

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA GERAÇÃO DE IMAGENS NDVI DERIVADAS DO AVHRR/NOAA-14 NA FUNCEME

MARCOS LEANDRO KAZMIERCZAK

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Divisão de Geoprocessamento
Caixa Postal 3221 Fortaleza (CE) - E-mail mlk@zeus.funceme.br

Abstract. NDVI images derived from AVHRR/NOAA data have been used by several researchers and institutions to analyse vegetation dynamic, CO₂ concentration and crop growing seasons. Funceme has a ground station to receive NOAA data, which are used to produce NDVI images each 15 days. These images are employed to analyse the status of vegetation and sea surface temperature assessment in the whole northeast of Brazil. A literature review and meetings with researchers at the National Institute of Space Research were done in order to propose a new methodology to produce the Funceme's index, considering a quantitative and more accurate product. Atmospheric and radiometric correction procedures are described in this paper.

Keywords: AVHRR/NOAA, Vegetation Index, Funceme

I. INTRODUÇÃO

A falta de dados confiáveis e atualizados é uma restrição básica para o planejamento e a gestão ambiental, bem como para a modelagem de variáveis climáticas. Assim, a operacionalização das atividades inerentes ao monitoramento das diversas informações que envolvem a gestão ambiental constitui uma etapa fundamental para a eficiência do processo.

Algumas aplicações de dados de sensoriamento remoto requerem não só uma boa resolução espacial para o monitoramento dos fenômenos, mas também temporal. Esta necessidade é suprida pelo emprego de satélites meteorológicos de órbita polar, que provêm cobertura diária global.

Produto destes satélites, o índice de vegetação tem sido empregado por pesquisadores e técnicos de diversas instituições para monitorar flutuações sazonais de extensas áreas de vegetação, classificar tipos de cobertura do solo, monitorar variações na média global atmosférica de CO₂, monitorar a dinâmica da vegetação e a extensão das estações de crescimento das culturas agrícolas.

O levantamento de informações é fundamental para a adequação dos programas existentes na Funceme e para o desenvolvimento de novas rotinas de correção a serem aplicadas ao Índice de Vegetação Diferença Normalizada, a ser utilizado para:

- estimativa das condições atuais da vegetação: discriminação das diferentes fisionomias da vegetação, sua distribuição espacial e quantificação;

- avaliação dos níveis de degradação (série temporal) da vegetação: disponíveis desde 1979, os dados NOAA permitem a realização de estudos multitemporais para o monitoramento da vegetação e sua dinâmica;

- entrada no modelo do índice de susceptibilidade de desertificação do semi-árido: variável essencial para a geração de um algoritmo que modele os diversos graus de susceptibilidade de desertificação em uma determinada área;

- avaliação da vegetação, através da quantificação do índice de área foliar, a ser utilizado no pacote de solo-vegetação do modelo regional de previsão numérica de tempo - RAMS (Regional Atmospheric Modelling System).

2. NECESSIDADE DE CORREÇÃO DOS DADOS AVHRR-NOAA

O AVHRR, à bordo dos satélites NOAA, tem estado em contínua operação desde 1979. Isto criou um notável conjunto de dados globais, que deve se estender pelo próximo século, no qual o potencial de monitoramento dos recursos naturais será cada vez maior.

O interesse na calibração radiométrica e na correção atmosférica dos dados de satélites orbitais tem resultado em diversos artigos. Os primeiros produtos orbitais da superfície terrestre podiam ser considerados como imagens qualitativas. Com o passar do tempo e a evolução dos sistemas sensores, as primeiras estimativas quantitativas foram feitas, baseadas em classificação supervisionada e não-

supervisionada, que não requeria calibração radiométrica ou correção dos efeitos da atmosfera no sinal. Atualmente há um esforço crescente no sentido de melhorar a qualidade desta informação quantitativa obtida pelas imagens.

Correções para os efeitos atmosféricos estão sendo desenvolvidas e cuidados especiais têm sido dados aos produtos de sensoriamento remoto (como os índices de vegetação) que são menos dependentes da direção de observação ou do ângulo zenital solar, mas que são afetados pela atmosfera e pela incerteza da calibração dos sensores.

2.1. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Um dos produtos AVHRR-NOAA mais empregados pela comunidade de sensoriamento remoto é o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), em composições que variam de 7 a 30 dias. Este índice é sensível ao estado da vegetação e o uso de técnicas de composição é uma alternativa para minimizar os efeitos atmosféricos (Holben, 1986) devido a ocorrência de pixels completa ou parcialmente nublados, espalhamento atmosférico e absorção ou variação nas condições de visada e iluminação (Holben e Fraser, 1984).

A atmosfera induz processos complexos quando a superfície é não-Lambertiana e/ou não uniforme (Kaufman, 1982; Diner e Martonchink, 1984; Powers e Gerstl, 1988). Estudos anteriores propuseram métodos para correção atmosférica pela identificação de vegetações escuras (Kaufman e Sendra, 1988) ou pela normalização de seqüências de imagens TM-Landsat (Hall et al., 1991; Kim e Elman, 1990).

Outros estudos analisaram os efeitos atmosféricos em imagens AVHRR (Holben, 1986; Justice et al., 1991; Soufflet et al., 1991). Apesar destes esforços, ainda há uma série de questões que precisam ser esclarecidas: (1) Quão importante é a contribuição da radiação difusa na reflectância de superfícies não-Lambertianas ?; (2) O efeito de adjacência nas imagens AVHRR é negligenciável para todas as condições de observação ?; (3) O efeito atmosférico sobre o NDVI é o mesmo para qualquer tipo de superfície ?; (4) Quão precisa é a correção para o espalhamento molecular ?; (5) Qual é o impacto do espalhamento molecular e de aerossóis nos procedimentos dos algoritmos de correção atmosférica ?

Os canais do NOAA estão localizados no vermelho) e no infravermelho próximo. Há uma banda de absorção de ozônio no canal 1, bem como uma pequena absorção de vapor d'água, enquanto no canal 2 há uma forte absorção

causada pelo vapor d'água, estendendo-se de 930 a 1000 nm. O ozônio não apresenta bandas de absorção no canal 2 mas há uma forte e estreita banda de absorção de oxigênio.

Devido a saturação da banda de oxigênio, a absorção não depende do conteúdo efetivo de oxigênio (conteúdo atual versus massa de ar) e não introduz efeitos angulares (Tanré et al., 1992), resultando numa transmissão quase constante (0,970+-0,005) como função da massa de ar "m", dada por

$$m = 1/\mu_s + 1/\mu_v.$$

Por outro lado, a absorção de ozônio ou água não é saturada e depende da massa de ar. Além disso, o conteúdo de vapor d'água é temporal e espacialmente variável, causando impacto em estudos multitemporais.

O efeito de adjacência se deve a radiação espalhada até o sensor a partir da área contígua ao alvo. Portanto, sua magnitude depende do IFOV do instrumento e da variabilidade espacial da área. No caso do AVHRR, o IFOV é de 0,5 mrad, o que resulta em uma resolução de 1,1x1,1 km ao nadir (Kidwell, 1984). Uma vez que o IFOV não é infinitesimal, alguns dos fótons espalhados a partir da área adjacente ao alvo, produzindo o efeito de adjacência, agora pertencem a parte útil do sinal, uma vez que eles são refletidos pelo próprio pixel.

2.1.1. Funções de absorção e espalhamento para o AVHRR-NOAA

Nos canais AVHRR, o ozônio e a água são os dois componentes responsáveis pela absorção de gases quando as moléculas e os aerossóis afetam o espalhamento atmosférico. Sob condições normais, a maior parte do ozônio está localizada acima de 20 km de altitude, enquanto a água está abaixo de 2 km. O espalhamento Rayleigh ocorre tipicamente dentro dos primeiros 8 km e a camada de aerossol está usualmente confinada a menos de 2 km. Com esta distribuição, o ozônio irá afetar todas as funções de espalhamento (reflectância atmosférica, funções de transmissão e albedo esférico) da mesma maneira. Devido ao fato de que a água é encontrada dentro da camada de mistura, irá afetar diferentemente as várias funções.

2.1.1.1. Transmissão de gases

A influência do ozônio é muito pequena no canal 2 e a transmissão resultante, expressa por

$$t_{03}(\mu_s, \mu_v, UO_3)$$

pode ser assumida como sendo igual a 1.0 para todas as condições, em contraste ao canal 1. O conteúdo de ozônio varia de 0,25 cm-atm em regiões tropicais a 0,50 cm-atm nas regiões sub-árticas no inverno (McClatchey et al., 1972). Variações diurnas podem ser importantes dentro de uma mesma área geográfica, e flutuações de 1.0 a 4.0 g.cm foram observadas (Holben e Eck, 1990; Aro, 1976), o que resulta em uma diminuição de 10% na função de transmissão. Além disso, a variabilidade espacial da água precipitável pode ser importante numa escala de 100 km² e pode afetar diferentemente os pixels dentro de uma mesma imagem AVHRR. O vapor d'água tem um efeito muito forte nas medidas AVHRR e é um "input" importante para o algoritmo de correção atmosférica.

2.1.1.2. Funções de espalhamento

A contribuição do espalhamento Rayleigh ao sinal captado pelo sensor pode facilmente ser computada a partir da geometria Sol-satélite e a partir da elevação do alvo. Tanré et al. (1992), avaliando a reflectância do canal 1 ao nível do mar, usaram um ângulo zenital solar de 60 graus e ângulos zenitais de visada de 0 a 60 graus. A radiação emergente variou segundo um fator de 3: 7,0% de reflectância na direção de retroespalhamento a 2,5% de reflectância a 90 graus a partir do Sol. Para superfícies vegetadas, isto pode introduzir um efeito direcional da mesma ordem de magnitude da atual BRDF.

Segundo estes autores, a contribuição do aerossol é equivalente a reflectância de superfícies vegetadas no canal 1, mesmo para uma atmosfera limpa. Para uma atmosfera muito turbida, o componente aerossol introduz uma reflectância que é três vezes a reflectância da superfície vegetada no canal 1 e um terço da reflectância da maioria das superfícies no canal 2. Os erros aumentam com o ângulo zenital solar, ângulo zenital de visada e espessura óptica do aerossol, mas permanecem aceitáveis para todos os ângulos solares muito baixos.

2.2. EFEITOS ATMOSFÉRICOS SOBRE O NDVI

A absorção de vapor d'água diminui a radiância medida pelo satélite no infravermelho, resultando num efeito diferencial no vermelho e numa diminuição do NDVI com o aumento da quantidade de vapor d'água na atmosfera. O espalhamento pelas moléculas e aerossóis é também espectralmente dependente e afeta qualquer combinação que empregue os dois canais.

As perturbações são maiores para baixos valores de NDVI quando as reflectâncias nos dois canais são equivalentes. O efeito do ozônio é de aumentar o NDVI. A água provoca um efeito de diminuir o NDVI segundo um fator três vezes maior que o aumento provocado pelo ozônio (Tanré et al., 1992).

Apesar de ser impossível atenuar completamente o efeito atmosférico para todas as condições, algumas declarações gerais podem ser feitas:

- A absorção por ozônio pode reduzir a reflectância aparente no canal 1 em 5 a 15%;
- O espalhamento molecular pode causar um aumento na reflectância aparente do canal 1 em 0,02 a 0,07 (unidades de reflectância), dependendo da direção de iluminação e observação;
- A absorção pelo vapor d'água afeta a reflectância aparente no infravermelho próximo reduzindo-a entre 10 a 30%, dependendo da quantidade de vapor d'água e da direção de iluminação e observação.

Esta correção deve ser um requerimento para o NDVI sobre superfícies esparsamente vegetadas, como é o caso de regiões áridas e semi-áridas (Tanré et al., 1992).

Os efeitos atmosféricos são uma limitação séria no uso de dados orbitais. Os métodos derivados para a correção de imagens AVHRR serão de grande valia para o desenvolvimento dos algoritmos de correção do MODIS, instrumento previsto pelo EOS (Earth Observing System).

3. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia descrita a seguir apresenta as informações relativas ao processo de geração do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), a partir de dados coletados pelo sensor AVHRR do NOAA-14. Esta metodologia foi montada a partir da consulta a artigos nacionais e internacionais e na experiência brasileira no tratamento de dados para obtenção de índices de vegetação.

3.1. RECEPÇÃO DOS DADOS

A Funceme dispõe de uma estação completa de recepção de dados AVHRR-NOAA. Devem ser tomadas as devidas precauções para garantir a eficiência na recepção dos dados NOAA-14. Para assegurar a qualidade do processamento e do produto final a ser gerado, as imagens devem ser armazenadas em sua forma original (10 bits).

3.2. ARMAZENAMENTO DOS DADOS

Os dados devem ser armazenados de forma a abranger toda a área de interesse da instituição, de acordo com as seguintes coordenadas envolventes: 02°00'00"S e 47°47'53"W; 15°47'53"S e 34°00'00"W.

3.3. LEITURA DOS DADOS

A órbita deve ser aberta e as informações do "header" devem ser checadas. A seguir, devem ser lidas as primeiras 120 linhas (valor definido pela NASA como ideal). Quando for o caso, as linhas pertencentes a parte descendente da órbita devem ser ignoradas no processamento. Se possível, os dados auxiliares, tais como elevação da superfície terrestre, ozônio e máscara continente/oceano, devem ser adicionadas.

3.4. NAVEGAÇÃO

A etapa de localização dos pontos de controle em uma imagem constitui-se num dos momentos cruciais do processamento. Diversos pesquisadores, inclusive do INPE, estão estudando a implementação de métodos avançados de autocorrelação, o que irá proporcionar um ganho significativo de tempo no processo de navegação. Enquanto tais métodos não estiverem validados, a navegação continuará a ser realizada interativamente pelo operador e sujeita aos erros usuais.

A Universidade do Colorado (EUA) desenvolveu um sistema de navegação preciso para dados GAC. Maiores detalhes podem ser vistos no artigo de Baldwin e Emery (1993).

Um arquivo contendo offsets ("calculated time offsets") para o relógio de bordo é usado para atualizar os tempos para cada linha scaneada, e dados sobre a locação da terra e geometria de visada são calculados para cada píxel. A equipe deve checar as diferenças entre os nós ("tie points") fornecidos pela NOAA e os calculados. No caso de dados GAC, geralmente assumem valores de 6 a 8 Km em latitude e 0 a 4 Km em longitude nas margens ou bordas.

Os programas de navegação, reprojeção e ajuste disponíveis hoje na Funceme devem ser criteriosamente analisados com o objetivo de verificar todos os parâmetros e funções empregadas.

3.5. CALIBRAÇÃO

Os canais 1 e 2 devem ser calibrados para produzir "at-satellite radiances", usando uma correção dependente do tempo e que considere

a degradação do sensor e a intercalibração dos satélites (quando for o caso).

Para que se possa fazer a calibração dos canais do visível e infravermelho próximo, diversas metodologias têm sido empregadas, como as que consideram o monitoramento do brilho de alvos específicos e vôos experimentais. Rao (1993) recomenda os procedimentos de calibração que têm sido empregados pela NASA.

Os "offsets" recomendados foram obtidos com vôos experimentais do U-2 em 1986 e 1988, e os ganhos são baseados em tendências de calibração determinadas usando o deserto do sudeste do Líbano como alvo temporal invariante. Dado o número de dias desde o lançamento (T_d), a radiância calibrada para cada canal (L_i) é calculada como

$$L_i = (\text{GANHO}_i) * (\text{NDIGITAL}_i - \text{OFFSET}),$$

onde o ganho é calculado pela expressão

$$\text{GANHO}_i = A \exp(B * T_d),$$

onde A, B e OFFSET são tabelados. Os dados relativos ao NOAA-14 não são aqui apresentados.

Satélite	Canal	A	B	OFFSET
NOAA-7	1	0,5753	$1,01 \times 10^{-4}$	36,0
	2	0,3914	$1,20 \times 10^{-4}$	37,0
NOAA-9	1	0,5406	$1,66 \times 10^{-4}$	37,0
	2	0,3808	$0,98 \times 10^{-4}$	39,6
NOAA-11	1	0,5496	$0,33 \times 10^{-4}$	40,0
	2	0,3680	$0,55 \times 10^{-4}$	40,0

3.6. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Deve ser aplicada uma correção para o espalhamento Rayleigh, que considere a absorção de ozônio (com o TOMS do Nimbus-7) e a elevação da superfície (com os dados do ETOPO5). Devem também ser consideradas as correções relativas a excentricidade da órbita e iluminação solar. Posteriormente, as radiâncias devem ser convertidas para percentual de reflectância (Goward et al., 1988).

Diversas pesquisas estão em andamento para correção de efeitos atmosféricos em dados AVHRR. O efeito do espalhamento Rayleigh já está bem entendido e avanços significativos têm sido feitos para a compreensão dos efeitos do vapor d'água e aerossóis. Todavia, devido a

dificuldades em encontrar dados auxiliares para vapor d'água e aerossóis e a falta de experiência na aplicação destas correções, o Land Science Working Group (LSWG) recomenda que sejam feitas correções apenas para o espalhamento Rayleigh e absorção de ozônio nos canais 1 e 2.

O primeiro passo da correção atmosférica é calcular a irradiância solar reduzida a partir da absorção de ozônio. Diversos pesquisadores seguem a metodologia proposta por Gordon et al. (1988), em que os valores diários de ozônio são obtidos a partir do Nimbus-7. Onde estes valores não estão disponíveis ("missing values"), um valor médio de 313 Dobson é assumido, e o "flag" de controle de qualidade para o píxel é atualizado para indicar que este valor foi empregado. A irradiância solar reduzida é dada, respectivamente, para uma passagem e duas passagens pela camada de ozônio, pelas seguintes expressões:

$$B'_i = F_i \exp(-T_{Oz} \times (1.0 / \cos \theta_s))$$

$$F'_i = F_i \exp(-T_{Oz} (1.0 / \cos \theta_s + 1.0 / \cos \theta_v))$$

onde F_i é a irradiância solar no topo da atmosfera, T_{Oz} é a espessura óptica da camada de ozônio e θ_s e θ_v são os ângulos zenitais solar e do sensor, respectivamente.

A reflectância da superfície (p_i) é então calculada como a razão da radiância corrigida atmosféricamente (L_w) e da irradiância solar corrigida

$$p_i = (L_w / (B'_i \exp(-T_r (1.0 / \cos \theta_s)))) \times 100$$

onde

$$L_w = L_i^R / (-T_r (1.0 / \cos \theta_v))$$

e L_i^R é o fluxo calibrado menos a correção de Rayleigh, que inclui uma pequena correção para a elevação do píxel segundo a expressão

$$(R(\theta_v, \theta_s, \phi) F'_i) - \frac{(1.0 - \exp(-T_r' / \cos \theta_v))}{(1.0 - \exp(-T_r / \cos \theta_v))}$$

onde T_r é o comprimento óptico da atmosfera e T_r' é o comprimento óptico corrigido para a escala de altura da observação baseada na elevação dos dados ETOPO5.

3.7. NUVENS

Uma "cloud layer" deve ser calculada para cada linha usando um algoritmo específico. Como

exemplo, tem-se o CLAVR (Clouds from AVHRR), que tem sido implementado em processamentos operacionais da NASA. Este algoritmo emprega as reflectâncias do topo da atmosfera para os canais 1 e 2 para realizar diversos testes usando limiares derivados de dados amostrados em áreas geladas ou desérticas.

Os testes são feitos em uma matriz 2x2 píxels, e se todos os 4 píxels passarem no teste, cada píxel é definido como "livre de nuvens". Se 1 a 3 píxels falharem no teste ou se a matriz tiver uma alta variabilidade (grande contraste), a matriz é definida como "mista". Os píxels são definidos como "nublados" se todos os 4 píxels falharem no teste. Alguns testes são empregados para restaurar píxels falsamente identificados como "nublados".

3.8. CÁLCULO DO NDVI

O índice de vegetação é calculado empregando as reflectâncias dos canais 1 e 2, de acordo com a expressão

$$NDVI = (2-1) / (2+1)$$

3.9. BINNING & MAPPING E MASCARAMENTO

O valor de "cutoff" para gerar imagens globais tem sido de 42 graus (NASA Pathfinder), enquanto para imagens continentais tem sido de 20 graus. Considerando-se a área de interesse da Funceme, que é de aproximadamente 14 por 14 graus, deve-se definir um valor de "cutoff" adequado.

Dados obtidos com ângulos zenitais solares maiores que 80 graus não devem ser empregados para composição, uma vez que a precisão cai muito, devido ao fato que as reflectâncias medidas em áreas de sombra são muito baixas.

Os passos 3.3. a 3.9. são repetidos para as próximas 120 linhas e assim sucessivamente, até que todas as linhas tenham sido processadas. Ao final desta etapa, aplica-se a máscara continente/oceano.

3.10. PRODUTO DIÁRIO

Concluída a etapa 3.9., tem-se a imagem NDVI diária, que é armazenada de acordo com os procedimentos usuais.

3.11. CONTROLE DE QUALIDADE

Durante todo o processo, devem ser feitos "check-in's" para a detecção de valores fora da

faixa especificada ou para valores perdidos ("missing values"). Condições de erros fatais resultam na exclusão de dados e as condições de erros não fatais são "flagged" por píxel.

Assim que cada imagem diária é dada como concluída, a imagem resultante é checada visualmente para verificar a ocorrência de erros óbvios ou grosseiros.

3.12. COMPOSIÇÃO

O período de composição varia de instituição para instituição, existindo períodos de 7, 10, 15 e 30 dias. Para o caso da Funceme, pode ser definido um período de ~15 dias para a composição, em função do mês, considerando-se o valor mais alto do NDVI no período considerado.

3.13. CONTROLE DE QUALIDADE

De maneira análoga ao passo 3.11., é feita uma checagem da imagem quinzenal.

3.14. MANIPULAÇÃO

Aprovada pelo controle de qualidade, a imagem NDVI quinzenal está disponível aos usuários internos e externos para manipulação.

BIBLIOGRAFIA

BALDWIN, D.; EMERY, W.J. Systematized approach to AVHRR navigation. *Annals of Glaciology*, 17:414-420. 1993.

GOWARD, H.R.; BROWN, J.W.; EVANS, R.H. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 CZCS. *Applied Optics*, 27:2111-2122. 1988.

HOLBEN, B.N.; FRASER, R.S. Red and near-infrared response to off-nadir viewing. *International Journal of Remote Sensing*, 5. 1984.

HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7:1435-1445. 1986.

JUSTICE, C.O.; ECK, T.F.; TANRÉ, E.T.D.; HOLBEN, B.N. The effect of water vapor on the normalized difference vegetation index derived for the Sahelian Region from NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 12:1165-1187. 1991.

KIDWELL, K.B. NOAA Polar Orbiter (TIROS-N NOAA-6, NOAA-7 and NOAA-8) User's Guide. Washington, D.C., NOAA/NESDIS. 1984.

MCCLATCHEY, R.A.; FENN, R.W.; SELBY, J.E.A.; VOLZ, F.E.; GARING, J.S. Optical properties of the atmosphere. AFCRL-72-0497. Hanscom Field, Bedford, MA. 1972.

RAO, C.R.N. Degradation of the visible and near infrared channels of the AVHRR on the NOAA-9 spacecraft: assessment and recommendations for corrections. NOAA Technical Report NESDIS-70, NOAA-NESDIS, Washington, DC. 1993.

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

TANRÉ, D.; HOLBEN, B.N.; KAUFMAN, Y.J. Atmospheric correction algorithm for NOAA AVHRR products: theory and application. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:231-248. 1992.

Lista das variáveis

s	ângulo zenital solar
v	ângulo zenital do sensor
	ângulo azimutal relativo
T_r'	comprimento óptico corrigido
T_r	comprimento óptico
F_i'	irradiância solar reduzida após duas passagens pela camada de ozônio
B_i'	irradiância solar reduzida após uma passagem pela camada de ozônio
F_{iR}	irradiância solar no topo da atmosfera
L_i	fluxo calibrado - correção de Rayleigh
L_w	radiância corrigida atmosféricamente
T_{oz}	espessura óptica da camada de ozônio

AGRADECIMENTOS

Fica aqui registrado o agradecimento ao Dr. Yosio E. Shimabukuro, ao Dr. Alberto W. Setzer, ao MSc. Alfredo Pereira dos Santos, a MSc. Helena França e a Aníbal Evaristo Fernandes, pela contribuição dada.