

General Disclaimer

One or more of the Following Statements may affect this Document

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available as much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures, which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

E83-10079
CR-145122



SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

Some data on Earth Resources Survey
Program information and without liability
for any use, made thereof.

RECEIVED BY
NASA STI FACILITY
DATE: 9/22/82
DCAF NO. 002949

PROCESSED BY
 NASA STI FACILITY
 ESA - SDS AIAA

(E83-10079) COMPARISON OF DIVERSE METHODS
FOR THE CORRECTION OF ATMOSPHERIC EFFECTS ON
LANDSAT AND SKYLAB IMAGES (Instituto de
Pesquisas Espaciais, Sao Jose) 27 p
HC A03/MF A01

N83-14588

Unclas
00079

CSCI 05B G3/43



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Publicação nº <i>INPE-2471-PRE/160</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DSE/DIN</i>	Programa <i>IMAGE</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>IMAGENS DE SATÉLITE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA MÉTODO DE CORREÇÃO</i>			
7. C.D.U.: <i>621.376.5</i>			
8. Título <i>COMPARAÇÃO DE DIVERSOS MÉTODOS PARA A CORREÇÃO DE EFEITO ATMOSFÉRICO EM IMAGENS LANDSAT E SKYLAB</i>		10. Páginas: <i>29</i>	
		11. Última página: <i>22</i>	
		12. Revisada por <i>UML</i> <i>Ubirajara M. B. Lima</i>	
9. Autoria <i>Gilberto Câmara Luiz Alberto Vieira Dias Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas Ricardo Cartaxo Modesto de Souza Antônio Eduardo Costa Pereira</i>		13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada Diretor</i>	
Assinatura responsável <i>Parada</i>			
14. Resumo/Notas <i>Recentemente com o advento do LANDSAT, SKYLAB e outros satélites e plataformas avançadas de monitoramento da Terra, cresceu em importância a necessidade de avaliar a extensão dos efeitos atmosféricos nos dados de sensoriamento remoto. A atmosfera terrestre diminui a habilidade dos recursos de discriminar corretamente o alvo. A correção radiométrica dos efeitos devidos à atmosfera pode melhorar o desempenho de um sistema interpretador automático de imagens, como o existente no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). O presente trabalho apresenta uma comparação do desempenho dos diversos métodos, divulgados na literatura, com vistas ao desenvolvimento de um sistema de correção atmosférica próprio ao INPE.</i>			
ORIGINAL PAGE IS OF POOR QUALITY			
15. Observações		<i>Este trabalho foi apresentado na 33ª Reunião Anual da SBPC, Salvador, BA, julho de 1981.</i>	

**ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY**

ABSTRACT

Recently, with the advent of LANDSAT, SKYLAB, and other satellites, and platforms for Earth monitoring, the need for atmospheric correction was apparent on remote sensed data. Earth's atmosphere reduces the sensors ability in correctly discriminating targets. Using radiometric correction to reduce the atmospheric effects may improve considerably the performance of an automatic image interpreter. The Institute for Space Research, (Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE) has such an apparatus, and the present work presents a comparison of several methods, from the open literature, leading to the development of an atmospheric correction system for its needs.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	v
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>EFEITO DA ATMOSFERA EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO</u>	1
3. <u>TEORIA DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA</u>	3
3.1 - Profundidade ótica	4
3.2 - Função fase de espalhamento	5
4. <u>O MÉTODO TURNER</u>	6
5. <u>MÉTODOS DE EXTENSÃO DE ASSINATURA</u>	10
6. <u>CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS PARA IMAGENS NO MAR</u>	12
7. <u>CORREÇÃO DE EFEITO ATMOSFÉRICO NO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE KANAZAWA (JAPÃO)</u>	15
8. <u>COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES</u>	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 - Dependência angular de funções de fase de espalhamento num plano azimutal	7
2 - Dependência de profundidade ótica de Rayleigh com o comprimento de onda para a atmosfera padrão dos E.U.A.	9
3 - Profundidade ótica de aerossol (τ_A) em função do alcance visual, v . O parâmetro é o comprimento de onda, λ	10
4 - Diagrama dos processos radiativos na atmosfera com refletor não-uniforme	16
5 - Diagrama de aproximações de reespalhamento simples	18

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

1. INTRODUÇÃO

A presença de atmosfera terrestre é causa de variados problemas na fotointerpretação, no reconhecimento e na classificação de alvos em sensoriamento remoto. A radiância aparente dos atributos terrestres medida por um satélite difere da radiância intrínseca da superfície, devido ao espalhamento e à absorção da radiação causados pelos gases e partículas presentes na atmosfera. O tom azulado presente em muitas imagens de plataformas orbitais como LANDSAT e SKYLAB torna claro ao observador humano tais efeitos. Uma das consequências comuns do efeito da atmosfera é a mistura, num mesmo elemento da imagem, de informações provenientes de pontos distintos da superfície. Torna-se evidente a importância de um procedimento de correção para tais efeitos, de modo a melhorar a eficiência da classificação de imagens LANDSAT e SKYLAB.

Neste trabalho faz-se uma comparação entre diversos métodos — divulgados na literatura — propostos para solucionar o problema. Inicialmente é apresentada a formulação teórica, fazendo-se posterior referência às várias aproximações utilizadas para tornar a solução computacionalmente viável. O conhecimento dos métodos expostos se mostrou fundamental ao desenvolvimento de um Sistema de Correção Atmosférica no INPE.

2. EFEITO DA ATMOSFERA EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A atmosfera afeta a radiação recebida no sensor de quatro diferentes maneiras, a saber:

- 1) modificando a irradiância solar que chega ao topo da atmosfera para produzir a irradiância incidente sobre a superfície terrestre;
- 2) atenuando o sinal recebido do alvo terrestre;
- 3) espalhando radiação não-proveniente do alvo (radiância de trajetória) no campo de visada do sensor;

- 4) misturando assinaturas de alvos distintos num mesmo elemento da imagem resultante.

A equação que fornece a relação entre a radiância total $L(h)$ medida pelo sensor a uma altitude h e a radiância intrínseca L_I do alvo é usualmente dada por

$$L(h) = L_I T(h) + L_p(h) \quad (1)$$

onde:

$L(h)$ \equiv radiância total do alvo medida pelo instrumento sensor;

$T(h)$ \equiv transmitância da atmosfera entre o alvo e o sensor;

L_I \equiv radiância intrínseca do alvo;

$L_p(h)$ \equiv radiância de trajetória gerada pela presença de atmosfera entre o alvo e o sensor.

Supondo-se condições lambertianas (o que é o procedimento usual), a radiância intrínseca será obtida pela equação

$$L_I = \frac{\rho E_H}{\pi} \quad (2)$$

onde E_H \equiv irradiância incidente na superfície;

ρ \equiv reflectância difusa efetiva do material.

Dentro dessa perspectiva, para levar em conta o efeito da atmosfera na medida do sensor, deve-se poder calcular a radiância de trajetória L_p (fonte de efeito aditivo); além disso, deve-se estimar o valor da transmitância atmosférica e a magnitude da irradiância incidente na superfície, para normalizar os valores da radiância total recebida pelo sensor. Com esse intuito, lança-se mão da teoria de transferência radiativa.

3. TEORIA DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

Descreve-se aqui, brevemente, as equações básicas e parâmetros da teoria de transferência radiativa. Para maiores detalhes, veja-se Chandrasekar (1950).

A equação de transferência radiativa pode ser escrita como

$$\mu \frac{d}{d\tau} L_D(\tau, \mu, \phi) = L_D(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi) \quad (3)$$

onde:

τ \equiv profundidade ótica da atmosfera;

L_D \equiv radiância difusa;

J \equiv função de fonte;

μ \equiv $\cos\theta$ (ângulo zenital da direção da radiação);

ϕ \equiv ângulo azimutal da direção da radiação.

A função de fonte J pode ser escrita mais explicitamente como

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 p(\mu, \phi, \mu', \phi') L_D(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' - \frac{E_S(\tau)}{4\pi} p(\mu, \phi, -\mu_0, \phi_0 + \pi) \quad (4)$$

onde μ', ϕ' \equiv direção da radiação incidente;

μ, ϕ \equiv direção de radiação espalhada;

μ_0, ϕ_0 \equiv parâmetros angulares que descrevem a posição do sol;

$E_S(\tau)$ \equiv irradiância solar direta numa área perpendicular ao fluxo solar na profundidade ótica τ ;

$p(\dots)$ \equiv função fase de espalhamento.

A solução da Equação 3 para a radiância de trajetória as cedente (devido apenas ao espalhamento atmosférico), no topo da atmos fera, será

$$L_p(0, \mu, \phi) = \int_0^{\infty} J(\tau, \mu, \phi) e^{-\tau/\mu} \frac{d\tau}{\mu} \quad (5)$$

Subtraindo - se esse parâmetro da Equação 1, levando-se ain da em conta a transmitância da atmosfera e a irradiância descendente to tal na superfície, é possível corrigir o efeito da atmosfera na radiân cia medida pelos sensores dos satélites LANDSAT e SKYLAB. A seguir é feita uma discussão dos parâmetros mais relevantes para a resolução com pleta das Equações 3 e 5.

3.1 - PROFUNDIDADE ÓTICA

É a quantidade que expressa o valor do espalhamento e ab sorção ocorridos. A profundidade ótica para uma altitude h acima do ní vel do mar é dada por

$$\tau = \int_h^{\infty} K(z) dz \quad (6)$$

onde $K(z)$ é o coeficiente de extinção na altitude K. De uma maneira ge ral tem-se, considerando-se apenas o espalhamento,

$$K = K_{\text{Rayleigh}} + K_{\text{Aerosol}}$$

onde K_{Rayleigh} indica o coeficiente de extinção devido à presença de mo léc ulas gasosas (espalhamento Rayleigh), e K_{Aerosol} , aquele resultante da presença de particulados (espalhamento MIE).

A profundidade ótica total (relativa ao nível do mar) é obtida a partir da equação

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} K(z) dz \quad (7)$$

Usualmente separa-se a profundidade ótica em duas componentes: uma decorrente do espalhamento Rayleigh (τ_R), e a outra resultante do espalhamento Mie (τ_A).

3.2 - FUNÇÃO FASE DE ESPALHAMENTO

A função fase de espalhamento simples – denotada por $p(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi')$ – representa a fração da radiação espalhada da direção $d\hat{\Omega}' = d(\mu') d\phi'$, na direção $d\hat{\Omega} = d(\mu) d\phi$. No caso de espalhamento Rayleigh, a função de fase é uma distribuição de dipolo; porém, no caso de espalhamento por aerossóis, 95% da energia é usualmente espalhada para a frente. Isto é ilustrado na Figura 1.

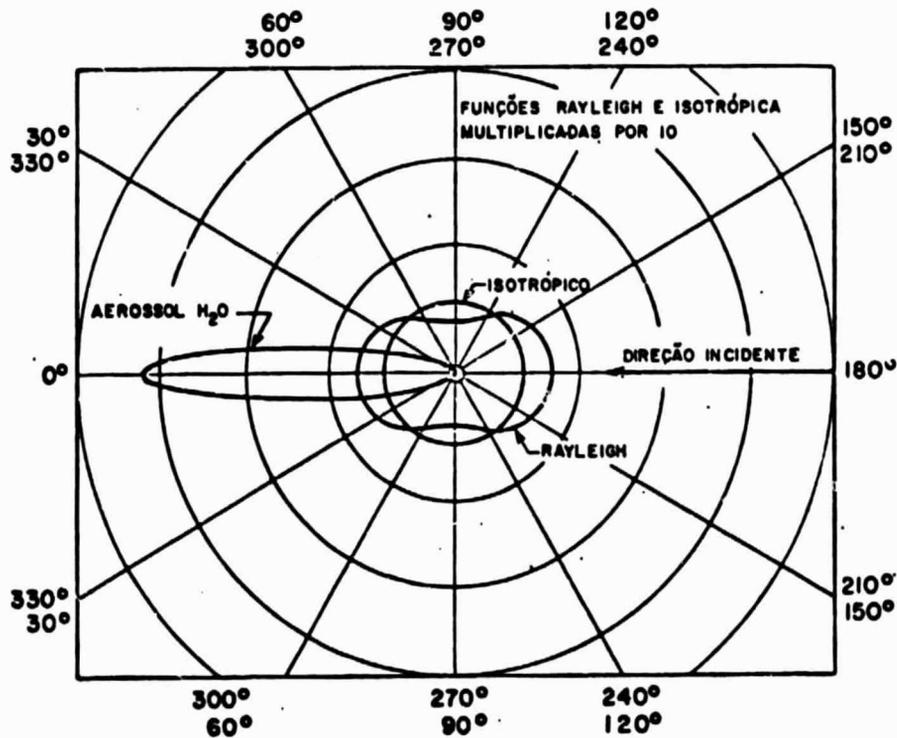


Fig. 1 - Dependência angular de funções de fase de espalhamento em plano azimutal.

FONTE: Turner e Spencer, 1972.

Serão expostos a seguir diversos métodos propostos para compensar o efeito da atmosfera em imagens de satélite; diferenças essenciais – ressaltadas no curso do trabalho – são as maneiras de estimar as quantidades envolvidas.

4. O MÉTODO DE TURNER

Desenvolvido na Universidade de Michigan, o método proposto por Turner e Spencer (1972) considera uma atmosfera homogênea, isotrópica, plano-paralela iluminada pela radiação solar direta fazendo um ângulo θ_0 com a normal. Entende-se como homogênea uma atmosfera cujas propriedades de espalhamento e absorção não dependam da profundidade óptica, isto é

$$p(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') = p(\mu, \phi, \mu', \phi') \quad (8)$$

As suposições do modelo são as seguintes:

- 1) o albedo da superfície segue a lei de Lambert, isto é, é perfeitamente difuso;
- 2) não existe absorção na região onde ocorre espalhamento;
- 3) o alcance visual e a transmitância caracterizam o espalhamento por aerossóis ("haze");
- 4) não há nuvens;
- 5) a função de fase de espalhamento pode ser escrita como

$$p(\mu, \phi, \mu', \phi') = 4\pi\eta\delta(\mu - \mu')\delta(\phi - \phi') + \frac{1}{2}\pi(1 - \eta)\delta(\mu + \mu')\delta(\pi + \phi - \phi') \quad (9)$$

Como antes, μ', ϕ' refere-se à direção inicial e μ, ϕ , à direção final. O parâmetro η é a fração de energia que é espalhada para o hemisfério dianteiro e fornecido pela relação aproximada

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

$$\eta = \frac{0.5 \tau_R + 0.95 \tau_A}{\tau_R + \tau_A} \quad (10)$$

onde τ_R é a profundidade ótica total de Rayleigh, e τ_A é a profundidade ótica total de aerossóis. A Equação 10 diz que no caso de uma atmosfera com muita concentração de aerossóis, então $\tau_A \gg \tau_R$ e $\eta = 0.95$; se existe pouco particulado presente, então $\tau_A \ll \tau_R$ e $\eta = 0.5$.

Usando-se as aproximações acima, pode-se resolver a equação de transferência radiativa. Em termos de profundidade ótica, a distância de trajetória no topo da atmosfera é dada por:

$$\begin{aligned} L_p(0, \mu_V, \phi) = & \frac{E_0}{4\pi [\mu_0 + (1-\eta)\tau_0]} \left\{ \left\{ (1-\eta)\tau_0 [p(\mu_V, \phi_V, \mu_0, \pi + \phi_0) + \right. \right. \\ & + p(\mu_V, \phi_V, -\mu_0, \phi_0)] + \mu_0 p(\mu_V, \phi_V, -\mu_0, \phi_0) + \\ & + \frac{2\mu_0^2 \bar{\rho}}{1+2(1-\bar{\rho})(1-\eta)\tau_0} \left. \right\} [1 - e^{-\tau_0/\mu_V}] + \\ & + \left\{ (1-\eta) [p(\mu_V, \phi_V, \mu_0, \pi + \phi_0) + p(\mu_V, \phi_V, -\mu_0, \phi_0)] - \right. \\ & \left. - \frac{8(1-\eta)\mu_0^2 \bar{\rho}}{1+2(1-\bar{\rho})(1-\eta)\tau_0} \right\} [(\tau_0 + \mu_V) e^{-\tau_0/\mu_V} - \mu_V] \quad (11) \end{aligned}$$

onde:

E_0 \equiv irradiância espectral solar extraterrestre (obtenível das tabelas de Thekaekara - cf. Turner e Spencer (1972));

$\bar{\rho}$ \equiv albedo médio do terreno,

e as funções de fase utilizadas são as fornecidas por Deirmendjian (1969) para uma distribuição continental de aerossóis "polidispersa" e para a função de fase de Rayleigh.

Os parâmetros necessários no modelo de Turner para o procedimento de correção são:

- 1) ângulo zenital solar (θ_0): ângulo entre o feixe solar direto e o nadir;
- 2) ângulo azimutal solar (ϕ_0): ângulo medido na direção dos ponteiros do relógio - a partir do norte verdadeiro até o plano solar, no plano tangente;
- 3) ângulo de visada do nadir (θ_v): ângulo entre a direção da linha-de-visada e o nadir;
- 4) ângulo de visada azimutal (ϕ_v): ângulo entre o norte verdadeiro e o plano de visada, medido na direção dos ponteiros do relógio;
- 5) albedo médio do terreno ($\bar{\rho}$): normalmente obtido coletando-se informação para a região considerada e fazendo-se uma média ponderada das reflectâncias;
- 6) pressão da estação medida na superfície (P);
- 7) alcance visual horizontal.

Com o conhecimento das sete quantidades dadas acima, pode-se determinar a radiância de trajetória (L_p) e a transmitância (T); a partir disso, usando-se a Equação 1, calcula-se a radiância intrínseca do alvo (L_I). Inicialmente acha-se a profundidade ótica padrão de Rayleigh τ_{Ro} a partir da Figura 2. A profundidade ótica de Rayleigh τ_R pode ser obtida por

$$\tau_R = \frac{P}{1013} \tau_{Ro} \quad (12)$$

onde P \equiv pressão da estação em milibares.

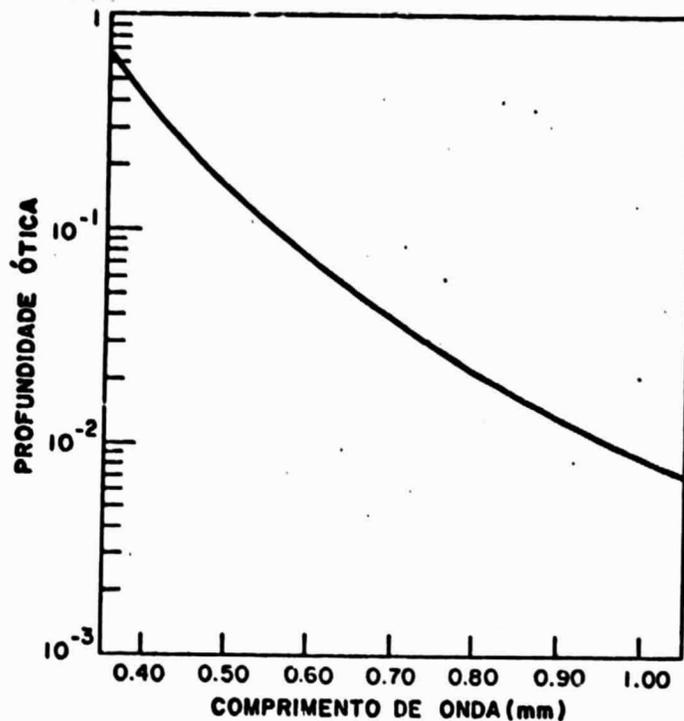


Fig. 2 - Dependência da profundidade ótica de Rayleigh com o comprimento de onda para a atmosfera padrão dos EUA.

FONTE: Op. cit.

A seguir, a profundidade ótica de aerossol τ_A é obtida da Figura 3 para um dado alcance visual e um dado comprimento de onda. A soma de τ_R e τ_A dá a profundidade ótica total τ_0 , sendo a transmitância atmosférica T calculada como

$$T = e^{-\tau_0} \quad (13)$$

Calculando-se os valores de L_p a partir da Equação 11, completa-se o procedimento.

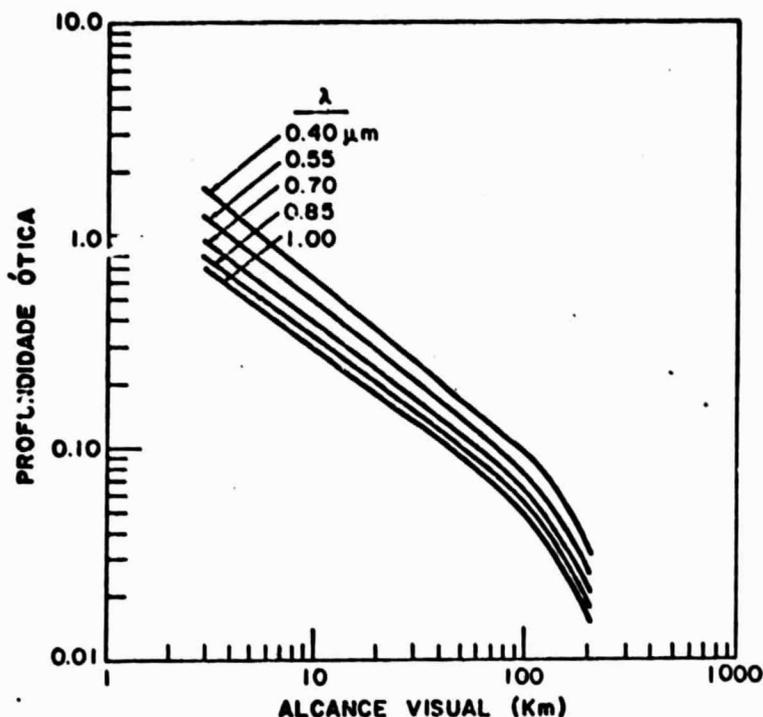


Fig. 3 - Profundidade ótica de aerossol (τ_A) em função do alcance visual, v . O parâmetro λ é o comprimento de onda, λ .

FONTE: Op. cit.

5. MÉTODOS DE EXTENSÃO DE ASSINATURA

No levantamento de grandes áreas de terreno por meio de imagens de satélite, a etapa frequentemente mais custosa é a de fazer o treinamento dos algoritmos de classificação estatística. Seria desejável, portanto, que se abreviasse essa tarefa efetuando-se o treinamento em uma área selecionada e que se utilizassem tais parâmetros estatísticos em outras áreas separadas geograficamente, ou na mesma área, separada temporalmente da área original.

Todavia, surgem problemas ao se tentar, pura e simplesmente, utilizar os parâmetros estatísticos da forma como foram inicialmente obtidos. Isto se deve às variações das condições de observação das imagens em épocas e/ou regiões diferentes. Tais mudanças podem ocorrer até mesmo dentro de uma mesma imagem de satélite. As fontes de variação

podem estar no próprio instrumento (instabilidades na eletrônica do rastreador ou do gravador, por exemplo), no meio ambiente (mudanças na irradiância solar, posição do sol, transmitância atmosférica, ou irradiância de trajetória) ou na cena imageada (umidade do solo, estágio de maturação das plantas).

Os métodos de correção radiométrica, para resolver tais problemas, dividem-se em duas categorias:

- 1) Métodos que visam corrigir explicitamente as distorções existentes, pela inversão do processo físico que causou tais distorções. Esse é o caso dos processos de correção atmosférica, que se baseiam em modelos físicos de transferência radiativa e que são abordados em outras seções deste trabalho.
- 2) Métodos que visam estabelecer uma correspondência entre duas imagens obtidas em condições diferentes, transformando os elementos de uma imagem ("pixels") de modo a "casar" seus parâmetros estatísticos com os de outra imagem.

A seguir, serão descritos os principais métodos incluídos no item 2 acima.

O processo mais simples consiste em ajustar o 1º momento (média) de uma das imagens, de modo a se igualar ao correspondente momento da 2ª imagem (Malila et alii, 1975).

O próximo grau de complexidade envolve a adição de uma constante e a multiplicação por um ganho (Henderson, 1976), escolhidos por um esquema de regressão linear aplicado às médias das agregações de dados obtidos das duas imagens (algoritmo MASC). Outros algoritmos que utilizam transformações sobre as médias das agregações são: OSCAR (Finley e Wehmanen, 1976), MODIFIED OSCAR (Wehmanen, 1976), ROOSTER (Finley, 1975), e MODIFIED ROOSTER (Wehmanen, 1976).

Dois métodos propostos (Thadani, 1977; Peters e Walter, 1975) desenvolvem o processo de estimação da transformação linear para extensão de assinatura pelo critério de máxima verossimilhança.

A utilização do chamado processamento adaptativo — através de filtragem de Kalman (Crane, 1974) — tem sido objeto de investigação. Esse tipo de filtro permite pequenas variações dinâmicas no ajuste, em resposta a mudanças no sinal em cada tipo de cobertura do terreno, em oposição a um único ajuste global da média.

Alguns trabalhos que estabelecem comparações entre os desempenhos dos vários algoritmos propostos também foram desenvolvidos (Malila et alii, 1975; Abottern, 1977).

6. CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS PARA IMAGENS DO MAR

No caso de o alvo ser o oceano e/ou grandes corpos de água, o interesse é associar sua resposta espectral ao conteúdo de clorofila, para localizar áreas piscosas. Neste caso a abordagem é diferente da acima descrita. Para comprimento de onda acima de $0,7 \mu\text{m}$, o oceano comporta-se como um corpo negro; assim, toda radiação que chegar ao sensor no comprimento de onda $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$ é proveniente da atmosfera, e pode ser descontada dos canais de menor comprimento de onda após uma normalização adequada. O trabalho de Viollier et alii (1980) descreve em detalhe um modelo deste tipo. Neste modelo, três suposições são feitas:

- a) independência dos efeitos de espalhamento devido a moléculas (Rayleigh) e devido a aerossóis;
- b) dependência linear do efeito devido a aerossóis na profundidade ótica;
- c) superfície lambertiana.

A correção é feita em duas etapas, uma para o efeito Rayleigh e outra para os aerossóis. A correção é da forma

$$R = R_a + GT$$

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY (14)

onde R_a é a reflectância espalhada apenas pela atmosfera, R é a transmitância difusa da atmosfera, e G é a reflectância do alvo.

R_a pode ser dividida em duas partes, uma devido à presença de moléculas na atmosfera R_a^M , e a outra devido a aerossóis R_a^A

$$R_a = R_a^M + R_a^A \quad (15)$$

R_a^M é proporcional a fatores geométricos e à profundidade ótica devido às moléculas atmosféricas

$$R_a^M = f(\text{geom}) \tau^M \quad (16)$$

Analogamente tem-se para R_a^A

$$R_a^A = f'(\text{geom}) \tau^A$$

Para aerossóis, a transmitância difusa é diferente (em forma) da do caso Rayleigh. Portanto, para uma mistura aerossol e Rayleigh, considera-se (Vioilier et alii, 1980):

$$\begin{aligned} \tau = \frac{1}{4} (1 + \exp(-\tau^M/\mu_0)) (1 + \exp(-\tau^M/\mu)) - \\ - \left[1 - \exp(-b\tau^A) \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \right] \exp(-\tau^M) \left[\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

onde μ e μ_0 são, respectivamente, os cossenos dos ângulos de observação ($\cos\theta$) e de incidência ($\cos\theta_0$).

Comparando-se as reflectâncias em comprimentos de onda de 0,450 μm e 0,650 μm , para aerossóis, tem-se

$$R_{a_{450}}^A = \epsilon' R_{a_{650}}^A \quad (19)$$

onde

$$\epsilon' = 0,9 \tau \quad (20)$$

e

$$\epsilon = \frac{\tau^A(450)}{\tau^A(650)} ; \quad (21)$$

trata-se, portanto, de uma relação linear. Devem ser usados modelos de aerossóis como o de McClatchey et alii (1972) para o caso de atmosferas claras ou turvas, usualmente com visibilidades de 23 km e 5 km, respectivamente.

Com o acima exposto, pode-se montar o modelo para correção

$$e_2 = \left\{ (R_2 - R_{a2}^M) - \epsilon (R_1 - R_{a1}^M) \right\} T_2^{-1} \quad (22)$$

onde os índices 2 e 1 referem-se a diferentes comprimentos de onda.

Para resultados mais precisos, ϵ pode ser aproximado por uma lei de potências:

$$\epsilon = \frac{\tau_2^A}{\tau_1^A} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha} \quad (23)$$

onde α depende da densidade e do tamanho das partículas de aerossol, com variação de 0,2 a 2 (Box e Lo, 1976).

O erro na expressão Δ_2 pode ser expresso em função da incerteza $\Delta\alpha$ em α por

$$\Delta_2 = \frac{1}{T_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} R_{a1}^A \alpha \Delta\alpha \quad (24)$$

A precisão pode ser melhorada se forem considerados três canais ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), onde se tem erro ainda menor

$$\Delta(\rho_2 - \rho_2) = \left(\frac{1}{T_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \frac{1}{T_3} \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right) R_{a_1}^A \propto \Delta\alpha \quad (25)$$

A absorção atmosférica no visível é feita principalmente pelo ozônio e pode ser levada em conta, aditivamente, de maneira independente (Viollier et alii, 1980).

7. CORREÇÃO DO EFEITO ATMOSFÉRICO NO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE KANAZAWA (JAPÃO)

Uma abordagem diferente do problema de correção dos efeitos da atmosfera é a apresentada pelos pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Kanazawa, e.g. Kusaka et alii (1978), Ueno (1980). No que segue, faz-se um breve sumário do procedimento proposto em Kusaka et alii (1978).

Os processos radiativos na atmosfera são descritos no diagrama mostrado na Figura 4.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

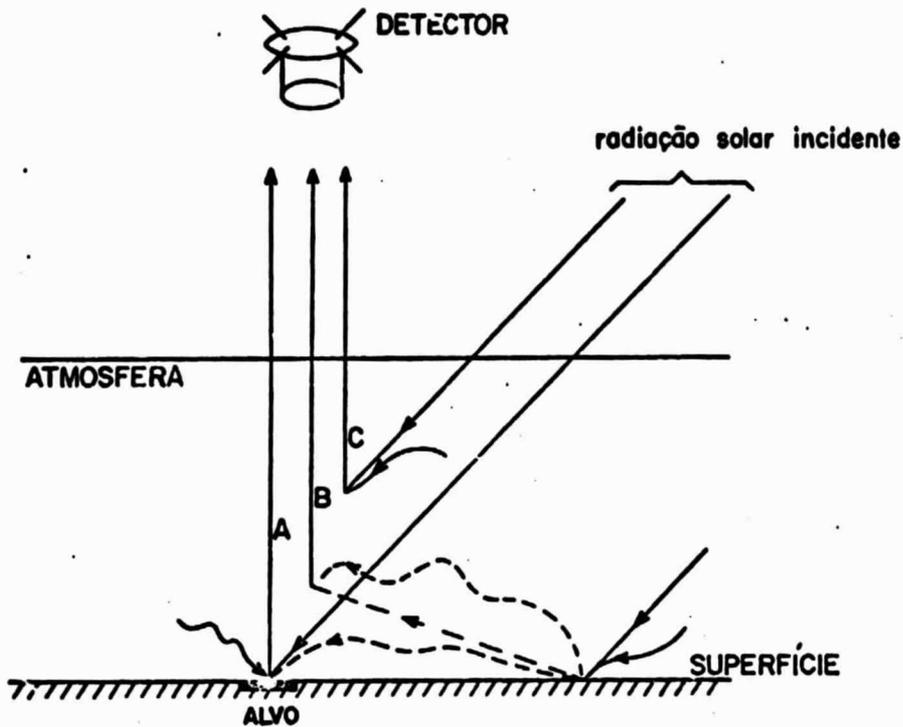


Fig. 4 - Diagrama dos processos radiativos na atmosfera com refletor não-uniforme.

Quando o sensor instalado na plataforma orbital "vê" um elemento (alvo), a radiação incidente no detector consiste em três tipos de fótons:

Tipo A: fótons que foram refletidos pelo alvo e diretamente transmitidos pela atmosfera;

Tipo B: fótons que, após interagir com materiais do fundo, são transmitidos diretamente;

Tipo C: fótons difusamente refletidos pela atmosfera livre.

A radiancia de trajetória vem de fótons dos tipo B ou do tipo C. Deste modo, o objetivo eventual será eliminar esses dois últimos tipos de fótons de radiancia observada, mantendo apenas fótons do tipo A que fornecem informação direta sobre o alvo. A aproximação utilizada é a de espalhamento simples, e deriva-se de uma equação integral que relaciona a distribuição do albedo do terreno com a distribuição de radiancia observada.

Utilizando-se a geometria mostrada na Figura 5 - com a suposição de re-espalhamento simples - a radiancia total recebida pelo sensor no satélite será

$$L_0(x,y) = L_I(x,y) + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\xi,\eta) L_I(x+\xi,y+\eta) d\xi d\eta \quad (26)$$

A Equação 26 é uma equação integral de convolução onde a radiancia intrínseca da superfície (L_I) é a incôgnita, a radiancia total observada é a função forçante, e $K(\xi,\eta)$ é a função de deslocamento. O termo L_C denota a radiancia proveniente de fótons do tipo-C, sendo desprezado no que segue (não afeta o poder de discriminação da imagem). A função forçante $K(\xi,\eta)$ é definida como

$$K(\xi,\eta) = \int_0^H \frac{h}{(\xi^2 + \eta^2 + h^2)^{3/2}} \frac{\rho(\theta^*)}{4\pi} e^{-\tau(h)/\mu^*} \cdot \beta(h) dh \quad (27)$$

onde $\gamma(\theta^*)$ é a função fase de espalhamento simples, H é a profundidade geométrica de atmosfera, $\tau(h)$ é a profundidade ótica e $\beta(h)$ é o coeficiente de extinção na altitude h .

Para resolver a Equação 26 para $L_I(x,y)$, considere-se a transformada de Fourier bidimensional de equação na forma discreta:

$$O_{mn} = I_{mn} + K_{mn} I_{mn} \quad (28)$$

onde I_{mn} , O_{mn} e K_{mn} são coeficientes de Fourier de ordem (m,n) , das quantidades $L_I(x,y)$, $L_0(x,y)$ e $K(\xi,\eta)$. Obtêm-se então:

$$I_{mn} = \frac{O_{mn}}{1 + K_{mn}} \quad (29)$$

As transformadas de Fourier podem ser feitas com eficiência por meio do algoritmo de FFT. Quanto aos parâmetros, a função fase de espalhamento pode ser obtida a partir do trabalho de Deirmendjanz (1969); a profundidade ótica de aerosol é fornecida pelos perfis verticais de atenuação para as componentes moleculares e para os aerossóis, dados em Elterman (1968).

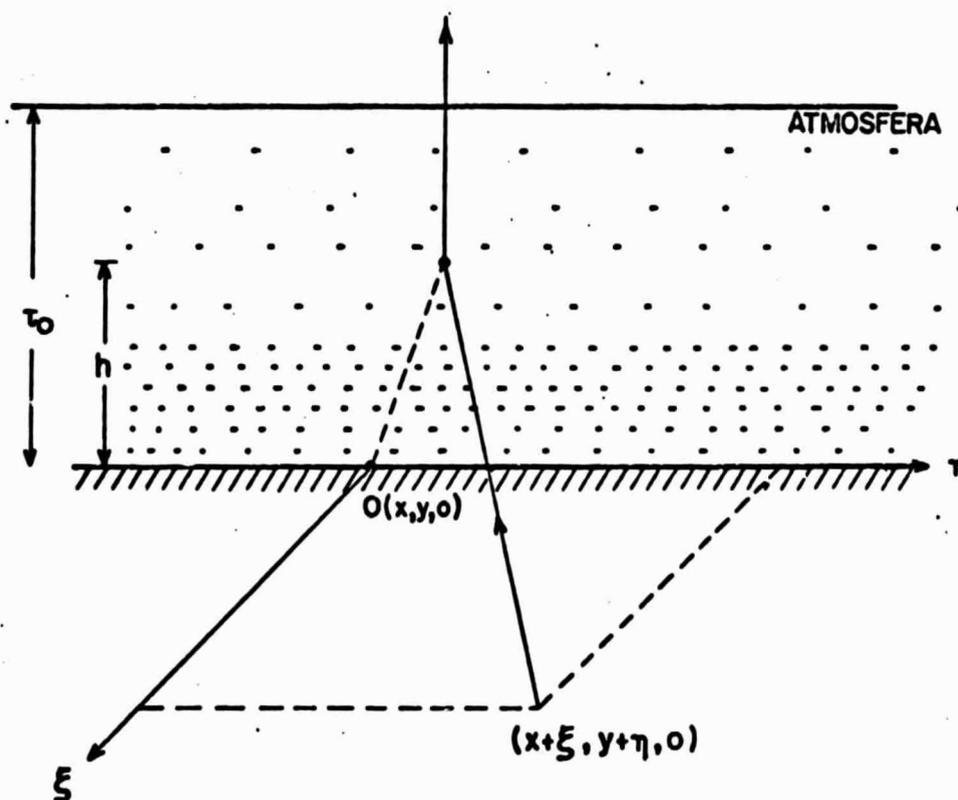


Fig. 5 - Diagrama da aproximação de reespalhamento simples.

8 - COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES

Os métodos de correção atmosférica, apresentados neste trabalho, dividem-se em duas categorias: (1) métodos que visam inverter o processo físico responsável pelas distorções; neste caso, utiliza-se a teoria da transferência radiativa, sendo a questão crucial a aquisição dos parâmetros relevantes; (2) métodos que visam estabelecer uma correspondência entre imagens de datas diferentes; entre estes últimos, estão os de "extensões de assinatura".

No caso de métodos do primeiro tipo, as simplificações utilizadas dependem do problema específico a ser resolvido. O modelo de Turner (Turner e Spencer, 1972) representa uma aproximação para o caso de correção no continente, com pequena densidade de aerossóis. O trabalho de Viollier et alii (1980) é aplicável ao tratar-se com alvos do mar. Uma abordagem distinta, que considera o problema de correção atmosférica como um problema de restauração e faz uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT), é utilizada pelos pesquisadores de Instituto de Tecnologia de Kawazawa (Japão) (Kusaka et alii, 1978).

Devido às dificuldades inerentes ao problema, nenhum método apresentado revelou ser suficientemente geral. Leve-se ainda em consideração que todos os trabalhos foram concebidos tendo em vista as condições atmosféricas do Hemisfério Norte; no caso do Brasil, muito pouco ainda se sabe sobre os parâmetros atmosféricos. Em particular, os diversos tipos de aerossóis de atmosfera são praticamente desconhecidos.

O Instituto de Pesquisas Espaciais está, no momento, desenvolvendo um Sistema de Correção Atmosférica. Um trabalho inicial de pesquisas é representado pelas teses de mestrado de Morimoto (1980) e Bentancurt (1980). Pretende-se que o sistema seja computacionalmente eficiente, sem acarretar simplificações demasiadas. O conhecimento acumulado na análise dos métodos expostos acima foi extremamente importante na formulação de um Algoritmo para Correção Atmosférica no INPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOTTERN, R. Performance tests of signature extension algorithms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 11., Ann Arbor, MI, 1977. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1977, p. 1523-1532.
- BENTANCURT, J.J.V. *Processamento de dados multiespectrais obtidos por plataformas orbitais da série LANDSAT para estudos de qualidade de água da baía de Guanabara*. Tese de Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações. São José dos Campos, INPE, no prelo.
- BOT, M.A.; LO, S.Y. Approximate determination of aerosol distribution. *Journal Applied Meteorology*, 15(10): 1068-76, Oct. 1976.
- CHANDRASEKHAR, S. *Radiative transfer*. New York, Dover, 1950.
- CRANE, R.B. Adaptive processing of multiespectral scanner data using a decision-directed Kalman filter. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9, Ann Arbor, MI, 1977. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1977.
- DEIRMENDJIAN, D. *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*. New York, American Elsevier, 1969.
- ELTERMAN, L. *U.V. Visible and IR attenuation for altitudes to 50 km*. Cambridge, MA, AFCRL, 1968. (AFCLR-68-0153).
- FINLEY, D. *A new algorithm to correct MSS signature for atmospheric effects*. Houston, TX, NASA/JSC, 1975. (NASA-LEC-6246).
- FINLEY, D.; WEHMANEN, O. *Description of the OSCAR algorithm for implementation on the prototype signature extension system*. Houston, TX, NASA/JSC, 1976. (NASA-LEC-8774).
- KUSAKA, T.; HABA, Y.; KAWATA, Y.; TERASHITA, Y.; UENO, S. Removal of atmospheric blurring from remotely sensed imagery. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE IN PATTERN RECOGNITION, 4., Kyoto, Japão, 1978. Proceedings. Piscataway, NJ, IEEE Procs, 1979. p. 931-935.
- HENDERSON, R.G. Signature extension using the MASC algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1): 34-37, Jan. 1976.

MC CLATCHEY, R.A.; FENN, R.W.; SELBY, J.E.A.; VOLZ, F.E.; GARING, J.S. *Optical properties of the atmosphere*. Cambridge, MA, AFCRL, 1972. (AFCRL-TR-72-0437).

MALILA, W.; NALFKA, R.; SARNO, R.F. *Image enhancement and advanced information extraction techniques for ERTS-1 data*. Ann Arbor, MI, ERIM, 1975. (NASA-CR-ERIM-193300-66-F).

MORIMOTO, T. *Estudos de efeitos atmosféricos sobre as radiações percebidas pelos sensores a bordo de plataformas orbitais (ERTS-LANDSAT)*. Tese de Mestrado em Meteorologia. São José dos Campos, INPE, 1980. (INPE-1689-TDL/021).

PETERS, B.C.; WALKER, H. *An iterative procedure for obtaining maximum likelihood estimates of the parameters for a mixture of normal distribution*. Houston, TX, Department of Mathematics, University of Houston, 1975. (Report nº 43).

THADANI, S.G. The maximum likelihood estimation of signature transformation (MLEST) algorithm. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA 4., West Lafayette, In, 1977. Proceedings. West Lafayette, Purdue University, 1977, p. 21-23.

TURNER, R.; SPENCER, M. Atmosphere model for correction of spacecraft data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, 1972. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1972, p. 845-947.

UENO, S. Inversion of solar transmitted radiance profiles for the atmospheric optical thickness. *Applied Mathematics and Computation*, 7: 171-186, 1980.

VIOLLIÈR, M.; TANRE, D.; DESCHAMPS, P. An algorithm for remote sensing of water colc. from space. *Boundary-Layer Meteorology*, 18(3): 247-267, 1980.

WEHMANEN, O. *The Kauth greenness value with application to signature extension and the drought study*. Houston TX, NASA/JSC, 1976. (NASA LEC-8080).