



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II

**DEPARTAMENTO DE
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PÓS - GRADUAÇÃO
EM METEOROLOGIA**

ANÁLISE DE PROPRIEDADES RADIATIVAS DE NUVENS CIRRUS

AUTOR: ROBERTO CARLOS GOMES PEREIRA

PUBLICAÇÃO DCA - CMM TD Nº 04 - 1997

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 1997

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES RADIATIVAS
DE NUVENS CIRRUS**

ROBERTO CARLOS GOMES PEREIRA

CAMPINA GRANDE - PB.

MARÇO - 1997

ROBERTO CARLOS GOMES PEREIRA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES RADIATIVAS
DE NUVENS CIRRUS**

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

LINHA DE PESQUISA:

Radiação na Atmosfera e Sensoriamento Remoto

Orientador: Dr. JUAN CARLOS CEBALLOS

Co-orientador: Dr. EDUARDO JORGE BRITO BASTOS

**Campina Grande - PB
Março - 1997**



P436s Pereira, Roberto Carlos Gomes.
Análise de propriedades radiativas de nuvens Cirrus /
Roberto Carlos Gomes Pereira. - Campina Grande, 1997.
76 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.
Referências.
"Orientação : Prof. Dr. Juan Carlos Ceballos, Prof. Dr.
Eduardo Jorge Brito Bastos".

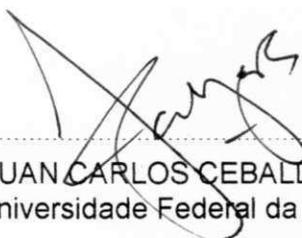
1. Radiação na Atmosfera. 2. Propriedades Radiativas -
Análise. 3. Nuvens Cirrus. 4. Dissertação - Meteorologia.
I. Ceballos, Juan Carlos. II. Bastos, Eduardo Jorge Brito.
III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB).
IV. Título

CDU 551.521.32(043)

ANÁLISE DE PROPRIEDADES RADIATIVAS DE NUVENS CIRRUS

ROBERTO CARLOS GOMES PEREIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/03/97



Prof. Dr. JUAN CARLOS CEBALLOS - Orientador
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. EDUARDO JORGE DE BRITO BASTOS - Co-Orientador
Universidade Federal da Paraíba



Prof. PhD TANTRAVAHU VENKATA RAMANA RAO
Universidade Federal da Paraíba



Prof. MsC ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Universidade Federal da Paraíba

Campina Grande -Pb.
Março de 1997

DEDICATÓRIA

*"A máscara pode esconder o rosto,
mas os olhos não escondem a alma."*

Norberto Lopes

À minha querida esposa e filho: Maria José da Silva
Pereira e Maxwell da Silva Pereira, pelo amor e compreensão
que faz a minha vida ser tão linda.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Juan Carlos Ceballos e Eduardo Jorge de Brito Bastos pela amizade, que antes de qualquer outra coisa, me proporcionou dar este passo no caminho da pesquisa científica.

Aos meus queridos pais, Maria das Neves Gomes Pereira e Edeval Pereira do Nascimento, que através de carinho e perseverança me mostraram o caminho da vida.

Às minhas irmãs, que sempre estiveram ao meu lado dando uma palavra de estímulo.

À Maria Marle Bandeira, funcionária do Laboratório de Meteorologia, Recurso Hídricos e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba, que através de compreensão e paciência mostrou ser uma grande amiga.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Professores para o Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação do Mestrado em Meteorologia, por ter tornado possível a realização desta dissertação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas pelos anos de convivência e parceria.

A todos os amigos e colegas pelos dias bons que vivemos e que, de forma direta ou indireta, deram sua valiosa contribuição para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Foram identificados nuvens Cirrus em imagens Meteosat-5, inferindo-se propriedades tais como altitude, temperatura, emissividade e profundidade óptica no intervalo visível. As imagens correspondem aos canais visível (VIS), infravermelho termal (IR) e do vapor d'água (WV) durante o experimento EIS, no NE brasileiro, para o período de 25 de março a 03 de abril de 1995. Utilizou-se um método estatístico baseado em frequências de histogramas bidimensional dos canais do satélite. A altitude foi obtida utilizando comparações com sondagens feitas no mesmo período de Barbalha-Ce e de Campina Grande-Pb. As temperaturas foram obtidas a partir das imagens com base na temperatura de brilho observadas nos canais WV e IR. Identificaram-se dois tipos predominantes de nuvens Cirrus, um considerado tênue e outro denso, verificando-se que as nuvens tênues estão numa altitude maior e a uma temperatura menor do que as densas. As nuvens densas têm uma emissividade próxima de um, o pode ser comparadas com um "corpo negro", e transmitância em média de 0,04. As nuvens Cirrus apresentaram, em média, temperaturas de 220K e uma altitude de 12.370m.

ABSTRACT

In this study certain characteristics of cirrus clouds such as the height, temperature, emissivity and optical depth are investigated using Meteosat-5 satellite images obtained from the EIS experiment during the period 25th March to 3 rd April 1995 in NE region.

Cloud temperatures obtained from satellite images indicate two distinct types of cirrus clouds one of which is much thinner than the other. Cloud heights were determined using radiosonde data. It is found that the thin clouds are located at a lower altitude and have a higher temperature than the dense clouds, the dense cirrus clouds have an emissivity very close to unity and an optical depth value of about six. Mean height and temperature of the cirrus clouds are 12,370m and 220 K.

SUMÁRIO

	Página
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XX
Lista de Símbolos	XXX
Lista de Abreviaturas e Siglas	XL
1. - Introdução	01
2. - Fundamentação Teórica	04
2.1. - Descrição das características de nuvens Cirrus	04
2.1.1.- Descrição da microfísica das nuvens Cirrus.....	09
2.2. - Método de classificação de nuvens em imagens de satélite	10
2.2.1. - Identificação de nebulosidade em imagens de satélite através de nefanálise.....	11
2.2.2. - Método estatístico de identificação	15
2.3. - Parâmetros radiativos	18
2.3.1. - Temperatura de brilho	19
2.3.2. - Temperatura de nuvens Cirrus	21
2.3.3. - Determinação da altitude de nuvens Cirrus	25
3. - Materiais e Métodos	30
3.1. - Dados utilizadas	30
3.1.1. - Dados das sondagens atmosféricas	31
3.1.2. - Descrição das imagens	31

3.2. - Uso de satélite na detecção de nuvens Cirrus	33
3.3. - Avaliação dos parâmetros radiativos	36
3.3.1. - Radiância de onda longa	36
3.3.2. - Temperatura de Brilho e temperatura termodinâmica.....	37
3.3.3. - Emissividade.....	39
3.3.4. - Transmitância no Infravermelho	40
3.3.5. - Profundidade Óptica no infravermelho	40
3.4. - Determinação da altitude de nuvens Cirrus	41
4. - Resultados	44
4.1. - Classificação das imagens	44
4.1.2. - Nefanálise	46
4.1.3. - Comparações entre o método manual e o modelo automático.....	47
4.3. - Determinação da temperatura das nuvens Cirrus	55
4.4. - Determinação da altitude	62
4.5. - Emissividade dos Cirrus	64
4.6. - Transmitância dos Cirrus	67
4.7. - Profundidade Óptica dos Cirrus	68
5. - Considerações finais	71
6. - Recomendações	73
7. - Referências Bibliográficas	74

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 2.1 - Distribuição geográfica das nuvens altas para o ano de 1977 (Rossow e Lacis 1990)	7
FIGURA 2.2 - Distribuição de nuvens convectivas ao longo de todo globo para os meses de: (a) Janeiro e (b) Julho de 1977 (Rossow e Lacis 1990).	8
FIGURA 2.3 - Imagens do dia 02.04.95 às 12:00 TMG, do <i>Nordeste Brasileiro</i> (a) canal visível e (b) do infravermelho invertida..	15
FIGURA 2.4 - Histograma característico, obtido para um conjunto de imagens, mostrando a posição de diversos tipos de cena num diagrama bidimensional de counts Visível / Infravermelho (Fonte: Farki et al 1993).	18
FIGURA 2.5 - Variação diurna da ROL para uma região sobre o continente africano. As curvas descrevem o comportamento da ROL em função das cenas existentes: as cruces, correspondem a superfície em condições de céu claro, os quadrinhos, a nuvens baixas, os círculos, a nuvens médias e os triângulos, a nuvens altas e nuvens do tipo cirriformes (Schmetz e Liu 1988).	20
FIGURA 2.6 - Rota do avião modelo CV 990, em torno de nuvens Cirrus (Fonte: de Szejwach 1982) .	22
FIGURA 2.7 - Componentes da radiação de onda longa provenientes da Terra, que chegam diretamente ao satélite, que atravessam as nuvens e que são emitidas pelas nuvens..	24

- FIGURA 2.8 - Emissividade dos Cirrus no canal do vapor d'água (1) versus emissividade no canal da janela atmosférica (2) (Fonte: Szejwach 1982). 28
- FIGURA 2.9 - Curvas Γ e Ψ , que através da interseção se pode determinar a temperatura da nuvem T_N referente a um grupo de nuvens observados. 29
- FIGURA 2.10 - Curva para a determinação da temperatura de topo de nuvens Cirrus. A temperatura obtida foi de 222K (Fonte: Desbois e Szejwach, 1987). 29
- FIGURA 2.11 - Temperatura termodinâmica versus emissividade para cinco temperaturas de brilho características de nuvens Cirrus, baseado em Shenk e Curran (1973), modificada para uma temperatura do solo de 300 K. 30
- FIGURA 3.1a - Formatos das imagens do satélite Meteosat-5 utilizados, com as suas respectivas localizações dentro do formato global (em coordenadas de imagem), mostrando as coordenadas dos vértices inferior. 35
- FIGURA 3.1b - Área em coordenadas geográficas coberta pelas imagens, que recebeu o nome de *Nordeste Brasileiro*, onde está contido o Nordeste do Brasil, alguns estados das regiões vizinhas e parte do Oceano Atlântico, ficando de fora apenas uma pequena parte do sul do estado da Bahia. 33

- FIGURA 3.3 - Emissividade de nuvens Cirrus em função da profundidade óptica visível. Os pontos "x" foram obtidos com um modelo para 11 tipos de nuvens com espessura de 0,5; 1; 2 e 4 Km. A linha sólida é uma curva de ajuste com os dados obtidos do modelo (Fonte: Liou 1986). 40
- FIGURA 3.4 - Perfil atmosférico de temperatura e umidade para as seguintes cidades (a) Barbalha - CE e (b) Campina Grande - Pb; para o dia 31.03.95 para o horário das 09:00 horas local ou 12:00 UTC. 43
- FIGURA 4.1 - Histograma de frequência IR x VIS para o dia 02.04.95, para o horário das 18:00 UTC. 48
- FIGURA 4.2 - Histograma de frequência IRxVIS, versus a porcentagem, mostrando as áreas correspondentes a cenas mais comuns dentro de uma imagem. 44
- FIGURA 4.3 - Histograma tridimensional de frequência para os pares de "count" mais freqüentes nos canais IR e WV, para o dia 02.04.95 às 12:00 TMG. 44
- FIGURA 4.4. - (a) imagem classificada utilizando os valores de "count" os canais no espectro infravermelho, IR x WV, para o horário da 12:00 UTC, do dia 02.04.95, e (b) imagem na banda do vapor d'água com os valores de "count" invertida. 45

- FIGURA 4.5 - Cobertura de nuvens Cirrus obtida apartir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas e as restantes de imagens diurna do horário das 12:00 TMG. 46
- FIGURA 4.6 - (a) imagem no canal do visível do dia 02.04.95 às 09:00 horas locais, e (b) imagem classificada para uma cena específica (nuvens Cirrus), usando um método baseado no de Sèze e Desbois (1987), em azul, aparece as mais finas e, em verde, as nuvens mais espessas. 48
- FIGURA 4.7 - Histograma de frequência para toda a imagem do dia 02.04.95 às 12:00 UTC, das temperaturas na banda do vapor d'água versus as temperaturas na janela atmosférica. 52
- Figura 4.8a - Interseção entre às curvas $\check{Y}[C(IR),C(WV)]$ e $C(IR)=\check{Y}[C(WV)]$, de forma que se encontra um valor de "count" que caracteriza a temperatura para o grupo1 de nuvens espessas. 52
- Figura 4.8b - Interseção entre às curvas $\check{Y}[C(IR),C(WV)]$ e $C(IR)=\check{Y}[C(WV)]$, de forma que se encontra um valor de "count" que caracteriza a para o grupo 2, de nuvens tênue.. 53
- Figura 4.9a - Interseção entre às curvas $\check{Y}[C(IR),C(WV)]$ e $C(IR)=\check{Y}[C(WV)]$, para os dois tipos de Cirrus. 53

- FIGURA 4.9b - Determina a temperatura para as nuvens Cirrus espessas, tênue e para os dois grupos simultaneamente, da figura 4.8.a e b. 54
- FIGURA 4.10 - Temperatura de nuvens Cirrus para 10 observa es feitas em pares de imagens WV e IR, usando o método de Szejwach (1982). 54
- FIGURA 4.11 - Varia o da altitude das nuvens Cirrus ao longo de 10 observa es, em pares de imagens WV e IR para Cirrus t nuas (a curva de cima) e , para Cirrus densas (a curva de baixo), onde as varia es de altitudes podem ser atribuídas aos movimentos convectivos abaixo das nuvens. 61
- FIGURA 4.12 - Valores de emissividade obtidas através de medidas feitas sobre nuvens Cirrus em Persons em 26 de novembro de 1991. Para cada caso utilizou-se o c175 e outras distribui es de micro-física de nuvens Cirrus frias (Fonte: Beck *et al.* 1996). 60
- FIGURA 4.13 - Emissividade obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas e as restantes de imagens diurna do horário das 12:00 UTC.. 61
- FIGURA 4.14 - Transmitância obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas, e as restantes de imagens diurnas do horário das 12:00 UTC. 62

FIGURA 4.15 - Profundidade óptica obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas, e as restantes de imagens diurnas do horário das 12:00 UTC. utilizando o método de Fu e Liou (1993). 63

FIGURA 4.16 - Profundidade óptica no espectro solar e IR, obtida com "Lidar" ER-2 a bordo de uma aeronave, entre 16:40 e 16:46 UTC, no dia 28 de outubro de 1986, a uma altitude de 10 Km entorno das nuvens Cirrus (Fonte: Kinne et al. 1992) 63

LISTA DE TABELAS

- TABELA 3.1 - SPC e CAL são coeficientes de calibração, A e A são coeficientes de regressão, onde a é adimensional e b é dado em K^{-1} , para os canais IR e WV do satélite meteosat-5, validos durante o projeto eis. 37
- TABELA 4.1 - Valores de "counts" para os pares (IR,WV), para duas classes de cirrus: 1) espessos e 2) tênues, com os valores do desvio padrão do count (dp), e a porcentagem destes dois tipos de nuvens em cada horário de imagem. 49
- TABELA 4.2 - Valores de "counts" correspondentes às cenas características nos canais do VIS e do IR, provenientes de uma nefanálise para 09:00, 12:00 e 14:00 horas local e à média temporal. 47
- TABELA 4.3 - Os resultados obtidos para temperatura e altitude, para 10 observações feitas ao longo de 8 dias, nos pares de imagens wv e ir, estes são os dias em que se dispõem das imagens nos mesmos, horários dos dois canais, simultaneamente, onde a classe 1, corresponde a nuvens cirrus tênues e a 2 a nuvens espessas..... 55
- TABELA 4.4 - Os resultados obtidos para emissividade, transmitância e profundidade ópticas para 10 observações feitas ao longo de 8 dias, nos pares de imagens WV e IR, onde a classe 1 correspondente a nuvens tênues a 2 nuvens espessas. 64

LISTA DE SIMBOLOS

λ - Comprimento de onda, em μm ;

ϕ_λ - Função de resposta do sensor do satélite para um determinado comprimento de onda;

ν_1 e ν_2 - Frequências (Número de onda em cm^{-1}), para os canais 1 e 2 do Meteosat-5;

a - Albedo;

$B_\lambda(T)$ - Radiância espectral de um corpo negro (função de Planck), para a temperatura T, em ($\text{Wm}^{-2}\text{ster}^{-1}$);

$B_\lambda(T_F)$ e $B_\lambda(T_G)$ - Radiância calculada usando a função de Planck, para as temperaturas do solo no canal 1 e 2, do Meteosat-5, respectivamente ($\text{Wm}^{-2}\text{ster}^{-1}$);

$B_\lambda(T_N)$ - Radiância calculada usando a função de Planck, calculada para uma temperatura das nuvens ($\text{Wm}^{-2}\text{ster}^{-1}$);

$d\lambda$ - Incremento infinito-ezimal de comprimento de onda;

ϵ_1 e ϵ_2 - Emissividade das nuvens para os canais 1 e 2 do satélite Meteosat-5;

K - Grau Kelvin;

Km - Quilometro;

l - Litro;

L_1 e L_2 - Radiância espectral observada para o canal 1 e 2 do Meteosat-5, respectivamente;

T_N - Temperatura termodinâmica da nuvem ($^\circ\text{C}$);

T_c = transmitância da nuvem;

T_F , T_G - Temperaturas da: atmosfera proveniente das camadas abaixo das nuvens no canal WV, do solo no canal IR, respectivamente

τ - Profundidade óptica no visível centrada em $0.5\mu\text{m}$;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Bitmap - formato "Windows" de arquivo de imagens

CAL - coeficiente de calibração

DCA - Departamento de Ciências Atmosféricas

EIS - Experimento Integrado do Semi-Árido

EMAS - Experimento de Meso Escala na Atmosfera do Sertão

EUMETSAT - Organização Europeia para Exploração de Satélites Meteorológicos

FIRE - Primeiro experimento internacional regional do projeto de climatologia de nuvens por satélite

ISCCP - Projeto internacional de climatologia de nuvens por satélite

IR - Espectro infravermelho termal do satélite

LMRS-PB - Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba

Meteosat - Meteorological Satellite (européu)

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

RADSAT - Projeto Radiação-Satélite

ROL - Radiação de Onda Longa

SPC - "Space count"

TMG - Tempo médio de Greenwich

UFPb - Universidade Federal da Paraíba

VIS - Espectro visível do satélite

WV - Espectro vapor d'água do satélite.

1 - INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas as propriedades radiativas dos sistemas de nuvens Cirrus têm gerado um crescente interesse na comunidade meteorológica mundial que estuda a radiação atmosférica. Isto se deve a que, sendo de grande extensão, esse tipo de nuvem é um modulador potencial e significativo no balanço radiativo da Terra, funcionando como um “tampão” virtual para a radiação proveniente do sistema Terra-atmosfera no espectro infravermelho. Devido a sua semi-transparência no espectro visível, permitem a entrada de boa parte da radiação solar. Entretanto, são bastante opacas para a transmissão de radiação no espectro termal. Por causa de sua elevada altitude sua temperatura é baixa; dessa forma, ao mesmo tempo que absorvem e re-emitem radiação de volta para o planeta, a perda radiativa para o espaço planetário é relativamente menor do que para as nuvens mais baixas. Tem-se tentado estudar seu comportamento mediante análise da informação fornecida por satélites, mas a comparação com a “verdade terrestre” determinada à superfície ou em vôo requer aparelhos sofisticados para obter dados. Por enquanto, a maioria dos estudos comparam dados de satélite com estimativas teóricas a fim de determinar, dentre outros, temperatura termodinâmica, altitude, espessura e propriedades microfísicas dessas nuvens.

As nuvens Cirrus, regularmente cobrem em torno de 20% do globo, sendo uma das componentes de difícil solução nas pesquisas de tempo e clima.

Devido a sua localização na alta troposfera, tornando difícil avaliar os detalhes da composição microfísica das mesmas; apenas recentemente vêm sendo realizadas pesquisas com avaliações precisas, utilizando equipamentos sofisticados (como o LIDAR) em aeronaves que atingem altos níveis. Quanto à termodinâmica e/ou dinâmica, o mecanismo de formação e dissipação dos Cirrus não está bem definido, devido às variações nas escalas temporal e espacial (Beck et al. 1996).

As nuvens Cirrus possuem uma natureza tênue, fator este que complica o estudo de suas características radiativas. Observações por satélite podem ser usadas para o estudo da variabilidade da radiação que sai, transmitida através dos Cirrus. Modelar suas características radiativas é complexo, devido à incerteza na distribuição do tamanho das partículas. Uma outra linha de incerteza, é o pouco conhecimento da dinâmica dos processos que controlam a presença de água na nuvem, a condensação dos seus núcleos e sua origem (Beck et al. 1996).

As nuvens altas que contêm cristais de gelo em baixa concentração, são importantes e têm grande significado radiativo, por serem normalmente de pequenas espessura óptica e semitransparentes no visível. O grau e extensão do "efeito estufa-versus-albedo" que envolve nuvens Cirrus gera uma influência significativa na taxa de resfriamento e aquecimento da atmosfera na vertical, como também na escala horizontal. Esses efeitos, ao longo de "feedbacks" de nuvens-radiação, são reorganizados para fazer o domínio dos processos de perturbações no clima, e aparecem também com profunda influência nos sistemas de tempo sinótico e global, em pouco tempo ou ao longo de três dias (Liou 1986).

Cientes das limitações, é notório que renomados pesquisadores internacionais vêm focalizando a possibilidade de viabilizar as observações das propriedades dos Cirrus por satélite. O presente estudo faz o uso de métodos

desenvolvidos por pesquisadores de nuvens Cirrus tais como: Liou em 1977 e 1986, Ackerman et al. em 1990, entre outros (Beck et al. 1996).

Objetivos do trabalho

Neste trabalho pretende-se estudar nuvens Cirrus sobre a região Nordeste do Brasil e parte do Oceano Atlântico, com ajuda de radiossondagens e de imagens multiespectrais do satélite Meteosat 5, tendo como objetivos particulares:

- i.* Adaptar um método de classificação automática para a detecção de nuvens Cirrus em imagens de satélite;
- ii.* Inferir propriedades radiativas e temperatura e altitude destas nuvens.

2. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

2.1. Descrição das Características de Nuvens Cirrus

Os Cirrus fazem parte de uma família composta por nuvens altas que são classificadas em três espécies, por sua morfologia, a partir de observações à superfície. O Departamento Nacional de Meteorologia, descreve as observações à superfície das nuvens altas, divididas em três espécies: Cirrus, Cirroscumulus e Cirrostratus, que possuem uma mesma formação e altitude em comum e têm, quanto às suas formas e origem, pequenas diferenças. Estas nuvens têm forma de filamentos brancos e delicados, ou de faixas estreitas brancas, com um brilho sedoso, e aspecto fibroso ou de forma de grânulos, rugas, etc., soldados ou não e dispostos mais ou menos regularmente. Esta última afirmativa só não é aplicada para os Cirrostratus, que têm sempre uma forma de véu transparente, esbranquiçado e liso, cobrindo inteiramente ou parcialmente o céu, dando geralmente lugar a fenômenos de halo e auroras.

Os Cirrus nem sempre são suficientemente espessos para projetar sua sombra em objetos no solo, exceto quando o Sol está baixo no horizonte. Quanto a sua constituição, são quase que exclusivamente compostos por cristais de gelo e gotículas d'água fortemente super-resfriadas. Em geral as gotículas dão lugar rapidamente aos cristais de gelo (Ferrão, 1972).

Neste trabalho denominou-se de Cirrus a variedade de nuvens altas, que em virtude das imagens do satélite Meteosat possuem uma fraca resolução espacial (ou seja, mostra em uma grande área em cada elemento de imagem) não fornecem detalhes para a distinção das formas desses tipos de nuvens. Sendo assim, é atribuído apenas o nome Cirrus para todas elas, a semelhança das publicações internacionais sobre este tema, como Shenk e Curran 1973, Grund e Eloranta 1990, Heymsfield et al. 1990 e Menzel et al. 1992.

As nuvens Cirrostratus têm extensões horizontais que estão entre 15 e 100 Km, com uma pequena atividade convectiva, ou seja, sua extensão vertical é em torno de 1 Km. Estão sempre associadas a movimentos frontais, no interior de regiões com fortes movimentos convectivos, e tem temperaturas na base variando entre -21°C e -36°C , com grande parte de sua massa em forma de água super resfriada e o restante da sua massa em forma de gelo (Sassen et al. 1989). Estas características estão associadas a latitudes médias. Já nas latitudes tropicais, este tipo de nuvem está associado a movimentos verticais fortes causados por cumulonimbus na maioria das vezes, e tem uma extensão horizontal bem menor do que a encontrada em latitudes médias.

A altura do topo, centro e base dos Cirrus depende do processo de formação das nuvens. Quanto a seu tamanho horizontal, depende da direção do vento variando entre 5 e 400 Km. As razões entre as dimensões verticais e horizontais é de 1/5 até 1/1 (Grund e Eloranta, 1990), isto para nuvens Cirrus associadas a sistemas frontais em latitudes médias ou a correntes de jato, mas na região tropical a extensão horizontal ocupada por este tipo de nuvem, na maioria das vezes, não chega a 400 Km.

As nuvens Cirrus estão presentes em todas as estações do ano em torno de 20% a 30% do tempo, ocupando porcentagens iguais de área horizontal. Há um incremento de 20% na permanência com o aumento da atividade convectiva. Quanto à cobertura de nuvens Cirrus, geograficamente têm-se variações diária e sazonal pequenas sobre os continentes; entretanto, em alguns casos podem ser encontradas grandes variações (por exemplo, a variação sazonal sobre o oeste do Oceano Pacífico). A variação diurna na dinâmica das nuvens Cirrus é significativa no verão, mas não no inverno. Neste tipo de nuvens a dinâmica é bastante complexa; os dados revelam que, na maioria dos casos, as nuvens ocorrem onde comumente os parâmetros como velocidade vertical do vento e temperatura, entre outros, indicam movimentos verticais fortes. Todavia, algumas vezes, pois se verifica a ocorrência desse tipo de nuvem onde os parâmetros dinâmicos são fracos (Menzel et al.1992).

Na Figura 2.1 ilustra-se a distribuição planetária da média anual para as nuvens altas, onde são incluídas as nuvens do tipo Cirrus para o ano de 1977. Pode-se ver que este tipo de nuvem se apresenta em 30% da área e se localiza em sua maior parte ao longo das latitudes tropicais. Na Figura 2.2, podemos ver como estão geograficamente distribuídas as nuvens convectivas para os meses de janeiro e julho

mostrando uma forte permanência, em toda a América do Sul no mês de janeiro, e na costa norte do Nordeste do Brasil, no mês de julho (Rossow e Laciis 1990).

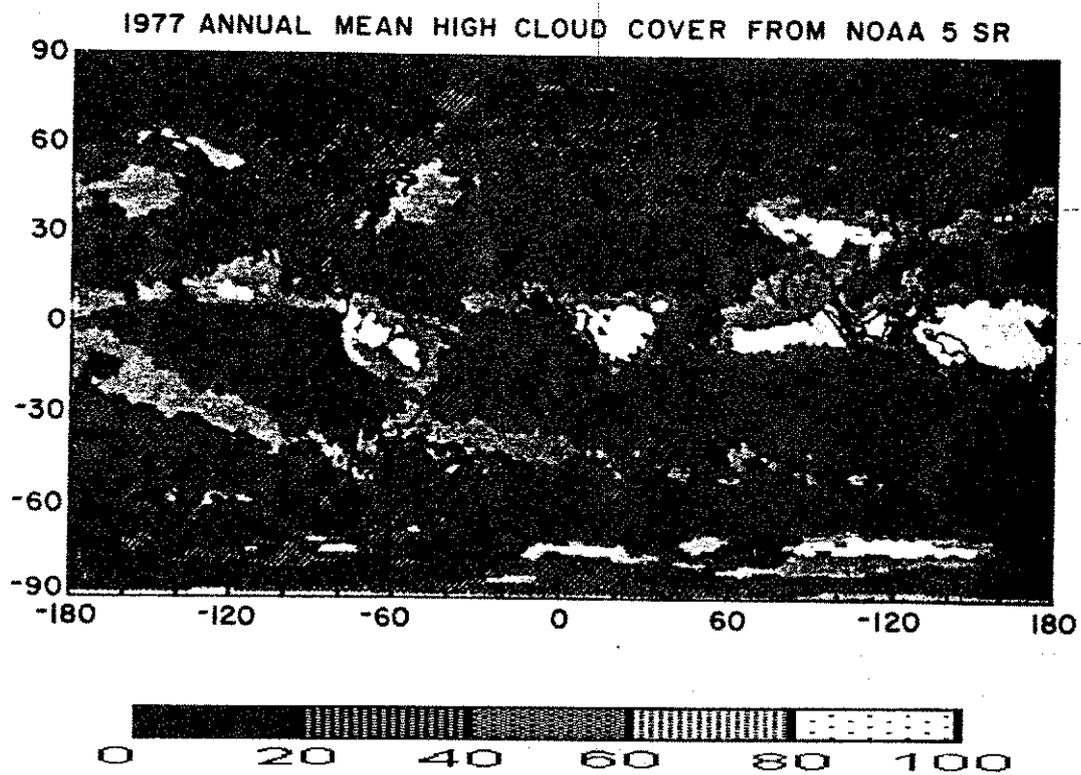
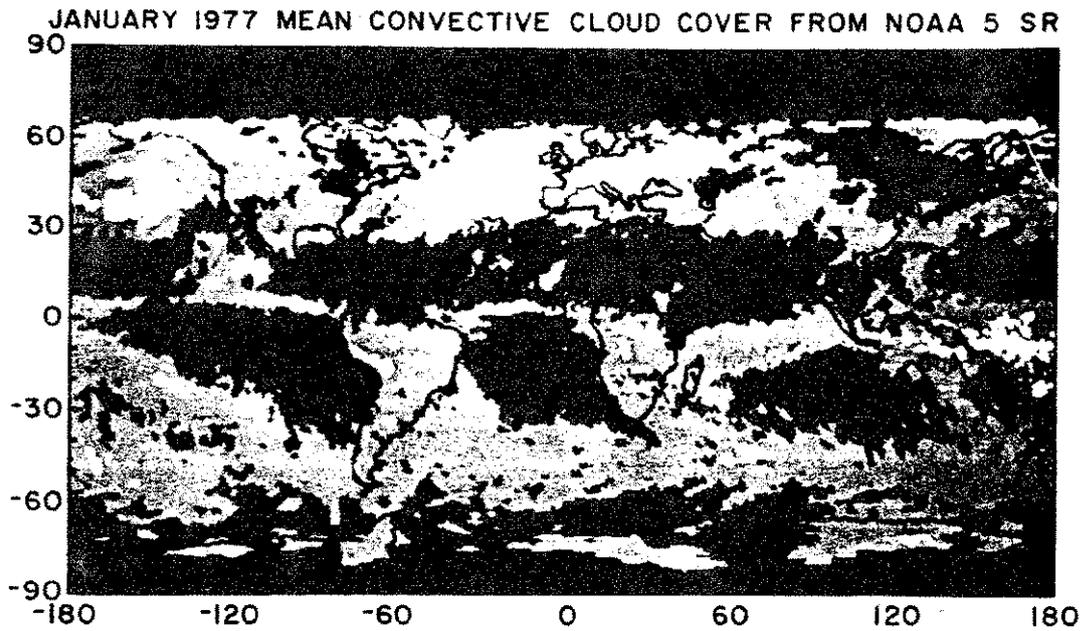
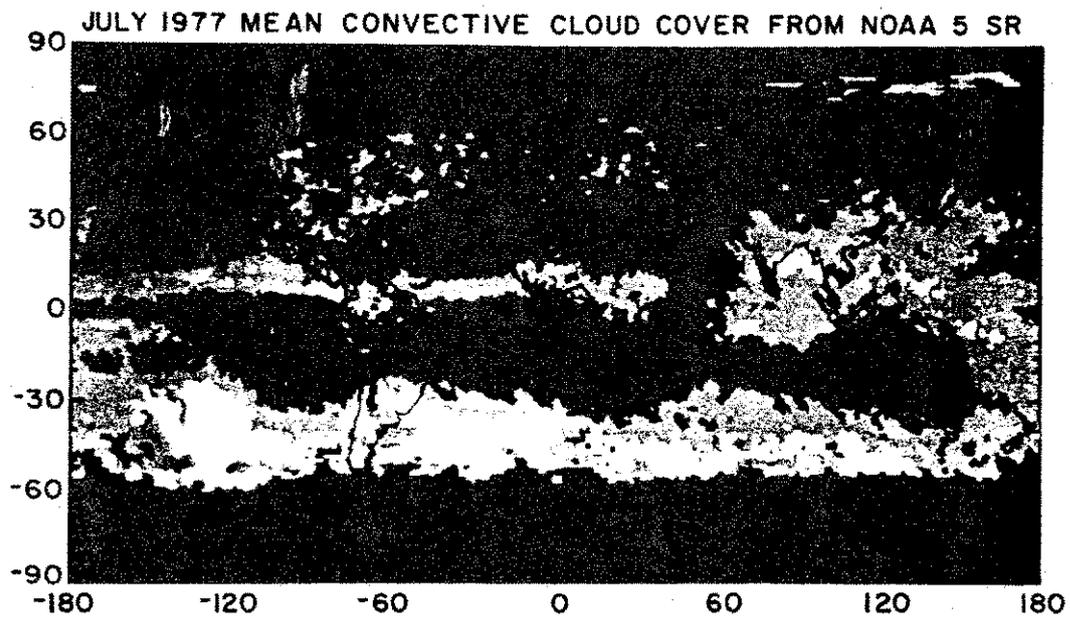


Fig. 2.1 - Distribuição geográfica das nuvens altas para o ano de 1977 (Rossow e Laciis 1990).



(a)



(b)



Fig. 2.2 - Distribuição de nuvens convectivas ao longo de todo globo para os meses de: (a) Janeiro e (b) Julho de 1977 (Rossow e Lacis 1990).

2.1.1 - Descrição da Microfísica das Nuvens Cirrus

O primeiro a estudar a física de nuvens Cirrus foi o pesquisador H. K. Weickmann, que usou um avião para coletar amostras e microfotografias, publicando seus resultados em dois artigos em 1945 e 1947. Recentemente, através de medidas mais precisas, foi constatado que água superresfriada contidas nas nuvens Cirrus é da ordem de 0,15-0,25 g m⁻³, e que o comprimento dos cristais é de 4 a 1000 µm, contendo uma predominância de colunas, "bullets" (balas pequenas) e rosetas em torno de 75%, e de placas em torno de 25% (Liou 1986).

Os Cirrus que se localizam em altitudes menores, têm uma relativamente alta concentração de gotas grandes, já às de maiores altitudes têm uma maior concentração de gotas pequenas, com diâmetros entre 6 e 40 µm, e com uma concentração que varia entre 10⁻¹ e 10 m⁻³. Quanto menor for a temperatura, maior será o número de pequenas partículas; elas se encontram em temperaturas que vão de -20° até -60°C, e coexistindo muitas vezes com água com uma concentração de 0,01 g m⁻³ (Liou 1986; Heymsfield et al. 1990).

Estudos laboratoriais da dispersão de luz em cristais de gelo indicam que o modelo de cristais hexagonais é o que melhor se ajusta as observações em nuvens do tipo Cirrus (Takano et al. 1992).

2.2 - Método de Classificação de Nuvens em Imagens de Satélite

Existem vários métodos que estão sendo usados para caracterização de nuvens através de imagens de satélites. Todos eles têm dois objetivos: o primeiro é detectar o tipo de nuvens e determinar a percentagem da cobertura por nuvens, o segundo é fazer a análise de determinadas propriedades físicas de grupos de nuvens. Os métodos de detecção podem dividir-se em dois grupos, um que usa a teoria física, e outro a teoria estatística. Este último apresenta um grande potencial, e não encontra dificuldades em discriminar tipos de superfícies e a variação da emissividade das nuvens, dificuldades estas que são encontradas pelo grupo da teoria física (Sèze e Desbois 1987). Sendo assim, este trabalho limitou-se à descrição do método estatístico, aplicado a imagens Meteosat-5.

Os dados dos canais espectrais do satélite Meteosat-5 são codificados em 8 bits, o que permite ter uma imagem com 256 níveis de cinza ("counts" entre 0 e 255) para os três canais, com as seguintes bandas espectrais (Eumetsat *in* Valadão 1995):

i. Banda do infravermelho (IR) - Situa-se entre 10,5 e 12,5 μm , tem uma resolução espacial de 5x5Km no ponto sub-satélite, com calibração de bordo, e com uma imagem enviada a cada meia hora.

ii. Banda do vapor d'água (WV) - Intervalo espectral de 5,7 a 7,1 μm , tem uma resolução espacial para o ponto sub-satélite, de 5x5Km, uma imagem é enviada a

cada 6 horas. Nos horários sem iluminação solar, as imagens passam a ser enviadas hora a hora.

iii. **Banda do Visível (VIS)** - Os dados são obtidos no intervalo espectral de 0,4 e 1,1 μ m, com uma resolução espacial de 2,5x2,5Km para o ponto sub-satélite, sem calibração, uma imagem é enviada a cada meia hora nos horários de iluminação solar.

2.2.1 - Identificação de Nebulosidade em Imagens de Satélite Através de Nefanálise

Transformando as imagens em arquivos "bitmap" (um formato de arquivo gráfico que permite visualizá-las em "softwares" como "Paint Brush", "Corel Photo Paint" entre outros), pode-se saber qual o valor de "count" de um determinado "pixel" e sua posição dentro da imagem; (para três canais simultaneamente) e definir as características de cenas freqüentes para cada canal, dentro de um certo intervalo de "count" em torno dos valores dessas cenas. Estes valores são comparados, por exemplo com os picos de freqüências nos histogramas que são gerados quando se usa um método de classificação como o de Sèze e Desbois (1986).

Analisando as imagens do satélite Meteosat-5 no canal do visível, pode-se identificar claramente o contorno do continente, de forma a distingui-lo do oceano, isto a que, o continente tem uma maior reflectância do que o oceano. Já ao observar o canal do infravermelho, é possível verificar a diferença entre continente e oceano, desde que suas temperaturas sejam diferentes. Para as latitudes do Brasil a

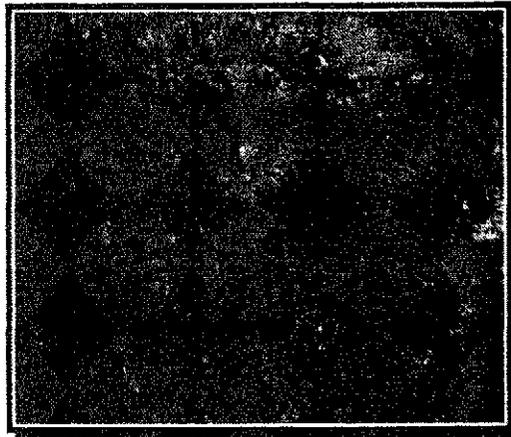
diferença de temperatura entre oceano e continente é pequena, de forma que a variação dos tons de cinza entre ambos são mínimas, dificultando a discriminação destas cenas.

No canal do visível é fácil identificar grandes aglomerados convectivos, pois são muito brilhantes; em relação aos outros tipos de nuvens, baixas e altas, é difícil uma identificação mas pode-se atestar a presença ou ausência deste tipo de nuvens. Assim sendo, faz-se necessário o uso da imagem do infravermelho, que é o canal apropriado para distinguir diferentes tipos de nuvens, já que a imagem é composta por radiancias provenientes das temperaturas de cada cena que em virtude das altitudes, têm consequentemente temperaturas diferentes. A faixa espectral onde se localizar o canal infravermelho do Meteosat-5 é conhecida como a região do infravermelho termal ou "janela atmosférica", onde pode-se considerar limitada a absorção dos gases atmosféricos ao "contínuo" do vapor d'água. Com estas características as imagens no infravermelho têm uma maior variação de tons de cinza associados a nuvens, de forma que é possível distinguir os vários tipos de nuvens quanto as suas temperaturas, o que implica em altitude diferentes. As nuvens médias aparecem mais brilhantes do que às nuvens baixas. Quanto as nuvens altas, podem ser identificadas no canal do infravermelho em forma de bandas de nebulosidade na maioria dos casos próximas a cumulosnimbus, que podem ser distinguidas destes quando se utiliza ao mesmo tempo o canal do visível, já que as nuvens altas aparecem como bandas fracas de nebulosidade ou em alguns casos não chegam a aparecer no canal VIS.

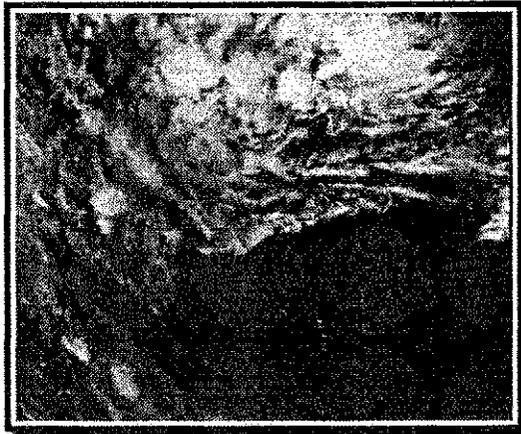
Nuvens altas, principalmente do tipo Cirrus, são um problema para se fazer a classificação através da nefanálise no visível, devido a suas propriedades

radiativas de semitransparência e em alguns casos de quase total transparência neste espectro, enquanto que no canal da janela atmosférica podem ser confundidas com nuvens médias, e muitas vezes confundidas com nuvens cumulus. Uma primeira solução para esse problema é usar os dois canais simultaneamente, pois o que aparece no canal do visível como uma pequena nebulosidade que pode ser associada a nuvens médias, ou nem é perceptível, dependendo da espessura óptica, aparece como uma forte nebulosidade no infravermelho. Um outro aspecto que é importante ressaltar, refere-se aos valores de "counts" dessas áreas, pois na maioria dos casos não se detecta nebulosidade no VIS devido a sua cobertura homogênea, mas os valores de "counts" não são os correspondentes à condição de céu aberto, enquanto que no IR não se tem valores de "counts" correspondentes a nuvens médias, ou nuvens do tipo cumulosnimbus. Sendo assim, através de uma composição de imagens faz-se a identificação do tipo de nuvens e quais os valores de "count" que as caracterizam em ambos os canais (Pereira e Ceballos 1995). As Figuras 2.3, são duas imagens nos canais visível e infravermelho termal, respectivamente, onde pode-se encontrar as características descritas anteriormente.

A melhor maneira de se fazer a classificação de nuvens altas é utilizar simultaneamente os canais do infravermelho, dentro da janela atmosférica e do vapor d'água. Embora na janela se possa ver a presença dos Cirrus, é fácil confundi-las com nuvens médias ou bordas de nuvens. O canal na banda do vapor, que só detecta sinal associado a umidade até uma profundidade de 700 hpa, eliminará as nuvens médias que são ruídos no canal IR, pois as cenas que aparecem no canal do vapor d'água são restritas a quase exclusivamente a presença de nuvens do tipo cumulosnimbus, e altas do tipo Cirrus.



(a)



(b)

Fig. 2.3 - Imagens do dia 02.04.95 às 12:00 TMG, do Nordeste Brasileiro (a) canal visível e (b) do infravermelho invertida.

2.2.2. - Métodos Estatísticos de Identificação

Um método estatístico consiste, basicamente, na análise de características de segmentos de imagens de satélite através de uma representação gráfica de histogramas bi ou multidimensionais, dependendo do número de canais espectrais utilizados. Aceitando que um tipo de cena (superfície de céu claro, camada de nuvens, etc.) tem níveis de cinza ("counts") característicos nos canais VIS e IR, usam-se tais propriedades para representá-las em histogramas bi ou multidimensionais diários, que por sua vez mostrarão picos de frequência, evidenciando assim grupos de cenas com os seus valores de "counts" característicos ou, pelo menos, mais frequentes na imagem (maiores detalhes podem ser vistos em, p. ex., Tsonis 1984; Phulpin et al. 1985). A Figura 2.4 ilustra um histograma bidimensional onde está indicada a posição de diferentes tipos de nuvens.

Outro fato relevante é que esse método pode usar como informações complementares outras variáveis derivadas das imagens, que são as variâncias locais dos "counts" em torno de um "pixel" (elemento de imagem). Estas por sua vez caracterizam a "textura" da imagem, ou seja sua variabilidade espacial local. Esses dados juntamente com os "counts" das imagens permitem definir centróides multidimensionais (centros de gravidade) de grupos de pixels que caracterizam diferentes tipos de nebulosidade. O método é aperfeiçoado utilizando-se métodos de agrupamento. Por exemplo, o procedimento utilizado por Sèze e Debois (Sèze e Desbois, 1987, Rossow e Lacis, 1990) consiste na caracterização dos centros de gravidade por dois valores de "counts": o VIS, o IR ou quatro, quando acompanhando

por suas respectivas variâncias. Daí aplica-se um método de técnicas de agrupamento, que consiste em:

1. Construir histogramas bi-dimensionais de freqüências com os pares de valores dos "pixels" em dois canais.
2. Escolher centros de gravidade preliminares, pelos picos ou áreas de maiores freqüências.
3. Fazer o agrupamento do conjunto de "pixels" usando a menor distância Euclidiana aos centros de gravidade.
4. Calcular a média e a variância de cada classe; com o qual novos centróides são diferenciados.

O número adequado de picos pode ser avaliado aplicando-se uma restrição, por exemplo, que uma classe deva exceder uma porcentagem mínima do total de pixels da imagem. Essa restrição não ocorrendo, volta-se ao terceiro passo e repete-se o processo eliminando-se centróides e/ou observando como eles se deslocam, até que sua posição seja estacionária. Este processo é descrito por Séze e Desbois (1987), e denomina-se de agrupamento por nuvens dinâmicas.

Um método simplificado pode ficar restrito aos quatros passos indicados acima, partindo apenas das posições de máximo do histograma e limitando-se a um único processo de classificação.

A automatização do método de nuvens dinâmicas, foi testado pelo Serviço Meteorológico Francês para imagens Meteosat, aplicado-o para África e parte do Atlântico Oriental (Beliec et al. 1992; Farki et al. 1993), onde os resultados obtidos

foram considerados satisfatórios quando comparados com uma nefanálise. Também comprovou que o método é muito útil na identificação de superfícies, nuvens cirriformes, e nuvens altas espessas, mas não é tão bom na identificação de nuvens baixas e médias.

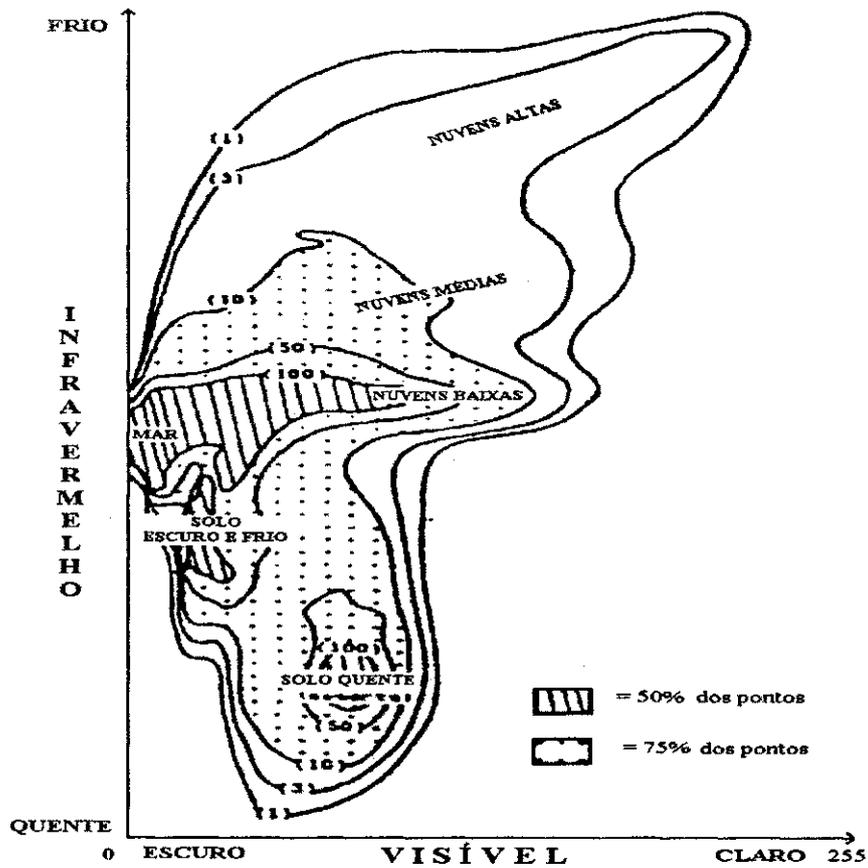


Fig 2.4 - Histograma característico, obtido para um conjunto de imagens, mostrando a posição de diversos tipos de cena num diagrama bidimensional de counts Visível / Infravermelho (Fonte: Farki et al 1993).

2.3 - Parâmetros Radiativos

O importante efeito das nuvens Cirrus no balanço atmosférico de energia ocorre devido aos cristais de gelo terem um coeficiente de absorção muito alto justamente na janela atmosférica, no comprimento de onda entre 8 e 12 μm , pois são formados, em sua maior parte, por cristais de gelo com o tamanho da mesma ordem desse comprimento de onda (Liou 1977).

Para analisar radiação de onda longa emergente no topo da atmosfera (ROL) mediante imagens de satélite, Schmetz e Liu (1988) mostraram que existe uma diminuição da ROL na presença de nuvens. Esta redução é expressivamente maior quando as nuvens são do tipo Cirrus, (Figura 2.5), o que demonstra a interação dos cristais das nuvens Cirrus com a radiação de onda longa, e sua imediata consequência na radiação que sai no topo da atmosfera. Dessa forma, pode-se comparar o efeito das nuvens Cirrus aos de uma "estufa", pois elas deixam passar uma fração considerável da radiação de onda curta proveniente do Sol, ou melhor, são semitransparentes nesta faixa espectral e, ao mesmo tempo, só deixam passar uma fração menor da radiação termal proveniente da superfície da Terra, ou de camadas de nuvens mais baixas. Dependendo da espessura, elas são totalmente opacas na faixa espectral de onda longa, com propriedades semelhantes as de um "corpo negro", absorvendo toda radiação em um determinado comprimento de onda e reemitindo toda radiação, só que correspondente à sua temperatura. A reemissão de radiação pelas nuvens Cirrus provoca um efeito de estabilização de fluxos de energia nas camadas inferiores, e um perfil de saldo de radiação de onda longa com fraco gradiente vertical (Schmetz e Liu 1988).

2.3.1 - Temperatura de Brilho

Ao analisar a temperatura de brilho na janela atmosférica pode-se facilmente detectar nuvens Cirrus, pois as variações na temperatura de brilho não são grandes na presença de vapor d'água, mas são bastante significativas na presença de cristais de gelo (Ackerman et al. 1990).

Em nuvens altas, Cirrus, os tamanhos de partículas que predominam são aqueles com raios efetivos entre 12 e 24 μm . Cirrus que não são tão altas têm temperatura de brilho quase homogênea, de forma que podem ser confundidas com camadas baixas de alto Stratus (Spinhirne e Hart 1986).

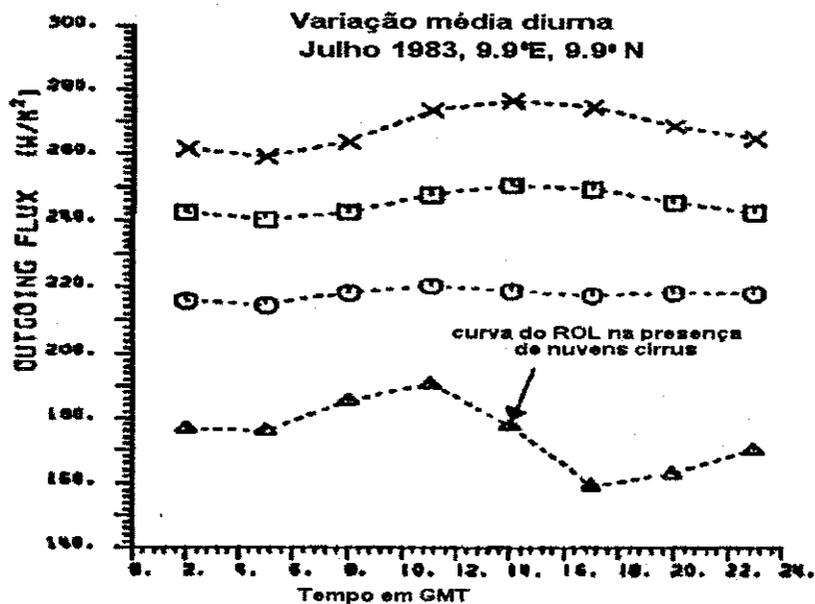


Fig. 2.5 - Variação diurna da ROL para uma região sobre o continente africano. As curvas descrevem o comportamento da ROL em função das cenas existentes: as cruces, correspondem a superfície em condições de céu claro, os quadrinhos, a nuvens baixas, os círculos, a nuvens médias e os triângulos, a nuvens altas e nuvens do tipo cirriformes (Schmetz e Liu 1988).

Analisando dados de satélites, torna-se fácil associar nuvens do tipo Cirrus a fortes correntes de jato em níveis superiores, com características de levantamento de zona frontal, uma vez que as nuvens Cirrus estão relacionadas em latitudes médias a temperaturas baixas ligadas a frentes, o que faz com que elas tenham um relacionamento significativo com partículas de gelo e com ocorrências de sistemas de precipitação e de tempo em escala sinótica (Starr et al. 1990). Dessa forma, pode-se encontrar este tipo de nuvem envolvido também com sistemas geradores de tempo em escala sinótica nas latitudes tropicais como por exemplo os cumulosnimbus, o que de certa forma facilita a sua detecção em imagens de satélite, devido às nuvens Cirrus estarem associadas a fortes movimentos convectivos.

Szejwach (1982) descreve os resultados obtidos em mais de 10 vôos em locais onde verificou-se a presença dos Cirrus, feitos em quatro níveis de altitudes: de sua base (9.000m), do topo (10.000m), de 100m acima do topo e 12.500m acima do nível médio do mar, em uma extensão horizontal entre 3 e 20 Km (Figura 2.6). Foram usados dois radiômetros digitais, um no intervalo espectral de 5,7 a 7,1 μ m (canal 1), e outro de 10,5 e 12,5 μ m (canal 2), e foram observadas mais de 40 diferentes nuvens Cirrus. Eles mostraram que a temperatura nos três primeiros níveis é a mesma e com flutuações em torno de 1K para uma temperatura de 231K. Isto mostrou que as nuvens estavam em equilíbrio termodinâmico com a atmosfera e que elas eram isotérmicas, e verificou-se também que existe uma diferença na temperatura de cor no topo das nuvens de -40° , do canal 1 em relação ao canal 2, em virtude da radiação proveniente do solo ser quase toda absorvida pelo vapor d'água entre o mar e a base das nuvens no primeiro canal, e quase não sofrer atenuação no segundo canal.

2.3.2 - Temperatura de Nuvens Cirrus

Pode-se a partir de uma simplificação da Equação de Transferência Radiativa, onde se despreza o espalhamento, considerando-se que: 1) a radiação na base da

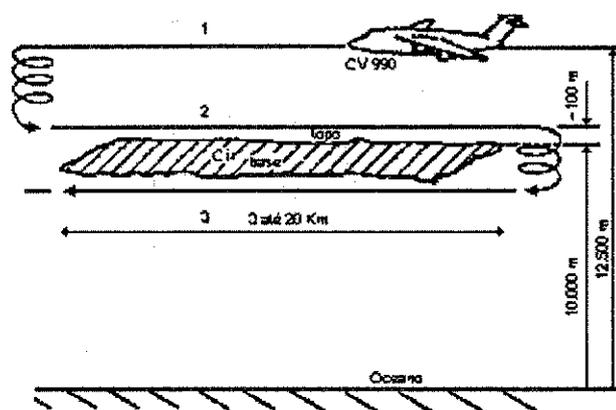


Fig. 2.6 - Rota do avião modelo CV 990, em torno de nuvens

Cirrus (Fonte: de Szejwach 1982).

nuvem no canal 2 não teve absorção atmosférica; 2) a nuvem transmite parcialmente radiação da base para o topo, não havendo absorção posterior (devido à escassa quantidade de vapor d'água na alta troposfera); 3) as nuvens emitem radiação de acordo com sua temperatura e emissividade. A Figura 2.7 ilustra as componentes das radiancias recebidas pelo satélite. Escrevendo estas componentes da radiação para os dois canais do infravermelho do Meteosat, temos:

Para o canal do vapor d'água (1):

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \int_{5.7}^{7.1} \phi_\lambda L_\lambda(T_1) d\lambda \\
 &= \varepsilon_1 \int_{5.7}^{7.1} \phi_\lambda L_\lambda(T_N) d\lambda + (1 - \varepsilon_1) \int_{5.7}^{7.1} \phi_\lambda L_\lambda(T_F) d\lambda
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Para o canal do infravermelho (2):

$$\begin{aligned}
 L_2 &= \int_{10.5}^{12.5} \phi_\lambda L_\lambda(T_2) d\lambda \\
 &= \varepsilon_2 \int_{10.5}^{12.5} \phi_\lambda L_\lambda(T_N) d\lambda + (1 - \varepsilon_2) \int_{10.5}^{12.5} \phi_\lambda L_\lambda(T_G) d\lambda
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

onde:

ϕ_λ - resposta espectral do sensor do satélite no comprimento de onda λ ;

$L_\lambda(T_1)$, $L_\lambda(T_2)$ - radiâncias registradas nos canais (1) e (2)

$L_\lambda(T_N)$, $L_\lambda(T_F)$ e $L_\lambda(T_G)$ - radiância de "corpo negro" para as temperatura T_N (temperatura termodinâmica da nuvem), T_F (temperatura de brilho, na base da nuvem no canal 1) e T_G (temperatura de brilho, na base da nuvem no canal 2).

ε_1 e ε_2 - emissividade nos canais 1 e 2, respectivamente;

$d\lambda$ - elemento infinitesimal de comprimento de onda.

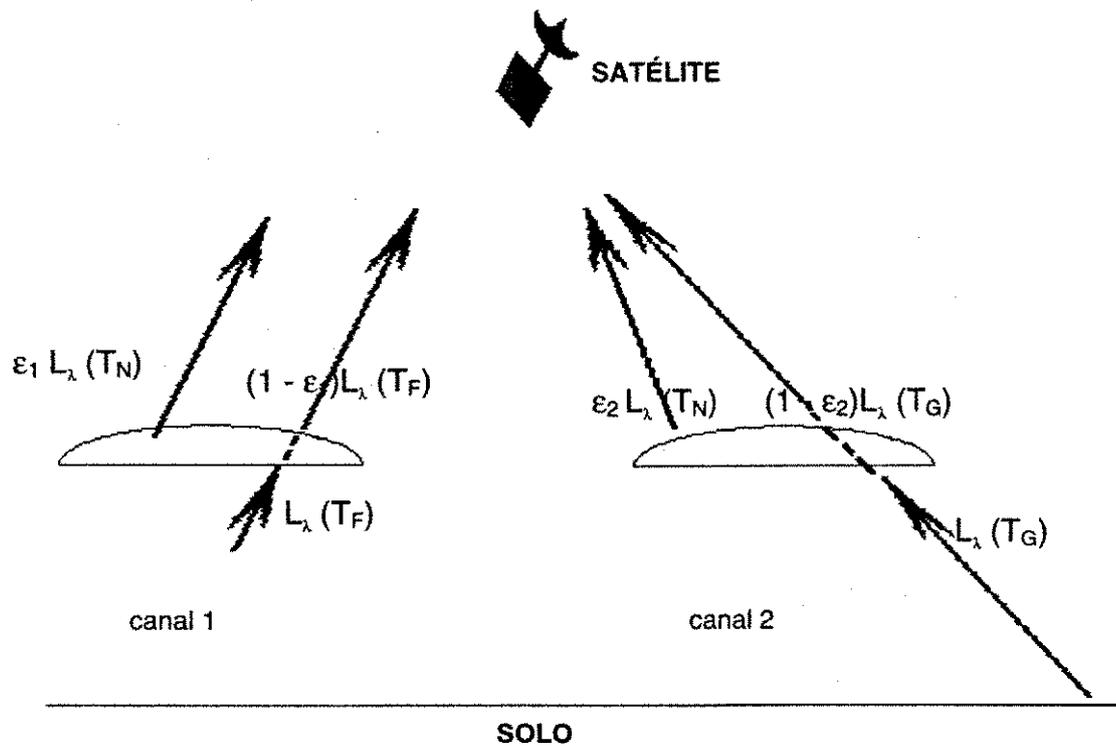


Fig 2.7 - Componentes da radiação de onda longa provenientes da Terra, que chegam diretamente ao satélite, que atravessam as nuvens e que são emitidas pelas nuvens.

Agora, considerando que acima do nível onde se encontram os Cirrus não se tem a presença de vapor d'água, as equações anteriores podem ser reduzidas a:

$$L_1(T_1) = \varepsilon_1 L_1(T_N) + (1 - \varepsilon_1)L_1(T_F) \quad (2.3)$$

$$L_2(T_2) = \varepsilon_2 L_2(T_N) + (1 - \varepsilon_2)L_2(T_G) \quad (2.4)$$

Szejwach (1982) mostrou que as emissividades nos dois canais sobre o topo das nuvens são basicamente a mesma, diferindo entre si em não mais de 6%,

(Figura 2.8). Sendo assim, pode-se escrever as duas radiâncias $L_1(T_1)$ e $L_2(T_2)$ uma em função da outra, isto é:

$$L_1(T_1) = a L_2(T_2) + b \quad (2.5)$$

onde:

$$a = [L_1(T_N) - L_1(T_F)] / [L_2(T_N) - L_2(T_G)] \quad e \quad (2.6)$$

$$b = [R_1(T_F)L_2(T_N) - (L_1(T_N)L_2(T_G))] / [L_2(T_N) - L_2(T_G)] \quad (2.7)$$

Da eq. (2.5) espera-se que os pares de medidas (L_1 , L_2) determinadas para diversas espessuras ópticas de nuvens estejam ordenadas ao longo de uma reta ψ , desde que o conjunto de medidas $L_1(T_N)$, $L_2(T_N)$ correspondam efetivamente a diversos pontos com a mesma temperatura termodinâmica. As radiâncias medidas nos dois canais correspondem a diferentes temperaturas de brilho T_1 , T_2 ; e seguem a lei de Planck de acordo com:

$$L_1 = B_{\nu_1}(T_1), \quad L_2 = B_{\nu_2}(T_2), \quad (2.8)$$

onde ν_1 , ν_2 são as frequências associadas ao canal 1 e ao canal 2. Szejwach (1982) fez notar que as temperaturas T_1 e T_2 seriam iguais se a nuvem fosse suficientemente espessa: neste caso $T_1 = T_2 = T$, sendo $T = T_N$ a temperatura termodinâmica da nuvem. Nessas condições,

$$L_1 = B_{\nu_1}(T), \quad L_2 = B_{\nu_2}(T). \quad (2.9)$$

Portanto, se for construída uma curva $\Gamma \equiv [B_{v_1}(T), B_{v_2}(T)]$ para uma temperatura T variável, a reta ψ deve interceptar a curva Γ para o valor de temperatura termodinâmica da nuvem (Figura 2.9).

Quando se trabalha com satélite, torna-se mais fácil usar os "counts" das imagens, pois a relação entre radiâncias e o nível de cinza é linear. Desbois e Szejwach (1982), transformaram as curvas obtidas por Szejwach (1982) para coordenadas de níveis de cinza (Figura 2.10).

2.3.3 - Determinação da Altitude de Nuvens Cirrus

Usando medidas no canal do visível para se estimar vento, encontra-se que mais da metade do erro desta estimativa (aproximadamente 8mseg^{-1} em média) é causado pela incerteza na determinação da altitude de nuvens Cirrus, que utilizados por modelos geram um erro no traçado dos ventos da alta troposfera. Pode-se melhorar a estimativa dos ventos quando um dos dados de entrada dos modelos é a altitude das nuvens Cirrus com uma boa precisão. Uma forma para se estimar a altitude do topo de nuvens é usar emissividade dos Cirrus no infravermelho, para estimar suas temperaturas termodinâmicas, que por sua vez permitem avaliar a altitude das nuvens (Shenk e Curran 1973).

A emissividade e a temperatura termodinâmica podem ser obtidas aproximadamente a partir da temperatura de brilho, e da temperatura do solo usando a Equação da Transferência Radiativa da forma semelhante à apresentada na Eq.

(2.3). A temperatura termodinâmica é calculada fazendo as seguintes considerações para o canal infravermelho termal:

- i. Consideram-se várias temperaturas características das nuvens, considerada isotérmica;
- ii. o segundo termo da direita da Eq. (2.3) corresponde à radiação proveniente da temperatura do solo e não da radiação que chega a base das nuvens.

Agora fazendo a emissividade variar de 0 a 1 obtém-se temperaturas brilho diferentes e, comparando com a temperatura encontrada no perfil atmosférico, determina-se a altitude em que se encontram essas nuvens. No caso das latitudes tropicais o perfil de temperatura apresenta pequenas variações ao longo do ano o que leva a cometer pequenos erros, propiciando por sua vez uma melhor estimativa na determinação da altitude dos Cirrus. Sendo assim, para diferentes emissividades se encontra diferentes temperaturas de nuvens associadas a uma temperatura de brilho constante, de forma que agora se pode usar o satélite para se fazer o contrário, ou seja, para uma determinada temperatura de brilho e certa emissividade encontra-se a temperatura da nuvem. Para estes fins, foi reproduzido o gráfico 3 de Shenk e Curran (1973), para uma temperatura do solo de 288K (Figura 2.11). Este método é aplicável se for conhecida a emissividade. Os autores avaliam que o erro associado à determinação de altitudes não excede ± 50 hPa para nuvens situadas em níveis de pressão de 300 hPa ou menos.

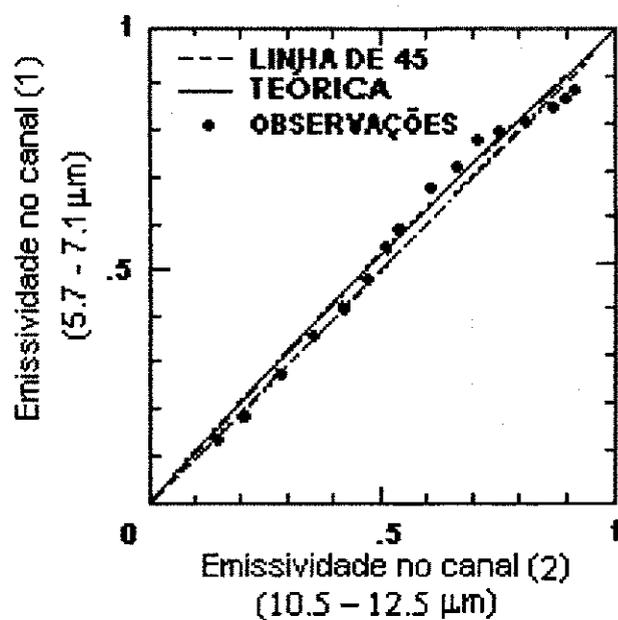


Fig. 2.8 - Emissividade dos Cirrus no canal do vapor d'água (1) versus emissividade no canal da janela atmosférica (2) (Fonte: Szejwach 1982).

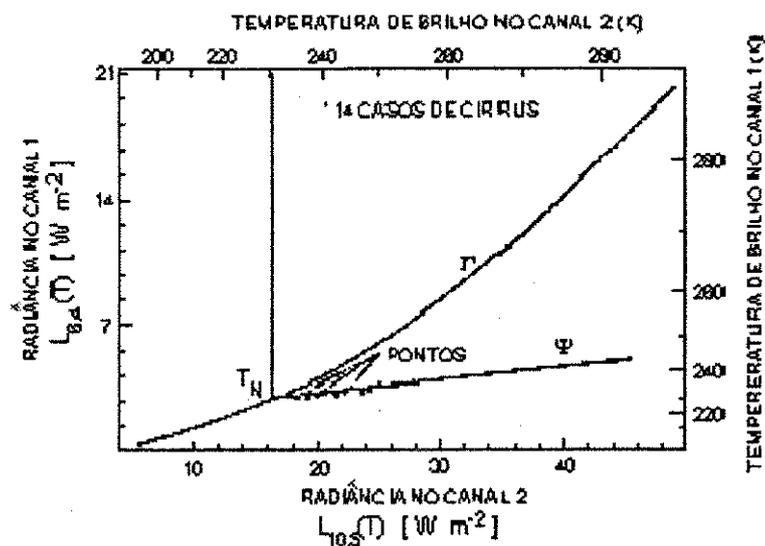


Fig. 2.9 - Curvas Γ e Ψ , através da interseção se pode determinar a temperatura da nuvem T_N referente a um grupo de pontos em nuvens.

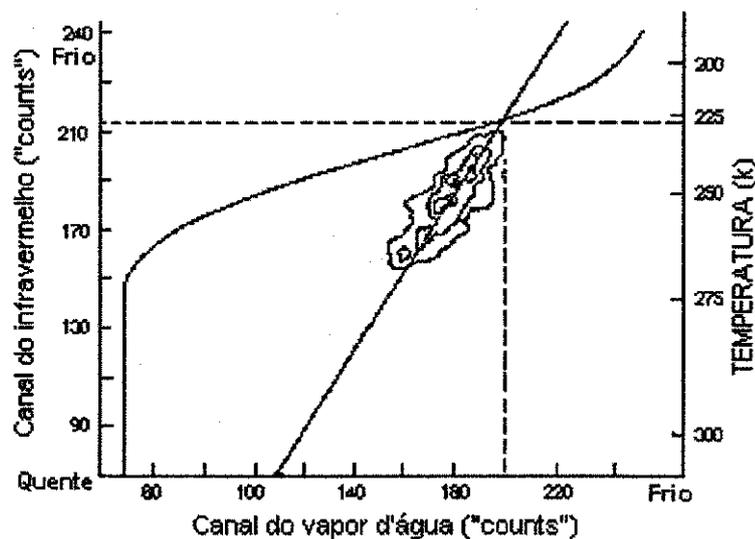


Fig. 2.10 - Diagrama para a determinação da temperatura de topo de nuvens Cirrus. A temperatura obtida foi de 222K (Fonte: Desbois e Szejwach, 1987).

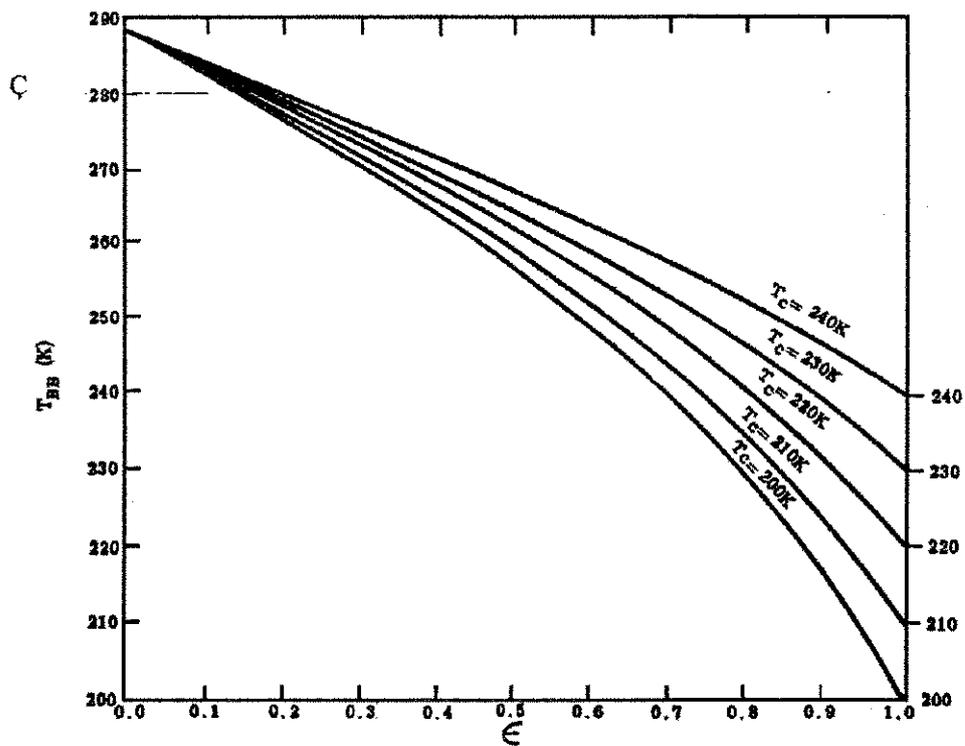


Fig 2.11 - Temperatura termodinâmica da nuvem ($T_c=T_n$) versus emissividade (ϵ) para temperaturas de brilho (T_{BB}) características de nuvens Cirrus, baseado em Shenk e Curran (1973), modificada para uma temperatura do solo de 300 K.

3 - Materiais e Métodos

3.1. - Dados Utilizados

Neste trabalho foram usados dados coletados durante o Projeto EIS (*Experimento Integrado do Semi-Árido*), realizado no período de 25 de março a 05 de abril de 1995, no qual estavam incluídos vários subprojetos, como o EMAS (*Experimento de Meso escala na Atmosfera do Sertão*), com radiossondagens nos horários sinóticos durante o período do projeto, e o RADSAT (Radiação-Satélite), com medidas de radiação solar, captação e gravação de imagens dos satélites NOAA-12, 14 e Meteosat-5.

As imagens utilizadas neste trabalho foram do Meteosat-5, gravadas mediante a colaboração entre o Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal da Paraíba UFPb e o Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba (LMRS-PB). As sondagens foram cedidas pela Coordenação do projeto EMAS junto à UFPb, Campus II, Campina Grande (Pb).

O processamento computacional de imagens foi realizado mediante microcomputador PC, com programação em Turbo-Basic.

3.1.1. - Dados das Sondagens Atmosféricas

As sondagens foram feitas em três cidades do Nordeste brasileiro: Fortaleza ($3^{\circ}20'S$; $38^{\circ}8'W$) e Barbalha ($7^{\circ}13'S$; $37^{\circ}W$), no Estado do Ceará, e Campina Grande ($7^{\circ}13'S$; $35^{\circ}W$), no Estado da Paraíba. Foi utilizado um sistema de radiossondagem PC CORA, que fornece além dos dados de temperatura, pressão, altitude, umidade, direção e velocidade do vento, obtidos através de uma radiossondagem convencional, dados derivados (temperatura virtual e depressão psicrométrica), em forma de um arquivo que pode ser usado para cálculos em vários aplicativos. Os dados de superfície utilizados neste trabalho foram observados da estação meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFPb, Campus II, e da estação climatológica da cidade de Barbalha (Ce).

3.1.2. - Descrição das Imagens

As imagens utilizadas foram dos canais do visível, do infravermelho e do vapor d'água do Meteosat-5, gravadas em dois formatos: 1) Global, consistente em mostrar todo um hemisfério do globo; 2) Setor, que mostra apenas uma parte da América do Sul próximo ao Equador e o Oceano Atlântico até a África. Em ambos os

casos, os formatos são arquivos de 800x600 "pixels". No formato global as imagens são degradadas (em 3/1 linha e 4/1 colunas); já no formato setor são degradadas em colunas e linhas alternadas no canal do infravermelho e em duas colunas e duas linhas alternadas no canal do visível, de forma que a área coberta pelas imagens nestes dois canais seja a mesma. No canal do vapor d'água, apesar do arquivo ter o mesmo tamanho dos canais anteriores, as imagens estão com resolução total ou "full resolution", de forma que a área mostrada por esta imagem é menor, sendo um novo formato.

As imagens mostram uma boa parte da América do Sul e do Oceano Atlântico. Restringindo-se à área de interesse e, simultaneamente, buscando minimizar o tempo de processamento, o formato setor foi recortado dando origem a uma imagem com um novo tamanho de 200x200 "pixels", nesta nova área incluíram-se todos os pontos de observação do projeto EIS (Figura 3.1b), uma boa parte do Nordeste brasileiro, parte do Oceano Atlântico equatorial e sul, e uma parte dos estados de outras regiões do Brasil, como Pará e Mato Grosso, ficando de fora apenas uma pequena parte do sul do Nordeste; todavia este formato aqui foi denominado de "Nordeste Brasileiro". Nos arquivos de imagens os pontos cardeais leste e oeste estão trocados, ou seja, o leste está à esquerda na imagem como mostra Figura 3.1a.

O arquivo de imagens do RADSAT (no LMRS-PB) é um conjunto que dispõe de duas imagens a cada hora, mas optou-se apenas pelos horários sinóticos de 00:00; 06:00; 12:00 e 18:00 UTC e intermediários de 03:00; 09:00; 15:00 e 21:00 UTC para o Meteosat-5, no caso dos canais do visível e do infravermelho. Devido aos horários antes das 06:00 horas locais e depois das 18:00 horas locais não terem mais iluminação solar em parte da região coberta pelo formato *Nordeste Brasileiro*,

optou-se por trabalhar apenas com os horários que se tem iluminação, no caso os das 09:00, 12:00 e 15:00 horas locais. Quanto às imagens no canal do WV, têm-se imagens apenas em alguns horários noturnos em torno da 00:00 hora local, e para os três primeiros dias de abril tem-se apenas o horário das 09:00 horas local, de forma que a análise das três imagens simultaneamente pôde ser feita apenas neste horário.

As imagens estão em formato binário comum, seguindo uma matriz linha-coluna, e para visualizá-las é necessário transformá-las em um arquivo com outro padrão, como o "bitmap", de forma que possibilite a visualização em vários "softwares" em microcomputador PC.

3.2. - Uso de Satélites na Detecção de Nuvens Cirrus

Para se fazer a detecção de nuvens, aplicou-se um método de classificação de centróides supervisionada, fazendo os seguintes procedimentos:

- i.* Construíu-se histogramas bidimensionais de frequência de "counts" utilizando-se os canais do visível e do infravermelho, e os canais do vapor d'água e do infravermelho;
- ii.* nos histogramas verificaram-se as áreas ou picos correspondentes às maiores frequências de onde se tiraram os pares de "counts" (VIS,IR) e (WV,IR) que caracterizavam inicialmente às centróides;

- iii. utilizou-se o do critério da distância euclidiana mínima para fazer uma classificação preliminar, associando cada grupo a uma cena através de nfanálise, e calculando-se a média e o desvio padrão para cada cena, redefinindo novas centróides;
- iv. visualizou-se a classificação compondo uma outra imagem, onde cada tipo de cena foi representada por cores diferentes, de forma a distingui-las, como por exemplo, oceano com e sem nuvens, continente com e sem nuvens, nuvens cumulosnimbus sobre oceano e continente entre outras;
- v. um critério foi estabelecido para se retornar ou não ao terceiro item, tal como: a variação em torno da média ser de um desvio padrão. No caso de satisfeito o critério, novamente foi feita uma nfanálise, de forma a verificar a associação das cenas classificadas com as observadas na nfanálise.

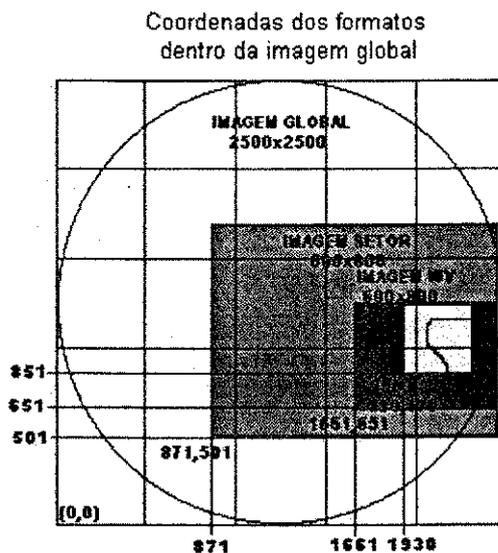


Fig. 3.1a - Formatos das imagens do satélite Meteosat-5 utilizados, com as suas respectivas localizações dentro do formato global (em coordenadas de imagem), mostrando as coordenadas dos vértices inferior.

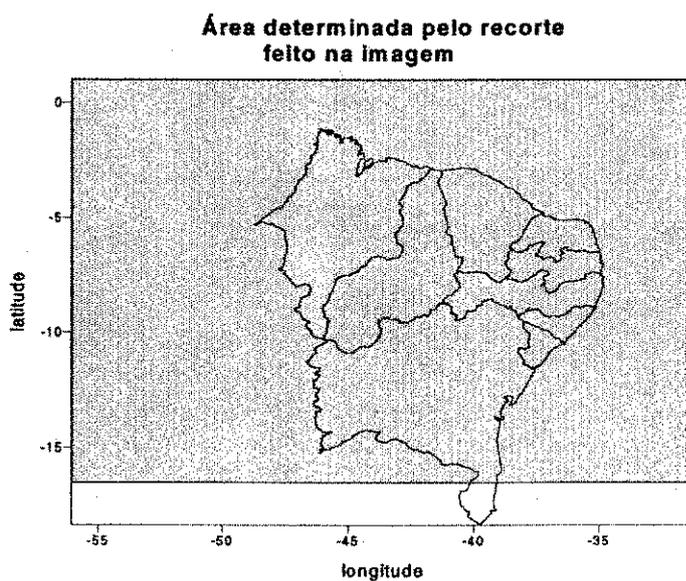


Fig. 3.1b - Área em coordenadas geográficas coberta pelas imagens, que recebeu o nome de *Nordeste Brasileiro*, onde está contido o Nordeste do Brasil, alguns estados das regiões vizinhas e parte do Oceano Atlântico, ficando de fora apenas uma pequena parte do sul do estado da Bahia.

3.3. Avaliação de Parâmetros Radiativos

Existem vários modelos para avaliação de parâmetros radiativos de nuvens Cirrus, muitos desses usando dados da microfísica de nuvens Cirrus (p. ex. Beck et al. 1996). O presente trabalho utilizou apenas a informação proveniente de imagens do Meteosat-5 de três canais e de radiossondagens em Barbalha e Campina Grande, já que dados sobre a microfísica das nuvens cirrus da região não existiam.

3.3.1. - Radiância de onda longa

A radiância detectada no espectro infravermelho do Meteosat (L, em $W m^{-2}ster^{-1}$) pode ser calculada segundo a expressão:

$$L = ("count" - SPC) * CAL, \quad (3.1)$$

onde:

L - radiância observada pelo sensor do satélite em $Wm^{-2}ster^{-1}$;

SPC - "Space count" , que é uma correção em virtude da umidade no ambiente do sensor;

CAL - é o coeficiente de calibração,

O SPC como o CAL mudam ao longo da vida útil do satélite e de satélite para satélite.

Estes coeficientes são divulgados mensalmente pela Organização Europeia para Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT - European organisation for the exploration of METeorological SATellites), que mudam com o dia juliano. Como a variabilidade ao longo de dez dias é pequena, optou-se por fazer uma média dos valores de CAL ao longo dos dias do experimento (tabela 3.1). Não foi feita para SPC porque este coeficiente foi constante durante os dias do experimento.

3.3.2. - Temperatura de Brilho e Temperatura Termodinâmica

A partir da radiância, pode-se obter a temperatura de brilho para um "pixel" numa imagem. A expressão para o cálculo no infravermelho e/ou do vapor d'água, é dada por:

$$L = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right) \Rightarrow T = \frac{B}{\ln L - A}, \quad (3.2)$$

onde:

T é a temperatura de brilho em Kelvin (K); A é um coeficiente de regressão adimensional e B também é um coeficiente de regressão dado em K; ambos os valores estão na Tabela 3.1. Os coeficientes A, B provêm da interpolação da equação de Planck em função da temperatura, considerando os valores de L

ponderados com a função resposta do sensor nas bandas IV e WV, que junto com a eq. (3.1) foram divulgadas mensalmente pela EUMETSAT no Meteosat-5 Calibration Report 1995.

A temperatura termodinâmica de nuvens Cirrus foi determinada usando as imagens dos canais da banda do vapor d'água e da janela atmosférica. O método empregado foi o descrito por Desbois et al. (1982), comentado na Seção 2.3.2 deste trabalho.

TABELA 3.1 - SPC E CAL SÃO COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO, A E B SÃO COEFICIENTES DE REGRESSÃO, ONDE A É ADIMENSIONAL E B É DADO EM K^{-1} , PARA OS CANAIS IR E WV DO SATÉLITE METEOSAT-5, VALIDOS DURANTE O PROJETO EIS.

Canais	SPC	CAL	A	B
IR	5	0.075863	6.7348	-1272.2
WV	8	0.008689	9.2361	-2266.7

3.3.3. - Emissividade

A emissividade de nuvens Cirrus pode ser considerada a mesma para os canais IV e WV, dentro de uma precisão de 6% (Figura 3.2) (Szejwach 1982). Considerando como uma primeira aproximação que a radiância que chega ao satélite, proveniente do solo, é uma função da temperatura da superfície e que esta temperatura é a um abrigo meteorológico, tem-se que a emissividade pode ser dada a partir da eq. (2.3); com radiâncias avaliados segundo a eq. (3.2)

$$\varepsilon = \frac{L - L(T_s)}{L(T_c) - L(T_s)} \quad (3.3)$$

onde:

ε - emissividade da nuvem;

L - radiância detectada pelo sensor a bordo do satélite;

$L(T_s)$ - radiância espectral média na faixa do satélite calculada para a temperatura do abrigo meteorológico como uma aproximação da temperaturas do solo e usando a Eq. (3.2);

$L(T_c)$ - radiância espectral média na faixa do satélite calculada para a temperatura das nuvens, encontradas e usando o método de Szejwach (1982), usando a Eq. (3.2).

Ao utilizar a temperatura do abrigo ao invés da temperatura do solo comete-se um erro de aproximadamente 3 graus, que para os valores de

temperatura na região considerada implica em 1% de erro na temperatura absoluta (Pontes 1997) e (aplicando a Eq. 3.2) em torno de 2% nas radiâncias $L(T_s)$. Este erro é menor quando se usar um satélite com resolução espacial baixa, como no caso do Meteosat-5, onde a temperatura é uma média de uma grande área onde coexistem solo, água, e vários tipos de vegetação. Sendo assim, ao utilizar temperatura do ar o erro que se comete no caso do Meteosat-5 por ser considerado aceitável.

3.3.4. - Transmitância no Infravermelho

A partir da emissividade, pode-se obter a transmitância no intervalo infravermelho. Não existindo reflexão, e considerando que a absorptância (espectral) da nuvem é $a = 1 - t_c$, sendo t_c = transmitância da nuvem em condições de equilíbrio radiativo $a = \varepsilon$ (lei de Kirchhoff) e tem-se:

$$t_c = 1 - \varepsilon . \quad (3.4)$$

3.3.5. - Profundidade Óptica no Infravermelho

Fu e Liou (1993) analisou a relação entre a emissividade de nuvens Cirrus e sua profundidade óptica centrada em $0,5 \mu\text{m}$, em dados coletados no FIRE

("The First International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) Regional Experiment"). A partir de 11 observações de Cirrus, com espessuras de 0,5; 1; 2 e 4Km, fizeram a representação gráfica de forma que encontraram a seguinte função (Figura 3.3):

$$\varepsilon = 1 - \exp(-b \tau) \quad (3.5)$$

onde:

ε - emissividade das nuvens Cirrus, na janela atmosférica;

b - 0,79 coeficiente de ajuste, usando um fator de difusividade de 1,66;

τ - profundidade óptica no visível centrada em 0,5 μ m.

Sendo assim, a partir da eq. (3.5) a profundidade óptica é determinada apenas conhecendo-se a emissividade, da seguinte forma:

$$t = \frac{\left\{ \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) \right\}}{b} \quad (3.6)$$

3.4. - Determinação da Altitude de Nuvens Cirrus

Encontrando a temperatura das nuvens, pode-se determinar em que altitude os Cirrus se encontram comparando estas informações com as das radiossondagens. Os gráficos do perfil atmosférico (altitude como uma função da temperatura) obtidos para uma estação, usadas para estimar a altitude podem ser

generalizadas para uma extensa região, principalmente quando trata-se das latitudes tropicais. O perfil de temperatura é muito homogêneo nesta região de estudo, o que é evidenciado nas duas radiossondagens (Figuras 3.4a e b), correspondentes a Barbalha - Ce e Campina Grande - Pb, no dia 31 de março de 1995 às 12:00 TMG. Apesar do perfil de umidade variar de um local para outro, o perfil de temperatura não muda, e podemos ver que para uma temperatura de -50°C temos para ambos os locais uma altitude próxima de 12.000 m.

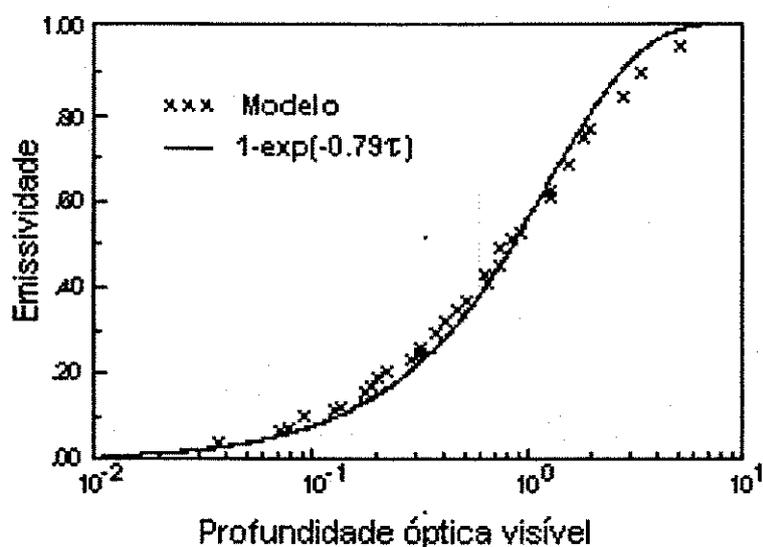
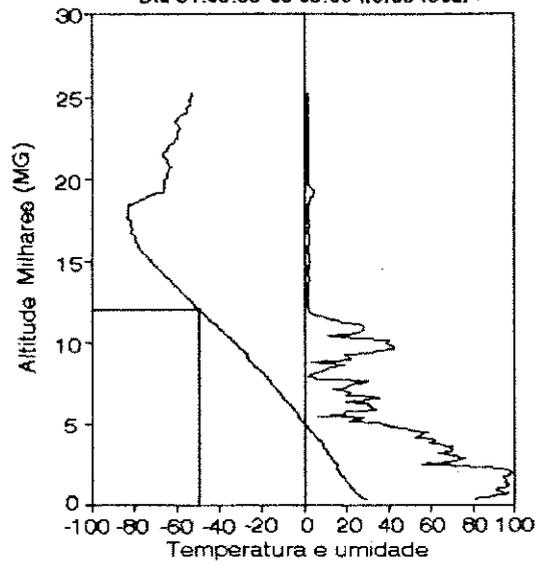


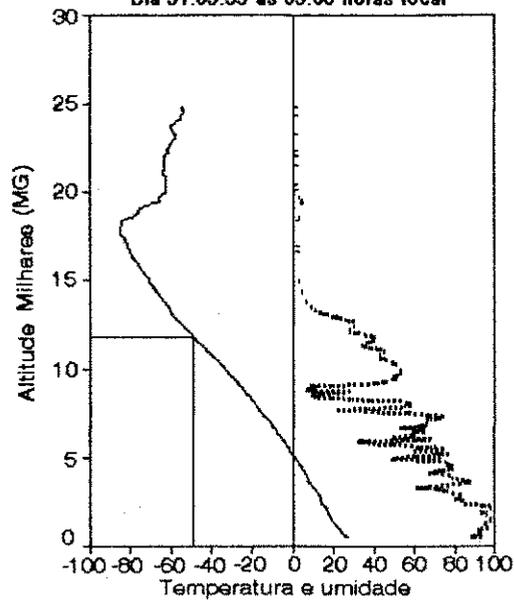
Fig. 3.3 - Emissividade de nuvens Cirrus em função da profundidade óptica visível. Os pontos "x" foram obtidos com um modelo para 11 tipos de nuvens com espessura de 0,5; 1; 2 e 4 Km. A linha sólida é uma curva de ajuste com os dados obtidos do modelo (Fonte: Fu e Liou 1993).

Perfil da Atmosfera em Barbalha - Ce
Dia 31.03.95 às 09:00 horas local



(a)

Perfil Atmosferico de C. Grande -Pb.
Dia 31.03.95 às 09:00 horas local



(b)

Fig. 3.4 - Perfil atmosférico de temperatura e umidade para as seguintes cidades (a) Barbalha - CE e (b) Campina Grande - Pb; para o dia 31.03.95 para o horário das 09:00 horas local ou 12:00 UTC.

4. - RESULTADOS

4.1. - Classificação das Imagens

A classificação das imagens seguiu o método descrito na Seção 3.2, de acordo com três critérios, utilizando os "counts" absolutos (não padronizados) dos seguintes pares de imagens: 1) (VIS, IR); 2) (WV, IR); e 3) (VIS, IR) e (VW, IR) simultaneamente. Inicialmente foi realizada nefanálise para identificar as nuvens associadas a histogramas bidimensionais.

No primeiro caso, a discriminação da classe dos Cirrus com base em histogramas ficou difícil, pois os valores do nível de cinza são baixos no canal do visível e relativamente altos no canal da janela atmosférica. Assim sendo, a classificação limita-se ao equivalente de utilizar um canal, já que a informação fornecida pelo canal do visível é mínima. A distribuição ilustrada na Figura 4.1 é bem próxima à do histograma característico (Figura 2.4), só que em virtude da imagem no canal infravermelho esta invertida tem-se que o mínimo valor neste com relação ao canal IR corresponde ao máximo no histograma característico. Nos histogramas VISxIR (Figura 4.2) tem-se que a

região do gráfico que corresponde às nuvens altas também pertence às nuvens baixas e médias.

No segundo critério a identificação das nuvens Cirrus é melhor, pois as imagens no WV mostram apenas o que se encontra na atmosfera acima de 700 hPa, o que facilita a detecção daquelas nuvens. Com base neste critério pode-se ver que a imagem classificada mostra mais claramente as nuvens Cirrus em volta dos cumulonimbus, como aparecem também as cenas de nuvens baixas, que têm grande extensão vertical como é o caso dos cumulonimbus (Figura 4.3).

A classificação utilizando os três canais simultaneamente teve uma modificação na aplicação do método porque o programa utilizado não comportava uma matriz de (127,127,127), o que levaria a um arquivo de no mínimo 2Mbytes, que extrapolaria em muito a capacidade do software. Devido a este fato, não foram construídos os histogramas para a terna (VIS,IR,WV), mas as centróides foram determinadas usando os histogramas das duas etapas anteriores. Contudo, a classificação não foi melhor do que a da etapa 2.

Optou-se por classificar a partir dos histogramas apenas dois tipos de cenas (classes) relativas às nuvens Cirrus, quais sejam: 1) Cirrus tênues e 2) Cirrus densas. Esta classificação se deu em virtude da área nos histogramas correspondentes às nuvens Cirrus ter sido relativamente grande, de forma que duas classes podem representar melhor os Cirrus (Figura 4.3). Isto a princípio permite discriminar as nuvens mais finas ou bordas e também as mais espessas ou centro (Tabela 4.1). Com este procedimento gerou-se uma imagem classificada a partir das imagens WV e IR, para as duas classes de Cirrus e outras cenas (Figura 4.4).

Para a área que denominou-se "Nordeste Brasileiro" a cobertura obtida foi de no mínimo 30% de sua área coberta por nuvens Cirrus, e no máximo 60%, mostrando que existe uma permanência de Cirrus nesta região, como consequência de fortes movimentos convectivos. A presença destas cenas se verificou mais à noite do que durante o dia (Figura 4.5).

4.1. 2 - Nefanálise

A nefanálise permitiu identificar os diferentes tipos de nuvens presentes nas imagens. Foi feita com ajuda de um "software" gráfico (Corel Photo Paint), que permitiu observar as imagens simultaneamente em dois canais e uma outra imagem composta por cores diferentes (construída mediante classificação, tomando como semente os picos dos histogramas). Comparando estas três imagens tornou-se possível a caracterização das cenas. A análise foi repetida para horários diferentes e com isto construiu-se a Tabela 4.2, onde além de valores característicos das cenas para cada horário é incluída a média delas; evidencia-se que algumas cenas não têm mudanças significativas entre horários. Esse não é o caso das nuvens Cirrus, que têm grande variabilidade dentro desses horários quando se analisa as imagens do canal visível e do canal infravermelho termal. Entretanto quando se analisa no IR e no canal do vapor d'água, não se têm grandes variações no tempo. De posse desses dados construíram-se as tabelas 4.1 e 4.2, que resumem os dados provenientes da nefanálise. Para o caso

dos pares (WV,IR) descrevem-se apenas os centróides das cenas características relativas aos Cirrus, já que outras cenas são de difícil identificação. Para os pares (VIS,IR) podem ser observadas as centróides de todas as cenas características presentes na imagem.

4.1.3 - Comparação entre o Método Manual e o Automático de Classificação

Após feita a primeira nefanálise e processando a classificação supervisionada para todas as imagens, faz-se necessária uma outra nefanálise com os resultados provenientes da finalização do processo automático, de forma a avaliar os resultados.

Na Figura 4.6 pode-se observar uma imagem classificada, onde identificou-se apenas um tipo de nuvem desejada, a qual foi denominada primeiramente de nuvem Cirrus sobre o continente e sobre o oceano na nefanálise (Tabela 4.2). Entretanto esta denominação não é adequada, pois estes dois tipos de cenas apareceram tanto sobre o continente como sobre o oceano no final do processo automático; em princípio isto ocorreu porque tinha-se associado (subjetivamente) Cirrus a oceano e a continente, mas a classificação objetiva mostrou que as características físicas eram as mesmas. Sendo assim parece mais apropriado denominar estas cenas como Cirrus tênues e/ou densas. As consideradas densas

de "counts" VIS e IR apenas, e que elas são mais evidentes nas imagens classificadas baseadas nos canais IR e WV. Usando o histograma WVxIR a discriminação de nuvens altas foi melhor, pois o que podemos ver na imagem no canal do vapor d'água é o que se encontra acima das nuvens baixas.

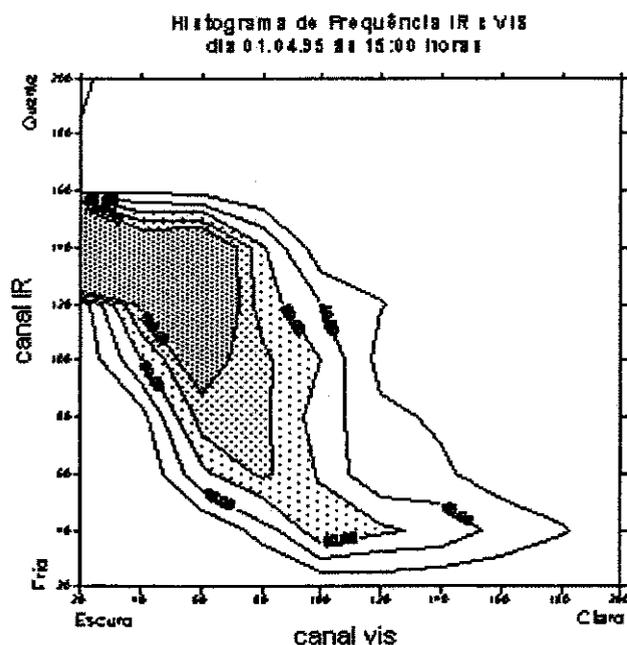


Fig. 4.1. Histograma de frequência IR x VIS para o dia 02.04.95, para o horário das 18:00 UTC.

TABELA 4.1 - VALORES DE "COUNTS" PARA OS PARES (IR,WV), PARA DUAS CLASSES DE CIRRUS: 1) ESPESSOS E 2) TÊNUES, COM OS VALORES DO DESVIO PADRÃO DO COUNT (DP), E A PORCENTAGEM EM CADA HORÁRIO DE IMAGEM, DESTES DOIS TIPOS DE NUVENS.

			Esessos	Tênu	Esessos	Tênu	Esessos	Tênu
	DIA	HORAS	MÉDIA	MÉDIA	DP	DP	%	%
1	25.03.95	20:00	(47,54)	(85,78)	(9,8)	(16,9)	26	36.8
2	26.03.95	00:00	(48,53)	(87,77)	(9,9)	(19,13)	25	39.5
3	27.03.95	23:00	(50,51)	(89,77)	(8,8)	(15,10)	16.4	33.8
4	28.03.95	00:00	(49,54)	(88,81)	(8,8)	(15,10)	15.8	34.3
5	28.03.95	20:00	(46,54)	(82,82)	(8,9)	(16,10)	19.7	27.6
6	30.03.95	00:00	(49,54)	(87,49)	(8,8)	(15,9)	14.2	27.4
7	30.03.95	22:00	(47,55)	(84,81)	(8,8)	(16,9)	13.8	27.2
8	01.04.95	09:00	(46,57)	(85,78)	(14,15)	(24,21)	9.8	30.1
9	02.04.95	09:00	(48,55)	(88,77)	(10,10)	(17,10)	13	35.6
10	03.04.95	09:00	(47,55)	(88,82)	(9,10)	(17,13)	8.6	20.2

**Gráfico de Frequência Percentual IR x VIS
dia 01.04.95 às 12:00 horas locais**

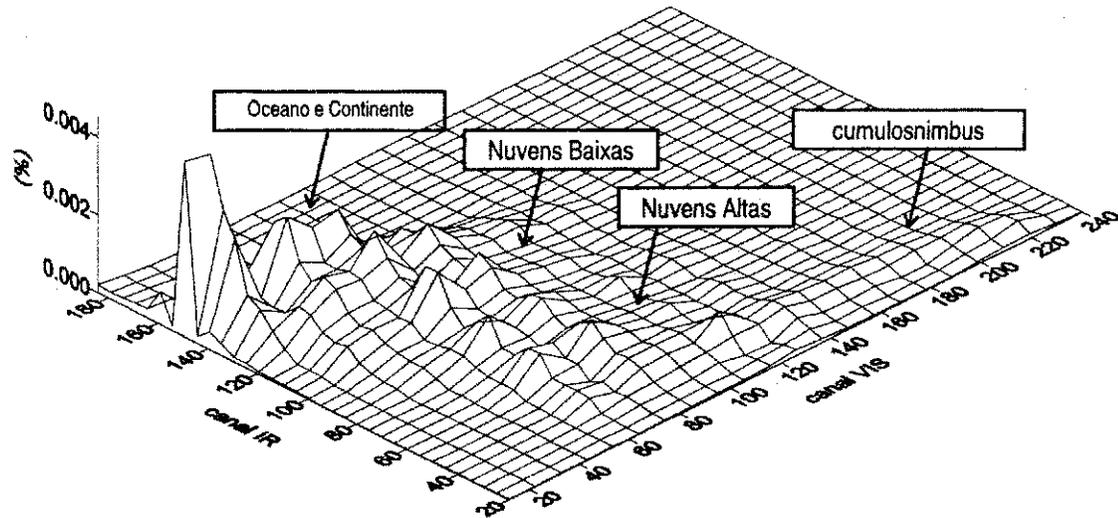


Fig. 4.2 - Histograma de frequência IRxVIS, versus a porcentagem, mostrando as áreas correspondentes a cenas mais comuns dentro de uma imagem.

**Histograma de Frequências relativas de IR x WV
dia 02.04.95 às 12:00 TMG**

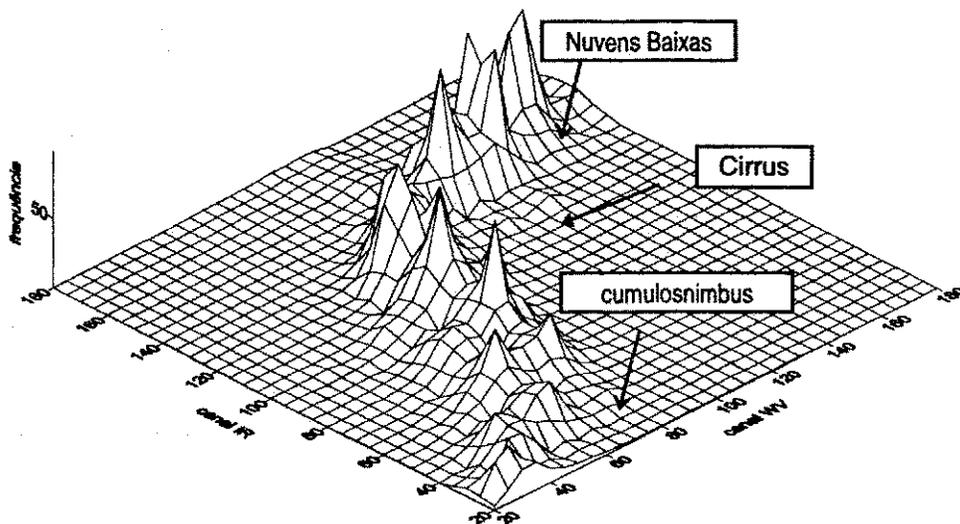


Fig. 4.3 - Histograma tridimensional de frequência para os pares de "count" mais frequentes nos canais IR e WV, para o dia 02.04.95 às 12:00 TMG.



(a)



(b)

Fig. 4.4 - (a) imagem classificada utilizando os valores de "count" os canais no espectro infravermelho, IR x WV, para o horário da 12:00 UTC, do dia 02.04.95, e (b) imagem na banda do vapor d'água com os valores de "count" invertidos.

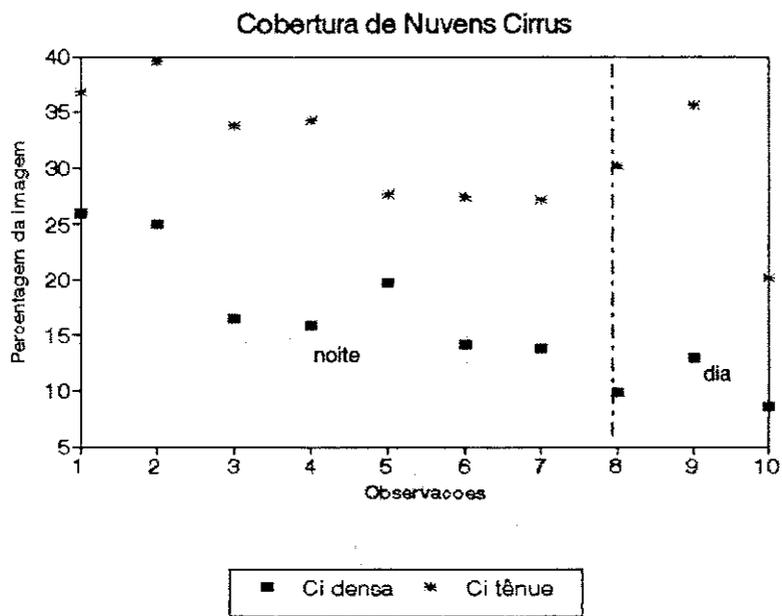
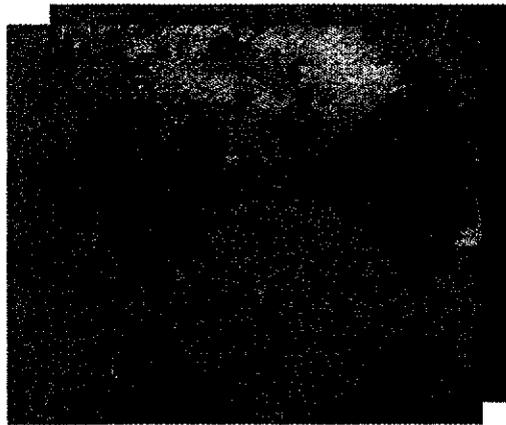


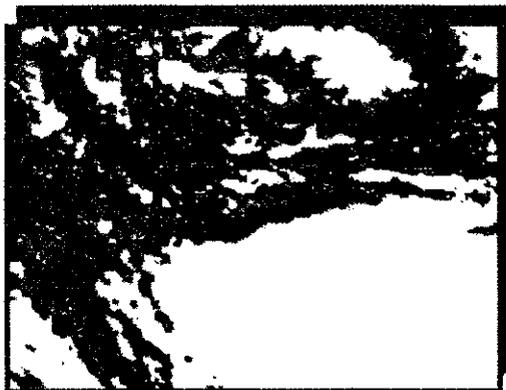
Fig. 4.5 - Cobertura de nuvens Cirrus obtida apartir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas e as restantes de imagens diurnas do horário das 12:00 UTC.

TABELA 4.2. VALORES DE "COUNTS" CORRESPONDENTES ÀS CENAS CARACTERÍSTICAS NOS CANAIS DO VIS E DO IR, PROVENIENTES DE UMA NEFANÁLISE PARA 09:00, 12:00 E 14:00 HORAS LOCAL E ÀS MÉDIA DESTES HORÁRIOS .

ORDEM	CENAS	09:00		12:00		14:00		M(VIS)	M(IR)
		VIS	IR	VIS	IR	VIS	IR		
1	OCEANO	17	150	17	150	17	150	17	150
2	CONTINENTE	40	145	40	140	30	145	35	145
3	CUMULOSNIMBUS SOBRE O OCEANO	170	35	215	35	180	25	190	34
4	CUMULOSNIMBUS SOBRE O CONTINENTE	160	35	185	30	200	25	183	33
5	CUMULUS / OCEANO	175	30	225	30	190	25	199	30
6	CUMULUS / CONTINENTE	150	85	220	25	215	25	195	38
7	CIRRUS FINOS	70	55	70	55	65	95	71	69
8	CIRRUS ESPESSOS	97	45	115	40	85	80	100	56
9	ESTRATUS / OCEANO	55	85	60	65	65	50	60	69
10	ESTRATUS / CONTINENTE	50	130	65	85	80	105	67	106



(a)



(b)

Fig. 4.6. (a) imagem no canal do visível do dia 02.04.95 às 09:00 horas locais, e (b) imagem classificada para uma cena específica (nuvens Cirrus), usando um método baseado no de Sèze e Desbois (1987), em azul, aparece as mais finas e, em verde, as nuvens mais espessas.

4.3. - Determinação da Temperatura das Nuvens Cirrus

As temperaturas de brilho obtidas nos canais do infravermelho do Meteosat mostraram primeiramente que dentro da “janela atmosférica”, centrada no comprimento de onda de $11\mu\text{m}$, teve-se uma grande variação de sinal mas as nuvens Cirrus têm temperaturas em torno de 230K na janela, enquanto que na banda do vapor d’água (no comprimento de onda de $6,4\mu\text{m}$), a temperatura de brilho manteve-se centrada basicamente em torno de 180 e 235K para todas as cenas. Lembre-se que a radiação captada pelo sensor neste canal é proveniente dos níveis altos da atmosfera, isto é, acima de 700hpa. De acordo com Szejwach (1982): “... toda a radiação que vem do solo no intervalo do comprimento de onda entre $5,4$ e $7,1\mu\text{m}$, é absorvida pelo vapor d’água presente na atmosfera até a altitude da base das nuvens Cirrus”. A Figura 4.7 apresenta um histograma bidimensional ilustrando um resultado típico.

A determinação da temperatura de nuvens Cirrus realizou-se usando o método de Szejwach (1982) diretamente aplicado aos histogramas de “counts” das imagens, de acordo com o critério de Desbois et al. (1982), após ter sido feita a discriminação de nuvens Cirrus. Na classificação optou-se por denominar as cenas com Cirrus como Cirrus tênues ou espessos, apesar de fazerem parte de uma mesma nuvem, correspondendo às bordas e ao centro da nuvem, respectivamente.

Foram escolhidos locais (pixels) de borda e centro de nuvens Cirrus, para obter essas temperaturas para os grupos “tênuas” e “espessos”. A partir dos diagramas de dispersão correspondentes (Figura 4.8a e b) foram estimadas as temperaturas correspondentes a dois grupos: para Cirrus menos densas obteve-se uma temperatura de 205K, e para um segundo grupo, com nuvens mais densas com temperatura de 222K. Estes resultados são incoerentes com o fato de se ter uma única nuvem. Se ela fosse suficiente espessa, os pontos no diagrama (IR,WV) ficariam perto da curva Γ e permitiriam uma estimativa de temperatura aceitável (Figura 4.8.a). Por outro lado, a Figura 4.8a evidencia que a aplicação do método apenas a nuvens bastantes tênues pode dificultar a obtenção de retas de regressão confiáveis, devido a que os pontos associados na imagem não estão suficientemente alinhados. Assim, a interseção dessa reta com a curva Γ introduziria erros apreciáveis na estimativa de temperatura. Sendo assim, é necessário levar em conta os dois grupos para se determinar a temperatura através do método empregado. Com isso a temperatura encontrada foi de 218K, inferior temperaturas encontradas por Szejwach (1982) que foram de 230K, contendo um erro de 15% nos dados obtidos a partir de observações em aeronaves.

Finalmente, ao plotar ambos os grupos em um único gráfico (Figura 4.9.a), uma reta ajustada a ambos permitiu determinar uma temperatura de 222K, coerente com a altitude de nuvens Cirrus. Este critério supõe, por outro lado, que a nuvem tem temperatura termodinâmica T_N homogênea entre bordas e o centro. A Figura 4.9.b mostra como a temperatura obtida foi intermediária entre as que se obteriam com cada grupo isolado.

Aplicando o método para os dias e horários disponíveis nos canais WV e IR do Meteosat (Tabela 4.3), encontra-se que ao longo das observações, as nuvens tiveram temperaturas em média em torno de 220K com um desvio padrão de 9K, observando-se a maior temperatura de 224K no dia 03.04.95 e a menor de 214K para dia 02.04.95, ambas para 12:00 UTC. Evidenciou-se que durante a manhã a variação é maior do que no período noturno, para o qual as temperaturas sempre estiveram próximas da média.

Na Figura 4.10 e na Tabela 4.3 vê-se que os dias observados 1,5,6,7,10 apresentaram temperaturas de nuvem maiores. Para esses casos a análise evidenciou que os Cirrus não estavam por cima de outro tipo de nuvem, o que não ocorreu para as observações 2,3,4 e 9. Nestes últimos casos, a ausência de nuvens em níveis inferiores sugere um aquecimento da superfície terrestre e um levantamento da atmosfera como um todo e conseqüentemente também do nível dos Cirrus.

Gráfico da Frequência
Temperatura na Janela x na Banda do Vapor D'água
para o dia 02.04.95 às 12:00 UT

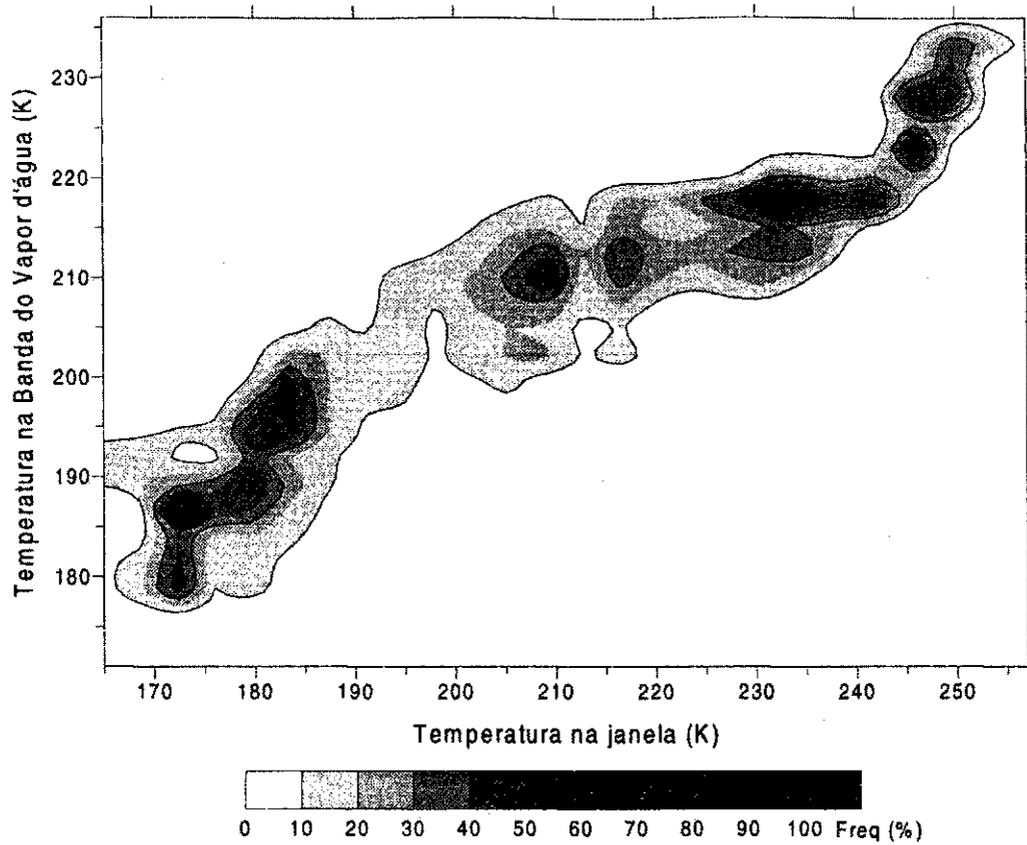


Fig. 4.7. Histograma de frequência para toda a imagem do dia 02.04.95 às 12:00 UTC, das temperaturas na banda do vapor d'água versus as temperaturas na janela atmosférica .

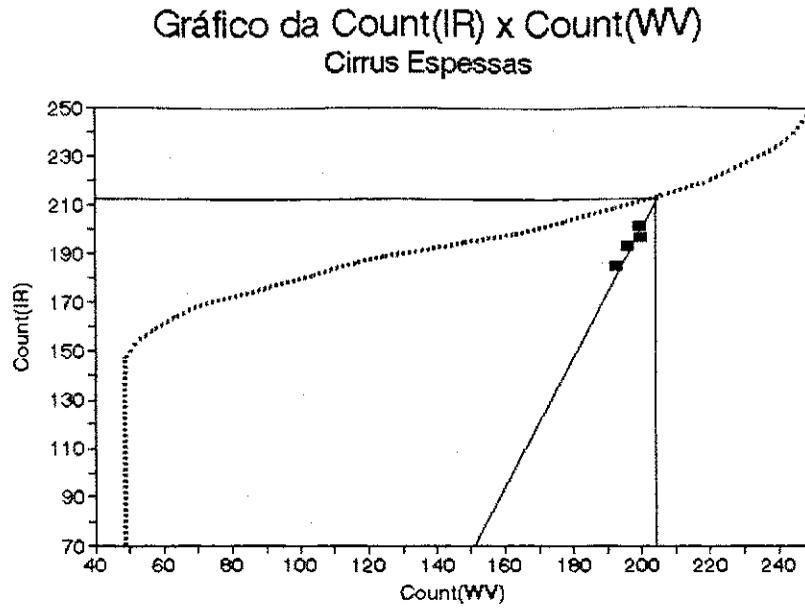
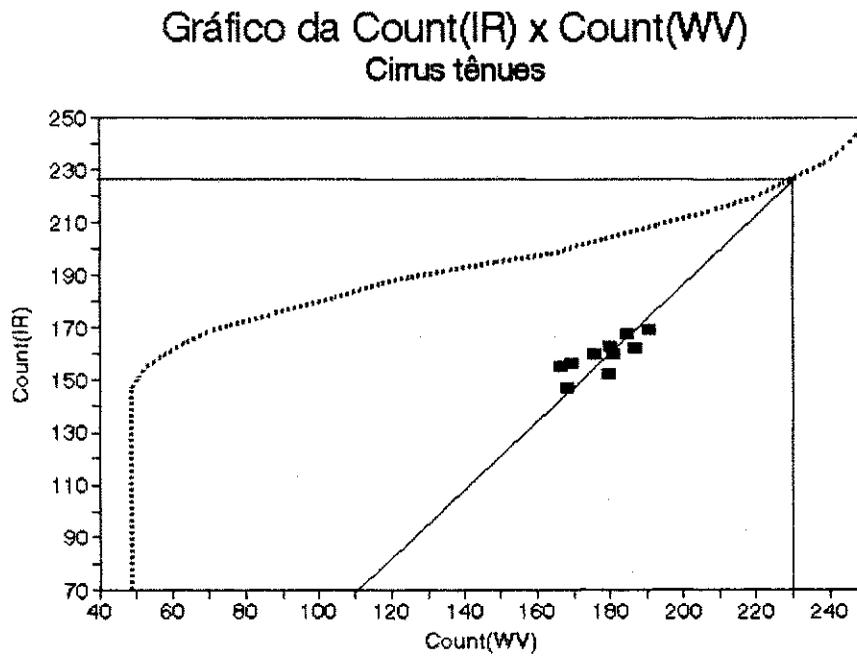


Fig. 4.8.a - Interseção entre às curvas $f[C(IR),C(WV)]$ e $C(IR)= f[C(WV)]$, de forma que se encontra um valor de "count" que caracteriza a temperatura para o grupo1 de nuvens espessas.



(b)

Fig. 4.8.b - Interseção entre às curvas $f[C(IR),C(WV)]$ e $C(IR)= f[C(WV)]$, de forma que se encontra um valor de "count" que caracteriza a para o grupo 2, de nuvens tênue.

Gráfico da Count(IR) x Count(WV)
Cirrus Tênu e Espesso

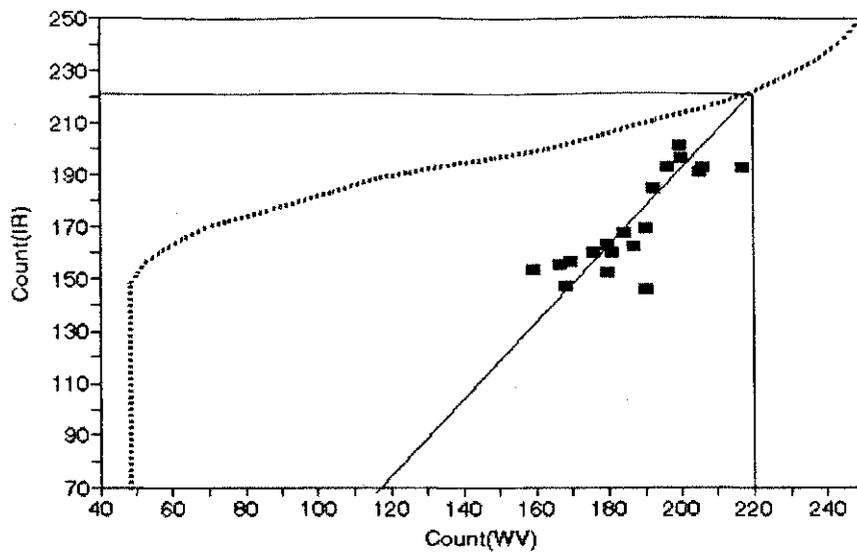


Fig. 4.9.a - Interseção entre às curvas $f[C(IR), C(WV)]$ e $C(IR) = f[C(WV)]$, para os dois tipos de Cirrus

Gráfico da Temperatura x Count(IR)

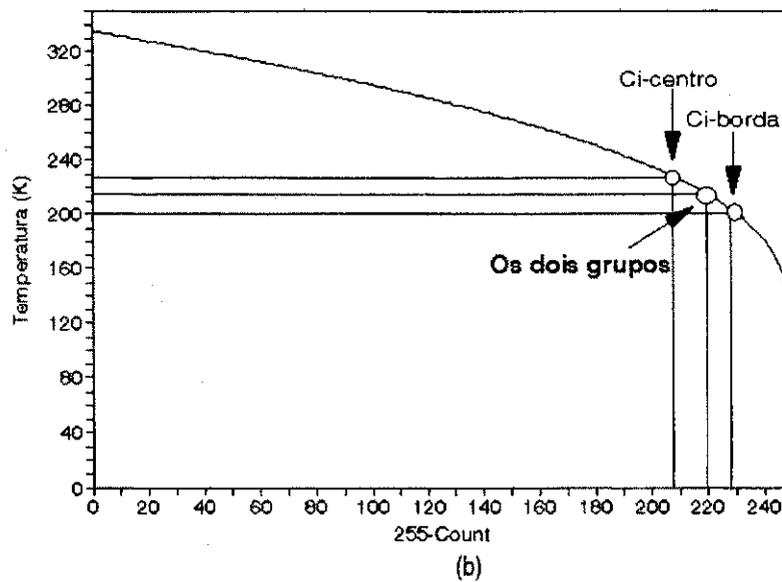


Fig. 4.9.b - determina a temperatura para as nuvens Cirrus espessas, tênu e para os dois grupos simultaneamente, da figura 4.8.a e b.

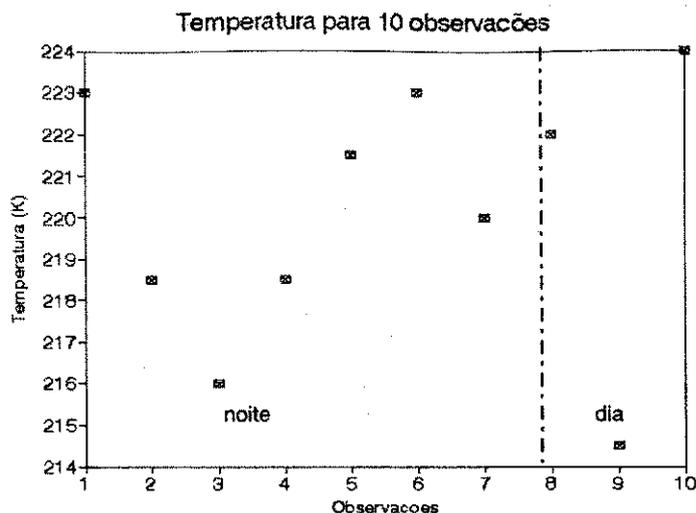


Fig. 4.10 - Temperatura de nuvens Cirrus para 10 observações feitas em pares de imagens WV e IR, usando o método de Szejwach (1982).

TABELA 4.3 - OS RESULTADOS OBTIDOS PARA TEMPERATURA E ALTITUDE, PARA 10 OBSERVAÇÕES FEITAS AO LONGO DE 8 DIAS, NOS PARES DE IMAGENS WV E IR, ESTES SÃO OS DIAS EM QUE SE DISPÕEM DAS IMAGENS NOS MESMOS, HORÁRIOS DOS DOIS CANAIS, SIMULTANEAMENTE, ONDE A CLASSE 1, CORRESPONDE A NUVENS CIRRUS TÊNUES E A 2 A NUVENS ESPESSAS.

OBS.	DIA	HORAS	T_N (K)	ALT (m)
1	25.03.95	20:00	223	11970
2	26.03.95	0:00	219	12530
3	27.03.95	23:00	216	12840
4	28.03.95	0:00	219	12510
5	28.03.95	20:00	222	12140
6	30.03.95	0:00	223	12040
7	30.03.95	22:00	220	12420
8	01.04.95	9:00	222	12120
9	02.04.95	9:00	215	13120
10	03.04.95	9:00	224	12030
			MÉDIA	220
			DP	9
				368

4.4 - Determinação da Altitude

Usando o método descrito na Seção 3.4, encontrou-se que as altitudes das nuvens Cirrus em média foram de 12420mcp com um desvio padrão de 368 mcp, com a menor altitude de 11.970mcp verificada no dia 25.03.95 às 23:00 UTC e a maior altitude de 13.120mcp para o dia 02.04.95 às 12:00 UTC. Os resultados são coerentes para a região em questão, visto que as altitudes foram típicas da região tropical de nuvens altas que é entre 8 e 18Km.

A figura 4.11 evidencia a variação na altitude do nível dos Cirrus em torno de 1.200mcp, isto possivelmente devido a atuação de um sistema convectivo durante a os dias onde as observações foram no período noturno. Ele teria feito com que a convecção fosse mais profunda, portanto produzindo dos Cirrus em níveis mais elevados. A medida que este sistema enfraqueceu ou passou, teve-se uma diminuição no nível onde se encontravam os Cirrus.

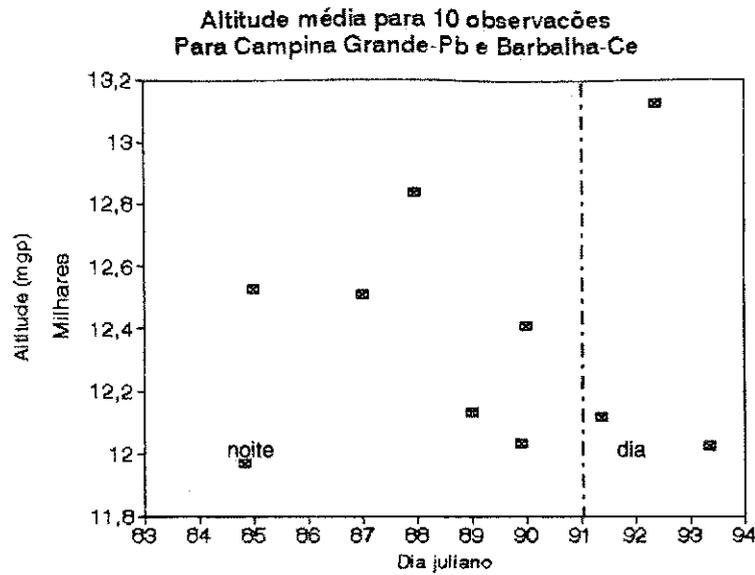


Fig. 4.11 - Variação da altitude das nuvens Cirrus ao longo de 10 observações, em pares de imagens WV e IR para Cirrus tênues (a curva de cima) e , para Cirrus densas (a curva de baixo), onde as variações de altitudes podem ser atribuídas aos movimentos convectivos abaixo das nuvens.

4.5 - Emissividade dos Cirrus

Os valores de emissividade em média foram de 0,88 e 0.97 para os Cirrus espessas e tênue, respectivamente, mostrando que as nuvens Cirrus têm um comportamento radiativo aproximado a de um "corpo negro". Estas medidas contêm um erro de ± 0.07 , aceitando-se a estimativa de erro usado por Shenk e Curran (1973)(Tabela 4.4). Acredita-se estar subestimando a emissividade, se comparada com a de outros autores, como Beck et al. (1996), que encontraram valores de emissividade próximo a 0.9. Todavia estes valores foram obtidos com o uso de um modelo que levou em conta a microfísica das nuvens, determinada através de medidas feitas por eles e por outros autores (Takano et al 1992)(Figura 4.12). Que são valores próximos aos encontrados para nuvens Cirrus espessos, mas bem abaixo daqueles encontrados para as nuvens tênue. Como Beck et al. (1996), não discrimina qual o tipo de Cirrus pode-se considerar o resultados satisfatório no caso dos Cirrus espessos.

As observações foram poucas e muito espaçadas no tempo. Podemos qualifica-las apenas como observações típicas do período noturno, que são as sete primeiras observações, e do período diurno, que são as três últimas observações. Quanto à variação dos valores de emissividade, ela foi maior para as nuvens tênue no período noturno para as nuvens Cirrus espessas foi quase constante tendo apenas dois valores discrepantes em relação ao restante das observações (Figura 4.13 e Tabela 4.4). Um período maior de seqüência de imagens seria ideal para se comprovar se esta afirmação é real, ou apenas uma anomalia, já que a variabilidade não é também muito grande.

Algo interessante é a existência de uma diminuição da emissividade na penúltima observação, mas isso ocorre devido a que neste horário e dia, os Cirrus não têm por baixo nenhum outro tipo de nuvem. Isto é evidenciado nas imagens (Figuras 4.4a e 4.6a) de forma que, neste caso, tem-se a emissividade própria deste tipo de nuvem em condições de existência isolada, o que faz com que a variação da emissividade nas últimas observações seja maior do que a dos outros horários.

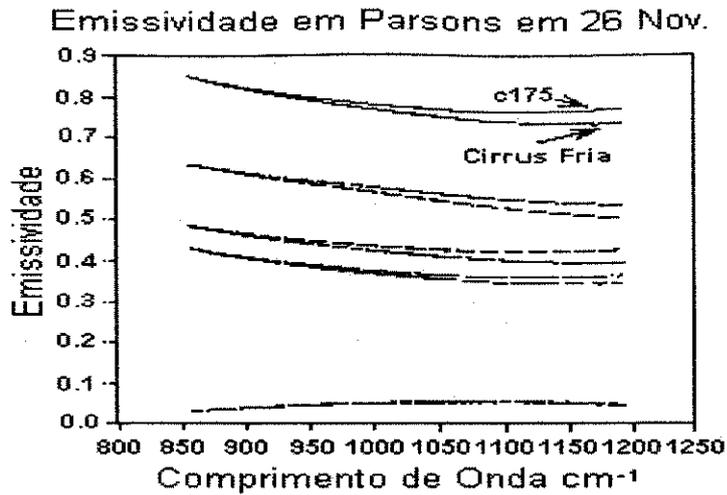


Fig. 4.12 - Valores de emissividade obtidas através de medidas feitas sobre nuvens Cirrus em Parsons em 26 de novembro de 1991. Para cada caso utilizou-se o c175 e outras distribuições de micro-física de nuvens Cirrus frias (Fonte: Beck *et al.* 1996).

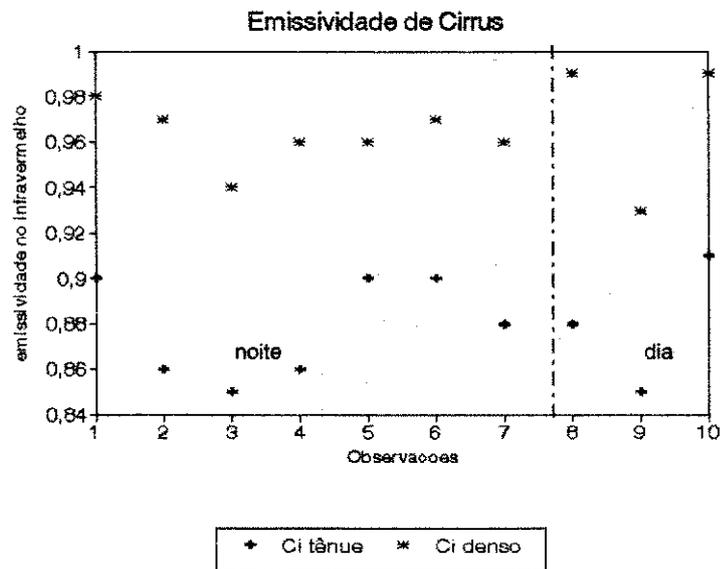


Fig. 4.13 - Emissividade obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas e as restantes de imagens diurna do horário das 12:00 UTC.

4.6 - Transmitância dos Cirrus

As transmitâncias observadas (eq. 3.4) não foram superiores a 15% e a menor não inferior a 2% (Figura 4.13). Sugere que a radiação captada acima do topo das nuvens Cirrus foi proveniente principalmente da sua emissão.

Na Figura 4.14, pode-se ver que as nuvens tênues são as que possuem maior transmitância, como é de se esperar, em virtude de sua espessura. As nuvens espessas têm uma variabilidade maior que as nuvens tênues; embora a média da transmitância seja bem menor para as tênues, o desvio padrão é da mesma ordem de grandeza (Tabela 4.4). Outro fato interessante é que para as 10 observações as flutuações de transmitância são da mesma magnitude.

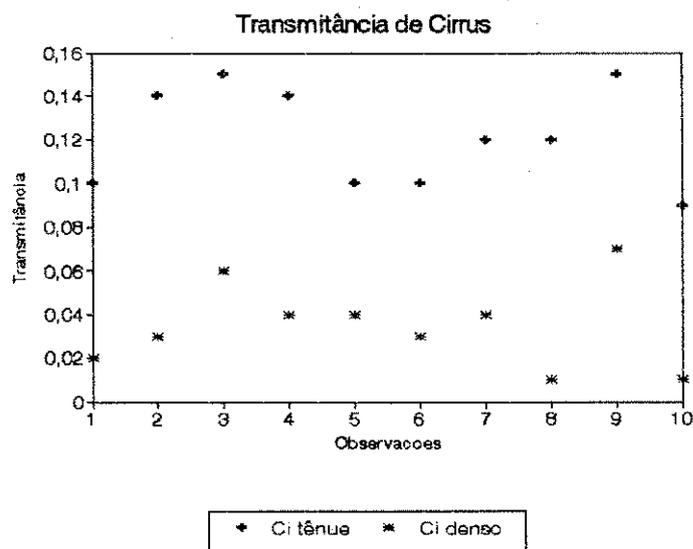


Fig. 4.14 - Transmitância obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas, e as restantes de imagens diurnas do horário das 12:00 UTC.

4.7 - Profundidade Óptica dos Cirrus

A profundidade óptica no visível ($0,5 \mu\text{m}$) variou de 2.04 a 5.39, dentro dos limites encontrados por Liou (1986). Nuvens tênues variaram muito pouco ao longo das observações, o que não ocorreu com as nuvens mais densas, que mostraram uma alta variabilidade e uma maior profundidade óptica nos horários diurnos (Figura 4.15), e são evidenciados pelos dados da Tabela 4.4. Os resultados parecem ser coerentes com os obtidos por Kinne et al. (1992), que utilizaram medidas de "Lidar" e radiômetros a bordo de aeronaves, embora tenha sido para latitudes médias, o intervalo da profundidade óptica, é próximo do que conseguimos encontrar (Figura 4.16), de forma que pode-se ter uma idéia de qual é o comportamento da profundidade óptica das nuvens Cirrus no visível como também em relação ao infravermelho.

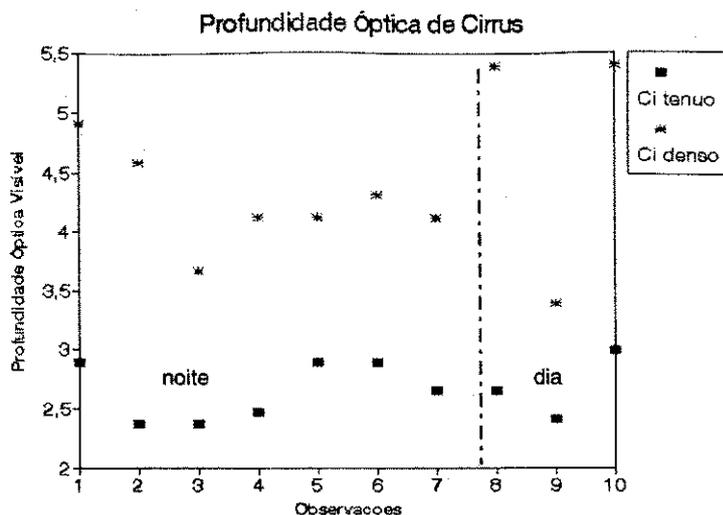


Fig. 4.15 - Profundidade óptica ($0,5 \mu\text{m}$) obtida a partir de 10 pares de imagens, onde as sete primeiras são provenientes de imagens noturnas, e as restantes de imagens diurnas do horário das 12:00 UTC, utilizando o método de Liou (1986).

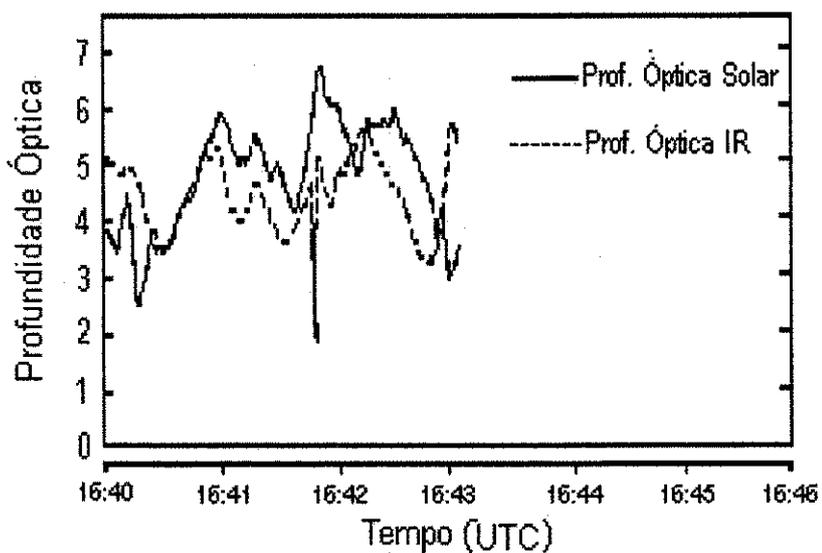


Fig. 4.16 - Profundidade óptica no espectro solar e IR, obtida com "Lidar" ER-2 a bordo de uma aeronave, entre 16:40 e 16:46 UTC, no dia 28 de outubro de 1986, a uma altitude de 10 Km entorno das nuvens Cirrus (Fonte: Kinne et al. 1992).

TABELA 4.4 - OS RESULTADOS OBTIDOS PARA EMISSIVIDADE, TRANSMITÂNCIA E PROFUNDIDADE ÓPTICAS PARA 10 OBSERVAÇÕES FEITAS AO LONGO DE 8 DIAS, NOS PARES DE IMAGENS WV E IR, ONDE A CLASSE 1 CORRESPONDENTE A NUVENS TÊNUES A 2 NUVENS ESPESSAS.

			CLASSE 1	CLASSE 2	1	2	1	2
OBS	DIA	HORAS	ϵ	ϵ	T_N	T_N	τ	τ
1	25.03.95	20:00	0,90	0,98	0,10	0,02	2,89	4,91
2	26.03.95	00:00	0,86	0,97	0,14	0,03	2,37	4,58
3	27.03.95	23:00	0,85	0,94	0,15	0,06	2,37	3,67
4	28.03.95	00:00	0,86	0,96	0,14	0,04	2,47	4,12
5	28.03.95	20:00	0,90	0,96	0,10	0,04	2,89	4,12
6	30.03.95	00:00	0,90	0,97	0,10	0,03	2,89	4,32
7	30.03.95	22:00	0,88	0,96	0,12	0,04	2,65	4,12
8	01.04.95	09:00	0,88	0,99	0,12	0,01	2,65	5,39
9	02.04.95	09:00	0,85	0,93	0,15	0,07	2,04	3,39
10	03.04.95	09:00	0,91	0,99	0,09	0,01	2,99	5,39
		MÉDIA	0,88	0,97	0,12	0,04	2,62	4,40
		DP	0,005	0,003	0,005	0,003	0,841	4,047

5. - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para identificar nuvens altas em imagens de satélite, a discriminação será melhor quando se utilizarem as imagens nos canais no espectro do infravermelho (IR,WV), pois no canal do visível se torna difícil fazer esta classificação, embora não seja impossível. O canal VIS é de utilidade na associação com nuvens convectivas, mas parece pouco precisas na presença de mistura de nuvens baixas e médias com Cirrus semi-transparentes. Deve ser observado, entretanto, que as variáveis utilizadas na classificação de nebulosidade foram os "counts" absolutos em cada canal. Outros pesquisadores utilizaram-se de outros critérios, como variáveis padronizadas com relação à média de uma imagem, ou introduziram a textura (variância local de valores de "count") como medida da homogeneidade/variabilidade espacial do brilho observado Farki et al. (1993) e Sèze e Desbois (1987). Neste trabalho, o uso dos pares (WV,IR) mostraram-se eficientes na discriminação de nuvens Cirrus.

Observou-se que a cobertura de nuvens Cirrus foi mais extensa nos horários noturnos (7 observações) do que nos horários diurnos (3 observações), provavelmente pela associação com desenvolvimento de sistemas convectivos no final da tarde e sua dissipação ou enfraquecimento antes da madrugada.

As temperaturas estimadas pelo método de Szejwach (1982) conjuntamente com as radiossondagens indicaram altitudes próximas das esperadas para Cirrus nestas latitudes. As altitudes típicas foram de 12420m, com valores extremos de 11970 e 13120m.

Os valores de emissividade foram um pouco maiores, mas próximos daqueles obtidos por outros autores: $0,88 \pm 0,02$ para nuvens tênue (ou bordas) e $0,9 \pm 0,02$ para nuvens espessas (ou centro). Beck et al. (1996) obtiveram em torno de 0,84, para nuvens tênues.

A profundidade óptica no visível teve pouca variação dentro do intervalo de 2,04 e 5,39, durante os dias de observações, com valores considerados satisfatórios quando comparados com valores a resultados obtidos por Kinne et al. (1992).

6. RECOMENDAÇÕES

Em estudos futuros, podem ser observadas as seguintes recomendações:

- no caso da classificação de nuvens altas, utilizar as imagens no infravermelho (na janela atmosférica e na banda do vapor d'água), pois além de permitir o uso do método à noite, facilita a discriminação deste tipo de nuvem;
- Testar o aprimoramento do método incluindo textura local, e trabalhando com variáveis padronizadas.
- Utiliza-se mais horários durante cada dia, para estudar a evolução da cobertura de nuvens Cirrus e sua relação com o desenvolvimento de sistemas convectivos na região.
- Realizar experimentos para verificar através de medidas considerações estimar temperatura, emissividade e outros parâmetros.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, S. A. A., SMITH, W. L.; SPINHIRNE, J. D.; e REVERCAMB, H. E. The 27-28 October 1986 Fire Ifo Cirrus Case Study: Spectral Properties of Cirrus Clouds in the 8-12 μm Windows, Monthly Weather Review, Boston, v. 118, n. 11, p. 2377-2388, No.1990.

BECK, H. G.; DAVIS., J. M.; e COX, S. K. Radiative Properties of Cirrus Cloud Derived from Surface Interferometric Measurements, Journal of Applied Meteorology, v.35, n. 07,p.1240-1255, Aug.1996.

BELIEC. B.; BRISSON A.; LE BORGNE P.; e MARSOUIN, A. Operational Cloud Classification with Meteosat Data. Veille Climatique Satellitaire (Centre de Météorologie Spatiale, Météofrance). p. 283-288. 1992.

DESBOIS, M, SÈZE, G.; SZEJWACH, G. Automatic Classification on METEOSAT Imagery: Application to High-Level Clouds, Journal of the Applied Meterology, v. 21, n. 3 , p. 401-412. Mar. 1982.

EUMETSAT - Meteosat-5 Calibration Report., ISSU. MOD/MEP/MET. Apendix 4.Temperature/Radiance Conversion. April-June, 1995.

FARKI, B.; DAGORNE, B.; GUILLOT, B.; LE BORGNE, P.; MARSOUIN, A. Classification des Nuages sur l'Afrique à l'aide de Meteosat 4. Veille Climatique Satellitaire (Centre de Météorologie Spatiale, Météofrance). 1993.

FERRÃO, R. C. P. Atlas Internacional de Nuvens; Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro. 1972

- Fu, Q. e K. N. Liou. Parametrization of the Radiative Properties of Cirrus Cloud. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 50, n. 13, p.2008-2025, jul. 1993.
- GRUND, C. J.; ELORANTA, E. W. The 27-28 October 1986 FIRE IFO Cirrus Case Stude: Cloud Optical Properties Determined by High Spectral Resolution Lidar. Monthly Weather Review, Boston, v. 118, n. 11, p. 2344-2355, Nov. 1990.
- HEYMSFIELD, A. J.; MILLER, K. M.; SPINHIRNE, J. D. 1990. The 27-28 October 1986 FIRE IFO Cirrus case Study: Cloud Microstructure. Monthly Weather Review, Boston, v. 118, n. 11, p. 2313-2328, Nov.1990.
- Kinne, S., T. P. Ackerman, A. J. Heymsfield, F. P. J. Valero, K. Sassen e J. D. Spinhime. Cirrus Microphysics and Radiative Transfer: Cloud Field Study on 28 October 1986. Monthly Weather Review, Boston, v. 120, p. 661-684, May. 1992.
- LIOU, K. N. Remote Sensing of the Thickness and Composition of Cirrus Clouds from Satellites. Journal of Applied Meteorology, V.16, p. 91-99, Jan 1977.
- LIOU, K. N. Influence of Cirrus on Weather and Climate Processes: A Global Perspective. Monthly Weather Review, Boston, v. 114, p. 1167-1199. June 1986.
- MENZEL, W. P.; WYLIE, D. P.; STRABALA, K.I. Seasonal and Diurnal Changes in Cirrus Clouds as Seen in Four Years of Observations with the VAS. Journal of Applied Meteorology, V. 31, n. 4,p. 370-385, Apr.1992.
- PEREIRA, R. C. G.; CEBALLOS, J. C. Caracterização de Nuvens em Imagens do Satélite Meteosat. *Série Iniciados*, Editora Universitária/UFPB, v.1 123-160. 1995.

PONTES, E. G. S. Estimativa de Componentes do Fluxo Radiativo na Superfície Mediante Satélite. Campina Grande. 1997. 75 p

PHULPIN, T.; DERRIEN, M.; BRARD, A. A Two-Dimensional Histogram Procedure to Analyse Cloud Cover from NOAA Satellite High Resolution Data. Journal Climate of Applied Meteorology, v. 22, n. 12, p. 1332-1345, Dec. 1985.

ROSSOW, W. B.; LACIS, A. A. Global, Seasonal Cloud Variations from Satellite Radiance Measurements. Part II: Cloud Properties and Radiative Effects. Journal of Climate, v. 3, n. , p. 1204-1253, Oct. 1990.

SASSEN, K.; STARR, D O'C.; UTTAL, T. Mesoscale and Microscale Structure of Cirrus Clouds: Three Case Studies. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 46, n. 3, p. 371- 396, Feb. 1989.

SCHMETZ, J.; LIU, Q. Outgoing Longwave Radiation and its Diurnal Variation at Regional Scales Derived from Meteosat. Journal of Geophysical Research, v. 93, n. d9 , p. 11192-11204, Sep. 1988.

SÈZE, G.; DESBOIS, M. Cloud Analysis from Satellite Imagery Using Spatial and Temporal Charcaterstics of the Data. Journal of Applied Meteorology, v. 26, p. 287-303, Feb. 1987.

SHENK, W. E.; e R. CURRAN, J. A Multi-Spectral Method for Estimating Cirrus Cloud top Heights, Journal of Applied Meteorology, v. 12, n. 19 , p. 1213-1216, Oct. 1973.

SPINHIRNE, J. D.; HART, W. D. Cirrus Structure and Radiative Parameters from Airbone Lidar and Spectral Radiometer Observations: The 28 October 1986 FIRE Study. Monthly Weather Review, Boston, n.118, n. 11, p. 2329-2343, Nov. 1986.

STARR, D. O'C; WYLIE, D. P. The 27-28 October 1986 FIRE IFO Cirrus Case Study: Meteorology and Clouds. Monthly Weather Review, Boston, v. 118, n. 11, p. 2259-2287, Nov. 1990.

SZEJWACH, G. Determination of Semi-Transparent Cirrus Cloud Temperature from Infrared Radiances: Application to METEOSAT, Journal of the Applied Meteorology, v. 21, n. 3, p. 384-393, Mar.1982.

TAKANO, Y.; LIOU, K.N.; MINNIS, P. The Effects of Small Ice Crystals on Cirrus Infrared Radiative Properties. Journal of the Atmospheric Science, v. 49, n. 16 p. 1487-1493, Aug.1992.

TSONIS, A. A. On the Separability of Various Classes from GOES Visible and Infrared Data. Journal Climate of Applied Meteorology., v. 23, n. 10, p. 1393-1410, Oct. 1984.

VALADÃO, C. E. A. *Disseminação, Conversão Radiométrica dos Canais Espectrais e Georeferências de Imagens dos Satélites da Série METEOSAT*, Fortaleza, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), 7 Pag., 1995, Nota Técnica.