície a partir de imagens. A estrutura básica do modelo consiste num esquema de duas camadas, sendo a camada superior composta apenas de ar e a camada inferior composta de ar+aerossóis (camada limite planetária). O método utilizado foi o de dois fluxos, e os seus resultados demonstram ser coerentes com aqueles observados por Bowker et al. (1985).

Por outro lado, Freire e Bastos (1996) aplicaram o método proposto por Tanré et al. (1986) considerando um atmosfera Rayleigh, para isso, foram delimitados vários alvos sobre uma superfície aquática, e os valores de reflectância da água obtidos pelo modelo variaram com o tamanho do alvo, apresentando grandes diferenças quando comparados aos dados de verdade terrestre. Esta variação na reflectância com o tamanho do alvo evidencia o efeito de adjacência, cuja vizinhança possuía uma reflectância muito maior do que a superfície aquática. Também foi realizada uma simulação da reflectância do alvo em função do tamanho do alvo, onde os valores de reflectância obtidos aproximam-se dos valores obtidos “in situ”, quando o raio do alvo assume valores superiores a 10 km.

Em resumo, a maioria dos métodos alternativos abordados sugerem a presença de alvos sombrios, tendo a água como referência, para que seja estimada a

influência da atmosfera e/ou espessura óptica dos aerossóis. Porém, neste trabalho como a superfície de estudo é água então será utilizado um modelo físico, baseado no 5S (Tanré et al., 1986), onde a espessura óptica vertical dos aerossóis é obtida “in situ”, e os demais parâmetros ópticos retirados da literatura. Por esse motivo, utiliza-se um modelo de correção atmosférica baseado na teoria de transferência radiativa, cuja finalidade é alcançar padrões de reflectância mais precisos.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

3.1 - MÉTODOS ALTERNATIVOS

Uma maneira simplificada de correção dos efeitos atmosféricos é o uso de métodos que utilizam informações intrínsecas das próprias imagens. Estes métodos, denominados de métodos alternativos, utilizam “pixels” que são representativos das feições específicas. Apesar de terem suas limitações, são correções que não dependem de parâmetros atmosféricos ou de dados da superfície, e sim das informações da própria imagem para determinar a contribuição da atmosfera em cada banda espectral.

3.1.1 - MÉTODO DO HISTOGRAMA MÍNIMO

O método do histograma mínimo é o mais simples, e está baseado na análise de imagens multiespectrais que contém corpos d'água, sombras devido a topografia ou outras feições de baixa reflectância, que garantem a existência de áreas com reflectâncias iguais ou muito próximas de zero, as quais são utilizadas como referencial. Então, os histogramas de uma imagem têm limites muito próximos da origem, porém, quando se analisa uma imagem as posições relativas estão deslocadas e tem-se uma imagem com pouca definição espacial (Figura 3.1).

A correção consiste na determinação dos menores níveis de cinza dos histogramas estatisticamente representativos, e considerá-los iguais a radiância da atmosfera. A seguir subtrai o valor encontrado de cada “pixel” dentro da sua respectiva banda espectral, e o resultado será o deslocamento para origem (Figura 3.2).

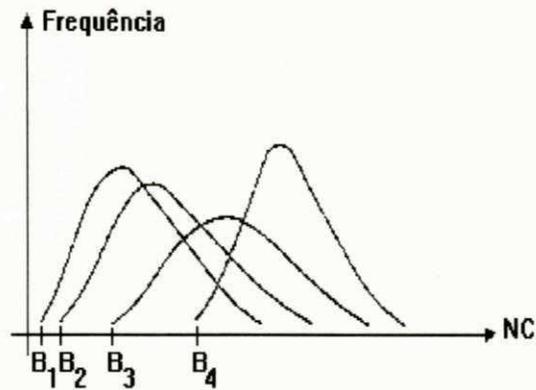


Fig. 3.1 - Histograma correspondente a uma imagem bruta.

Fonte: Ribeiro (1992), p. 41.

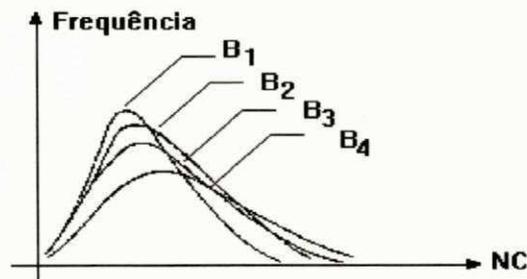


Fig. 3.2 - Histograma de uma imagem corrigida.

Fonte: Ribeiro (1992), p. 42.

3.1.2 - MÉTODO DA INTERSEÇÃO EM Y

Os métodos de correção atmosférica de imagens geralmente determinam a contribuição da atmosfera em termos de radiância. Entretanto, seu cálculo exige formulações complexas baseado na teoria de transferência radiativa. Assim sendo, o método da interseção em Y fundamenta-se na linearidade da equação da radiância, o que se obtêm:

$$L^* = (E_0 T / \pi) \rho + L^{atm}, \quad (3.1)$$

onde E_0 é a irradiância solar que atinge o topo da atmosfera, T é a transmitância atmosférica, ρ é a reflectância do alvo, L^{atm} é a radiância devido ao efeito da atmosfera e L^* é a radiância detectada pelo sensor ou a radiância aparente do alvo. A Equação (3.1) é uma solução aproximada da equação de transferência radiativa.

Admitindo-se que a relação $E_0 T/\pi$ e L^{atm} são constantes para toda a imagem numa determinada banda espectral, e que somente ρ possui valores distintos, então a Equação 3.1 pode ser representada da seguinte forma:

$$y = ax + b. \quad (3.2)$$

A representação gráfica desse procedimento é mostrada na Figura 3.3, onde pelo menos dois pontos (x, y) são conhecidos e satisfazem a Equação 3.2, sendo associados a ρ e L^* , respectivamente. A reta denominada canal x representa um conjunto de pontos da Equação 3.1 quando se relaciona a reflectância da superfície com números digitais. O coeficiente angular de cada reta (canal x e canal $x+1$) é dado por $E_0 T/\pi$ correspondendo ao valor de L^{atm} .

Para se calcular a variável ρ usa-se alvos diferentes com reflectâncias distintas, como a água limpa (baixo valor de ρ) e a areia (alto valor de ρ), e assim os valores de L^* são obtidos a partir de uma imagem multiespectral.

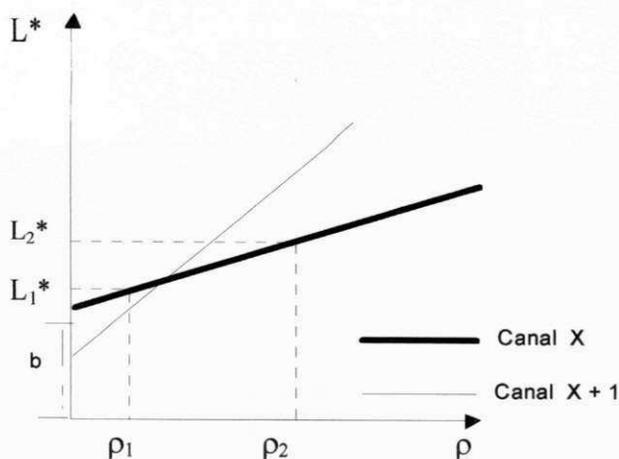


Fig. 3.3 - Representação gráfica da radiância (L^*) versus reflectância (ρ).

Quando usa-se a Equação 3.1 alguns aspectos são considerados: as superfícies são planas e horizontais, com comportamento isotrópico, e os parâmetros atmosféricos L^{atm} e T devem apresentar variações mínimas em toda imagem. Marsh (1978) citado por Ribeiro (1992), mostrou que o método permite excelentes concordâncias entre os valores de reflectância obtidos através de imagens digitais e a reflectância medida em campo, utilizando a técnica de conversão.

3.1.3 - MÉTODO DA REGRESSÃO LINEAR

Esse método utiliza a regressão linear das bandas do visível individualmente, sobre uma banda do infravermelho (canal 4 do TM), portanto, é uma adaptação do método da interseção em Y. O procedimento considera que não existe radiação contaminante na faixa do infravermelho próximo, e que há alta correlação linear entre as bandas consideradas.

Se a condição da correlação entre as bandas for satisfeita, e se a imagem contém amostras homogêneas, então pode-se estimar a radiância devido ao efeito da atmosfera L^{atm} , através de:

$$L^*(j) = L^{\text{alvo}}(j) + L^{\text{atm}}(j), \quad j = \text{canais } 1, 2 \text{ e } 3. \quad (3.3)$$

Se no canal 4 do TM a radiância L^{atm} é zero, tem-se:

$$L^*(4) = L^{\text{alvo}}(4) + 0. \quad (3.4)$$

Considerando que a informação é linearmente correlacionada entre a banda j e a banda 4, então:

$$L^{\text{alvo}}(j) = k L^{\text{alvo}}(4), \quad (3.5)$$

onde k é o coeficiente de regressão de uma determinada banda j do visível sobre a banda 4, que satisfaz a condição de linearidade.

Daí, de acordo com a Equação 3.5, a Equação 3.3 pode ser reescrita como:

$$L^*(j) = k L^{\text{alvo}}(4) + L^{\text{atm}}(j). \quad (3.6)$$

Graficamente, o procedimento relaciona valores dos “pixels” na banda do canal 4 com valores da outra banda considerada, como mostra a Figura 3.4. O aglomerado de pontos gerado na plotagem é ajustado pelo método de regressão linear, onde o valor de b que corta o eixo Y para o canal j representa a radiância da trajetória estimada para aquela banda particular.

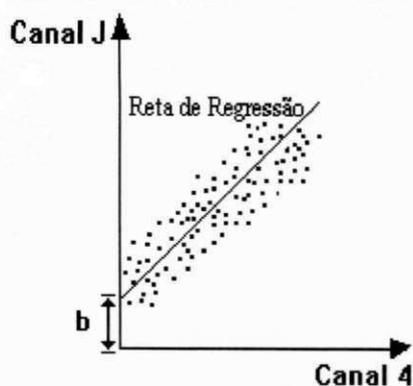


Fig. 3.4 - Representação gráfica de uma banda genérica j sobre a banda do canal 4.

3.2 - MÉTODO FÍSICO

A reflectância de um alvo detectada pelos sensores a bordo dos satélites é alterada não só por efeitos atmosféricos, mas também pelo efeito de adjacência (ou em torno, ou vizinhança, ou “background”). Em geral, as análises dos efeitos atmosféricos baseiam-se no princípio de que a superfície imageada é uniforme. Entretanto, isso tem sido um grande problema em superfícies que apresentam baixa reflectância, como a água, onde a influência da vizinhança é muito importante. Tanré et al. (1987) utilizou várias superfícies homogêneas e não-homogêneas, considerando a água como alvo. Entre as superfícies não homogêneas observadas, foi exibido o efeito de adjacência, nas áreas de pequenas dimensões rodeadas por uma vizinhança com um coeficiente de reflexão mais elevado, especialmente no infravermelho próximo.

Devido aos efeitos atmosféricos, que inclui o efeito de adjacência, o satélite não mede a reflectância espectral real do alvo, mas sim uma reflectância aparente. A reflectância aparente é a compostas por efeitos das reflectâncias do alvo, da atmosfera e da vizinhança do alvo.

Desse modo, pode-se desenvolver ou utilizar métodos que sejam capazes de corrigir os efeitos atmosféricos produzidos nos dados de sensoriamento remoto. O realismo das informações extraídas pelos sensores orbitais depende desta correção, e como consequência, torna-se fundamental o conhecimento das propriedades ópticas da atmosfera e do processo de interação da radiação com a atmosfera e a superfície. Assim, para que o modelo retrate a complexidade da atmosfera, é necessário a utilização de métodos físicos de correção fundamentados na teoria de transferência radiativa.

3.3 - ANÁLISE DOS MÉTODOS

Os métodos alternativos abordados não necessitam de informações dos parâmetros atmosféricos ou medições de superfícies, porém, suas limitações consistem na presença de alvos específicos nas imagens analisadas. Entretanto, apesar dessa simplicidade e facilidade, será usado um modelo de correção atmosférica baseado na teoria de transferência radiativa, que depende da determinação de parâmetros atmosféricos, com a finalidade de alcançar padrões de correção mais precisos. Além disso, neste trabalho a água é o alvo de estudo, que para os métodos alternativos corresponde à superfície utilizada como referencial.

No entanto, qualquer que seja o método adotado, algumas limitações estarão sempre presentes, e como forma de atenuá-las estudar-se-á o mecanismo de transferência de energia, visando sempre formulações simplificadas, e adaptando-as às condições pré-definidas.

CAPÍTULO 4

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA I: MÉTODO FÍSICO

Neste capítulo é descrito o método físico de correção atmosférica com efeito de adjacência desenvolvido por Tanré et al. (1986) e Vermote (1990), no qual este trabalho está baseado.

4.1 - MÉTODO FÍSICO DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A correção dos efeitos atmosféricos é feita utilizando o método proposto por Tanré et al. (1986) e Vermote (1990). Este método simula o sinal recebido por um satélite como uma função de sucessivas ordens de interação da radiação solar com o sistema terra-atmosfera, considerando uma superfície lambertiana e heterogênea. A faixa do espectro considerada é a que apresenta característica reflectiva, do espectro visível ao infravermelho próximo, correspondente às bandas TM do LANDSAT-5.

Os efeitos bidirecionais difusos das superfícies naturais dependem das direções de iluminação e visada (Perdiz, 1990). A reflectância bidirecional é função da distribuição angular das radiações incidente e refletida, como também do comprimento de onda. Para uma superfície difusora lambertiana, a reflectância não depende da geometria de iluminação e visada, e é idêntica ao albedo da superfície (Tanré et al., 1983).

A reflectância de uma superfície determinada por um sensor orbital (ρ^*), caracterizada como uma reflectância aparente, é definida como a razão entre o fluxo emergente e o fluxo incidente no topo da atmosfera, analiticamente é dada por:

$$\rho^* (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) = \pi L^* (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) / \mu_0 S_0, \quad (4.1)$$

onde $\mu_0 = \cos Z_0$ e $\mu = \cos Z$, ou seja, são os cossenos dos ângulos zenitais do sol e de visada do satélite, respectivamente; ϕ_0 e ϕ são os ângulos azimutais de iluminação e visada; L^* é a radiância detectada pelo sensor; e, $\mu_0 S_0$ é a irradiância solar que atinge o topo da atmosfera (S_0 é a constante solar) corrigida pela distância terra-sol (Paltridge & Platt, 1976).

A reflectância detectada pelo sensor ρ^* , sem considerar os efeitos de absorção numa banda espectral ou num comprimento de onda, pode ser dada por:

$$\begin{aligned} \rho^*_\lambda (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) = & \rho_{\lambda}^{\text{atm}} (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) + \rho_{\lambda} \exp(-\tau/\mu_0) \exp(-\tau/\mu) + \\ & \rho_{\lambda} t_d(\mu_0) \exp(-\tau/\mu) + \rho_{\lambda} [\exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0)] t_d'(\mu) + \\ & + \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [\exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0)] (\rho_{\lambda} S)^n \right\} \times \rho_{\lambda} [\exp(-\tau/\mu) + t_d'(\mu)], \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde $\rho_{\lambda}^{\text{atm}}$ é a reflectância da atmosfera; ρ_{λ} é a reflectância do alvo; $t_d(\mu_0)$ e $t_d'(\mu)$ são as funções de transmitância difusa da atmosfera, descendente e ascendente, respectivamente; τ é a profundidade óptica da atmosfera; e, S é o albedo esférico da atmosfera. O subscrito λ refere-se a grandezas monocromáticas.

É importante salientar que a Equação (4.2) constitui uma descrição aproximada da reflectância detectada por um sensor espacial, desacoplando em diversos termos o resultado da integração formal da equação de transferência radiativa.

A contribuição de cada termo para a reflectância aparente ρ^*_λ , ou seja, aquela detectada pelo sensor é a seguinte:

$\rho_{\lambda}^{\text{atm}}$ - contribuição da reflectância da atmosfera;

$\rho_\lambda \exp(-\tau/\mu_0) \exp(-\tau/\mu)$ - contribuição da radiação solar direta refletida pelo alvo;

$\rho_\lambda t_d(\mu_0) \exp(-\tau/\mu)$ - contribuição da radiação solar difusa descendente refletida pelo alvo;

$\rho_\lambda [\exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0)] t_d'(\mu)$ - contribuição de primeira ordem do "background" do alvo;

$\sum_{n=1}^{\infty} [\exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0)] (\rho_\lambda S)^n \times \rho_\lambda [\exp(-\tau/\mu) + t_d'(\mu)]$ - contribuição da reflexão múltipla da superfície, onde $(\rho_\lambda S)^n$ é o termo de ordem superior da interação entre a atmosfera e a superfície.

Do desenvolvimento da série geométrica e de alguns termos da Equação 4.2, esta reduz-se a:

$$\begin{aligned} \rho'_\lambda (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) &= \rho_\lambda^{\text{atm}} (\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) + \\ &+ [\exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0)] \frac{\rho_\lambda}{1-S\rho_\lambda} [\exp(-\tau/\mu) + t_d'(\mu)]. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Para uma atmosfera homogênea, ou seja, uma atmosfera em que as proporções dos constituintes são constantes com a altitude, as funções de transmitância difusa, $t_d(\mu_0)$ e $t_d'(\mu)$ são idênticas devido ao princípio de reciprocidade, $t_d'(\mu) = t_d(\mu)$. Todavia, devido a presença de aerossóis, a atmosfera real não é homogênea, mas este princípio é considerando como uma boa aproximação (Tanré et al., 1979).

Sendo assim, as funções de transmitâncias total descendente e ascendente são dadas, respectivamente, por:

$$T_\lambda (\mu_0) = \exp(-\tau/\mu_0) + t_d(\mu_0), \quad (4.4a)$$

$$T_{\lambda}(\mu) = \exp(-\tau/\mu) + t_d(\mu). \quad (4.4b)$$

Daí, a Equação 4.3 pode ser reescrita como:

$$\rho'_{\lambda}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) = \rho_{\lambda}^{\text{atm}}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) + T_{\lambda}(\mu_0) \frac{\rho_{\lambda}}{1-S\rho_{\lambda}} T_{\lambda}(\mu). \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 é válida para o caso de uma superfície homogênea, para superfícies não homogêneas, considerando os efeitos de adjacência, Tanré et al. (1986) e Vermote (1990) rescreveram-na como:

$$\begin{aligned} \rho'_{\lambda}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) = & \rho_{\lambda}^{\text{atm}}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) + \\ & + T_{\lambda}(\mu_0) \frac{1}{1-S\langle\rho_{\lambda}\rangle} [\rho_{\lambda}^{\text{alvo}} \exp(-\tau/\mu) + \langle\rho_{\lambda}\rangle t_d(\mu)], \end{aligned} \quad (4.6)$$

onde $\langle\rho_{\lambda}\rangle$ é denominada de reflectância média, que considera a heterogeneidade da superfície observada.

Do ponto de vista prático, considera-se um alvo circular de raio r com reflectância $\rho_{\lambda}^{\text{alvo}}$, e a superfície adjacente com reflectância $\rho_{\lambda}^{\text{viz}}$. Na Equação 4.6 a reflectância média é:

$$\langle\rho_{\lambda}\rangle = F(r) \rho_{\lambda}^{\text{alvo}} + [1 - F(r)] \rho_{\lambda}^{\text{viz}}, \quad (4.7)$$

onde $F(r)$ é a função de vizinhança, que representa a contribuição relativa da reflectância do alvo para reflectância média. Esta função está associada com o tamanho do raio r do alvo, ou seja, $F(r=0) = 0$ e $F(r \rightarrow \infty) = 1$, o que corresponde a $\langle\rho_{\lambda}\rangle = \rho_{\lambda}^{\text{viz}}$ e $\langle\rho_{\lambda}\rangle = \rho_{\lambda}^{\text{alvo}}$, respectivamente.

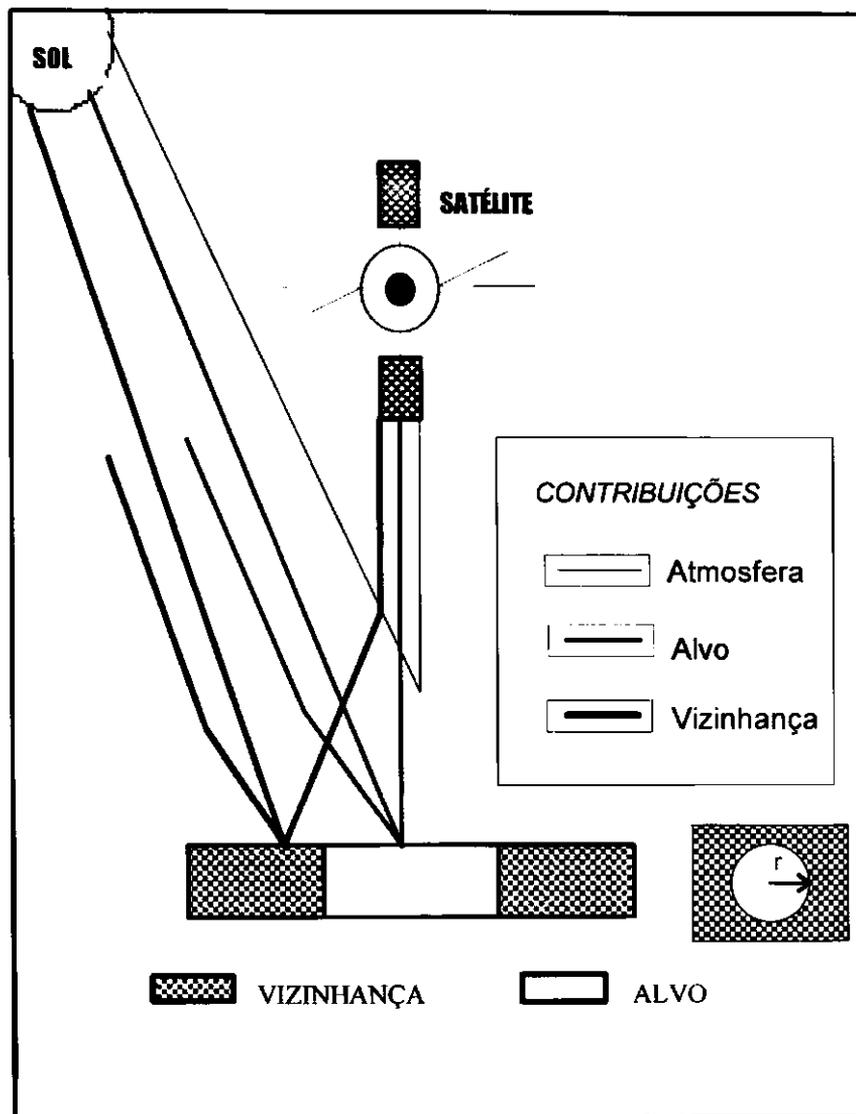


Fig. 4.1 - Esquema das contribuições da reflectância detectada pelo sensor.

A partir da Equação 4.6 nota-se, que a reflectância detectada por um sensor espacial é formada pelas contribuições da reflectância da atmosfera, da reflectância do alvo e da reflectância da adjacência, como mostra a Figura 4.1. Onde observa-se que a radiação solar ao penetrar na atmosfera gera dois componentes, a irradiância direta e a irradiância difusa, que atinge tanto o alvo como sua vizinhança. Ao atingir o alvo, a radiação difusa é refletida e diretamente atenuada na direção dos sensores a bordo do satélite (representada pelo termo $T_{\lambda}(\mu_0) \rho^{\text{alvo}} \exp(-\tau/\mu)$), como também interage com a atmosfera e dispersada na direção do sensor (representada

pelo termo $T_\lambda(\mu_0) \rho^{\text{alvo}} F(r) t_d(\mu)$). No caso da vizinhança, a radiância proveniente da atmosfera é transmitida difusamente na direção do sensor (representada pelo termo $T_\lambda(\mu_0) \rho^{\text{viz}} (1 - F(r)) t_d(\mu)$). Ainda pode-se observar a contribuição da reflectância intrínseca da atmosfera (representada pelo termo ρ^{atm}) e o componente de ordem superior devido ao mecanismo de “trapping”, correspondente às sucessivas reflexões e espalhamento entre a superfície e a atmosfera, representado pelo termo $T_\lambda(\mu_0) [1/(1 - S\langle\rho_\lambda\rangle)] T_\lambda(\mu)$.

A função de vizinhança depende das propriedades ópticas da atmosfera, principalmente, da função de fase e do perfil de densidade dos aerossóis. Simulações para diferentes distribuição vertical e função de fase mostram que a variabilidade da função de vizinhança pode ser razoavelmente tratável. Nos modelos de aerossóis, a função de vizinhança é estimada por uma função média, entretanto, o espalhamento molecular é o maior fator para que a contribuição da adjacência aumente. Desta forma, a função de vizinhança pode ser linearizada da forma:

$$F(r) = \frac{t_d^R(\mu) F^R(r) + t_d^a(\mu) F^a(r)}{t_d^R(\mu) + t_d^a(\mu)}, \quad (4.8)$$

onde $t_d^R(\mu)$ e $t_d^a(\mu)$ são as funções de transmitância difusa, devido aos espalhamentos Rayleigh e de aerossóis, dadas por aproximações analíticas simples em termo da profundidade óptica e do parâmetro de assimetria (Tanré et al., 1981); e, $F^R(r)$ e $F^a(r)$ são as funções de vizinhança para o efeito Rayleigh e o efeito de aerossóis. Estas últimas funções dependem muito pouco do comprimento de onda (Tanré et al., 1986), e são estimadas a partir de simulações que utilizam do método Monte Carlo (Vermote, 1990), para uma atmosfera usando o modelo de aerossóis de McClatchey. As expressões são as seguintes:

$$F^R(r) = 1 - 0,930 \exp(-0,082 r) + 0,07 \exp(-1,102 r), \quad (4.9a)$$

$$F^a(r) = 1 - 0,375 \exp(-0,202 r) + 0,625 \exp(-1,832 r) \quad (4.9b)$$

sendo r o raio do alvo dado em km.

Se o tipo de aerossóis utilizado não é muito diferente dos geralmente utilizados nos processos radiativos do sistema terra-atmosfera, as Equações 4.9a e 4.9b podem ser usadas, e na maioria dos casos os efeitos de vizinhança são bem representados. A Figura 4.2 mostra as variações das funções $F^R(r)$ e $F^a(r)$ em função do raio do alvo, nota-se que a escala horizontal do efeito de adjacência é tipicamente 2 km para o espalhamento por aerossóis, e 10 km para o espalhamento molecular.

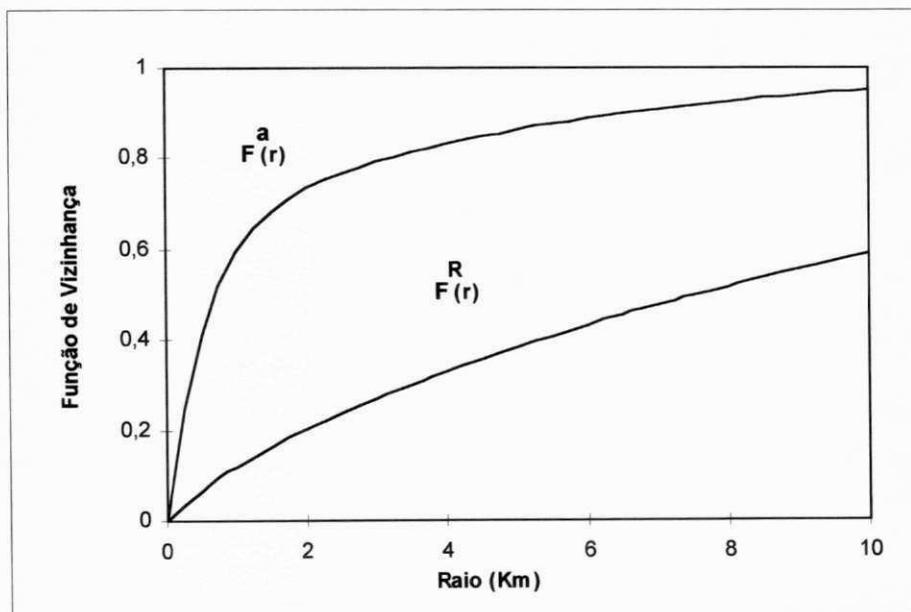


Fig. 4.2 - Funções de vizinhança Rayleigh (F^R) e de aerossóis (F^a).

O efeito de absorção é computado considerando que:

$$\rho_{\lambda}^*(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) = t_g(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) [\rho_{\lambda}^{\prime}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0)], \quad (4.10)$$

onde t_g é a função de transmitância para absorção gasosa e ρ_λ^* é a reflectância detectada pelo sensor, considerando a absorção.

A reflectância da vizinhança do alvo é obtida pela combinação das Equações 4.6, 4.7 e 4.10, ou seja:

$$\rho_\lambda^{viz} = \frac{\left(\frac{\rho_\lambda^*}{t_g} - \rho_\lambda^{atm} \right) \frac{1}{T(\mu_0)} [1 - S \rho_\lambda^{alvo} F(r)] - \rho_\lambda^{alvo} \exp(-\tau / \mu) + F(r) t_d(\mu)}{1 - F(r) \left[\frac{S}{T(\mu_0)} \left(\frac{\rho_\lambda^*}{t_g} - \rho_\lambda^{atm} \right) + t_d(\mu) \right]}, \quad (4.11)$$

Analogamente, a reflectância do alvo, é dada por:

$$\rho_\lambda^{alvo} = \frac{\left(\frac{\rho_\lambda^*}{t_g} - \rho_\lambda^{atm} \right) \frac{1}{T(\mu_0)} - [1 - F(r)] \rho_\lambda^{viz} \left[\frac{S}{T(\mu_0)} \left(\frac{\rho_\lambda^*}{t_g} - \rho_\lambda^{atm} \right) + t_d(\mu) \right]}{F(r) \left[\frac{S}{T(\mu_0)} \left(\frac{\rho_\lambda^*}{t_g} - \rho_\lambda^{atm} \right) + t_d(\mu) \right] + \exp(-\tau / \mu)}, \quad (4.12)$$

A percentagem de contribuição da vizinhança pode ser obtida através da combinação da Equação 4.3 com a Equação 4.6, isto é,

$$\frac{\rho_\lambda^{alvo} \exp(-\tau / \mu) + \langle \rho_\lambda \rangle t_d(\mu)}{\rho_\lambda [\exp(\tau / \mu) + t_d(\mu)]} \frac{1 - S \rho_\lambda}{1 - S \langle \rho_\lambda \rangle} = 1, \quad (4.13)$$

onde ρ_λ é a reflectância do alvo quando não se considera o efeito de adjacência. Para separar os termos que correspondem à contribuição do alvo e da vizinhança, assume-se que o termo $(1 - S \rho_\lambda)/(1 - S \langle \rho_\lambda \rangle) \cong 1$. Deste modo, a Equação 4.13 torna-se:

$$\frac{\rho_\lambda^{alvo} \exp(-\tau / \mu) + \langle \rho_\lambda \rangle t_d(\mu)}{\rho_\lambda [\exp(\tau / \mu) + t_d(\mu)]} = 1. \quad (4.14)$$

Essa é uma aproximação razoável, pois em casos práticos o albedo esférico da atmosfera (S) não excede a 15% (Tanré et al., 1981). Então, reescrevendo a Equação 4.14, tem-se:

$$\rho_{\lambda} = \frac{[\exp(-\tau/\mu) + F(r) t_d(\mu)]}{T(\mu)} \rho_{\lambda}^{\text{alvo}} + \frac{t_d(\mu) [1 - F(r)]}{T(\mu)} \rho_{\lambda}^{\text{viz}}, \quad (4.15)$$

onde os termos $[\exp(-\tau/\mu) + F(r) t_d(\mu)] / T(\mu)$ e $t_d(\mu) [1 - F(r)] / T(\mu)$ representam às contribuições relativas dos termos $\rho_{\lambda}^{\text{alvo}}$ e $\rho_{\lambda}^{\text{viz}}$, respectivamente, para reflectância média. As percentagens de contribuição do alvo e da vizinhança são:

$$\% \text{ viz} = \frac{t_d(\mu) [1 - F(r)]}{T(\mu)} \frac{\rho_{\lambda}^{\text{viz}}}{\rho_{\lambda}}, \quad (4.16a)$$

$$\% \text{ alvo} = \frac{\exp(-\tau/\mu) + F(r) t_d(\mu)}{T(\mu)} \frac{\rho_{\lambda}^{\text{alvo}}}{\rho_{\lambda}}. \quad (4.16b)$$

As contribuições do alvo e da vizinhança caracterizam que o efeito de adjacência é provocado pela atmosfera. A contribuição da vizinhança detectada pelo sensor, deve-se ao processo de dispersão da radiação refletida pela superfície adjacente, que ocorre na atmosfera. Este processo de dispersão está interligado ao tamanho do alvo e a reflectância da vizinhança; quanto maior o tamanho do alvo, menor é a energia dispersada pela atmosfera, proveniente da adjacência, e assim, a contaminação da adjacência; e, quanto menor a reflectância da vizinhança, menor é a radiação refletida, e menor é a contaminação da adjacência. A contribuição do alvo comporta-se de modo contrário a vizinhança, exerto no que diz respeito à radiação refletida pelo alvo, e transmitida diretamente.

CAPÍTULO 5

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA II: PROCESSOS RADIATIVOS DO SISTEMA TERRA-ATMOSFERA

A radiação solar, principal fonte de energia radiante em ondas curtas, interage com a atmosfera, ocasionando atenuação devido aos processos de espalhamento e absorção dos gases. A radiação que atinge a superfície sofre processos de espalhamento, reflexão, absorção e transmissão. Por sua vez, a radiação emergente do sistema terra-atmosfera sofre estes mesmos processos, até atingir o sensor do satélite. Sendo assim, os métodos físicos de correção atmosférica requerem o conhecimento físico-matemático dos parâmetros envolvidos no processo de interação da radiação solar com o sistema terra-atmosfera.

Neste capítulo são apresentadas as propriedades radiativas dos componentes atmosféricos e da superfície terrestre, definindo os parâmetros que influenciam o comportamento do fluxo de radiação que chega a um sensor espacial. Apresentam-se as abordagens mais utilizadas, dando ênfase às que foram efetivamente utilizadas nesta pesquisa.

5.1 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ATMOSFERA

Nesta Seção são apresentadas as propriedades ópticas da atmosfera, visando definir os parâmetros adequados para a modelagem dos sinais detectados pelos sensores espaciais na região espectral correspondente à radiação solar.

5.1.1 - ESPALHAMENTO ATMOSFÉRICO

O espalhamento por moléculas e aerossóis é um dos principais mecanismos pelo qual a atmosfera modifica a reflectância do alvo (Tanré et al., 1979).

Este mecanismo consiste no processo pelo qual as partículas em suspensão na atmosfera interagem com um fluxo de radiação, reduzindo a sua intensidade e reirradiando-o dentro de um ângulo sólido, centrado na própria partícula (McCartney, 1976); ou seja, provoca uma redistribuição angular da radiação. As grandezas que caracterizam um regime de espalhamento são: o coeficiente de atenuação linear, o albedo simples e a função de fase.

Um dos regimes de espalhamento atmosférico é o molecular ou Rayleigh, que é baseado na hipótese de que o elemento dispersor atua simetricamente quando interage com o campo de radiação. Este é aplicável às partículas muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente, isto é, partículas com raio menor que $0,01 \mu\text{m}$, tamanho típico das moléculas atmosféricas (Bastos, 1994).

Por outro lado, à medida que o tamanho da partícula aumenta em magnitude, quando comparado ao comprimento de onda da radiação incidente, como é o caso dos aerossóis, a teoria Rayleigh passa a não ser aplicável. A estas partículas se aplica a teoria de espalhamento Mie, a qual se baseia nas soluções das equações de Maxwell. As soluções destas equações são muito complexas, mas para descrever a transferência de radiação através da atmosfera procura-se dar ênfase aos critérios simplificadores, utilizando expressões analíticas com um número reduzido de parâmetros.

5.1.1.1 - ESPALHAMENTO MOLECULAR

Uma variável espacial que descreve a atenuação causada pelo espalhamento é a profundidade óptica (τ). A profundidade óptica (ou espessura óptica vertical) associada ao espalhamento molecular τ_r , é a integral do coeficiente de extinção ao longo do caminho óptico vertical (McCartney, 1976). Nesse caso, o espalhamento molecular é aplicado à atmosfera Rayleigh, que se refere a uma atmosfera puramente dispersiva com composição homogênea em toda sua extensão, composta pelos gases chamados quase permanentes. A denominação “limpa e seca”

representa a ausência de espalhamento e absorção devido ao ozônio, aerossóis e vapor d'água.

Neste trabalho, para determinação da espessura óptica vertical Rayleigh, adota-se a formulação empírica proposta por Robinson (1966), dada por:

$$\tau_R = (P/P_0) 0,00888 \lambda^{-4,05}, \quad (5.1)$$

onde $P_0 = 1013,25$ mb é a pressão atmosférica ao nível médio do mar, P a pressão atmosférica ao nível da superfície e λ o comprimento de onda, dado em μm . A correção P/P_0 é necessária, pois o espalhamento Rayleigh é proporcional ao número de moléculas numa coluna vertical e, portanto, proporcional à pressão atmosférica P .

A distribuição angular e a intensidade do espalhamento são representadas pela função de fase. Esta função representa a probabilidade relativa de um fóton mudar sua direção inicial de um ângulo Z^* , após colidir com partículas em suspensão no espaço. A função de fase na hipótese de isotropia molecular é dada por:

$$P_R(\cos Z^*) = 3/4 (1 + \cos^2 Z^*), \quad (5.2)$$

sendo Z^* o ângulo de dispersão. A Expressão 5.2 usualmente é encontrada em textos básicos (Paltridge & Platt, 1976; Liou, 1980) e independe do comprimento de onda.

A dispersão Rayleigh polariza parcialmente a radiação solar, introduzindo efeitos de anisotropia na radiação difusa. Devido à esses comportamentos anisotrópicos das moléculas da atmosfera, mesmo em condições mais límpidas e secas, adota-se a seguinte expressão (Chandrasekhar, 1950; McCartney, 1976):

$$P_R(\cos Z^*) = 1/3 [1/(1+2\gamma)] [(1+3\gamma) + (1-\gamma) \cos^2 Z^*]. \quad (5.3)$$

O termo γ representa a inclusão do efeito de anisotropia molecular através do fator de depolarização δ no formalismo básico do regime de espalhamento Rayleigh, e é dado por:

$$\gamma = \delta / (2 - \delta). \quad (5.4)$$

Segundo McCartney (1976) e Liou (1980), o fator de depolarização considerado por Penndorf (1957) como representativo para as moléculas do ar é 0,035. Substituindo-o nas Equações 4.21 e 4.22, obtém-se a relação:

$$P_R (\cos Z^*) = 0,7629 + 0,7113 \cos^2 Z^*. \quad (5.5)$$

No código LOWTRAN (Kneizys et al., 1988) utiliza-se a seguinte expressão para a função de fase Rayleigh:

$$P_R (\cos Z^*) = 0,7603 + 0,7190 \cos^2 Z^*, \quad (5.6)$$

que corresponde à Equação 5.3 quando o fator de depolarização $\delta = 0,0279$, proposto por Young (1980).

Também no código 5S (Tanré et al., 1986) a função de fase Rayleigh é calculada pela Equação 5.3 com o valor de $\delta = 0,0139$, correspondendo à seguinte expressão para a função de fase:

$$P_R (\cos Z^*) = 0,7552 + 0,7345 \cos^2 Z^*. \quad (5.7)$$

Neste trabalho adota-se a Equação 5.6, cujos coeficientes são praticamente idênticos aos obtidos por Penndorf. Levando-se em consideração os resultados para o fator de depolarização analisados por Bates (1984), a função de fase depende do comprimento de onda através deste fator. Todavia, devido à ordem de

grandeza dos erros associados à determinação do fator δ , maiores ou aproximadamente iguais a 10% e à pequena variabilidade dos coeficientes da função de fase na faixa espectral de 0,2 μm a 1 μm , é em primeira aproximação razoável aceitar que as Equações 5.5 a 5.7 são válidas para qualquer comprimento de onda do espectro solar.

5.1.1.2 - ESPALHAMENTO POR AEROSSÓIS

Os aerossóis atmosféricos são definidos como uma complexa e dinâmica mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera. A sua origem pode ser natural (poeira, névoa, condensação e oxidação de gases, etc.) ou antropogênica (emissão de gases industriais, etc.). Estas partículas exercem grande influência na propagação da radiação, principalmente nos processos de espalhamento e absorção. Seus efeitos radiativos dependem de um conjunto de fatores, tais como: concentração, composição química e distribuição vertical que variam no tempo e no espaço.

Um fator que descreve a proporção de radiação espalhada é o albedo de espalhamento simples (ω_a), que é a fração de fluxo espalhada numa interação, ou seja, é a relação entre o coeficiente de espalhamento e o coeficiente de atenuação. Os resultados experimentais do albedo simples dos aerossóis (continental, rural e troposférico), são consistentes com os derivados de cálculos teóricos. Shettle e Fenn (1979) e Coakley et al. (1983) apresentaram equações polinomiais para o albedo de espalhamento simples dos aerossóis, tomando como variável independente o comprimento de onda. A distribuição de tamanho considerada é log-normal, válida no intervalo de 0,3 a 1,0 μm .

No caso da função de fase dos aerossóis, Tanré et al. (1986) utilizaram a aproximação de primeira ordem, dada por:

$$P_a(\mu^*) = 1 + 3g\mu^*, \quad (5.8)$$

onde $\mu^* = \cos Z^*$ e, o parâmetro g representa o fator de assimetria.

Dentre as aproximações propostas para representar a função de fase dos aerossóis, a mais usada é a de Henyey-Greenstein (Liou, 1980; Lima, 1995) dada por:

$$P_a(\mu^*) = (1 - g^2)/(1 + g^2 - 2g\mu^*)^{3/2}. \quad (5.9)$$

Esta tem sido considerada como uma boa aproximação para as funções de fase Mie. Todavia, a função de Henyey-Greenstein, conduz bons resultados na avaliação de irradiâncias e absortâncias, mas não acontece quando se pretende determinar radiâncias, face à complexidade dessa função de fase (Hansen, 1969 citado por Bastos, 1994).

Para que a função de Henyey-Greenstein tenha uma melhor aproximação daquela calculada pela teoria Mie, redefine-se a Equação 5.9 como uma soma de duas funções de fase (Kattawar, 1975), a qual assume a seguinte expressão:

$$P_a(\mu^*, g_n) = \alpha P'(\mu^*, g_1) + (1 - \alpha) P'(\mu^*, g_2), \quad (5.10a)$$

onde

$$P'(\mu^*, g_n) = (1 - g_n)/(1 + g_n - 2g_n\mu^*)^{3/2}, \quad (5.10b)$$

sendo $n = 1, 2$, os parâmetros α , g_1 e g_2 são os fatores de assimetria que dependem da concentração dos aerossóis e do comprimento de onda da radiação incidente. Entretanto, como as alterações da função de fase são muito maiores devido às variações na concentração dos aerossóis, do que nas mudanças no comprimento de onda (Aranuvachapun, 1986); os parâmetros α , g_1 e g_2 podem ser considerados

independentes do comprimento de onda nas regiões do visível e infravermelho próximo.

Valores dos fatores de assimetria α , g_1 e g_2 são calculados por Kattawar (1975). Por outro lado, considerando a falta de informação precisa sobre a distribuição dos aerossóis para a área de estudo, serão adotados os valores apresentados por Aranuvachapun (1986), para a condição de céu aberto.

Consideramos que na atmosfera está sempre presente uma mistura de aerossóis, ar e gases absorventes: mistura opticamente homogênea de aerossóis (parâmetros τ_a e ω_a) e um gás absorvente/dispersor (parâmetros τ_A e ω_A). No espalhamento molecular considera-se como fator de assimetria $g_R = 0$, e como albedo simples $\omega_R = 1$. Para os aerossóis atmosféricos naturais, o fator de assimetria apresenta valores típicos em torno de 0,7, e excedem cerca de 0,8 para aerossóis antropogênicos (Shettle & Fenn, 1979 e Coakley et al., 1983).

Para esses valores típicos dos aerossóis, a função de fase é extremamente concentrada na direção de incidência da radiação. Assim, a distribuição espacial da radiação associada a uma dispersão simples pode ser aproximada pela contribuição linear de uma função delta de Dirac e de uma função remanescente, muito mais isotrópica, correspondendo à $g < 0,5$.

Da mesma forma, uma mistura de ar e aerossóis, admite a aproximação delta adicionada a uma função de fase remanescente dada pela combinação linear da função de fase remanescente dos aerossóis, com a função de fase associada a dispersão do gás dispersor, ou seja:

$$P(\mu', \mu) = 2 Y f \delta(\mu', \mu) + (1-f) Y P_a^*(\mu', \mu) + (1-Y) P_A(\mu', \mu). \quad (5.11)$$

A função de fase remanescente para a mistura \tilde{P}^* é dada por (Ceballos, 1986):

$$\tilde{P}^* = [(1-f) Y P_a^* + (1-Y) P_A] / (1-f^*), \quad (5.12)$$

a qual admite para mistura o peso $f^* = Yf$ da aproximação e um fator de assimetria $g^* < 0,5$. A constante Y e o fator de assimetria g^* , para a função de fase remanescente são determinados por:

$$Y = [\omega_a(\lambda) \tau_a(\lambda)] / [\omega_a(\lambda) \tau_a(\lambda) + \omega_A(\lambda) \tau_A(\lambda)] \quad (5.13a)$$

$$g^* = (g - f) / [(1/Y) - f^*]. \quad (5.13b)$$

Para os cálculos da profundidade óptica e do albedo de espalhamento simples para a mistura de ar e aerossóis, pode-se considerar as expressões (Ceballos, 1986):

$$\tau(\lambda) = \tau_R(\lambda) + \tau_a(\lambda), \quad (5.14a)$$

$$\omega(\lambda) = [\omega_a(\lambda) \tau_a(\lambda) + \tau_R(\lambda)] / \tau(\lambda) \quad (5.14b)$$

onde τ é a profundidade óptica e ω é o albedo de espalhamento simples da mistura. Os sub-índices são "a" para aerossóis e "R" para Rayleigh.

É importante ressaltar que no caso da mistura, quando a função de fase dos aerossóis é a de Henyey-Greenstein de dois termos (ou dupla de Henyey-Greenstein), a função de fase remanescente é ponderada pelas profundidades ópticas Rayleigh e de aerossóis, ou seja:

$$\tilde{P}^* = [\tau_R(\lambda) P_R + \tau_a(\lambda) P_a] / [\tau_R(\lambda) + \tau_a(\lambda)]. \quad (5.15)$$

5.1.2 - ABSORÇÃO GASOSA

O espalhamento atmosférico da radiação solar é uma função contínua do comprimento de onda, todavia, a absorção é, em geral, seletiva. Dentre os gases absorventes, para efeitos de transferência de radiação no espectro solar, os principais são: o ozônio (O_3), o vapor d'água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2).

As bandas de absorção do ozônio são a banda de Hartley, centrada em $0,255 \mu m$ (região do ultravioleta solar); a banda de Huggins, entre os comprimentos de onda de $0,313$ e $0,340 \mu m$; e, a banda de Chappuis entre aproximadamente $0,45$ e $0,7 \mu m$ (Goody, 1964).

Na transferência de radiação solar, os efeitos do ozônio troposférico não são tão importantes quando comparados ao estratosférico, uma vez que seu efeito é predominante na dispersão, mas com pouca importância em relação aos outros constituintes do ar atmosférico. Isso permite considerar que, para os propósitos do trabalho, são válidas as parametrizações existentes na literatura, como a de Elterman (1970).

O vapor d'água apresenta absorção no infravermelho solar, e uma fraca absorção no visível. As bandas do vapor d'água (vibracionais-rotacionais e eletro-vibracionais) são centradas em $0,72$; $0,81$; $0,94$; $1,1$; $1,38$; $1,87$; $2,7$ e $3,2 \mu m$. Já o dióxido de carbono exibe uma série de bandas de absorção centradas em $1,4$; $1,6$; $2,0$ e $2,7 \mu m$, porém muitas fracas. A banda de absorção mais importante do CO_2 , centrada em $2,7 \mu m$, é sobreposta pela banda forte de absorção do H_2O .

Os sensores remotos possuem faixas espectrais em regiões do espectro eletromagnético onde a absorção é fraca. Particularmente, o sensor TM do satélite LANDSAT-5 não possui bandas no espectro solar contaminadas por forte absorção do vapor d'água e do dióxido de carbono. Sendo assim, os efeitos de absorção por H_2O e CO_2 não são considerados.

5.1.3 - FUNÇÕES DE TRANSMITÂNCIA DIFUSA

A partir do método de Eddington, Tanré et al. (1979) determinaram o termo de transmissão difusa $t_d(\mu)$, o qual também pode ser aplicado para o caso de aerossóis. O termo $t_d(\mu)$ é aproximadamente dado por:

$$t_d(\mu) \cong \exp [-(\tau_R + \tau_a) / \mu] \{ \exp [-(\alpha_R \tau_R + \alpha_a \tau_a) / \mu] - 1 \}, \quad (5.16)$$

sendo $\alpha_R = (1 + g_R)/2$ e $\alpha_a = (1 + g_a)/2$. Para espalhamento molecular $g_R = 0$ e espalhamento por aerossóis $g_a = g$. O fator g é constante para maioria dos aerossóis, daí, as variações de $t_d(\mu)$ com o comprimento de onda são devidos principalmente às variações de τ_a .

5.1.4 - ALBEDO ESFÉRICO DA ATMOSFERA

O albedo esférico da atmosfera representa a percentagem de energia refletida pela atmosfera em direção ao solo.

Seja $a(\mu)$ o albedo para um feixe solar paralelo, o albedo esférico da atmosfera (S) é definido pela seguinte expressão:

$$S = \int_0^1 a(\mu) \mu \, d\mu. \quad (5.17)$$

A expressão $a(\mu)$ é complexa quando o albedo de espalhamento simples é diferente da unidade (Vermote, 1990). Entretanto, do desenvolvimento de primeira ordem de $a(\mu)$ como função da profundidade óptica (τ), obtém-se uma aproximação correta de S , ou seja:

$$S = b' \tau, \quad (5.18)$$

onde $b' = (1-g)$.

A Equação 5.18 foi obtida por Tanré et al. (1986) e segundo, Vermote (1990), é uma aproximação precisa do albedo esférico. Todavia, a expressão do albedo esférico pode ser aperfeiçoada por uma aproximação empírica (Tanré et al., 1986), dada por:

$$S = b' \tau \frac{1 + \exp(-b' \tau)}{2 + b' \tau} \quad (5.19)$$

a qual é adotada neste trabalho.

5.1.5 - REFLECTÂNCIA DA ATMOSFERA

A reflectância intrínseca da atmosfera, corresponde à reflectância obtida pelo sensor quando a superfície é um corpo negro. No caso, a irradiância solar direta é atenuada até à superfície, acompanhada de produção de radiação difusa pela atmosfera em direção a superfície, devido aos processos de espalhamento Rayleigh e Mie, e novamente atenuada até ser detectada pelo sensor. A presença da atmosfera é considerada através das propriedades ópticas de seus componentes.

Com base na Equação de Transferência Radiativa (ETR), diferentes métodos podem ser aplicados para determinar a reflectância da atmosfera, dentre os quais citam-se os métodos: “SS” (Schuster-Schwarzschild), Sobolev (Tanré et al., 1986) e de primeira ordem de espalhamento (“Single Scattering”), que são utilizados nesta pesquisa.

O “SS” é um método de dois fluxos, que soluciona a ETR por integração do campo de radiância em dois fluxos verticais, correspondentes às irradiâncias dos hemisférios superior e inferior. Os métodos de dois fluxos reduzem a ETR a um par de equações diferenciais de primeira ordem, envolvendo duas funções

desconhecidas referentes às irradiâncias ascendente e descendente. O “SS” é a versão mais simples para o método de dois fluxos, onde as radiâncias ascendente e descendente de cada hemisfério e a função de fase são isotrópicas. Uma outra variante de aproximação do “SS” propõe isotropia hemisférica para a radiância, mas não condiciona à isotropia para função de fase.

A solução geral das equações que correspondem às irradiâncias ascendente e descendente são dadas pelas seguintes expressões (Shettle & Weinman, 1970; Souza, 1995):

$$E^+(\tau) = C_1 \exp(k\tau) + C_2 \exp(-k\tau) - \gamma_1(\tau) \quad (5.20a)$$

$$E^-(\tau) = C_1 \frac{(\alpha_1 + k)}{\alpha_2} \exp(k\tau) + C_2 \frac{(\alpha_1 - k)}{\alpha_2} \exp(-k\tau) - \gamma_2(\tau) \quad (5.20b)$$

onde α_1 e α_2 são coeficientes que dependem de ω e g ; $k = (\alpha_1^2 - \alpha_2^2)^{1/2}$; e, C_1 e C_2 são constantes determinadas a partir das condições de contorno.

A reflectância intrínseca da atmosfera é obtida pelas Equações 5.20a e 5.20b, aplicando as condições de contorno $E^-(\tau) = 0$ e $E^-(0) = 0$, ou seja, que correspondem à ausência de radiação difusa no topo da atmosfera, e à superfície terrestre como um corpo negro. Analiticamente, a reflectância da atmosfera é dada por:

$$\rho^{\text{atm}} = E^-(0)/\mu_0 S_0 \quad (5.21a)$$

ou seja,

$$\rho^{\text{atm}} = C_1^* \frac{(\alpha_1 + k)}{\alpha_2} \exp(k\tau) + C_2^* \frac{(\alpha_1 - k)}{\alpha_2} \exp(-k\tau) - \gamma_2^*(0). \quad (5.21b)$$

As constantes C_1^* e C_2^* e a solução particular $\gamma_2^*(0)$ correspondem a $C_1/\mu_0 S_0$, $C_1/\mu_0 S_0$ e $\gamma_2(0)/\mu_0 S_0$, respectivamente.

Particularmente, aplicando o "SS" à atmosfera Rayleigh ($\omega=1$; $\alpha_1=\alpha_2$), a reflectância da atmosfera pode ser determinada por:

$$\rho^{\text{atm}} = 1 - \left\{ \frac{1}{1 + \alpha_1 \tau_R} [1 + (\alpha_1 \mu_0 - 1/2) (1 - \exp(-\tau_R/\mu_0))] \right\}. \quad (5.22)$$

Tanré et al. (1986), no desenvolvimento do código computacional "5S", para a simulação do sinal detectado por um sensor de satélite, considera que a reflectância da atmosfera é uma simples adição de reflectâncias, ou seja,

$$\rho^{\text{atm}} = \rho^R + \rho^a, \quad (5.23)$$

onde ρ^R e ρ^a são as reflectância da atmosfera molecular (processos Rayleigh) e dos aerossóis (processos Mie), respetivamente.

Para as reflectância ρ^R e ρ^a são seleccionados diferentes métodos, que segundo Tanré et al. (1986) conduz a bons resultados. A reflectância molecular é determinada considerando o espalhamento de primeira ordem ("Single Scattering"), ou seja, supondo que a dispersão de fótons é realizada uma única vez. Baseando-se na ETR e nas condições de contorno, a reflectância da atmosfera devido ao espalhamento molecular é:

$$\rho^R = \frac{1}{4(\mu_0 + \mu)} (1 - \exp[-\tau^R(1/\mu_0 + 1/\mu)]) P_R(\mu^*). \quad (5.24)$$

Para determinação da reflectância dos aerossóis utiliza-se o método de Sobolev (Tanré et al., 1986). Este método consiste de uma versão das aproximações

de dois fluxos, onde é feita uma correção na direção do sensor. A reflectância dos aerossóis é dada por:

$$\rho^a = \frac{1}{(\mu_0 \mu)} \left\{ \frac{X \mu}{1 + k^* \mu} [1 - \exp(-\tau(1 + k^* \mu) / \mu)] + \frac{Y \mu}{1 + k^* \mu} [1 - \exp(-\tau(1 - k^* \mu) / \mu)] + [Z + P_a(\mu^*)] \frac{\mu_0 \mu}{\mu_0 + \mu} ([1 - \exp(-\tau(1 / \mu_0 + 1 / \mu))]) \right\} \quad (5.25)$$

onde $k^{*2} = 3(1 - \omega_a)(1 - \omega_a g)$; X, Y e Z são funções que dependem dos parâmetros ω_a e g ; e, a função de fase $P(\mu^*)$ é dada pela Equação 5.8.

Por outro lado, a reflectância da atmosfera para mistura de ar e aerossóis pode ser também avaliada através da solução de um "Single Scattering", ou seja:

$$\rho^{atm} = \frac{\omega}{4(\mu_0 + \mu)} \left(1 - \exp[-\tau(1/\mu_0 + 1/\mu)] \right) \tilde{P}(\mu^*). \quad (5.26)$$

Neste caso a profundidade óptica $\tau = \tau^R + \tau^a$, a função de fase $\tilde{P}(\mu^*)$ e o albedo simples de espalhamento ω , referem-se à mistura.

De acordo com a metodologia de Tanré et al. (1986), aplicou-se um "Single Scattering" na determinação da reflectância atmosférica, onde separa-se os tipos de atmosfera: Rayleigh e de aerossóis. Desta forma, a reflectância da atmosfera é:

$$\rho^{\text{atm}} = \frac{1}{4(\mu_0 + \mu)} \left\{ (1 - \exp[-\tau^R(1/\mu_0 + 1/\mu)]) P_R(\mu^*) + \omega_a \left(1 - \exp[-\tau^a(1/\mu_0 + 1/\mu)] \right) P_a(\mu^*) \right\}. \quad (5.27)$$

É importante ressaltar que as Equações 5.26 e 5.27 aplicadas a uma atmosfera Rayleigh ($\tau^a = 0$) correspondem a Expressão 5.24, visto que a diferença consiste apenas no método aplicado aos aerossóis. Para esses dois últimos casos, em que se emprega um “Single Scattering”, foram usados as três funções de fase definidas na Seção 5.1.1.2 (Equações 5.8, 5.9, 5.10a, 5.10b e 5.12).

5.2 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DA SUPERFÍCIE

Nesta Seção são apresentadas as propriedades ópticas da superfície, em particular, a reflectância superficial dos alvos utilizados.

5.2.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

A extração de informações e a utilização de dados coletados pelos sensores remotos são feitas através do conhecimento do comportamento espectral de alvos, e dos fatores que interferem nesse comportamento. Além disso, a caracterização do comportamento espectral de alvos é relevante na definição de novos sensores, no tipo de processamento a que devem ser submetidos os dados, e na forma de aquisição de dados (geometria de coleta, frequência, altura ou distância de coleta, resolução espacial e espectral, etc.). Também é importante caracterizar a reflectância de alvos para sua utilização em modelos de transferência radiativa (por exemplo, modelos de simulação de satélite), ou na determinação de albedos característicos das superfícies, úteis na previsão do tempo e na modelagem climática.

Para o sensoriamento remoto, a reflexão é um fenômeno mais importante, uma vez que normalmente considera a radiação refletida pelos alvos

existentes na superfície terrestre, isso explica a rápida associação entre o termo comportamento espectral e a reflectância espectral.

O termo comportamento espectral é comumente relacionado à maneira pela qual um determinado alvo reflete a radiação incidente proveniente de uma fonte. A reflectância espectral é o parâmetro chave para distinguir os diferentes alvos na imagem de satélite, e está associada às características intrínsecas de composição físico-química do alvo, o que possibilita discriminar e/ou identificar os alvos das cenas.

A rigor, quando há interesse de se conhecer o comportamento espectral de um alvo devem ser consideradas a reflectância, a transmitância e a absorptância espectrais hemisféricas e/ou bidirecionais, pois estes são os parâmetros que definem tal comportamento para determinadas condições experimentais ou de coletas das medidas de radiação.

O comportamento espectral de alvos é normalmente estudado sob forma gráfica. A análise pura e simples de uma curva espectral, que é denominada a função que representa a reflectância espectral (hemisférica ou bidirecional) de um alvo, não fornece informações suficientes a menos que se tenha a disposição das informações relativas às condições de coleta de dados que as geraram. Estas informações devem incluir o tipo de instrumentação e as condições experimentais (local, altura do equipamento, visada vertical ou oblíqua, horário das medições, condições climáticas, etc.) nas quais foram realizadas as medições espectrorradiométricas (Ponzoni & Disperati, 1992).

Um dos fatores de maior influência na forma das curvas espectrais de alvos é a forma de aquisição das medidas dos três parâmetros espectrais mencionados. Estas medidas podem ser feitas de três maneiras principais: em laboratório, no campo, ou a partir de uma plataforma elevada (helicóptero, avião, satélite, torre, etc.). Cada

uma das maneiras produz diferentes resultados, uma vez que estas são afetadas por diferentes fatores que interferem nas medidas.

As cenas do sensoriamento remoto terrestre contém água, vegetação (natural/cultivada), áreas urbanas, rochas e solos. Sendo assim, o sensoriamento remoto permite conhecer cada vez melhor cada um dos alvos, a fim de gerar informações de qualidade para administrar cada vez mais racional e cientificamente os recursos naturais.

5.2.2 - REFLECTÂNCIA DO ALVO

A reflectância do alvo refere-se à reflectância da superfície observada em que se deseja obter informações através de sistemas sensores, onde o alvo considerado é a água.

5.2.2.1 - ÁGUA

A água se apresenta sob diferentes estados físicos, que influenciam de modo fundamental seu comportamento espectral, entretanto, os ambientes aquáticos podem ser conceituados como ambientes em que a água, no estado líquido, é componente principal.

A assinatura espectral da água é modulada pelos processos de absorção e espalhamento, produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão no corpo d'água. Toda absorção da luz no meio aquático se deve a quatro tipos de componentes do sistema aquático: substância orgânica dissolvida, biota fotossintetizadora, partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, e a própria água (Novo, 1990).

A água limpa tem um espectro com reflectância mais acentuado na faixa do azul, a presença de matéria orgânica dissolvida desloca o máximo da

reflectância espectral para a faixa do verde-amarelo, enquanto que a matéria inorgânica em suspensão desloca o máximo da reflectância espectral na direção do vermelho.

Um fator externo que influencia a reflectância espectral da água é rugosidade da superfície aquática. Este favorece a reflexão difusa e, em consequência uma maior reflectância. Em águas muito tranquilas, a superfície se comporta de modo especular, com valores de reflectância difusa menores.

A curva de reflectância da água em seu estado líquido, correspondente ao açude de São Gonçalo no interior da Paraíba (área de estudo da presente pesquisa), obtida conforme o processamento descrito na seção 6.1.2.1, é mostrada na Figura 5.1. A reflectância espectral dos corpos d'água é bastante baixa na região do visível, e praticamente nula na região do infravermelho (Bowker et al., 1985). Além disso, o efeito da atmosfera é maior nas regiões espectrais onde a radiação eletromagnética apresenta maior penetração na coluna d'água. Assim, a radiância medida pelos sensores orbitais contém poucas informações da água.

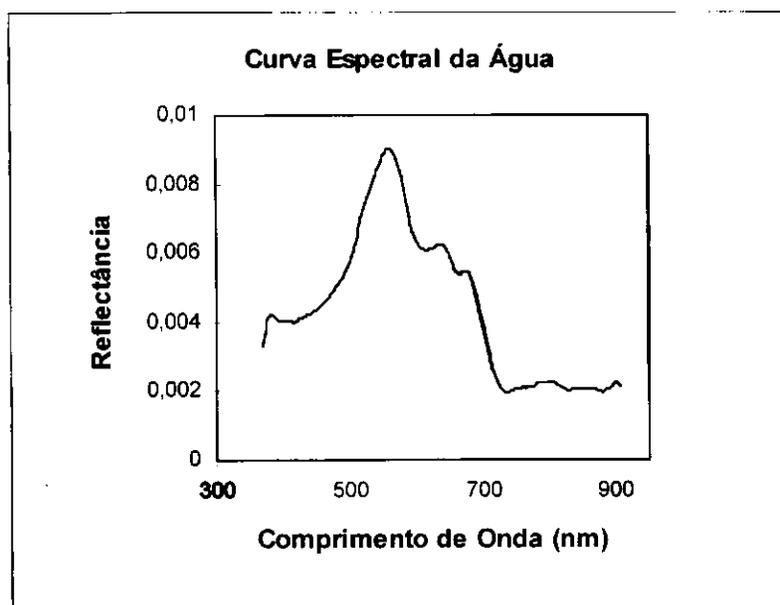


Fig. 5.1 - Curva da reflectância espectral bidirecional para o açude de São Gonçalo, no Estado da Paraíba.

5.2.3 - REFLECTÂNCIA DA VIZINHANÇA

A reflectância da vizinhança é o termo utilizado para representar a características reflectivas da superfície que interfere em uma outra superfície (alvo). A interferência é devido ao processo de espalhamento provocado pela atmosfera da radiação proveniente da região adjacente ao alvo. Particularmente, neste trabalho as superfícies de interferência são a vegetação e o solo.

5.2.3.1 - VEGETAÇÃO

A vegetação é um conjunto de plantas (de um mesmo grupo fisionômico ou não) que ocupa uma determinada área geográfica. Associado ao termo comportamento espectral, o termo vegetação tem sido usado para representar as propriedades espectrais de partes de uma planta, assim como folhas, galhos, etc., uma planta ou um conjunto de plantas (dossel).

A análise de uma curva de reflectância característica da vegetação pode ser dividida em duas regiões espectrais: região do visível e região do infravermelho próximo.

Na região do visível (0,4-0,7 μm), a reflectância espectral é baixa, sendo dominada pelos pigmentos. Estes pigmentos geralmente encontrados nos cloroplastos são: a clorofila, os carotenos e as xantofilas. Os valores percentuais de cada um desses pigmentos podem variar muito de espécie para espécie.

Os pigmentos predominantes absorvem na mesma região, próximo a 0,445 μm , que é a região do azul, mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (0,645 μm). Em 0,54 μm há um pequeno aumento da reflectância, não atingido, porém, níveis superiores a 0,1, que é responsável pela percepção da cor verde da vegetação. Na região de 0,55 μm a 0,67 μm encontra-se a absorção da

clorofila, a qual segundo Sul'gin e Keshnin (1959), apud Ponzoni e Disperati (1992), aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo de clorofila.

Na região do infravermelho próximo (0,7-1,3 μm) tem-se um alto coeficiente de reflexão da vegetação, devida a reflectância múltipla (interferência da estrutura celular). Nesta região existe uma pequena absorção da radiação, e um considerável espalhamento interno das folhas. Gates (1971), citado por Ponzoni e Disperati (1992), menciona que esta região é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo (tecido básico de uma folha). Fatores externos como disponibilidade de água, podem causar alteração na relação água-ar do mesófilo e, portanto, alterar a reflectância.

A curva da reflectância espectral característica da vegetação sobre o açude de São Gonçalo (área de estudo deste trabalho) obtida conforme processamento descrito na seção 6.1.2.1, é apresentada na Figura 5.2.

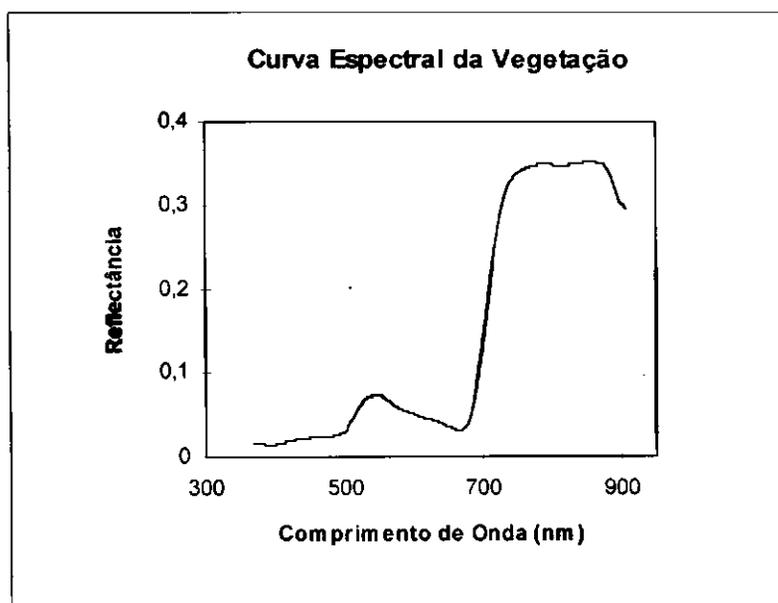


Fig. 5.2 - Curva da reflectância espectral bidirecional para a vegetação (caatinga) em torno do açude de São Gonçalo, no Estado da Paraíba.

Além das regiões do visível e do infravermelho próximo, tem-se a região do infravermelho médio (1,3-2,6 μm). Esta região é dominada pelo conteúdo de água das folhas (Novo, 1992), onde encontra-se dois máximos de absorção pela água, na região em torno de 1,45 μm e 2,0 μm .

5.2.3.2 - SOLO

O solo é uma coleção de corpos naturais, que contém matéria viva e são resultantes da ação do clima e da biosfera sobre as rochas, cuja transformação em solo se realiza durante um certo tempo, e é influenciada pelo tipo de relevo. Devido às infinitas possibilidades de combinação dos fatores de formação surgem os tipos de solos da superfície da terra. Assim, há uma variabilidade muito grande entre os tipos de solo (Formaggio, 1995).

As curvas espectrais dos solos podem ser classificadas em vários tipos, é comum encontrar na literatura uma classificação de cinco tipos de solo, caracterizando algumas faixas espectrais de interesse para o estudo da propriedades de solos (Novo, 1992).

Os parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento espectral do solo são: umidade, matéria orgânica, granulometria, óxido de ferro, mineralogia da argila e o material de origem. Também têm sido citados a cor, a capacidade de troca catiônica, as condições de drenagem interna do solo, a temperatura, a localização (condições de umidade), as condições de superfície, etc.

O efeito de cada fator é somado aos efeitos dos outros fatores, resultando num determinado comportamento que é a ponderação de todos os efeitos. Ainda, em determinadas condições, a influência de um parâmetro sobrepuja os demais, resultando em algumas feições específicas daquele parâmetro na curva espectral de um dado solo.

A assinatura espectral dos solos apresentam bandas de absorção determinadas pela água (1,45; 1,95 e 2,2 μm), óxido de ferro (0,7; 0,9 e 1,0 μm) e mineralogia da argila (água molecular - 1,4 μm e 1,9 μm). Enquanto que a distribuição do tamanho das partículas é explicada através de armadilhas de luz (agregados grandes, a maior parte do fluxo incidente é completamente extinto), a matéria orgânica diminui a reflectância no intervalo de 0,4 μm e 2,5 μm mascarando os efeitos dos outros constituintes do solo, e o material de origem (calcários, argilitos e arenitos) exibem formas características contrastantes.

A Figura 5.3 apresenta a curva espectral do solo, onde há presença de bandas de absorção da água líquida no solo em 1,45 μm e 1,95 μm , e uma banda de absorção do óxido de ferro nas proximidades de 0,9 μm , porém, menos evidente.

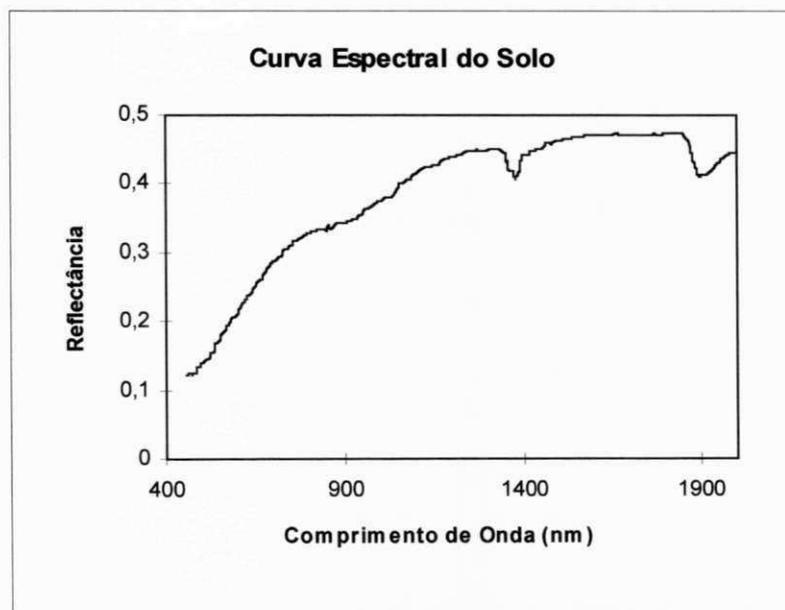


Fig. 5.3 - Curva de reflectância espectral do solo.

Fonte: Epiphany et al. (1992), p. 84.

CAPÍTULO 6

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os dados disponíveis e a metodologia utilizada na implementação do modelo de correção atmosférica com efeito de adjacência.

6.1 - DADOS DISPONÍVEIS

Os dados disponíveis para realização deste trabalho são imagens de satélite e dados experimentais obtidos “in situ”.

6.1.1 - IMAGENS DE SATÉLITE

As imagens utilizadas correspondem às detectadas pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5. O TM (Thematic Mapper) é um dos principais sensores do LANDSAT-5, que possui um sistema avançado de varredura multiespectral em sete bandas. Os canais 1, 2, 3, 4, 5, e 7, no espectro solar, apresentam uma resolução espacial de 30m x 30m, e o canal 6, no infravermelho termal, apresenta uma resolução de 120m x 120m. As características espectrais dos canais referentes ao espectro solar estão apresentadas na Tabela 6.1.

Foram analisados segmentos de imagens LANDSAT-5, nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM, dos quadrantes que inclui a localidade de São Gonçalo (6,84°S; 32,23°W), no alto sertão paraibano, no dia 12 de agosto de 1990. Estes segmentos de imagens de resolução espacial plena são compostos por 290 x 290 “pixels”.

**TABELA 6.1 - CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM
(LANDSAT)**

Comprimento de Onda (μm)	BANDAS					
	1	2	3	4	5	7
$\lambda_{\text{mínimo}}$	0,45	0,52	0,63	0,76	1,55	2,08
$\lambda_{\text{máximo}}$	0,52	0,60	0,69	0,90	1,75	2,35
$\lambda_{\text{médio}}$	0,49	0,56	0,66	0,83	1,65	2,22

FONTE: Novo (1992), p. 142.

As imagens gravadas em fitas “streamer” foram lidas utilizando os algoritmos do SITIM-150, no LMRS-Pb (Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba), e foram gravadas como segmentos de imagens em disquetes. A gravação das imagens, como arquivos binários, permitiu sua inspeção através de programas de visualização e processamento editados em Turbo Basic (Bottino e Ceballos, 1994).

A partir da visualização dos segmentos de imagens, foram identificados conjuntos de “pixels” (alvos) sobre a superfície aquática (açude de São Gonçalo). Os alvos são caracterizados pela situação de baixa reflectância ou baixo nível de cinza. A Figura 6.1, indica a localização de cada um destes alvos sobre o açude.

Cabe ainda uma observação, as imagens não correspondem nem ao mês e nem ao ano dos dados experimentais. A imagem do ano de 1995 (ano do experimento) não foi possível porque a cobertura de nuvens sobre os quadrantes que inclui a localidade de São Gonçalo foi em torno de 90% ou 100% e, portanto, não tinha imagem disponível. O mesmo fato acontece com o mês de março em anos anteriores a 1995. Este fato deve-se aos poucos dias (na hora da passagem do

satélite) com céu aberto em que se tem imagem. Daí, optou-se em analisar uma imagem já existente.

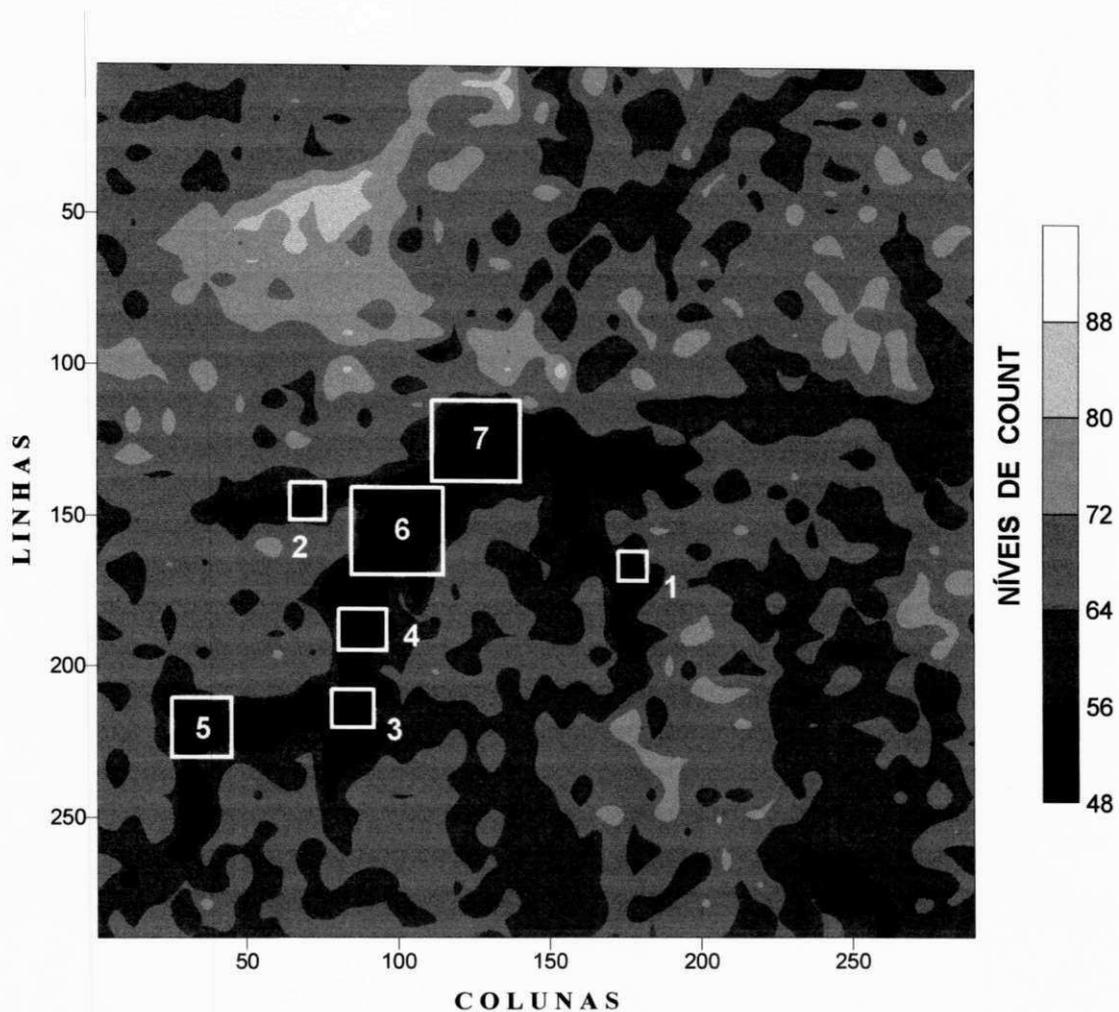


Fig. 6.1 - Imagens do açude de São Gonçalo no canal 1 do sensor TM do satélite LANDSAT-5. Os quadrados assinalados correspondem aos alvos de estudo, em que aplica-se o modelo de correção atmosférica com efeito de adjacência.

A radiância medida pelo sensor é calculada através de sua curva de calibração. A calibração é o procedimento pelo qual se relaciona a medida radiométrica em unidades de engenharia (“count” ou nível de cinza) com a radiância detectada pelo sensor a bordo do satélite, em unidades físicas ($W/m^2 \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1} \cdot count^{-1}$),

representada em geral por equações lineares. A relação entre o nível de cinza (NC) e a radiância detectada pelo sensor (L^*), é dada por:

$$L^* = a \text{ NC} + b \quad (6.1)$$

onde L^* é dada em $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$; NC é o nível de cinza que varia de 0 a 255; e, “a” e “b” são os coeficientes de calibração.

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos coeficientes “a” e “b” para cada banda espectral do sensor TM, determinados antes e após o lançamento do satélite LANDSAT-5. Neste trabalho foram adotados os coeficientes de pós-lançamento.

TABELA 6.2 - COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO PARA BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM

BANDAS	(*) Pré-lançamento		(**) Pós-lançamento	
	a	b	a	b
TM 1	0,602	-1,50	0,727	-1,331
TM 2	1,170	-2,80	1,385	-2,346
TM 3	0,806	-1,20	1,102	-1,897
TM 4	0,815	-1,50	0,885	-1,942
TM 5	0,108	-0,37	0,126	-0,398
TM 7	0,057	-0,15	0,067	-0,203

FONTE: (*) Markham e Barker (1986) , p. 4.

(**) Slater et al. (1987), p. 25; Hill e Aifadopoulou (1990), p. 55.

6.1.2 - DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais são medidas de reflectância espectral bidirecional ou fator de reflectância bidirecional de alvos (água e vegetação), e de irradiâncias espectrais global e difusa para vários horários do dia (15 em 15 min).

6.1.2.1 - REFLECTÂNCIA ESPECTRAL BIDIRECIONAL

A superfície aquática (açude de São Gonçalo) e sua região em torno são caracterizadas por suas reflectâncias espectrais bidirecionais, obtidas através de medidas realizadas em São Gonçalo, durante o EIS (Experimento Integrado do Semi-árido). Os dados de reflectância coletados durante o experimento EIS, no período de 27 a 31 de março de 1995, correspondem às medidas radiométricas do fator de reflectância obtidas com o espectroradiômetro SPECTRON-SE-590 (SPECTRON ENGINEERING-USA).

A reflectância é uma grandeza radiométrica de difícil medição e, por isso, costuma ser avaliada através de uma grandeza equivalente, denominada de fator de reflectância (Steffen & Moraes, 1993; Steffen, 1995). A dificuldade técnica observada é medir a irradiância na superfície do alvo em ambiente de campo.

Para medição do fator de reflectância são utilizadas placas padrões como a sulfato de bário ($BaSO_4$), que é calibrada em laboratório antes e depois do experimento em relação a placa de referência chamada SPECTRALON, com espectro conhecido. Este procedimento de calibração é necessário devido as placas padrões não terem um comportamento de uma superfície lambertiana com reflectância unitária. Daí, o fator de reflectância é uma grandeza aproximada da reflectância do alvo.

Para processamento dos dados de campo, obtidos com o espectroradiômetro SE-590, usou-se o programa Espectro (Steffen et al., 1992), desenvolvido no Laboratório de Radiometria (LARAD), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As medidas de reflectância obtidas durante o EIS foram sobre a água (açude de São Gonçalo) e a vegetação (pastagem + caatinga) a qual corresponde a região em torno do açude. As Figuras 5.1 e 5.2 (Seções 5.2.2.1 e 5.2.3.1) apresentam o comportamento espectral da reflectância bidirecional da água e da vegetação, respectivamente. Estas curvas referem-se a média aritmética das medidas obtidas em vários pontos de cada superfície (em média de cem espectros para cada superfície).

Convém salientar que estas medidas não correspondem à época das imagens utilizadas neste trabalho. Entretanto, o açude de São Gonçalo pode ser caracterizado como oligotrófico, ou seja, possui pouca disponibilidade de nutrientes. Além disso, sua classificação em termos de cor, é considerado escuro. Estas análises permitem concluir que o açude tem uma característica reflectiva que não varia acentuadamente com o tempo, ou ainda, que a variação é praticamente nula.

Na vizinhança, também foi identificado a presença de solo nu. A reflectância foi caracterizada através de dados divulgados por Epiphanyo et al. (1992). Esses autores apresentam um estudo do comportamento espectral de vários tipos de solo na região espectral de 400 a 2500 nm. Nota-se, de um modo geral, que estes dados são válidos para ângulos de iluminação menores que 45° e visada vertical.

O tipo de solo predominante sobre a região de São Gonçalo, foi avaliado mediante o mapa pedológico do Estado da Paraíba e o Boletim Técnico da Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (1972). Segundo o levantamento, o solo é o “podzólico vermelho-amarelo equivalente eutrófico” e de acordo com suas características químicas e físicas, escolheu-se a curva de reflectância espectral apresentada na Figura 5.3 (Seção 5.2.3.2).

Cada superfície ao redor do açude (solo e vegetação) é quantificada pelo módulo denominado de aplicativo, disponível no SITIM. Para isso, utilizou-se o método do paralelepípedo na classificação das imagens. Daí que, a vizinhança do açude corresponde a 49% de vegetação e 51% de solo nu. A Tabela 6.3 apresenta os valores de verdade terrestre nas bandas 1, 2 e 3 do TM, para a vizinhança como uma composição de solo+vegetação, e também para a superfície da água.

TABELA 6.3 - VALORES DE REFLECTÂNCIA CORRESPONDENTES A VERDADE TERRESTRE

BANDAS	TM1	TM2	TM3
ρ^{alvo} (água)	0,0054	0,0080	0,0057
ρ^{viz} (solo + vegetação)	0,0850	0,1243	0,1572

6.1.2.2 - DADOS DE RADIAÇÃO GLOBAL E DIFUSA

Medidas de radiação global e difusa foram obtidas por um piranômetro PSP EPPLEY com os filtros WG 295, GG 395, GG 495, OG 530, RG 630 e RG 695 durante o experimento EIS.

As medidas permitem determinar a irradiância instantânea para cada filtro, e daí, estimar o nível de turbidez atmosférica (profundidade óptica dos aerossóis) no intervalo de 495 a 695 nm, correspondente às bandas espectrais 1, 2 e 3 do sensor TM. Sendo assim, foram apenas utilizados os filtros GG 495, OG 530, RG 630 e RG 695 para estimativa da turbidez atmosférica. Para tal se utiliza o método da derivada (Fattori & Ceballos, 1984).

O método da derivada é baseado na lei de Lambert-Beer-Bouguer, onde a profundidade óptica dos aerossóis é obtida através da derivada do fluxo direcional em relação ao comprimento de onda de corte inferior de cada filtro.

A utilização de mais de dois filtros com corte inferior no visível solar obtém-se valores de irradiância cuja magnitude não é maior que 5 ou 10 vezes o respectivo erro experimental, tornando arriscadas quaisquer interpretação de cunho físico. Entretanto, deve ser dito que durante o processamento dos dados piranométricos, para determinação da profundidade óptica dos aerossóis foi aplicado um controle de qualidade semelhante ao de Lima (1995), da seguinte forma:

Dada uma seqüência $i = 1, 2, \dots, 6$ de medições com comprimento de corte inferior dos filtros Λ_i , em ordem crescente,

- comparou-se pares de valores instantâneos de radiação global (G_i, G_{i+1}) e difusa (D_i, D_{i+1}); caso $G_{i+1} > G_i$, e/ou $D_{i+1} > D_i$ para algum valor de i , a medida foi descartada;

- aplicou-se um teste utilizando as médias aritméticas \bar{G}_i, \bar{D}_i e os desvios padrões $S(G_i)$ e $S(D_i)$ para conjuntos de medidas com ângulos zenitais próximos; caso $S(G_i)/\bar{G}_i > 0,05$; $S(D_i)/\bar{D}_i > 0,10$ para algum dos filtros, a situação foi descartada.

A Tabela 6.4 apresenta os valores médios e os desvios padrões da profundidade óptica dos aerossóis referentes às bandas 1, 2 e 3 do TM, obtidos a partir de dados piranométricos, utilizando-se o método da derivada.

TABELA 6.4 - VALORES MÉDIOS E DESVIOS DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS PARA BANDAS DO TM

BANDAS	TM1	TM2	TM3
τ_a	0,056	0,035	0,025
δ_{pad} (desvio padrão)	0,020	0,015	0,014

6.1.2.3 - PRESSÃO À NÍVEL DA SUPERFÍCIE

A pressão na superfície referente ao mês da imagem, é $P = 986,6$ mb (DNMET, 1992). Este valor é usado para determinar a profundidade óptica Rayleigh, correspondente à região de São Gonçalo (Equação 5.1, Seção 5.1.1.1)

6.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

O modelo de correção atmosférica com efeito de adjacência (MCA-CA) utilizado foi desenvolvido por Tanré et al. (1986) e Vermote (1990). Além de sua estrutura e de seus parâmetros ópticos, é considerada a formulação geral proposta.

Foram concebidas duas opções para MCA-CA: (1) atmosfera de uma camada composta de uma mistura de ar e aerossóis e, (2) atmosfera como uma adição dos processos Rayleigh (reflectância Rayleigh) e Mie (reflectância dos aerossóis). Estas opções referem-se aos diferentes métodos propostos para determinação da reflectância da atmosfera, para a opção (1) foi aplicado o método de dois fluxos "SS" (Schuster-Schwarzchild) e o "Single Scattering", no caso da opção (2) foram aplicados o método descrito pelo "5S" (Tanré et al., 1986) e o método "Single Scattering".

Para a função de fase associada aos aerossóis foram testadas as aproximações de primeira ordem (PRO), a de Henyey-Greenstein (HG) e a dupla de Henyey-Greenstein (DHG). A Figura 6.2 mostra o fluxograma das várias opções para se determinar a reflectância da atmosfera. Na atmosfera composta de uma mistura de ar e aerossóis usou-se a aproximação delta de primeira ordem na obtenção da função de fase. No caso da mistura, quando a função de fase utilizada é a DHG, não há possibilidade do uso da aproximação delta, neste caso, a função de fase da mistura foi ponderada pela profundidade óptica Rayleigh e de aerossóis (Equação 5.1.1.2).

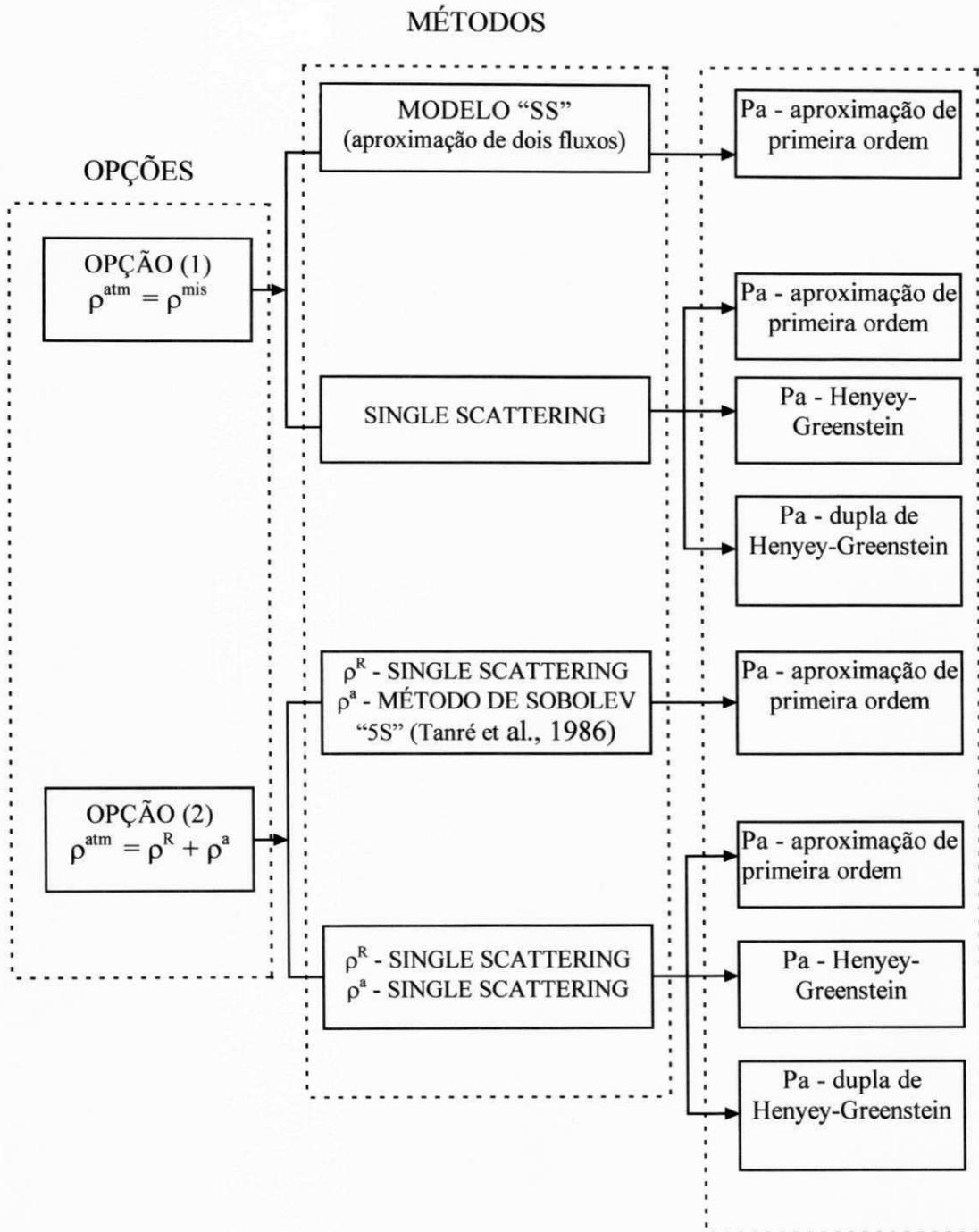


Fig. 6.2 - Fluxograma das opções propostas para o cálculo de reflectância da atmosfera

O modelo tem como dados de entrada o dia do ano, a localização geográfica, a profundidade óptica e o fator de assimetria dos aerossóis, a pressão atmosférica a nível da superfície, os valores de "count" do alvo em cada banda, o raio de cada alvo e a reflectância da vizinhança (Figura 6.3). Também existe a possibilidade de introduzir dados de reflectância do alvo para se estimar a reflectância da vizinhança. Esta opção foi implementada apenas para fins de comparação com a verdade terrestre.

Os dados incorporados no modelo são a banda espectral de cada sensor e a profundidade óptica do ozônio

Na primeira etapa de execução são calculados os parâmetros astronômicos tais como: declinação do sol, hora solar, ângulo zenital do sol. Também nesta rotina, é calculado o ângulo de espalhamento (Z^*), entre a orientação do feixe solar direto e a orientação de visada do sensor.

Na etapa seguinte, calculam-se os parâmetros associados aos efeitos atmosféricos de dispersão, transmissão e absorção. Citam-se profundidade óptica Rayleigh, transmitância do ozônio, funções de fase do espalhamento pelas moléculas, pelos aerossóis e pela mistura de ar mais aerossóis, albedo simples de espalhamento dos aerossóis e albedo esférico da atmosfera. Após esta etapa são calculadas as funções de vizinhança.

No caso da absorção, são desprezadas as influências do dióxido de carbono e vapor d'água. Quanto ao ozônio, consideram-se apenas os efeitos de absorção; e sua transmitância foi obtida através do código de transferência radiativa LOWTRAN-7.

Para a irradiância solar espectral no topo da atmosfera, são utilizados os dados divulgados por Tanré et al. (1986), corrigidos pela distância média Sol-Terra (Paltridge & Platt, 1976; Iqbal, 1983).

Os componentes ρ^{alvo} ou ρ^{viz} e ρ^{atm} são integrados em cada banda do satélite.

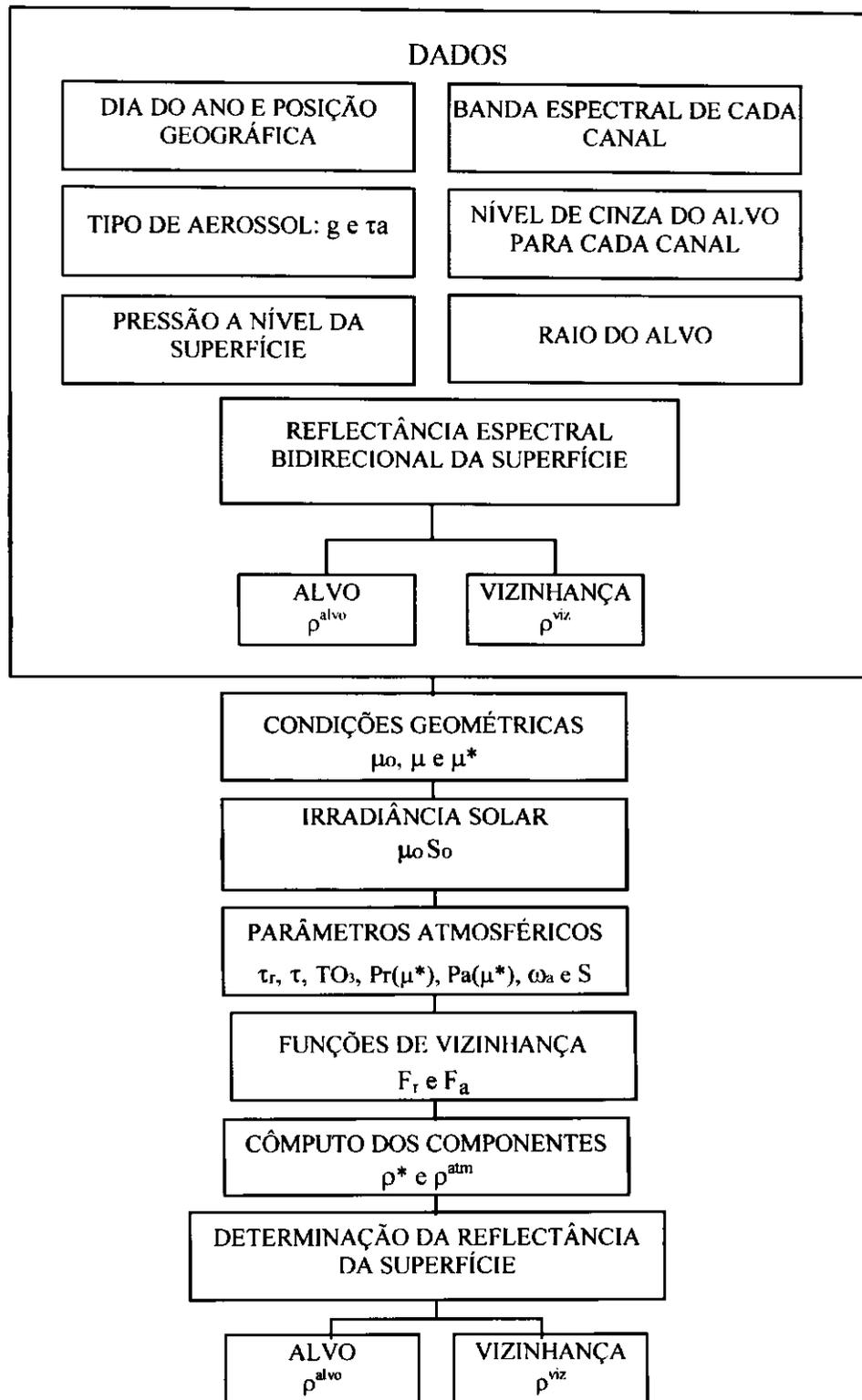


Fig. 6.3 - Fluxograma da implementação do modelo de correção atmosférica com efeito de adjacência (MCA-CA).

6.3 - APLICAÇÃO DO MODELO

Para aplicar o modelo MCA-CA foram delimitados alvos (conjuntos de “pixels”) sobre a superfície da água (açude de São Gonçalo). Cada alvo é caracterizado por um valor de “count”, em cada banda, obtido a partir da média aritmética de “counts”. A radiância detectada pelo sensor para cada alvo é obtida pela conversão de “count” em radiância utilizando a Equação 6.1. Além dos valores de “count” de cada alvo, são também avaliados os seus respectivos raios. Para isso, considerou-se que o alvo possui uma “área equivalente” a uma superfície circular, daí obtido um raio equivalente. Como exemplo, o raio do alvo de número 6 (Figura 6.1) possui uma área de $930 \times 930 \text{ m}^2$, o que corresponde a um raio equivalente $r = 525 \text{ m} = 0,525 \text{ km}$. Os valores dos raios são utilizados para calcular as funções de vizinhança Rayleigh e de aerossóis.

Os valores de reflectância da superfície (alvo ou vizinhança) associados a cada um dos alvos da Figura 6.1, obtidos através do modelo, foram comparados com dados de “verdade terrestre”. Além disso, da comparação se estabelece a melhor opção e o melhor método para determinar a reflectância da atmosfera (ρ^{atm}).

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se os resultados do modelo MCA-CA, e discussões pertinentes, em particular, no que concerne a: (1) aplicação do modelo à atmosfera Rayleigh, utilizando os métodos propostos para determinação da reflectância da atmosfera; (2) avaliação da determinação de ρ^{atm} , considerando uma atmosfera real; (3) correção atmosférica para pontos do açude; (4) análise do efeito de adjacência, calculando-se as contribuições percentuais do alvo e da vizinhança; e, (5) simulação do sinal do satélite de alvos e da composição de alvos sobre a região de São Gonçalo (Pb).

7.1 - APLICAÇÃO À ATMOSFERA RAYLEIGH

O modelo MCA-CA foi aplicado à atmosfera Rayleigh, considerando a reflectância do alvo como dados de entrada, e a reflectância da vizinhança como dado de saída do modelo. É importante salientar, que ao considerar uma atmosfera Rayleigh ($\tau_a = 0$; $g = 0$), as opções (1): $\rho^{atm} = \rho^{mist}$ e (2): $\rho^{atm} = \rho^R + \rho^a$, reduzem-se à aplicação dos métodos “SS” e “Single Scattering”.

As Tabelas 7.1 e 7.2 apresentam os valores de ρ^* , ρ^{atm} e ρ^{viz} , para os alvos significativos de números 6 e 7 (Figura 6.1), nas bandas 1, 2 e 3 do TM. Observa-se que estes alvos são os mais representativos da superfície aquática (açude de São Gonçalo) no segmento de imagem considerado. Os resultados do modelo “SS” apresentam valores de ρ^{atm} maiores que ρ^* nas bandas 1 e 2, produzindo valores negativos de ρ^{viz} . Assim, o método “SS” superestima o valor de ρ^{atm} , e nestas circunstâncias este não é indicado à região de São Gonçalo (Pb). Quando se aplica o método “Single Scattering”, os valores de ρ^{viz} obtidos apresentam erros percentuais grandes. Portanto, ao contrário do “SS”, o “Single Scattering” considerando uma

atmosfera Rayleigh, subestima os valores de ρ^{atm} . Isso sugere concluir que seja introduzido o efeito dos aerossóis no método “Single Scattering”, para que sejam obtidos valores de reflectância mais realísticos.

Convém ressaltar que os resultados apresentados de ρ^{atm} mostram que o espalhamento é maior nos comprimentos de onda menores, de acordo com a teoria. Isso é verificado pelos maiores valores de ρ^{atm} na banda 1, seguido da banda 2 e banda 3, respectivamente. Todavia, a ineficiência do método “SS” deve-se ao fato de que os métodos de dois fluxos foram desenvolvidos para aplicação em nuvens e, além disso, é um método para avaliação de irradiâncias e não de radiâncias. Quanto aos valores de reflectância ρ^{atm} para a banda 3 do TM não houve uma superestimativa, devido ao efeito de espalhamento da atmosfera diminuir com o aumento do comprimento de onda. Mesmo assim, pode verificar que o valor da reflectância ρ^{atm} é próxima do valor da reflectância ρ^* , produzindo assim valores de ρ^{viz} inferiores aos da verdade terrestre, com erros percentuais superiores a 64%.

TABELA 7.1 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO SENSOR, DA
ATMOSFERA E DA VIZINHANÇA PARA O ALVO 6 CONSIDERANDO
UMA ATMOSFERA RAYLEIGH

MÉTODOS	BANDAS	TM1	TM2	TM3
	verdade terrestre ρ^{viz}	0,0850	0,1243	0,1572
	ρ^*	0,0765	0,0513	0,0367
“SS”	ρ^{atm}	0,0983	0,0573	0,0300
	ρ^{viz}	-0,4391	-0,3465	0,0563
“Single Scattering”	ρ^{atm}	0,0531	0,0321	0,0172
	ρ^{viz}	0,3092	0,3160	0,6609

TABELA 7.2 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO SENSOR, DA
ATMOSFERA E DA VIZINHANÇA PARA O ALVO 7 CONSIDERANDO
UMA ATMOSFERA RAYLEIGH

MÉTODOS	BANDAS	TM1	TM2	TM3
	verdade terrestre ρ^{viz}	0,0850	0,1243	0,1572
	ρ^*	0,0759	0,0510	0,0364
"SS"	ρ^{atm}	0,0983	0,0573	0,0300
	ρ^{viz}	-0,4506	-0,3554	0,0418
"Single Scattering"	ρ^{atm}	0,0531	0,0321	0,0172
	ρ^{viz}	0,2996	0,3079	0,6470

7.2 - TESTES DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA REFLECTÂNCIA DA ATMOSFERA

A aplicação do MCA-CA à atmosfera de ar e aerossóis é feita considerando as opções (1) e (2) e as funções de fase citadas. Como discutido na seção 7.1, o método "SS" aplicado a uma atmosfera Rayleigh sobre a região de São Gonçalo superestima os valores de ρ^{atm} e, por isso, este não será mais reportado para uma atmosfera de ar e aerossóis.

Quanto aos valores dos parâmetros dos aerossóis determinados, tem-se: a profundidade óptica, tipo (troposférico), fator de assimetria ($g = 0,66$) e o albedo de espalhamento simples (banda 1: $\omega_a = 0,968$; banda 2: $\omega_a = 0,967$; banda 3: $\omega_a = 0,961$). Exceto a profundidade óptica dos aerossóis obtidas através de dados experimentais, os demais parâmetros foram retirados da literatura (Shettle e Fenn, 1979; Coakley et al., 1983). É importante salientar que, no caso da Função de fase

Dupla de Henyey-Greenstein (DHG), o fator de assimetria g , é representado por dois outros fatores de assimetria $g_1 = 0,801$, $g_2 = -0,580$ e um “peso” $\alpha = 0,948$ (Aranuvachapun, 1986).

As Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam os valores de ρ^* , ρ^{atm} e ρ^{viz} nas bandas 1, 2 e 3 do TM para os alvos 6 e 7, respectivamente. Os resultados são provenientes da aplicação da atmosfera de ar e aerossóis considerando as opções (1), e (2) e as funções de fase dos aerossóis citadas. Como pode ser observado, para a opção (1) os valores de ρ^{viz} obtidos nas bandas 1, 2 e 3 são razoavelmente consistentes com os valores de verdade terrestre, dependendo da função de fase e , para a opção (2), os valores obtidos de ρ^{viz} foram negativos em ambos os métodos e para todas funções de fase.

A opção (1) apresenta resultados do MCA-CA satisfatórios, cuja qualidade dos resultados segue a seguinte ordem com relação a função de fase: primeira ordem, Henyey-Greenstein e Dupla de Henyey-Greenstein. Entretanto, na opção (2), os valores de ρ^{atm} obtidos são maiores ou muito próximos dos valores de ρ^* (“Single Scattering” - banda 3), produzindo valores de ρ^{viz} negativos. É importante salientar que a opção (2) tem como base a metodologia de Tanré et al. (1986) e Vermote (1990) na determinação de ρ^{atm} , em que os efeitos Rayleigh e de aerossóis são calculados separadamente. Pelos resultados obtidos, a opção (2) superestima os valores de ρ^{atm} , e não podendo a princípio ser empregada sobre a região de São Gonçalo. Uma justificativa no que concerne a opção (1) apresentar melhores resultados do que a opção (2), é o efeito dos aerossóis. Isto pode ser constatado analisando a função de fase da mistura, na qual o efeito dos aerossóis é ponderado pela massa de ar atmosférico (quanto maior τ_R , menos eficiente é o espalhamento da mistura). Nota-se que, a condição de separação dos efeitos Rayleigh e de aerossóis talvez pode ser utilizada em locais onde a profundidade óptica dos aerossóis possui valores maiores que 0,1.

TABELA 7.3 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO SENSOR, DA
ATMOSFERA E DA VIZINHANÇA PARA O ALVO 6 CONSIDERANDO
UMA ATMOSFERA DE AR E AEROSSÓIS

OPÇÃO	MÉTODOS	FUNÇÃO DE FASE DO AEROSSOL	BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3
			verdade terrestre ρ^{viz}	0,0850	0,1243	0,1572
			ρ^*	0,0765	0,0513	0,0367
(1)	"Single Scattering"	PRO	ρ^{atm}	0,0662	0,0411	0,0258
			ρ^{viz}	0,1007	0,1493	0,2148
		HG	ρ^{atm}	0,0672	0,0418	0,0264
			ρ^{viz}	0,0880	0,1364	0,1964
		DHG	ρ^{atm}	0,0666	0,0419	0,0266
			ρ^{viz}	0,0949	0,1349	0,1878
(2)	Sobolev	PRO	ρ^{atm}	0,1055	0,0608	0,0401
			ρ^{viz}	-0,4188	-0,2459	-0,2290
	"Single Scattering"	PRO	ρ^{atm}	0,0936	0,0567	0,0387
			ρ^{viz}	-0,2552	-0,1610	-0,1835
		HG	ρ^{atm}	0,0849	0,0514	0,0341
			ρ^{viz}	-0,1394	-0,0546	-0,0402
		DHG	ρ^{atm}	0,0805	0,0488	0,0317
			ρ^{viz}	-0,0818	-0,0012	0,0318

TABELA 7.4 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO SENSOR, DA ATMOSFERA E DA VIZINHANÇA PARA O ALVO 7 CONSIDERANDO UMA ATMOSFERA DE AR E AERROSSÓIS

OPÇÃO	MÉTODOS	FUNÇÃO DE FASE DO AERROSSOL	BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3
			verdade terrestre ρ^{viz}	0,0850	0,1243	0,1572
			ρ^*	0,0759	0,0510	0,0364
(1)	"Single Scattering"	PRO	ρ^{atm}	0,0662	0,0411	0,0258
			ρ^{viz}	0,0926	0,1425	0,2052
		HG	ρ^{atm}	0,0672	0,0418	0,0264
			ρ^{viz}	0,0779	0,1296	0,1869
		DHG	ρ^{atm}	0,0666	0,0419	0,0266
			ρ^{viz}	0,0869	0,1281	0,1783
(2)	Sobolev	PRO	ρ^{atm}	0,1055	0,0608	0,0401
			ρ^{viz}	-0,4278	-0,2531	-0,2388
	"Single Scattering"	PRO	ρ^{atm}	0,0936	0,0567	0,0387
			ρ^{viz}	-0,2639	-0,1681	-0,1933
		HG	ρ^{atm}	0,0849	0,0514	0,0341
			ρ^{viz}	-0,1479	-0,0616	-0,0499
		DHG	ρ^{atm}	0,0805	0,0488	0,0317
			ρ^{viz}	-0,0902	-0,0082	0,0221

Por outro lado, a análise quanto a função de fase dos aerossóis, considerando a opção (1), mostram que a PRO apresentam erros percentuais maiores com relação as demais para ambos os alvos (alvo nº 6: 18,5%, 20,1% e 36,6%; e, alvo nº 7: 8,9%, 14,6% e 30,5%, correspondentes as bandas 1, 2 e 3, respectivamente). As funções HG e DHG apresentam erros percentuais semelhantes para ambos os alvos na banda 2 (erros próximos de 9,0% para o alvo nº 6 e 4,0% para o alvo nº 7). Porém, a função HG apresenta erros percentuais maiores para o alvo nº 6, na banda 3 (25,0%), e para o alvo nº 7, nas bandas 1 e 3 (8,4% e 19,0%, respectivamente); e, a função DHG apenas para o alvo nº 6 na banda 1 (11,1%). Nestas circunstâncias, a função de fase que melhor representa o efeito dos aerossóis sobre a região de São Gonçalo, considerando os valores assumidos para g_1 , g_2 e α é a DHG.

A princípio, pela comparação dos resultados, a opção (1) e a função DHG correspondem, respectivamente, ao método de determinação de ρ^{atm} e a função de fase que melhor se aplica à região de São Gonçalo. Para uma melhor análise quanto a função de fase dos aerossóis, foram utilizados valores de ρ^{alvo} . Nesta abordagem a reflectância ρ^{viz} é um dado de entrada do modelo, e a reflectância ρ^{alvo} , é o dado de saída. A Tabela 7.5 apresenta os valores de ρ^{alvo} , considerando os alvos de números 6 e 7 nas bandas 1, 2 e 3 do TM. Semelhante ao caso em ρ^{viz} é o dado de saída, os erros percentuais apresentados pela função PRO são maiores. Da mesma forma, para as funções HG e DHG o comportamento dos erros percentuais apresentados para o caso de ρ^{viz} , é retratado em ρ^{alvo} porém, com valores maiores. Em particular, para a função DHG os erros são 13,0%, 8,8% e 24,6% para o alvo nº 6; e, 3,7% 2,5% e 19,3% para o alvo nº 7; correspondentes as bandas 1, 2 e 3, respectivamente. Diante da análise dos erros percentuais, para aplicação da função de fase, a função DHG é mais adequada para a área de estudo.

TABELA 7.5 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DOS ALVOS 6 E 7

NÚMERO DO ALVO	FUNÇÃO DE FASE DO AEROSSOL	BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3
		verdade terrestre ρ^{alvo}	0,0054	0,0080	0,0057
6	PRO	ρ^{alvo}	0,0067	0,0095	0,0081
	HG	ρ^{alvo}	0,0053	0,0088	0,0074
	DHG	ρ^{alvo}	0,0061	0,0087	0,0071
7	PRO	ρ^{alvo}	0,0058	0,0091	0,0077
	HG	ρ^{alvo}	0,0045	0,0083	0,0071
	DHG	ρ^{alvo}	0,0052	0,0082	0,0068

A análise dos resultados é satisfatória, exceto na banda 3, onde os erros percentuais são superiores a 20%. Por outro lado, variando-se a composição da superfície em torno do açude de São Gonçalo (solo+vegetação), os resultados de reflectância ρ^{alvo} se aproximam melhor dos dados de superfície. A Tabela 7.6 apresenta os valores de reflectância ρ^{alvo} nas bandas 1, 2 e 3 do TM, para vários percentuais de solo e vegetação que compõe a vizinhança. Verifica-se que aumentando o percentual de solo, os resultados melhoram consideravelmente, exceto para valores maiores que 60%, este fato deve-se à heterogeneidade da superfície. Todavia, os valores percentuais menores que 60 % são adequados, pois uma variação de 5% na quantidade de cada componente (por exemplo, variação de 55 a 60% no solo), implica em uma variação considerável no erro percentual. Além disso, os resultados da Tabela 7.6 mostram que o percentual mais representativo da vizinhança é 55% de solo e 45% de vegetação, cujos valores são próximos dos percentuais obtidos fazendo o mapeamento temático da imagem no SITIM (51% de solo e 49% de vegetação).

TABELA 7.6 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO ALVO PARA VÁRIOS
PERCENTUAIS DE SOLO E VEGETAÇÃO DA VIZINHANÇA, APLICADOS
AOS ALVOS 6 E 7

NÚMERO DO ALVO	COMPOSIÇÃO DA VIZINHANÇA		ρ^{alvo} BANDAS		
	SOLO	VEGETAÇÃO	TM1	TM2	TM3
6	53%	47%	0,0059	0,0085	0,0069
	55%	45%	0,0056	0,0084	0,0068
	60%	40%	0,0051	0,0080	0,0064
	70%	30%	0,0039	0,0073	0,0056
7	53%	47%	0,0050	0,0081	0,0066
	55%	45%	0,0048	0,0079	0,0064
	60%	40%	0,0042	0,0076	0,0060
	70%	30%	0,0030	0,0069	0,0052

7.3 - CORREÇÃO ATMOSFÉRICA COM EFEITO DE ADJACÊNCIA

Aplica-se o MCA-CA para se obter a reflectância do alvo que é a finalidade do modelo. O modelo MCA-CA foi executado com reflectância ρ^{atm} , obtida a partir da opção (1), utilizando o método "Single Scattering" e a função de fase dupla de Henyey-Greenstein, baseando-se nos resultados discutidos nas seções anteriores.

Na Tabela 7.7 são apresentados os valores da reflectância ρ^* , da reflectância ρ^{alvo} e da reflectância ρ^{atm} , nas bandas 1, 2 e 3 do TM para as várias áreas da Figura 6.1, sobre o açude de São Gonçalo. Como pode ser observado, os valores de ρ^{alvo} são maiores na banda 2, seguindo as bandas 3 e 1 de acordo com os dados obtidos em superfície. Os resultados da reflectância ρ^{alvo} apresentam erros percentuais que variam dependendo do alvo; o que comprova a heterogenidade da vizinhança. Dentre todos os alvos considerados, o alvo de número 7 é o que apresenta os melhores valores de ρ^{alvo} , com erros de 3,7% na banda 1, 2,5% na banda 2 e 19,3% na banda 3. Todavia, algumas observações devem ser consideradas: (1) os valores de ρ^{viz} são valores "aproximados", devido a não correspondência com a imagem de satélite utilizada; e, (2) o alvo de número 7 é o mais representativo da água, pois está localizado no centro de imagem, onde a vizinhança apresenta uma distribuição homogênea.

Por outro lado, reduzindo-se o número de casas decimais dos valores de ρ^{alvo} , os erros percentuais diminuem. Em particular, truncando os valores de verdade terrestre a três casas decimais, o alvo de número 7 apresentam erros de 0% nas bandas 1 e 2, e 16,7% na banda 3.

TABELA 7.7 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DA ATMOSFERA, DO SENSOR E DO ALVO OBTIDOS PELO MCA-CA PARA VÁRIOS ALVOS SOBRE À ÁGUA

NÚMERO DO ALVO	RAIO DO ALVO (km)	BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3
		ρ^{atm}	0,0666	0,0419	0,0266
1	0,169	ρ^*	0,0777	0,0520	0,0376
		ρ^{alvo}	0,0064	0,0085	0,0071
2	0,186	ρ^*	0,0775	0,0520	0,0376
		ρ^{alvo}	0,0062	0,0085	0,0067
3	0,220	ρ^*	0,0769	0,0520	0,0370
		ρ^{alvo}	0,0056	0,0087	0,0067
4	0,237	ρ^*	0,0769	0,0513	0,0370
		ρ^{alvo}	0,0057	0,0080	0,0068
5	0,355	ρ^*	0,0770	0,0523	0,0364
		ρ^{alvo}	0,0062	0,0095	0,0063
6	0,525	ρ^*	0,0765	0,0513	0,0367
		ρ^{alvo}	0,0061	0,0087	0,0071
7	0,525	ρ^*	0,0759	0,0510	0,0364
		ρ^{alvo}	0,0052	0,0082	0,0068

7.4 - ANÁLISE DO EFEITO DE ADJACÊNCIA

A influência do efeito de adjacência é analisada para as áreas sobre o açude de São Gonçalo (Figura 6.1). A Tabela 7.8 apresenta os valores de reflectância ρ quando os efeitos atmosféricos são corrigidos, exceto o efeito de adjacência, em função do tamanho do alvo; e, os percentuais de contribuições da vizinhança (% viz) e do alvo (% alvo). Os valores de reflectância ρ mostram que a resposta espectral da água, obtida a partir da imagem, é contaminada pelo efeito de adjacência. Este fato é verificado através dos valores de ρ nas bandas do TM consideradas (bandas 1, 2 e 3) na variação do raio; quanto menor o valor do raio, maior é o valor de ρ , e maior a contribuição da vizinhança.

De acordo com a verdade terrestre, os valores de reflectância ρ são maiores na banda 2, porém, apresentam valores superiores aos da verdade terrestre; caracterizando assim o efeito de vizinhança. A análise entre bandas, mostra que para cada alvo (raio constante) o percentual de vizinhança é maior na banda 1, seguindo as banda 3 e 2, respectivamente; exceto para o alvo nº 4. A explicação para esse fato, é que o efeito de adjacência é função dos seguintes parâmetros: profundidade óptica da atmosfera e reflectância da região adjacente ao alvo, para condição de alvo com característica de baixa reflectância e, dependendo da região espectral considerada um desses parâmetros domina o outro. Na banda 1, a profundidade óptica da atmosfera é maior que nas bandas 2 e 3, dominado, assim a percentagem de contribuição da vizinhança; porém, na banda 3, a reflectância da vizinhança é maior, apesar da profundidade óptica ser menor. Para a banda 2 temos uma ponderação desses parâmetros e, além disso, a reflectância da água ρ , possui valores maiores de reflectância. Sendo assim, da Equação 4.16b (Seção 4.1) tem-se uma menor contribuição da vizinhança.

TABELA 7.8 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DO ALVO QUANDO NÃO SE CONSIDERA O EFEITO DE ADJACÊNCIA E DAS PERCENTAGENS DE CONTRIBUIÇÃO DO ALVO E DA VIZINHANÇA SOBRE A ÁGUA

NÚMERO DO ALVO	RAIO DO ALVO (km)	BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3
1	0,169	ρ	0,0152	0,0160	0,0133
		% viz	69,7	52,4	56,1
		% alvo	29,3	46,7	43,2
2	0,186	ρ	0,0150	0,0160	0,0133
		% viz	69,3	52,4	56,1
		% alvo	29,8	46,7	43,2
3	0,220	ρ	0,0142	0,0160	0,0127
		% viz	67,6	52,3	53,8
		% alvo	31,6	46,8	45,3
4	0,237	ρ	0,0142	0,0152	0,0127
		% viz	67,5	49,9	53,8
		% alvo	31,6	49,3	45,6
5	0,355	ρ	0,0144	0,0164	0,0120
		% viz	67,8	53,2	51,2
		% alvo	31,2	45,8	48,2
6	0,525	ρ	0,0138	0,0152	0,0123
		% viz	66,3	49,6	52,4
		% alvo	32,8	49,6	47,0
7	0,525	ρ	0,0130	0,0148	0,0120
		% viz	64,4	48,4	51,1
		% alvo	34,8	50,8	48,3

7.5 - SIMULAÇÃO DA REFLECTÂNCIA: SISTEMA TERRA-ATMOSFERA

O modelo MCA-CA foi utilizado com a finalidade de simular a reflectância planetária do sistema terra-atmosfera, a reflectância da atmosfera e a reflectância detectada pelo sensor para vários alvos ou composição de alvos característicos da região de São Gonçalo. O modelo MCA-CA foi executado com a reflectância ρ^{atm} , obtida a partir da opção (1), utilizando o método "Single Scattering" e a função de fase dupla de Henyey-Greenstein. Para isso, o MCA-CA foi aplicado sem considerar o efeito de adjacência ($r \rightarrow \infty$), ou seja, cada alvo é representado por ρ_λ (Equação 4.5, Seção 4.1). Quanto aos valores de profundidade óptica, assumiu-se $\tau_a = 0,056$, para o intervalo espectral 0,45-0,52 μm ; $\tau_a = 0,035$, para 0,53-0,62 μm ; $\tau_a = 0,025$, para 0,63-0,69 μm ; e $\tau_a = 0$, para 0,70-0,90 μm (conforme medições efetuadas no EIS).

7.5.1 - REFLECTÂNCIA PLANETÁRIA

As Figuras 7.1 a 7.7 mostram os resultados obtidos para simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera, para vários alvos ou composição de alvos (água, vegetação, solo, água+vegetação, água+solo, vegetação+solo e água+vegetação+solo). Observa-se que, no caso de alvos com valores de reflectância médio, como a vegetação e o solo para comprimentos maiores que 0,5 μm , a reflectância planetária é modulada pela reflectância do alvo (ρ), pois esta é a componente predominante. Para alvos de baixa reflectância, como a água, a componente predominante é a reflectância da atmosfera; observa-se uma relação quase direta entre a reflectância da atmosfera e a reflectância planetária, com uma constante de proporcionalidade próxima de 1. Este fato é utilizado em alguns métodos alternativos, em que a água é utilizada para estimar a reflectância da atmosfera, usando a própria imagem de satélite como informação.

Em se tratando de alvos compostos, em que a água é um dos componentes presentes (água+vegetação, água+solo ou água+vegetação+solo), os

demais componentes são quem modulam a reflectância planetária. Entretanto, no caso da água+vegetação, temos uma predominância da atmosfera para os comprimentos de onda inferiores a $0,52 \mu\text{m}$, devido a existência de uma forte absorção da vegetação, nestes comprimentos de onda. Já para os alvos compostos, como vegetação+solo, há uma predominância da reflectância de um ou de outro para a planetária, dependendo do comprimento de onda; abaixo de $0,5 \mu\text{m}$ temos o solo e acima de $0,69 \mu\text{m}$, tem-se a vegetação, embora a reflectância do solo seja maior que 0,28. Este mesmo fato acontece no caso da água+vegetação+solo, pois a água tem reflectância muito baixa, daí predomina as características de reflexão da vegetação e do solo.

De maneira geral, o efeito da atmosfera é predominante em alvos de baixa reflectância, mesmo sendo uma atmosfera em que a profundidade óptica dos aerossóis é muito baixa, o espalhamento Rayleigh é suficiente para produzir valores de reflectância atmosférica superiores as da água. Em alvos de média reflectância, como solo ou vegetação, a reflectância da atmosfera contamina o sinal, principalmente, à medida que o comprimento de onda diminui. Particularmente, no caso da vegetação, nos comprimentos de onda inferiores a $0,7 \mu\text{m}$. Todavia, dependendo do tipo de atmosfera (por exemplo, com alta carga de aerossol), a reflectância da atmosfera pode produzir alterações significativas na reflectância planetária.

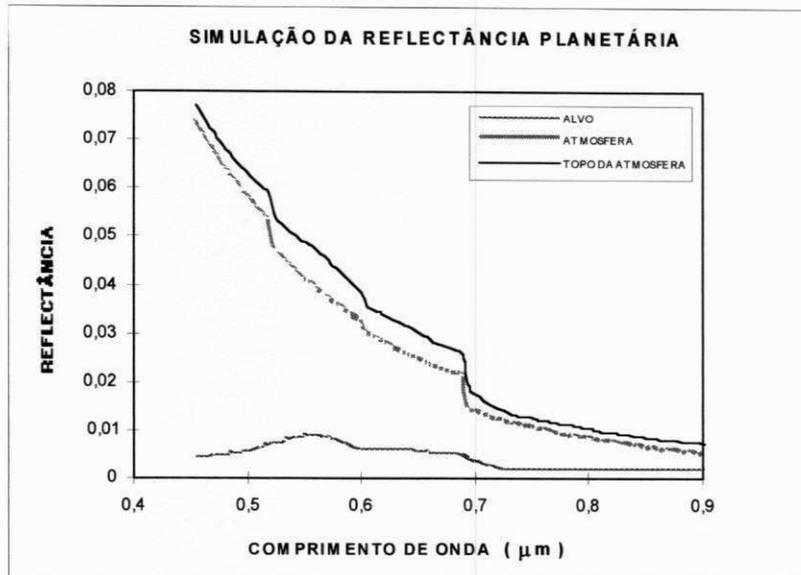


Fig. 7.1 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é a água.

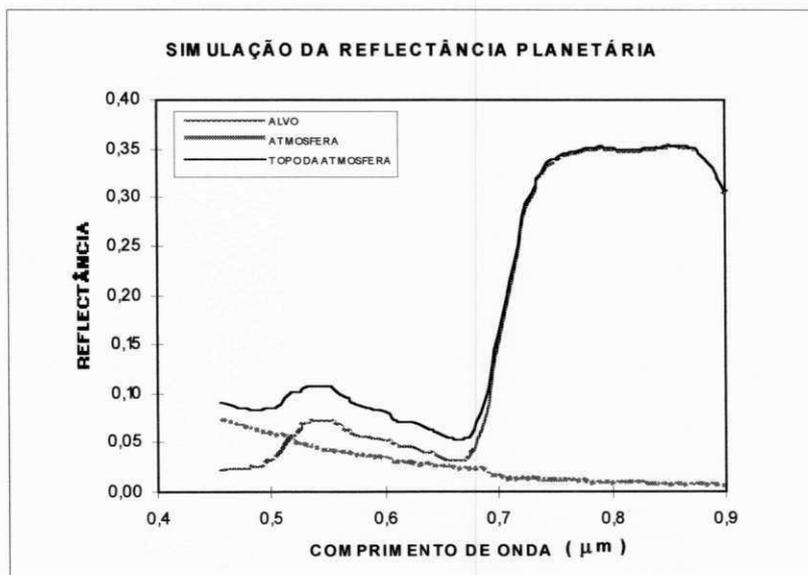


Fig. 7.2 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é a vegetação.

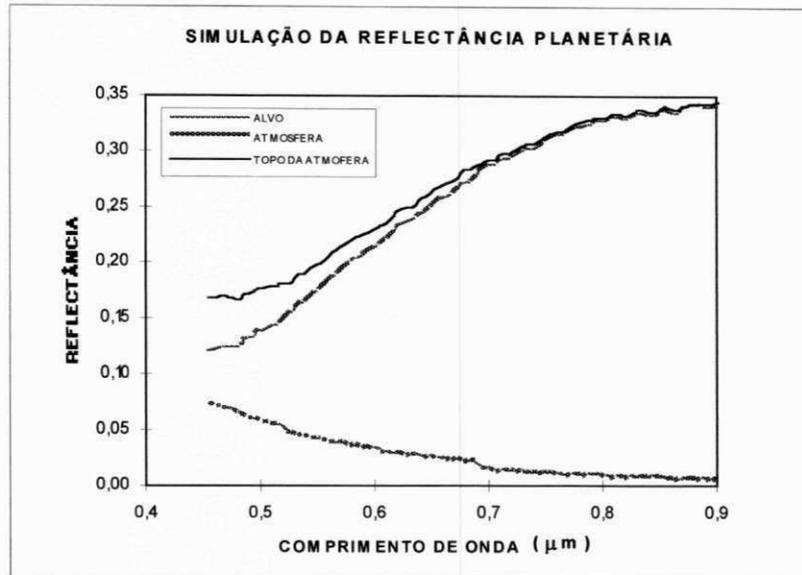


Fig. 7.3 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é o solo.

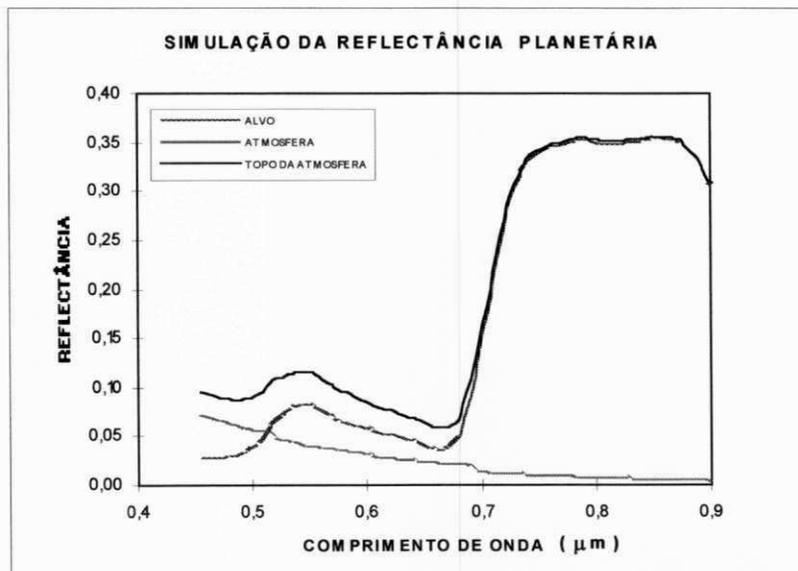


Fig. 7.4 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação.

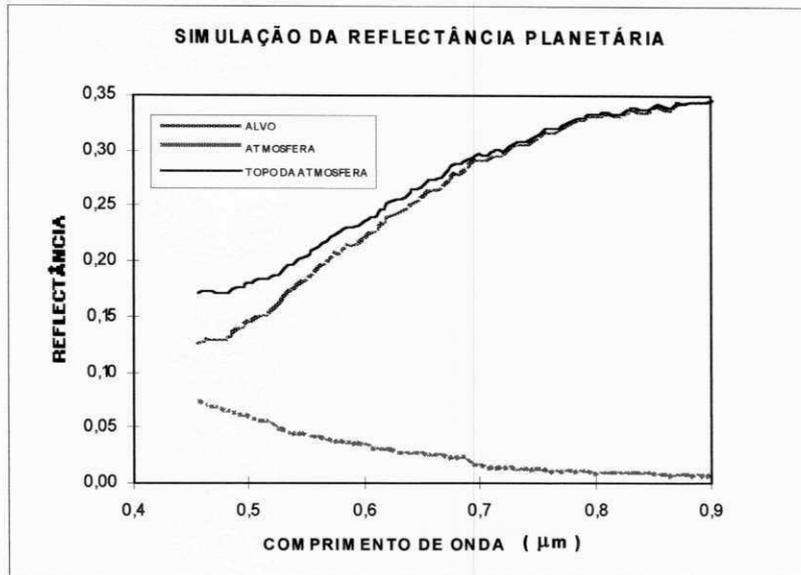


Fig. 7.5 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+solo.

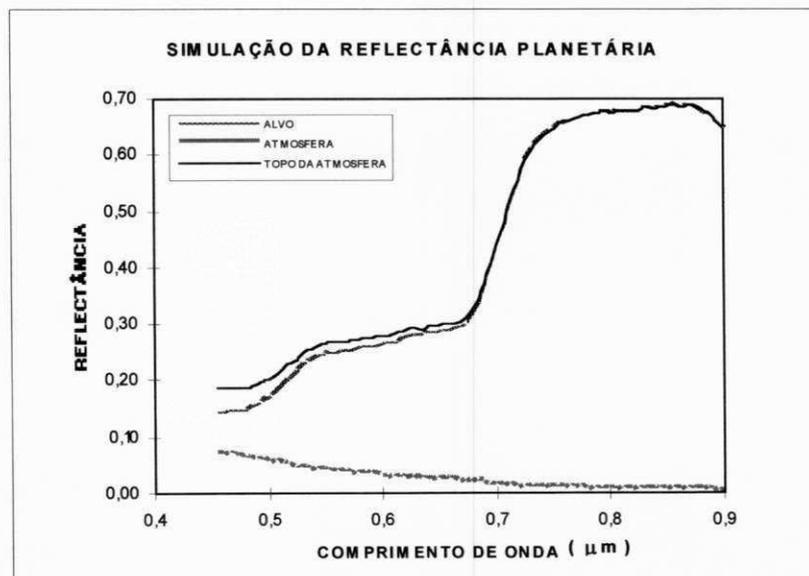


Fig. 7.6 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de vegetação+solo.

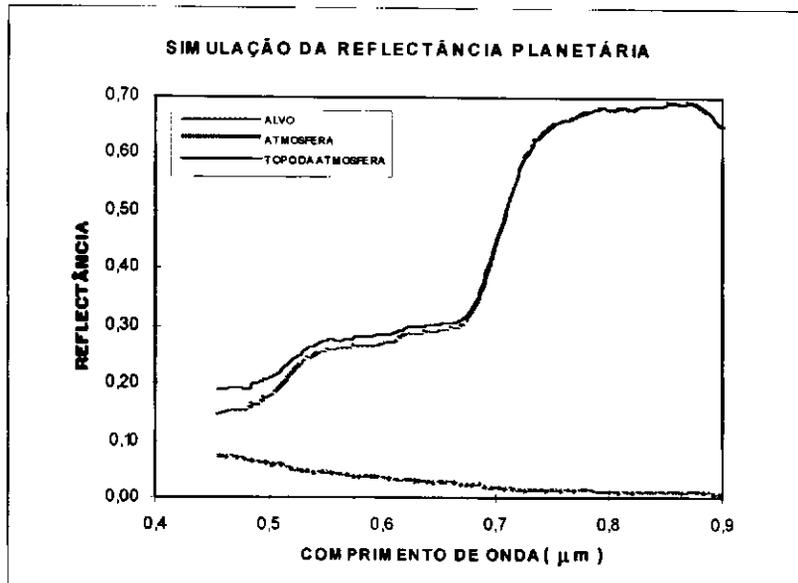


Fig. 7.7 - Simulação da reflectância planetária do sistema terra-atmosfera e da atmosfera em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação+solo.

7.5.2 - REFLECTÂNCIA DETECTADA PELO SENSOR

Para cada um dos alvos analisados anteriormente, foi aplicado as funções respostas espectrais dos canais 1, 2, 3 e 4 do TM do satélite LANDSAT-5 as reflectâncias planetária, para simular o sinal dos sensores. Nas Figuras 7.8 à 7.14, encontram-se a reflectância detectada pelos sensores (ρ^*) para as várias superfícies. Para a superfície da água tem-se que a maior reflectância ρ^* , corresponde a banda 1 seguindo as bandas 2, 3 e 4, devido ao domínio da atmosfera. Para vegetação, na banda 1 tem-se a predominância da atmosfera, nas bandas 2 e 3 da vegetação, pois os valores de reflectância da atmosfera são relativamente baixos e na banda 4 domínio total da vegetação. Já para o solo, há um considerável contribuição da atmosfera nas bandas 1 e 2, e na banda 4 a sua contribuição é praticamente desprezível; na banda 4 devido aos valores muito baixo da reflectância da atmosfera. Nas demais superfícies compostas em que há a presença da água tem-se a predominância das demais superfícies, e portanto, seguem as mesmas análises anteriores. Para superfície de

solo+vegetação, temos que a reflectância da superfície é predominante em todas as bandas, isso devido a soma de duas reflectância caracterizadas por superfícies de média de reflectância.

A análise da reflectância ρ^* para as superfícies de solo+vegetação e/ou água+vegetação+solo evidencia o domínio do solo nas bandas 1, 2 e 3 e, o domínio do solo e da vegetação na banda 4, já que ambos possuem valores muito próximos. Para um caso como este, a identificação da vegetação através de uma imagem de satélite, usando essas quatro bandas seria através da banda 4, pois seus valores são muitos altos modulando assim o sinal dos sensores. Entretanto, a identificação da água seria praticamente impossível devido aos seus valores muito baixos de reflectância.

Diante destas análises, verifica-se que a água é o alvo que sofre mais influência da atmosfera e quando em composição com outras superfícies sua reflectância pode ser até mesmo interpretada com um ruído do que propriamente como um sinal que a caracteriza.

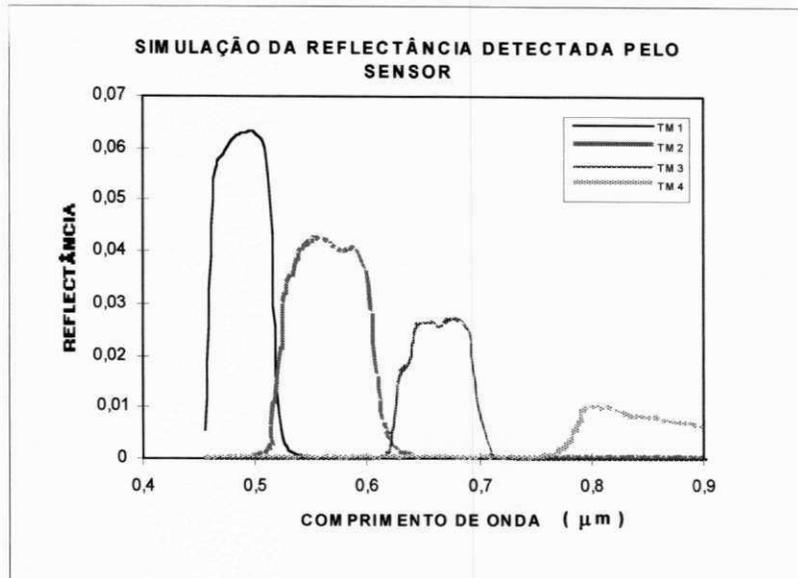


Fig. 7.8 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é a água.

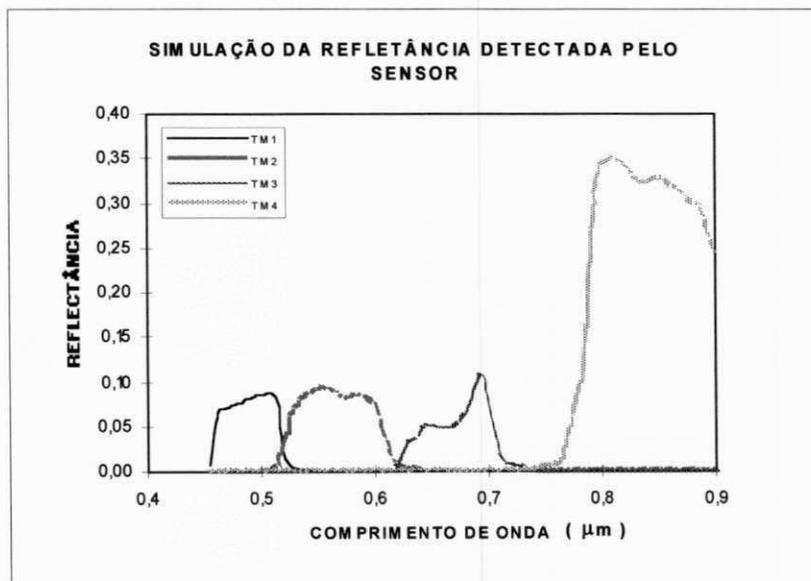


Fig. 7.9 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é a vegetação.

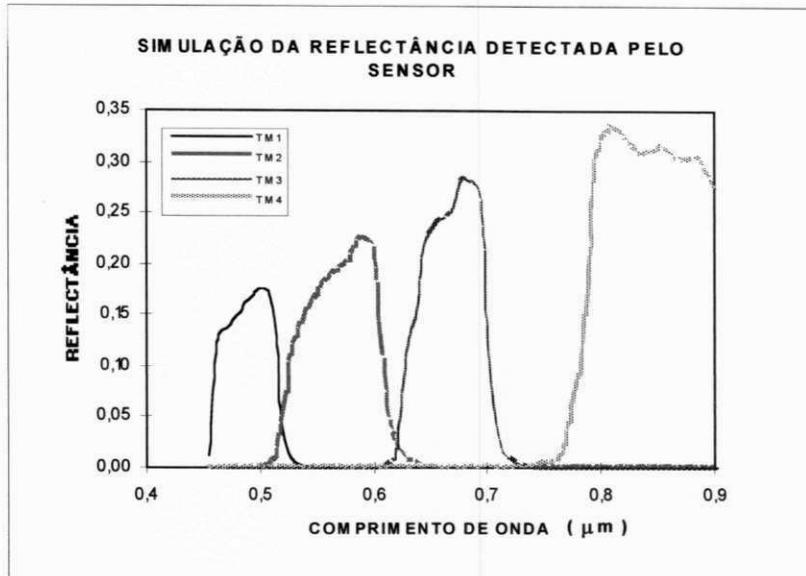


Fig. 7.10 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é o solo.

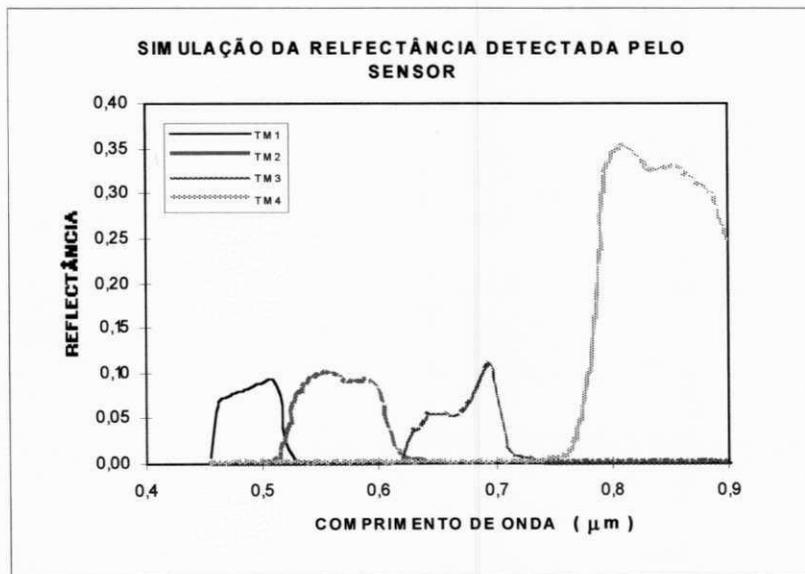


Fig. 7.11 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação.

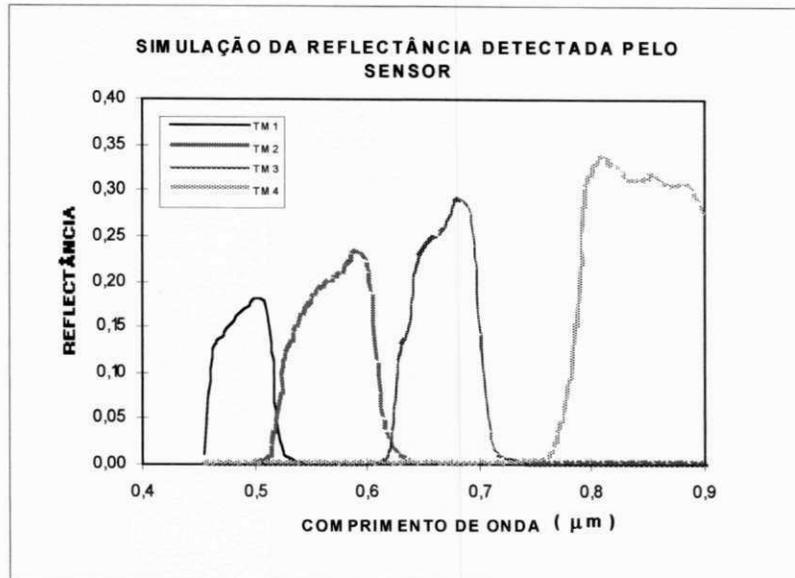


Fig. 7.12 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+solo.

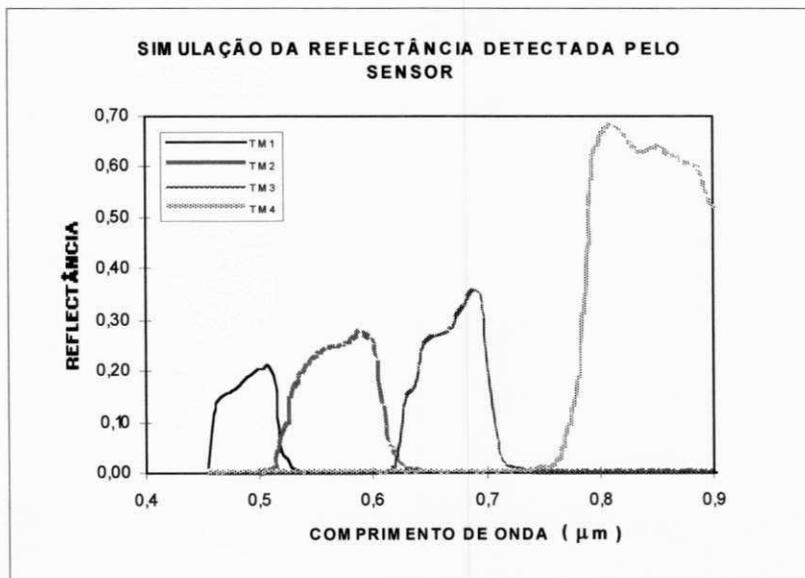


Fig. 7.13 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de vegetação+solo.

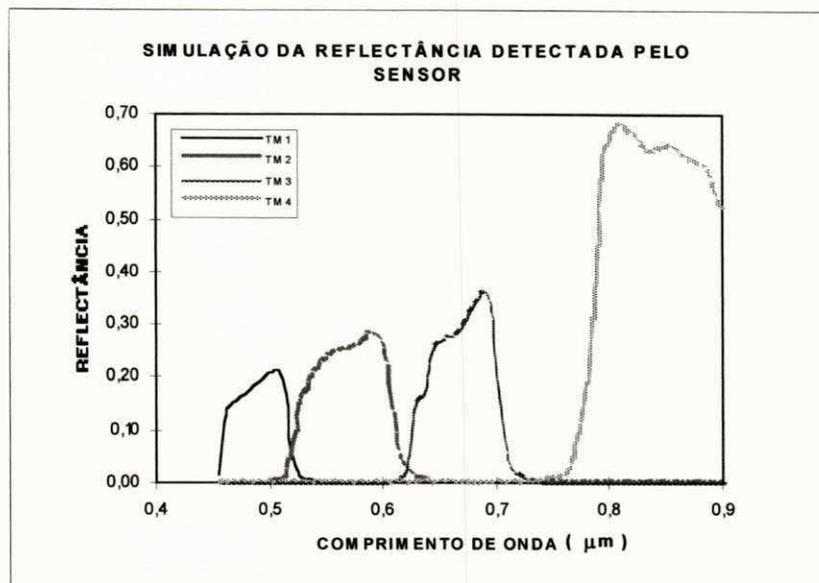


Fig. 7.14 - Simulação da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4) em função do comprimento de onda quando o alvo é composto de água+vegetação+solo.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa foi implementado um modelo físico de correção atmosférica com efeito de adjacência, para determinar a reflectância à superfície a partir da radiância detectada pelo sensor espacial TM, do satélite LANDSAT-5.

A principal finalidade do modelo é a busca de bases científicas para o tratamento do problema de correção atmosférica na atividade de sensoriamento remoto em superfícies heterogêneas, com aplicação em áreas científicas, tais como: hidrologia e oceanografia, em que a água é o elemento de estudo, ou seja, o alvo em que a influência da adjacência é considerável.

Foram testados métodos para determinar a reflectância da atmosfera, aplicando-se vários tipos de aproximações para a função de fase dos aerossóis. Para área de estudo (região de São Gonçalo) os melhores resultados são para o método "Single Scattering", aplicado à atmosfera de mistura de ar mais aerossóis e a função de fase dupla de Henyey-Greenstein.

Em particular, como a atmosfera da região Nordeste do Brasil é caracterizada com baixos valores de profundidade óptica dos aerossóis como São Gonçalo, é provável que o método de determinação da reflectância da atmosfera possa ser aplicado para toda esta região. Apesar da pequena ordem de grandeza da profundidade óptica dos aerossóis, os resultados indicam que seus efeitos são muito importantes, e não deve ser desprezados.

Por outro lado, todos os métodos de determinação da reflectância da atmosfera composta de ar e aerossóis, que não se aplicaram à localidade de São Gonçalo são indicados para áreas com aerossóis em que a concentração ou tamanho

das partículas sejam grandes. Daí, recomenda-se avaliar a utilização desses métodos em outros tipos de aerossóis.

Os principais fundamentos físicos e hipóteses utilizadas no modelo envolvem: espalhamento molecular, espalhamento por aerossóis e/ou espalhamento pela mistura de ar + aerossóis; parametrizações de Coakley et al. (1983); absorção pelo ozônio, calculada banda por banda; transmitância atmosférica; funções de vizinhança; isotropia da superfície; e, reflectância bidirecional do alvo e da adjacência.

O modelo foi avaliado através de comparações com dados de reflectância medidos "in situ". Os valores de reflectância obtidos pelo modelo apresentam-se fisicamente consistentes para todas as análises, que incluíram: efeitos dos aerossóis; percentuais de contribuição do alvo e da adjacência; e, variação dos percentuais dos constituintes que compõem a vizinhança. As análises evidenciaram que a característica de reflexão da água é alterada pelos efeitos atmosféricos, incluindo-se o efeito de adjacência quando a reflectância da vizinhança é maior que a do alvo.

A influência da adjacência também é caracterizada pelas contribuições percentuais para vários alvos sobre o açude de São Gonçalo. De um modo geral, a contribuição da vizinhança possui valores superiores a 50%, evidenciando assim que este efeito não deve ser desprezado nas aplicações do sensoriamento remoto, em particular, no caso de satélites de recursos naturais e, até no caso do NOAA para aplicações específicas

Além de determinar a reflectância à superfície, o modelo foi utilizado para simular o sinal da reflectância planetária e o sinal da reflectância detectada pelo sensor TM (canais 1, 2, 3 e 4), como função do comprimento de onda, em alvos característicos da região de estudo. De uma maneira geral, os resultados demonstram que a reflectância planetária e/ou a detectada pelos sensores do satélite em alvos de baixa reflectância, como a água, é modulada pela reflectância da atmosfera; já em

alvos caracterizados de média reflectância, como o solo ou vegetação, a predominância é da reflectância do alvo.

Tendo em vista o papel que desempenha a correção atmosférica para o monitoramento de recursos naturais, futuras pesquisas devem conduzir experimentos com a finalidade de definir parâmetros ópticos mais realísticos sobre o Brasil, especialmente no tocante aos aerossóis.

Finalmente, deve-se procurar sistematizar este método para o Brasil e aplicar a outros satélites. Isto, devido a grande importância deste estudo para o sensoriamento remoto e, o avanço do programa espacial brasileiro que contempla, ainda nesta década a colocação em órbita de satélites de recursos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARANUVACHAPUN, S. Satellite remote sensing of atmospheric optical depth spectrum. **International Journal of Remote Sensing**, 7 (4): 499-514, 1986.
- ARINO, O.; DEDIEU, G.; DESCHAMPS, P. Y. Accuracy of satellite land surface reflectance determination, **Journal of Applied Meteorology**. 30: (7) 960-972, 1991.
- BASTOS, E. J. B. **Modelagem de radiancias emergentes do sistema terra-atmosfera para calibração de imageadores no visível**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1994. 180p.
- BATES, D. R. **Rayleigh scattering by air**. **Planetary and Space Science**, 32 (6): 785-7790, 1984
- BOTTINO, M. J.; CEBALLOS, J. C. Um estudo de caracterização espectral de alvos em imagens Landsat da Paraíba. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia 8**, Belo Horizonte, 1994. Anais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1994, v.1. p. 396-399.
- BOWKER D. E.; DAVIS, R. E.; MYRICK, D. L.; STACY, K.; JONES, W. T. Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies. **Hampton (Nasa Reference Publication 1139)**, 1985. 181p.
- CASELLES, V.; GARCÍA, M. J. L. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. **International Journal of Remote Sensing** 10 (6): 1127-1134, 1989.

CEBALLOS, J. C. **Um modelo estocástico para propagação de radiação solar na atmosfera. Tese de Doutorado em Meteorologia**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986. 368p.

_____ BASTOS, E. J. B. Um estudo de imagem Landsat-5 no agreste paraibano. I: reflectâncias de duas épocas do ano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 3 (1): 207-215, 1988.

CHANDRASEKHAR, S. **Radiative transfer**. London (Dover Eds., 1960), Oxford University Press, 1950. 393p.

CHAVEZ, P. S. Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing Environment** 24: 459-479, 1988.

_____ Radiometric calibration of Landsat thematic mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55 (9): 1285-1294, 1989.

CHEN, S. C.; GODOY, M. Jr.; HERZ, R. **Correção atmosférica através do método de subtração - aplicabilidade para analisar imagens da região amazônica**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Publicação Interna), São José dos Campos - SP, 1995. 12p.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial**, Ediciones Rialp S. A. Madrid, 1990. 453p.

COAKLEY, J. A.; CESS, R. D.; YUREVICH, F. B. The effect of - tropospheric aerosols on the Earth's radiation budget: A parameterization for climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 40 (1): 116-138, 1983.

DNMET. Normais climatológicas (1961-1990). **Boletim do DNMET**, 1992.

ELTERMAN, L. Vertical-attenuation model with eight surface meteorological ranges 2 to 13 kilometres. Air Force Cambridge Research Laboratory, **Environment Research Paper** nº 318, U. S. Air Force, 1970.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. Relatório do Convênio FAPESP - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. 132p.

EQUIPE DE PEDOLOGIA E FERTILIDADE DO SOLO. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Ministério da Agricultura. Boletim Técnico nº 15. Série Pedologia nº 8, 1972.

FATTORI, A. P. CEBALLOS, J. C., Turbidez atmosférica: um estudo da informação fornecida por determinações pireliométricas. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia 3**, Belo Horizonte, 1984. Anais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1984, v. 2, p. 146-154.

FORMAGGIO, A. R. **Comportamento espectral de alvos - solos**: notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 1995. 36p.

- FRANCA, G. B.; CRACKNELL, A. P. Two-Look Self Consistent Approach for the Atmospheric Correction of CZCS Data. In: **First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments**, New Orleans, Louisiana, USA, 15-17 June, 1992. 12p.
- FREIRE, M. L. F.; BASTOS, E. J. B. Correção atmosférica em imagens Landsat contaminadas por efeito de adjacência: atmosfera Rayleigh. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 8**, Salvador, 1996. Anais. Salvador, 1996.
- GILABERT, M. A.; CONESE, C.; MASELLI, F. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. **International Journal of Remote Sensing**, **15** (10) : 2065-2086, 1994.
- GOODY, R. M. **Atmospheric Radiation I. Theoretical Basis**. Oxford, Claredon Press, 1964. 436p.
- HILL, J.; AIFADOPOULOU, D. Comparative analysis of Landsat - 5 TM and SPOT HRV-1 data for use in multiple sensor approaches. **Remote Sensing Environment**, **34** : 55-70, 1990.
- HOLBEN, B.; VERMOTE, E.; KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; KALB, V. Aerosol Retrieval over Land from AVHRR Data - Application for Atmospheric Correction. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **30** (2) : 212-222, 1992.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. London, Academic Press, 1983. 390p.

KATTAWAR, G. G. A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculations. **Journal Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer**, **15**: 839-849, 1975.

KAUFMAN, Y. J.; SENDRA, C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, **9 (8)** : 1357-1381, 1988.

KNEIZYS, F. X, SHETTLE, E. P., GALLERY, W. O., CHETWYND, J. H.; ABREU, L. W. Jr.; SELBY, J. E. A.; CLOUGH, S. A.; FENN, R. W. Atmospheric transmittance and radiance: computer code LOWTRAN 6. Hanscom AFB, Air Force Geophysics Laboratory **Publication AFGL-TR-83-0187**, 1983.

_____ SHETTLE, E. P., ABREU, L. W.; CHETWYND, J. H.; ANDERSON, G. P.; GALLERY, W. O., SELBY, J. E. A.; CLOUGH, S. A.; Atmospheric transmittance and radiance: computer code LOWTRAN 7. Hanscom AFB, Air Force Geophysics Laboratory **Publication AFGL-TR-88-0177**, 1988.

LIMA, L. M. **Correção atmosférica em imagens Landsat do Estado da Paraíba**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-Pb, 1995. 80p.

LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York, NY, Academic Press, 1980. 392p.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Landsat MSS e TM post-calibration dynamics ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellites temperatures. **Landsat Technical Notes**, **1**, Aug. 1986.

MCCARTNEY, E. J. **Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles.** New York, John Wiley, 1976. 407p.

McCLATCHEY, R. A.; FENN, R. W.; SELBY, J. E. A.; VOLZ, F. E.; GARING, J. S. **Optical properties of atmosphere.** Air Force Cambridge Research Laboratory, **Environment Research Paper nº 411**, 1972.

MEKLER, Y.; JOSEPH, J. H. Direct determination of surface albedos from satellite imagery. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, 22: 530-536, 1983.

MILOVICH, J. A.; FRULLA, L. A.; GAGLIARDINI, D. A. Environment contribution to the atmospheric correction for Landsat-MSS images. **International Journal of Remote Sensing**, 16 (14) : 2515-2537, 1995.

NOVO, E. M. L. M. **Apostila do curso de sensoriamento remoto de sistemas aquáticos:** notas de aulas [Adaptado do livro: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems]. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 1990. 112p.

_____ **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 2^oed. Editora Edgard Blucher Ltda, 1992. 308p.

PALTRIDGE, G. W.; PLATT, C. M. R. **Radiative processes in Meteorology and Climatology.** Amsterdam, Elsevier, 1976.

PENNDORF, R. Tables of refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0,2 and 20,0 μm and their application to atmospheric optics. **Journal of the Optical Society of America**, 47: 176-182, 1957

PERDIZ, V. A. Reflectância: Teoria Geral e Uso da Esfera Integradora. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 6**, Manaus, 1990. Anais. Manaus, 1990, v.2, p. 476-483.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Publicação Interna), São José dos Campos - SP, 1992. 56p.

POPP, T. Correcting atmospheric masking to retrieve the spectral albedo of land surfaces from satellite measurements **International Journal of Remote Sensing** 16 (18): 3483-3508, 1995.

RIBEIRO, L. C. B. **Correção de uma imagem para os efeitos atmosféricos utilizando dados de radiossonda**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1992. 79p.

RICHTER, R. A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**. 11 (1) : 159-166, 1990.

ROBINSON, M. **Solar radiation**. New York, NY. Elsevier, 1966. 34p.

SHETTLE, E. P.; WEINMAN, J. A. The transfer of solar irradiance through inhomogeneous turbid atmospheres evaluated by Eddington's approximation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 71 (7): 1048-1055, 1970.

SHETTLE, E. P.; FENN, R. W. Models for aerosols of lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical parameters. Hanscom AFB, Air Force Geophysics Laboratory, **Publication AFGL-TR-79-0214**, 1979. 94p.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading Addison-Wisley, 1980, 575p.

_____ BIGGAR, S. F.; HOLM, R. G.; JACKSON, R. D.; MAO, Y.; MORAN, M. S.; PALMER, J. M.; YUAN, B. Reflectance - and radiance - based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. **Remote Sensing of Environment**, **22** (11) : 11-37, 1987.

SOUFFLET, V.; TANRÉ, D.; BEGUE, A.; PODAIRE, A.; DESCHAMPS, P. Y. Atmospheric effects on NOAA AVHRR data over Sahelian regions **International Journal of Remote Sensing**, **12** (6) : 1189-1203, 1991.

SOUZA, J. D. **Testes de um modelo de propagação de radiação solar em atmosfera de múltiplas camadas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-Pb, 1995. 74p.

STEFFEN, C. A.; OLIVEIRA, J. L.; GAMA, F. **Programa Espectro - (Versão 1.0/1991)**. Laboratório de Radiometria (LARAD) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos-SP, 1992. 14p.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Radiometria Espectral: Tutorial de Radiometria Espectral. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 7**, 10-14 de Maio - Curitiba, Pr, 1993.

STEFFEN, C. A. **Reflectância**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Publicação Interna), São José dos Campos - SP, 1995. 10p.

TANRÉ, D.; HERMAN, M.; DESCHAMPS, P. Y.; LEFFE, A. Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances including bidirectional properties. **Applied Optics**, **18** (21) : 3587-3594, 1979.

_____ HERMAN, M.; DESCHAMPS, P. Y. Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. **Applied Optics**, **20** (20) : 3676-3684, 1981.

_____ HERMAM, M.; DESCHAMPS, P. Y. Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties. **Applied Optics**, **22** (5): 733-741, 1983.

_____ DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORRCRETTE, J. J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P. Y. Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S). **Technical Report**, 1986. 149p.

_____ DESCHAMPS, P. Y.; DUHAUT, P.; HERMAN, M. Adjacency Effect Produced by the Atmospheric Scattering in Thematic Mapper Data. **Journal of Geophysical Research**, **92** (10) : 12000-12006, 1987.

_____ DESCHAMPS, P. Y.; DEVAUX, C.; HERMAN, M. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data. **Journal of Geophysical Research**, **93** (D12) : 15955-15964, 1988.

TANRÉ, D.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. T. Atmospheric Correction Algorithm for NOAA-AVHRR Products: Theory and Application. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30 (2) : 231-248, 1992.

VERMOTE, E. **Effets d'Atmosphère en Télédétection**. Tese de Doutorado-U.F.R. de Physique Fondamentale, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille Flandres, França, 1990. 177p.

YOUNG, A. T. Revised depolarization corrections for atmospheric extinction. **Applied Optics**, 19 (20): 3427-3428, 1980.

ZAGOLSKI, F.; GASTELUU-ETCHEGORRY, J. P. Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model. **International Journal of Remote Sensing**, 16 (16): 3115-3146, 1995.