

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5667-TDI/560

ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO DE SÃO PAULO
UTILIZANDO A TÉCNICA CONVECTIVA ESTRATIFORME

Graziela Balda Scofield

Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo
Dr. Nelson Jesus Ferreira e Dra. Thelma Krug

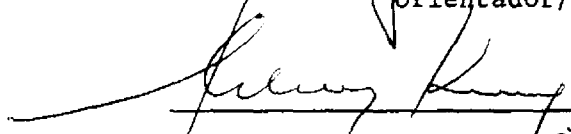
INPE
São José dos Campos
Dezembro de 1994

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Nelson Jesus Ferreira


Orientador/Presidente

Dra. Thelma Krug


Orientadora

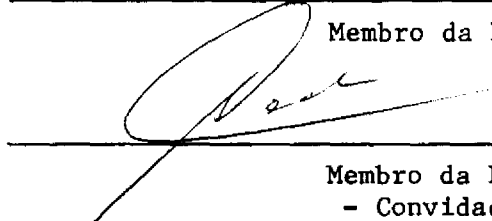
Dr. Ralf Gielow


Membro da Banca

Dr. Roberto Vicente Calheiros


Membro da Banca

Dr. Adilson Wagner Gandu


Membro da Banca
- Convidado -

Candidata: Graziela Balda Scofield

São José dos Campos, 21 de dezembro de 1994

Ao meu marido Celso e aos meus pais Angelina
e Guilherme pelo amor, carinho, compreensão,
confiança e constante incentivo

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nelson Jesus Ferreira e a Dra. Thelma Krug pela orientação, apoio e ensinamentos úteis na elaboração deste trabalho.

Aos amigos Meiry Sayuri Sakamoto, Eduardo Jorge de Brito Bastos, Egídio Arai, Jorge Luís Nogueira e Nelson Arai pelos apoios técnico e científico, e pela oportunidade de discussões.

Aos amigos da pós-graduação, Rita pela elaboração de alguns desenhos e José Marinaldo pela ajuda na elaboração dos gráficos. Além disso, pelos constantes incentivos ao longo de todo o curso de Mestrado.

Ao CTH/USP pelo fornecimento dos dados de radar.

Ao INPE e ao CNPq pelos auxílios técnico e financeiro.

Finalmente, agradeço a todos que direta e indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Utilizando-se a técnica CST (Convective Stratiform Technique), adaptada para a região Sudeste do Brasil, foram feitas estimativas de precipitação para a região de São Paulo. Foram utilizados imagens infravermelho do satélite METEOSAT-3 e dados CAPPI do radar meteorológico de Ponte Nova (SP) para o período de dezembro de 1993 a fevereiro de 1994. A adaptação desta técnica, para os meses de janeiro e fevereiro de 1994, envolveu os seguintes procedimentos: conversão das radiâncias transmitidas pelo satélite em temperaturas; cálculo da temperatura limiar correspondente a ocorrência de chuva e não chuva; e, definição da equação discriminante entre nuvens cirrus e núcleos convectivos. Foram obtidas estimativas de precipitação horárias e diárias para dezembro de 1993. As estimativas diárias apresentaram melhor resultado. As estatísticas mostram que a correlação entre os dados de radar e CST adaptada é de 11% (horário) e 25% (diário); RMSE de 350% (horário) e 143% (diário); e Tendência de 55% (horário) e 58% (diário). O teste t de Student para dados emparelhados mostrou que as taxas médias de precipitação encontradas pelo radar são significativamente diferentes àquelas encontradas pela CST. As análises de sensibilidade de temperatura mostraram que o RMSE é constante para a faixa de 225 a 240K, e que a Tendência é mais sensível a variações de temperatura.

RAINFALL ESTIMATION OVER SÃO PAULO REGION USING THE CONVECTIVE STRATIFORM TECHNIQUE

ABSTRACT

The Convective Stratiform Technique (CST) was adapted to the southeastern Brazil to estimate precipitation over São Paulo region. The data used are infrared imagery provided by the geosynchronous meteorological satellite METEOSAT-3 and Constant Altitude Plan Position Indicator data (CAPPI data) measured by Ponte Nova Radar (SP) for the period December 1993 to February 1994. The adaptation of the CST was performed using the data for January-February 1994. The modification of the CST involved the following procedures: conversion of the radiance measured by satellite into temperature; calculation of the threshold temperature of rain and no rain occurrence; and definition of the discrimination equation for cirrus and thunderstorm. Hourly and daily precipitations were estimated for December 1993. Daily estimations present better results. For hourly estimations, the correlation coefficient between radar data and the estimated precipitation is 11%, the RMSE is 350% and the Bias is 55%. For daily estimations, the correlation coefficient between radar data and the estimated precipitation is 25%, the RMSE is 143% and the Bias is 58%. The t-student test for paired observations showed that the mean precipitation rate of radar and estimated precipitation are significantly different. The sensitivity analysis for the temperature showed that the RMSE is constant for the band of 225 to 240 K, and that the Bias is more sensitive to variations in temperature.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xxv
 <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	 1
1.1 - Motivação e Justificativa.....	2
1.2 - Objetivos.....	3
 <u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	 5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Técnicas manuais.....	7
2.3 - Técnicas interativas.....	9
2.4 - Técnicas automáticas.....	11
2.4.1 - Técnicas monoespectrais.....	12
2.4.2 - Técnicas biespectrais.....	14
2.4.3 - Técnicas climatológicas.....	17
2.4.4 - Técnica padrão de reconhecimento - para curto período de tempo.....	18
2.5 - Técnicas utilizadas no Brasil.....	25
 <u>CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA</u>	 29
3.1 - Introdução.....	29
3.2 - Área de estudo.....	29
3.3 - Tabela de conversão de nível de cinza para tem- peratura.....	32
3.4 - Aquisição de dados.....	33

	<u>Pág.</u>
3.4.1 - Satélite METEOSAT-3.....	33
3.4.2 - Radar Meteorológico de Ponte Nova.....	34
3.5 - Seleção de imagens METEOSAT-3 e dados CAPPI do radar de Ponte Nova.....	37
3.6 - Modificação das coordenadas dos dados de dados de radar para as coordenadas de satélite.....	39
3.6.1 - Transformação dos dados de radar de coordena- das cartesianas para coordenadas mercator.....	40
3.6.2 - Transformação dos dados de radar de coordena- da mercator para coordenadas de satélite.....	42
3.7 - Sobreposição dos dados.....	43
3.8 - Determinação dos pixels associados à nuvens con- vectivas e cirrus.....	45
3.9 - Obtenção da relação empírica discriminante entre nuvens cirrus e núcleos convectivos.....	46
3.10 - Adaptação da CST.....	48
3.11 - Avaliação dos Resultados.....	48
3.12 - Teste t-Student para pares emparelhados.....	50
3.13 - Teste de sensibilidade.....	51
 <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	 53
4.1 - Introdução.....	53
4.2 - Sobreposição dos dados de radar e satélite.....	53
4.3 - Definição da equação discriminante.....	56
4.4 - Resultados das estimativas de precipitação sobre a região de São Paulo.....	58
4.4.1 - Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE).	61
4.4.2 - Correlação.....	63
4.4.3 - Tendência.....	69
4.4.4 - Teste t-Student da diferença entre as médias emparelhadas.....	71

	<u>Pág.</u>
4.4.5 - Média dos dados de radar.....	76
4.4.6 - Efeito de distância.....	78
4.4.6 - Teste de sensibilidade.....	81
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE A.....	97
APÊNDICE B.....	103

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Vizinhança (x) de um pixel k (.).....	20
2.2 - Discriminação de tempestades (T) e cirrus fino (C) no plano temperatura-inclinação.....	21
2.3 - Discriminação empírica entre nuvens convectivas e cirrus.....	25
3.1 - Fluxograma da implementação da CST no INPE.....	30
3.2 - Área de abrangência do Radar de Ponte Nova.....	31
4.1 - Resultado do programa RADSAT para o dia 10/02/94 às 20:00HL.....	54
4.2 - Gráfico da distribuição da temperatura limiares encontradas nas imagens analisadas.....	55
4.3 - Discriminação espacial dos pontos utilizados no cálculo da equação discriminante.....	57
4.4 - (a) Imagem de satélite do dia 19/12/93 às 18:30 HL e correspondentes estimativas de precipitação obtidas pelo satélite e técnicas CST, CST ₂₂₅ e CST ₂₂₉	59
4.4 - (b) ídem a (a), para a imagem adquirida em 28/12/93 às 19:30 HL.....	60
4.5 - Comparação do RMSE das três técnicas CST, CST ₂₂₅ e CST ₂₂₉	61
4.6 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST.....	64
4.7 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST ₂₂₅	64
4.8 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST ₂₂₉	65

4.9 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST e CST ₂₂₅	66
4.10 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST e CST ₂₂₉ .	66
4.11 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST ₂₂₅ e CST ₂₂₉	67
4.12 - Valores de Tendência obtidas para as técnicas CST, CST ₂₂₅ e CST ₂₂₉	70
4.13 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST.....	72
4.14 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST ₂₂₅	72
4.15 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST ₂₂₉	73
4.16 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas CST x CST ₂₂₅	74
4.17 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST ₂₂₉	74
4.18 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	75
4.19 - Variação dos valores de RMSE para temperaturas no intervalo de 210 a 240 K.....	82
4.20 - Variação dos valores da Tendência para temperaturas no intervalo de 210 a 240 K.....	82

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Características das principais técnicas utilizadas para estimar precipitação por satélite.....	6
3.1 - Características do Radar Meteorológico de Ponte Nova.....	35
3.2 - Datas e horários das imagens utilizadas para determinar a temperatura limiar.....	38
3.3 - Datas e horários das imagens utilizadas para determinar a equação discriminante.....	39
3.4 - Datas e horários das imagens utilizadas para testar a CST.....	39
4.1 - Equações discriminantes encontradas nos estudos desenvolvidos em São Paulo, Florida e Japão....	57
4.2 - Números das imagens utilizadas no trabalho.....	62
4.3 - Valores de RMSE obtidos para as estimativas de radar e das técnicas.....	63
4.4 - Médias das correlações horárias das estimativas de radar e das técnicas.....	68
4.5 - Correlações diárias das estimativas de radar e das técnicas.....	68
4.6 - Valores de Tendência obtidos entre as estimativas de radar e das técnicas.....	71
4.7 - Valores t de Student para os pares de dados de radar, CST, CST225 e CST229.....	76
4.8 - Média de precipitação do radar.....	77
4.9 - Relações horárias de RMSE/Média e Bias/Média....	77
4.10 - Relações diárias de RMSE/Média e Bias/Média....	78
4.11 - Medidas estatísticas horárias da comparação entre as estimativas de radar e CST ₂₂₉	79
4.12 - Medidas estatísticas diárias da comparação entre as estimativas de radar e CST ₂₂₉	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

a	- altura de nuvem (Km), constante de calibração ($W \text{ m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{count}^{-1}$), semieixo maior do elipsóide (m), constante empírica
A	- Área coberta pelos tipos de nuvens precipitantes (cumulonimbus, cumulocongestus e nimbostratus), m
A_C	- Área da nuvem medida de imagens IV ou VIS, Km^2
A_m	- Área máxima da nuvem, km^2
A_r	- Área de precipitação convectiva (Km^2), área de precipitação delimitada pelo radar (Km^2)
A_s	- Área de precipitação delimitada pelo satélite
c	- Área da nuvem, count
c_o	- Valor do nível de cinza calibrado com o corpo negro (space count)
dA_C/dt	- Mudança de área da nuvem no intervalo de tempo dt
D	- Diferença entre as médias multivariadas dos grupos A e B
$e(i,j)$	- Vetor da diferença entre o vetor imagem e o vetor de radar
est σ_{Md}	- Variância estimada
$E(*)$	- Esperança matemática
f	- Período fracional de precipitação (h), frequência mensal relacionada com a refletividade da cobertura de nuvem em um ponto, função de alta ordem que relaciona A_m e A_C , erro percentual
f_i	- frequência da classe de nuvem na modalidade i

F_c	- Fração de cobertura de nuvens mais frias que 235 K em uma área de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$
i	- tipo de nuvem
K	- constante empírica
m	- Médias aritméticas
N_n	- Número de pontos corretamente classificados com não precipitação
N_r	- Número de pontos incorretamente classifica-
P	- Estimativa da precipitação total, mm
PDD	- Probabilidade de detecção dos com não precipitação
$P_R(IV,VIS)$	- Probabilidade de distribuição de chuva em função de valores IV e VIS
r	- variável função da temperatura, K
R	- Taxa de precipitação(mm/h ou mm/dia ou mm/ano), função da área do eco do radar, radiância ($W\ m^{-2}sr^{-1}$)
R_n	- Número de pontos incorretamente classifica-
R_r	- Número de pontos corretamente classificados com precipitação
R_v	- Volume de precipitação, mm^3
RAF	- Razão de alarme falso
$R_{NR}(IV,VIS)$	- Número total de pontos em cada intervalo (IV,VIS)
$R_R(IV,VIS)$	- Número de ocorrência de chuva com magnitudes (IV,VIS) associado
s_p^2	- Variância e covariância conjunta das m variáveis
S	- Parâmetro de inclinação
t	- Período médio de tempo
T	- Temperatura, K
$u(i,j)$	- Vetor imagem
$v(i,j)$	- Vetor radar
x	- Pontos paralelos ao Equador em coordenadas cartesianas

y	- Pontos paralelos ao meridiano central em coordenadas cartesianas
Y_{i1}, Y_{i2}	- Valor do par i no grupo 1 ou 2
Z	- Fator de refletividade do radar, mm^6/m^3
w_k	- Número de pixels na imagem IV com temperatura modal

Gregos

λ	- Coeficiente da função discriminante
θ	- Latitude
ϕ	- Longitude

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABLE	- Amazon Boundary Layer Experiment
ATI	- Area-Time-Integral
CAPPI	- Constant Altitude Plan Position Indicator
CST	- Convective Stratiform Technique
CTH	- Centro Tecnológico de Hidráulica
FACE	- Florida Area Cumulus Experiment
FAG	- Fine Adjustment of Gain
GARP	- Global Atmospheric Research Program
GATE	- GARP Atlantic Tropical Experiment
GMS	- Geostationary Meteorological Satellite
GOES	- Geostationary Meteorological Environmental Satellite
GMT	- Greenwich Meridian Time
GPI	- GOES Precipitation Index
GWT	- Griffith Woodley Technique
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	- Infravermelho
IRT	- Infrared Regression Technique
HL	- Horário Local
METEOSAT	- Meteorological Satellite
MIEC	- Meteorological Information Extraction Centre
MO	- Microondas
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NAW	- Negri Adler Wetzel Technique
NESDIS	- NOAA Satellite Data and Information Service
NESS	- National Environmental Satellite Service
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
PIXEL	- Elemento de imagem
RMSE	- Root Mean Square Error
SSM/I	- Special Sensor Microwave/Imager
SMS	- Synchronous Meteorological Satellite

VA	- Vapor de água
VIS	- Visível

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importante nos trópicos. Entretanto, devido a grande variabilidade espacial e temporal desta variável, torna-se difícil quantificar a sua distribuição.

Tradicionalmente, são utilizados dois métodos fundamentais para medir a precipitação: os medidores pontuais (pluviômetros e pluviógrafos); e, os radares meteorológicos. O Brasil, país de grande dimensão continental, possui uma rede insuficiente de pluviômetros/pluviógrafos e um número reduzido de radares. Além disso, em algumas regiões, como a Amazônia, torna-se difícil manter uma rede de observações devido às dificuldades operacionais.

Uma possível solução para este problema consiste na utilização da informação de sensoriamento remoto por satélite. Desde o advento dos satélites meteorológicos, uma grande variedade de técnicas de estimativa indireta de precipitação foi desenvolvida. As primeiras técnicas utilizaram dados do canal infravermelho termal (IV) e/ou visível (VIS), que contém informações sobre a distribuição espacial e temporal da temperatura de brilho do topo das nuvens e o brilho das mesmas, respectivamente, para inferir de forma indireta a distribuição e a intensidade da precipitação. Outra opção consiste na utilização de dados na faixa espectral de microondas. Embora vários trabalhos tenham indicado o potencial de microondas em estimativa de precipitação, a utilização efetiva dos mesmos encontra-se ainda em fase incipiente (Kidd e Barrett, 1990; Gairola e Krishnamurti, 1992).

A técnica CST (Convective Stratiform Technique), desenvolvida por pesquisadores da NASA (National Aeronautics and Space Administration) tem sido amplamente utilizada em diversos estudos regionais de estimativa de precipitação (Adler e Negri, 1988; Martin et al.; 1990; Negri e Adler, 1993). Esta técnica utiliza imagens do canal infravermelho termal com frequência temporal de sessenta. Devido as suas características, a CST é ideal para ser aplicada em regiões onde o regime de precipitação é dominado por sistemas convectivos.

Com a finalidade de dispor de uma metodologia alternativa para estimar precipitação de precipitação de origem convectiva no Brasil, este trabalho optou pela adaptação da técnica CST.

1.1 - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As estimativas de precipitação em tempo quase real, pode beneficiar diretamente diversos setores produtivos da sociedade, tais como a agricultura, hidrologia e meios de transporte. Além disso, estas informações serão de grande valia para orientar a defesa civil em casos de ocorrência de chuvas intensas, principalmente nos grandes centros urbanos.

A técnica CST foi desenvolvida originalmente para algumas condições climáticas do Hemisfério Norte, caracterizadas por clima temperado e subtropical. Assim, justifica-se adaptar a CST para uma região que apresenta características geográficas e climáticas peculiares como é o caso de São Paulo.

1.2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral adaptar a técnica CST para estimar precipitação no estado de São Paulo. Esta adaptação envolve: 1) determinação da temperatura limiar de nuvens convectivas para a região de São Paulo, através do uso de imagens do satélite meteorológico e dados de radar meteorológico; 2) identificação da função discriminante entre os topos de nuvens cirrus e núcleos convectivos; 3) desenvolvimento de algoritmo para converter nível de cinza em temperatura, usando a documentação do satélite METEOSAT-3; e, 4) calibração e comparação dos resultados obtidos com dados de radar.

A apresentação deste trabalho está organizada em capítulos. O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica, que consta das principais técnicas para estimativa de precipitação. O capítulo 3 descreve a metodologia de adaptação da CST para o estado de São Paulo, e apresenta os dados que foram utilizados neste trabalho. O capítulo 4 apresenta os resultados da comparação entre a CST adaptada e os da CST não adaptada e entre a CST adaptada e os dados de radar meteorológico. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e as recomendações para continuidade deste estudo e abertura de novas oportunidades.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Desde a década de 60, quando as primeiras imagens de satélites meteorológicos tornaram-se disponíveis, diversas técnicas de estimativa de precipitação utilizando dados de satélite foram desenvolvidas. A Tabela 2.1 apresenta informações referentes às principais técnicas desenvolvidas. Inclui também informações sobre os satélites e os sensores utilizados, o estado atual de operação e algumas técnicas já testadas.

Como pode-se observar na Tabela 2.1, as técnicas operacionais utilizam dados de sensoriamento remoto nas faixas espectrais do IV e VIS. As técnicas de estimativa de precipitação que utilizam dados de sensores de microondas passivo ainda estão em estágio de desenvolvimento, enquanto que dados de sensores de microondas ativo (radares) só estarão disponíveis em um futuro próximo.

A seguir apresenta-se com mais detalhes as técnicas propostas para a estimativa de precipitação. Como nem todas as técnicas se enquadram nos tipos descritos na Tabela 2.1, adotou-se então a classificação proposta por D'Souza et al. (1990), que divide as técnicas em manuais, interativas e automáticas. Quando uma determinada técnica se enquadra em um dos tipos listados na Tabela 2.1, ela é apresentada como um sub-item dentro de cada classe.

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA ESTIMAR PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE

TIPOS (ESTADO ATUAL)	PRINCIPAIS APLICAÇÕES	SATÉLITES	SENSOR	CARACTERÍSTICA
Indexação (operação)	Meteorologia, climatologia, estimativa de precipitação, monitoramento de catástrofe	polar ou geoesta- cionário	VIS IV	A precipitação depende do tipo de nuvem e in- depende do tem- po.
Evolução Temporal (operação)	Pesquisa me- teorológica, avaliação de precipitação severa	geoesta- cionário	IV ou VIS	Depende do tem- po, ou seja, baseiam-se no ciclo de vida das nuvens.
Bi-espec- trais (operação)	Pesquisa me- teorológica, previsão de tempo	polar ou geoesta- cionário	VIS e IV	As informações conjuntas dos sensores IV e VIS podem se completar, au- xiliando a de- tecção de áreas com precipita- ção.
Climato- lógica (operação)	Estimativas de safra e mapeamento da precipitação em larga esca- la	polar ou geoesta- cionário	VIS e/ou IV	A precipitação é calculada pa- ra grandes pe- ríodos e áreas.
Microonda Passivo (desenvol- vimento)	Climatologia e meteorolo- gia marítima	polar	MO	Determinação da área exata da precipitação devido à trans- parência das nuvens não pre- cipitantes
Microonda Ativo (futuro)	Pesquisa de previsão de nuvens e pre- cipitação	polar ou geoesta- cionário (?)	satéli- te ra- dar (MO (a- tiva)	-

FONTE: Modificada de D'Souza et al. (1990), p.382.

2.2 - TÉCNICAS MANUAIS

As técnicas manuais foram desenvolvidas quando se dispunha apenas de imagens em forma de papel fotográfico, visavam estimar precipitação para períodos superiores a seis horas. Estas técnicas exigem que os dados sejam interpretados por um especialista experiente.

a) Técnicas de Indexação

1) Técnica de Bristol

A técnica de Bristol, descrita em Barrett e Martin (1981), foi desenvolvida na tentativa de utilizar dados de satélite para homogeneizar o mapeamento da precipitação no período de um mês na área do experimento "Tropical Far East" (Barrett, 1970, 1971). Esta técnica admite que a precipitação acumulada em um período (R), é expressa em função da área da nuvem (c), do seu tipo (I) e da sua altitude (A), isto é:

$$R = f(c, I, A). \quad (2.1)$$

2) Técnica do NESS

Esta técnica foi desenvolvida pelos pesquisadores do NESS (National Environmental Satellite Service) da NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), atualmente denominado NESDIS (NOAA Environmental Satellite Data and Information Service). A estimativa de precipitação pela técnica NESS baseia-se em imagens obtidas por satélites de órbita polar NOAA, adquiridas no período da tarde. Para cada período de vinte e quatro horas, a precipitação média sobre uma ampla área de estudo (R) é calculada pela equação de Follansbee (1973), dada por:

$$R = (K_1 A_1 + K_2 A_2 + K_3 A_3) / A_0, \quad (2.2)$$

onde A_0 é a área do local de estudo; A_1 , A_2 e A_3 referem-se, respectivamente, às áreas cobertas pelos três tipos mais importantes de nuvens precipitantes (cumulonimbus, cumulocongestus e nimbostratus) presentes na área de estudo; e K_1 , K_2 e K_3 são os respectivos coeficientes empíricos de A_1 , A_2 e A_3 , obtidos a partir de dados fornecidos por medidores de precipitação localizados na área de estudo.

Para aplicações extratropicais, Follansbee (1976) propôs uma relação entre a precipitação média climatológica e as contribuições a longo prazo fornecidas pelos sistemas sinóticos. A relação empírica fornece uma estimativa da precipitação total em meio dia ($P_{1/2}$), para cada ponto da região em estudo, e é expressa na forma:

$$P_{1/2} = 0,09 f_{1/2} E(P_{30}), \quad (2.3)$$

onde $f_{1/2}$ é o período fracional de precipitação (no caso meio-dia); e $E(P_{30})$ é a precipitação climática média esperada no período de 30 dias.

3) Técnica de Kilonsky e Ramage

Kilonsky e Ramage (1976) propuseram uma técnica monoespectral para fornecer a previsão mensal de precipitação sobre os oceanos tropicais. A técnica baseia-se na alta correlação encontrada entre o número de dias com cobertura de nuvens de alta refletividade, e a precipitação total mensal. A precipitação mensal (R) é dada pela seguinte equação:

$$R = a_0 + a_1 f, \quad (2.4)$$

onde f é a frequência mensal relacionada com a refletividade da cobertura de nuvem em um ponto; e a_0 e a_1 são constantes.

b) Técnica de Evolução Temporal

1) Técnica de Stout et al.

A técnica de Stout et al. (1979) estima a precipitação diária de nuvens cumulonimbus ou agrupamento de nuvens cumulonimbus. O volume de precipitação, R_V , é estimado pela equação:

$$R_V = a_0 A_C + a_1 dA_C/dt, \quad (2.5)$$

onde R_V é o volume de precipitação; A_C é a área da nuvem medida a partir de imagens IV ou VIS; dA_C/dt é a mudança de área da nuvem no intervalo de tempo dt (tipicamente igual a 30 min); e a_0 e a_1 são coeficientes empíricos.

A vantagem desta técnica em relação às já apresentadas é sua simplicidade conceitual, já que necessita apenas de medidas simples, como a área e a localização da nuvem cumulonimbus.

2.3 - TÉCNICAS INTERATIVAS

As técnicas interativas combinam a capacidade de interpretação humana com as facilidades computacionais. Entretanto, procedimentos de interpretação interativos exigem tempo e os resultados obtidos por diferentes analistas variam consideravelmente. As técnicas mais comumente utilizadas são:

a) Técnica de Evolução Temporal

1) Técnica de Scofield e Oliver

Scofield e Oliver (1977) desenvolveram uma técnica para estimar a precipitação de origem convectiva utilizando uma sequência de imagens IV. Essa técnica pressupõe que a precipitação têm maior chance de ocorrer quando a nuvem apresenta maior brilho (na imagem VIS) ou, equivalentemente, menor temperatura (na imagem IV). Scofield e Oliver observaram, também, que as chuvas fortes podem ocorrer devido a baixa temperatura de topo da nuvem, crescimento e agrupamento de nuvens, enquanto que as chuvas fracas em geral resultam de nuvens quentes e menores. A chuva concentra-se na parte da nuvem onde ocorre o aumento do cisalhamento de uma bigorna. Inicialmente, a técnica proposta por Scofield e Oliver (1977) era manual. Vários melhoramentos, incluindo a automação parcial no sistema interativo de análise das imagens, foram efetuados para tornar a técnica interativa. Na atual configuração interativa, a estimativa de precipitação convectiva é obtida a partir de uma árvore de decisões que inclui vários fatores, tais como: a forma da nuvem, sua taxa de mudança, seu ciclo de vida, a umidade atmosférica, se é convectiva ou não, se o topo é frio ou quente, se existem topos protuberantes ("overshooting tops") ou não e se resulta de uma combinação de cumulonimbus ou combinação de linhas convectivas (Scofield, 1987).

b) Técnica Bi-espectral

1) Técnica de Martin e Howland

A técnica "grid history" de Martin e Howland (1982, 1986) foi desenvolvida para estimar a precipitação diária de tempestades em grandes escalas sinóticas nos trópicos e estações quentes em latitudes médias. Esta técnica se fundamenta nas seguintes hipóteses: a) as informações das imagens VIS complementam as informações das imagens IV; b) a chuva é um evento raro em vários locais; c) os dados de satélite são redundantes, ou seja, os sistemas precipitantes são muito maiores que o pixel nas imagens IV ou VIS; d) o brilho é a fonte primária de informações sobre a precipitação; e, e) as sequências de imagens VIS e IV contêm informação suficiente para distinguir entre três classes de taxa de precipitação (forte, média e fraca).

Desta forma, a precipitação (R) é calculada por:

$$R = \sum_{i=0}^3 a_i f_i, \quad (2.6)$$

onde f_i é a frequência da classe de chuva na modalidade i ($i = 1$ (forte), 2 (média) e 3 (fraca)) e os a_i são os coeficientes dos f_i , supondo $f_0 = 1$.

2.4 - TÉCNICAS AUTOMÁTICAS

As técnicas automáticas fornecem estimativas de precipitação diretamente, não exigindo a manipulação dos dados por parte de analistas. Isto significa que todos os dados são inseridos no sistema computacional pelo usuário. Estas técnicas foram desenvolvidas para estimar a

precipitação em menor período de tempo (tempo quase real), e para maior período de tempo (10 dias a um mês). As técnicas automáticas são sub-divididas em monoespectral, biespectral, climatológica e padrão de reconhecimento. A seguir são descritas as principais técnicas dentro de cada sub-divisão.

2.4.1- TÉCNICAS MONOESPECTRAIS

a) Técnica de Evolução Temporal

1) Técnica de GWT

A técnica de Griffith e Woodley (Griffith et al., 1978; Woodley et al., 1980), conhecida como GWT, foi desenvolvida para estimar a precipitação convectiva, podendo utilizar tanto imagens VIS quanto imagens IV. A técnica original baseou-se na relação empírica entre a evolução temporal da área do topo da nuvem (determinada por satélite) e os dados de precipitação (adquiridos por medidores e radar sobre Flórida e área costeira, assim como sobre o Oceano Atlântico obtidos para o programa GARP (Global Atmospheric Research Program) no experimento GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment)). A precipitação volumétrica total para cada segmento individual de nuvem (cuja temperatura é de -20°C) é estimada a partir de uma função empírica da área e da variação da área dos segmentos de nuvens durante todo o seu tempo de vida.

A área da nuvem cumulonimbus está associada a área do eco do radar, através de uma relação que varia de acordo com o desenvolvimento da nuvem. A partir de uma sequência de medidas da área da nuvem, estima-se a taxa de precipitação (R_V) através da relação:

$$R_V = R f(A_C, A_m), \quad (2.7)$$

onde R é função da evolução da área do eco (se está decaindo ou crescendo); f é uma função que relaciona A_m e A_c ; A_m é a área máxima da nuvem (em Km^2); e, A_c é a área da nuvem cumulonimbus (em Km^2).

2) Técnica de NAW

Negri et al. (1984) identificaram as variáveis dominantes no cálculo da estimativa de precipitação pela técnica proposta por Griffith e Woodley (GWT) e sugeriram simplificações para tornar as estimativas independentes da evolução temporal da nuvem.

Após o estudo dos algoritmos do GWT concluiu-se que estes cálculos são desnecessariamente complicados para a estimativa diária de chuva.

Os resultados da técnica simplificada foram comparados aos da GWT e aos dados de medidores convencionais. Constatou-se que as estimativas de precipitação obtidas a partir da equação simplificada foram mais próximas dos valores fornecidos pelos medidores do que das estimativas obtidas pela GWT. Além disso, constatou-se uma tendência, em ambas as técnicas, em subestimar a chuva no seu início e superestimá-la mais tarde.

O algoritmo NAW foi modificado para ser aplicado aos dados da primeira intercomparação entre algoritmos de estimativa de precipitação levantadas durante o período de junho a agosto de 1989 sobre Japão e circunvizinhanças (Negri e Adler, 1993). As modificações consistiram de:

- diminuição do limiar de temperatura de 253 K para 235 K para melhor corresponder às regiões de espalhamento encontradas nos dados do SSM/I (Special

Sensor Microwave/Imager) a 86 GHz, e

- o estabelecimento de uma discriminação empírica entre as nuvens com precipitação e sem precipitação.

3) Técnica ATI

Esta técnica, denominada ATI (Area-Time-Integral), foi desenvolvida por Doneaud et al.(1987) e utiliza dados de radar e imagens IV para determinar o comportamento da precipitação. Esta técnica se fundamenta na forte correlação entre a cobertura do eco do radar (integrada ao longo do ciclo de vida da tempestade) e a estimativa do volume total de precipitação fornecida pelo radar. O volume de precipitação, estimado a partir dos dados do satélite, é obtido através de duas retas de regressão. Uma delas determina a porção chuvosa da área da nuvem, enquanto a outra fornece uma estimativa do volume total de precipitação. Estas regressões foram geradas para regiões específicas, relacionando-se os valores de ATI a volumes de precipitação e a temperatura média no canal infravermelho com a temperatura do ATI. Embora se utilize imagens adquiridas a cada meia hora, a estimativa do volume total de precipitação de uma nuvem refere-se ao seu ciclo completo de vida.

2.4.2 - TÉCNICAS BIESPECTRAIS

a) Técnica de Bellon et al.

Bellon et al. (1980) utilizaram o algoritmo de Lovejoy e Austin (1979a) para desenvolver um procedimento totalmente automático para delimitar áreas de chuva, de todos os tipos de precipitação. A aplicação do algoritmo para estimar a quantidade de precipitação é discutida em Lovejoy e Austin (1979b). Este algoritmo foi

implementado e utilizado operacionalmente em tempo real para a estimativa de precipitação no Canadá durante o verão de 1981.

O algoritmo básico envolve duas distribuições bivariadas de frequência obtidas a partir de imagens VIS e IV e de dados simultâneos de radar, para discriminar nuvens de chuva das de não chuva.

Os dados digitais das imagens VIS e IV, e os correspondentes dados de radar constituem a base de dados. O radar permite a identificação de pontos de chuva (R_R) e de não chuva (R_{NR}). Para cada R_R , os correspondentes dados no visível (VIS_R) e no infravermelho (IV_R) são localizados. O conjunto (IV_R, VIS_R) forma os subscritos de uma matriz, na qual todos os pontos R_R são acumulados. Da mesma forma, o par (IV_{NR}, VIS_{NR}) fornece as coordenadas da matriz não chuva para todos os pontos não chuva, R_{NR} . Esses dois conjuntos de distribuição bivariada de frequência no espaço IV-VIS são então combinados para fornecer a probabilidade de distribuição de chuva (P_R) em função de valores IV e VIS, na forma:

$$P_R(IV, VIS) = R_R(IV, VIS) / (R_R(IV, VIS) + R_{NR}(IV, VIS)), \quad (2.8)$$

onde $R_R(IV, VIS)$ é o número de ocorrências de chuva associada à (IV, VIS); e o denominador representa o número total de pontos associados à (IV, VIS).

b) Técnica de Tsonis

Tsonis (1984) desenvolveu uma técnica baseada nas características espectrais e espaciais das imagens IV e VIS. Esta técnica utiliza dois procedimentos fundamentais: a segmentação e a classificação. A segmentação é a compartimentação da imagem em vários

conjuntos espacialmente contínuos. Uma vez determinados esses conjuntos na imagem, a eles são designados rótulos específicos (classificação). No caso do sensoriamento remoto, a classificação é baseada nos valores espectrais.

Tsonis utilizou uma distribuição de frequência bivariada em conjunto com as características espaciais da imagem para diferenciar as várias classes presentes na imagem de satélite. Concluiu que o número de picos na distribuição da frequência é uma indicação do número de classes que apresentam características espectrais diferentes. Cada pico é associado a uma dentre três principais classes: 1) céu claro/sem cobertura de neve; 2) céu claro/com cobertura de neve, baixas e altas nuvens; e, 3) céu encoberto.

c) Técnica de Tsonis e Isaac

Tsonis e Isaac (1985) desenvolveram uma técnica de delimitação de áreas de precipitação instantânea (em latitudes médias) a partir de dados de imagens IV e VIS, que não exige a coexistência de dados de radar. Esta técnica emprega análise de agrupamento ("cluster analysis") para localizar pontos de máxima (picos) nas imagens IV e VIS, que correspondem a nuvens precipitantes. Estes pontos tendem a se agrupar em regiões bem definidas permitindo, assim, discriminar diferentes classes como, por exemplo, céu claro e nuvens não precipitantes.

Estes autores concluíram que durante o dia, a imagem VIS contém mais informação sobre precipitação do que a imagem IV em média latitude. Entretanto, em alguns pontos, os dados obtidos das imagens IV são úteis na discriminação de nuvens precipitantes das não precipitantes, desde que não apresentem respostas semelhantes no canal VIS. A imagem IV aparentemente contém mais informação que a imagem VIS apenas quando ocorre forte

convecção. A técnica é satisfatória na delimitação da área de precipitação instantânea nos casos convectivos, sugerindo que a mesma pode ser adequada para aplicações nos trópicos.

d) Técnica de Tsonis

Tsonis (1987) utilizou parâmetros texturais para identificar se áreas de precipitação eram núcleos convectivos. Após identificação, as áreas de precipitação foram separadas em duas classes de intensidade: pouco-moderada ou moderada-elevada.

2.4.3 - TÉCNICAS CLIMATOLÓGICAS

As técnicas climatológicas estimam a precipitação para longos períodos de tempo e menor resolução espacial. Algumas destas técnicas estão descritas a seguir.

a) Técnica de Arkin

A comparação entre precipitação acumulada para períodos de seis horas sobre a área do experimento GATE (fornecida por um grupo de radares de banda-C), e a cobertura fracional de nuvem acima de determinados limiares de temperatura (fornecida pelo sensor IV do satélite Synchronous Meteorological Satellite 1 (SMS)), mostrou a existência de correlações relativamente altas numa faixa limitada de temperatura e altitude. As maiores correlações foram obtidas para uma altitude de 10 Km e uma temperatura de 235 K (Arkin, 1979). As médias de três anos de precipitação estimadas para o período de dezembro de 1981 a novembro de 1984, foram agrupadas de três em três meses de acordo com as estações do ano e comparadas com os campos de precipitação a longo prazo.

b) Técnica GPI

A técnica de Arkin e Meisner (1987) utiliza um único limiar (IV) e estima a precipitação mensal convectiva. Esta técnica é conhecida por GPI (GOES Precipitation Index). O GPI é calculado através de:

$$\text{GPI} = 3 F_c t, \quad (2.9)$$

onde F_c é a fração de cobertura de nuvens mais frias que 235 K em uma área de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$; e, t é o período médio de tempo.

2.4.4 - TÉCNICA PADRÃO DE RECONHECIMENTO - PARA CURTO PERÍODO DE TEMPO

Este conjunto de técnicas utiliza algoritmos de padrão de reconhecimento em uma imagem IV ou VIS ou um par de imagens VIS e IV. Estes algoritmos possuem testes para identificar a existência de características na imagem que devem ser ressaltadas ou eliminadas.

Dentre as técnicas existentes, a técnica CST (Convective Stratiform Technique) foi selecionada neste trabalho para ser adaptada à região Sudeste por ser sua aplicação adequada para regiões tropicais pois o regime de precipitação é dominado por nuvens convectivas. Um maior detalhamento da técnica é apresentado abaixo.

1) Técnica CST

A técnica CST (Convective Stratiform Technique), proposta por Adler e Negri (1988), estima a precipitação convectiva e estratiforme a partir de imagens IV de satélite.

Inicialmente, a técnica elimina as nuvens cirrus e localiza os núcleos convectivos nas imagens. Na imagem IV com resolução plena localizam-se todos os pontos com temperatura inferior a 253 K . Estes pontos são fortes indicadores da presença de atividade convectiva devido a temperatura estar relativamente baixa. Em um estudo com dados IR do GOES para um curto intervalo de tempo (5 minutos), Negri e Adler (1981) descobriram que os núcleos convectivos definidos por esta temperatura coincidiam com os encontrados pelo radar para a maioria dos casos estudados.

Para eliminação das nuvens cirrus, que são finas e não precipitantes, Adler e Negri (1988) sugeriram o uso do parâmetro de inclinação (S_k), que é calculado para cada pixel com temperatura inferior a 253 K, de acordo com a seguinte expressão:

$$S_k = \bar{T}_k - T_{lim(k)}, \quad (2.10)$$

onde:

$$\bar{T}_k = \frac{\sum_{i \in N_{Tlim(k)}} T_i}{N_{Tlim(k)}},$$

$T_{lim(k)}$ refere-se a temperatura do k-ésimo pixel com temperatura inferior a 253 K e $N_{Tlim(k)}$ representa a vizinhança ao redor do k-ésimo pixel com temperatura inferior a 253 K. Esta vizinhança é ilustrada na Figura 2.1, para um determinado pixel (.).

A partir da utilização de dados de radar digital e imagem do canal visível, Adler e Negri (1988) definiram um plano temperatura/inclinação para a Flórida, que permitiu discriminar empiricamente as nuvens cirrus dos núcleos convectivos ativos, segundo procedimento descrito por Panofsky e Brier (1968). Este plano é ilustrado na Figura 2.2.

		x		
x	x	.	x	x
		x		

Fig. 2.1 - Vizinhaça (x) de um pixel k (.)
($N_{Tlim}(k)$).

Os pontos à esquerda da reta discriminante (função discriminante) estão associados à centros convectivos (T), enquanto aqueles à direita são classificados como nuvens cirrus (C).

A equação discriminante para os dados apresentados na Figura 2.2, S_{eq} , é dada por:

$$S_{eq}(k) = 0,568 (T_{lim}(k) - 220). \quad (2.11)$$

Em seguida, a técnica CST realiza um teste que compara S_k (Equação 2.10) e $S_{eq}(k)$ (Equação 2.11). Se S_k for menor que $S_{eq}(k)$, o pixel k está associado a nuvem cirrus, caso contrário à núcleo convectivo.

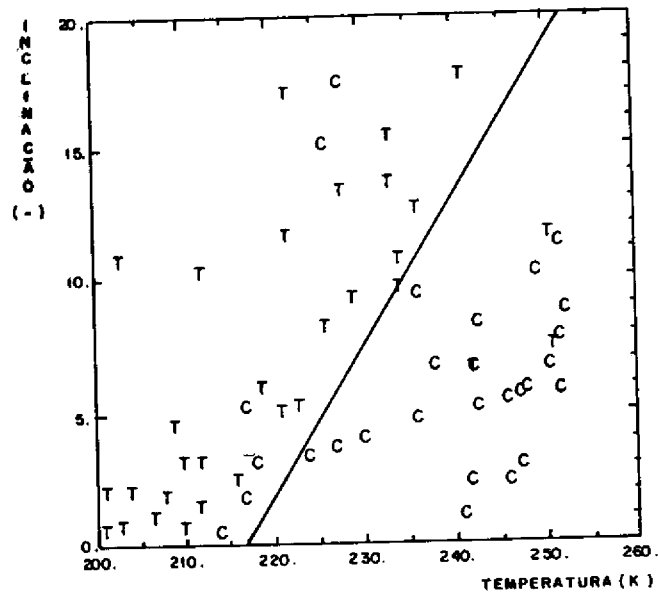


Fig. 2.2 - Discriminação de tempestades (T) e cirrus fino (C) no plano temperatura-inclinação.
FONTE: Adler e Negri (1988). p. 32.

Após a eliminação das nuvens cirrus e determinação dos centros convectivos, calcula-se a taxa e a área de precipitação através das equações do modelo unidimensional de nuvem proposto por Adler e Mack (1984). A taxa de precipitação média, $R_{\text{mean}}(k)$, e a área de precipitação convectiva, $A_r(k)$, associados ao pixel k , são calculadas em função da altura máxima da nuvem (ou temperatura limite corrigida $T_c(k)$). A $R_{\text{mean}}(k)$ é dada por:

$$R_{\text{mean}}(k) = 74,89 - 0,266 T_C(k), \quad (2.12)$$

onde $T_C(k)$ é obtida a partir da correção linear empírica de $T_{\text{lim}}(k)$ baseada na comparação de dados de imagens IV dos satélites GOES e TIROS-N AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) - (Negri, 1982). Esta correção é dada pela equação:

$$T_C(k) = 0,717 T_{\text{lim}}(k) + 56,6. \quad (2.13)$$

A área de precipitação convectiva, $A_R(k)$, é calculada por:

$$A_R(k) = \exp(15,27 - 0,0465 T_C(k)). \quad (2.14)$$

A precipitação estratiforme é calculada na ocorrência de grandes cirrus no local em estudo. A região estratiforme da bigorna é identificada através de um limiar de temperatura, $T_S(k)$. Desde que este limiar coincida com a porção relativamente fina das bigornas maduras, a temperatura modal ($T_{\text{mode}}(k)$) é indicada como a temperatura da circunvizinhança da bigorna, ou seja, a temperatura próxima à tropopausa. A $T_{\text{mode}}(k)$ é calculada para cada pixel com temperatura inferior a 253 K, cuja inclinação é menor ou igual a 4 e tenha passado no teste para eliminação de cirrus. Este valor foi determinado empiricamente. A maioria dos T_{lim} selecionados por este critério refere-se à tempestades maduras embutidas em cirrus extensos. Já inclinações maiores que 4 são observadas quando as tempestades são jovens.

A temperatura modal, $T_{\text{mode}}(k)$, é computada para cada pixel com temperatura inferior a 253 K ($T_{\text{lim}}(k)$) a partir da definição de uma área de aproximadamente 80 Km de raio, centrado em $T_{\text{lim}}(k)$. Para evitar efeitos do solo, apenas temperaturas menores que 253 K são incluídas no

cálculo da $T_{\text{mode}(k)}$. A temperatura limiar estratiforme ($T_s(k)$) é definida para cada pixel com temperatura inferior a 253 K, como a média dos $T_{\text{mode}(k)}$. Este valor é calculado a partir da expressão:

$$T_s(k) = E(w_k T_{\text{mode}(k)}), \quad (2.15)$$

onde E é o valor médio esperado; $T_{\text{mode}(k)}$ é a temperatura modal do k -ésimo pixel com temperatura inferior a 253 K e; w_k é o número de pixels na imagem IV com $T_{\text{mode}(k)}$.

O T_s é calculado para cada ponto. Em geral, seu valor se encontra em torno de 208 K e representa uma estimativa da temperatura da tropopausa.

Os pixels com temperatura menor que T_s são previamente designados como precipitação estratiforme e assumem uma taxa de precipitação estratiforme de 2mm/h. Segundo Adler e Negri (1988), este valor arbitrário é utilizado supondo-se que a taxa de precipitação estratiforme seja aproximadamente um décimo da taxa média convectiva (20 mm/h). Os autores notaram que a taxa de precipitação estratiforme arbitrária é próxima a 2,6 mm/h, valor calculado por Gamache e Houze (1983).

A técnica CST utilizou dados obtidos durante o segundo FACE, realizado no Sul da Flórida (EUA). Os resultados foram comparados com resultados obtidos por medidores convencionais e radar, além de outras três técnicas de estimativa de precipitação utilizando dados de imagens IV: NAWT (Negri et al., 1984), GWT (Griffith et al., 1978; Woodley et al., 1980) e modificação da técnica Arkin (1979). Em geral, a CST estimou melhor a intensidade de precipitação em um período de 30 minutos, que as outras técnicas investigadas. Adler e Negri (1988) notaram que além de representar melhor o ciclo de convecção e a

evolução da precipitação, a CST determina melhor os picos de precipitação e a transição de chuva convectiva para estratiforme. Outro ponto importante refere-se à área estimada de precipitação estratiforme, que é consistente com a área encontrada pelo radar.

A técnica CST foi modificada para ser aplicada aos dados da primeira intercomparação de algoritmos ocorrida durante o período de junho a agosto de 1989, sobre o arquipélago do Japão e circunvizinhanças (Negri e Adler, 1993). Estas modificações consistiram de:

- 1) redefinição da equação empírica de discriminação de cirrus e tempestade usando dados do SSM/I na frequência de 86 GHz. Na Figura 2.3 está apresentada a nova função discriminante, que é dada por:

$$S_{eq}(k) = 2 (T_{lim}(k) - 217). \quad (2.16)$$

- 2) diminuição da temperatura limite para 235 K.
- 3) inclusão de um ajuste automático para o cálculo da taxa de precipitação e da área de precipitação no modelo de nuvem para os pontos definidos como núcleos convectivos. Este ajuste, obtido diretamente da temperatura do topo de nuvem, equivale a um aumento de 10% na taxa de precipitação e de 25% na área de precipitação, quando a temperatura da troposfera, determinada por satélite, é de 221 K.
- 4) eliminação de todos os mínimos que possuem inclinação menor que 1,5 K. Isto foi feito para eliminar elementos não convectivos que aparecem nas bigornas das tempestades maduras, que possuem uma T_{IV} relativa mínima, mas que não sofrem

espalhamento no espectro de microondas. Isto indica que não são elementos convectivos mas apenas restos de atividades convectivas no topo da bigorna. Esta alteração também pode eliminar um número substancial de elementos convectivos verdadeiros.

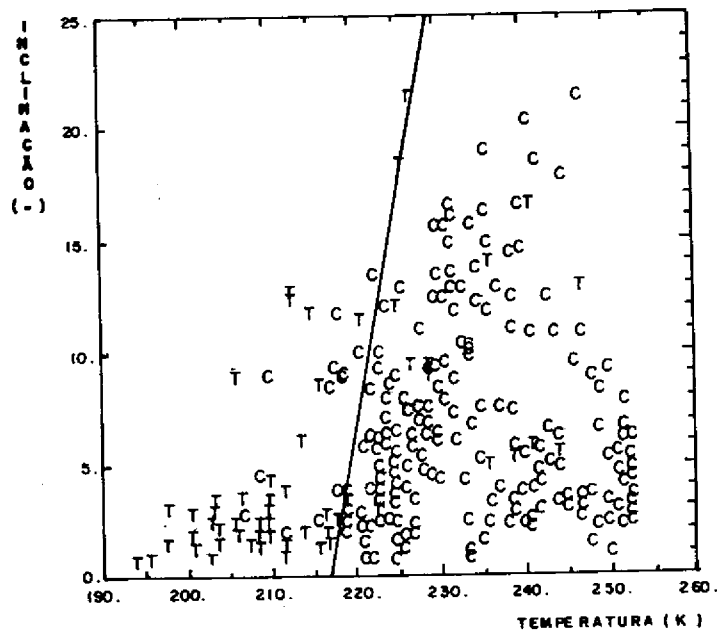


Fig. 2.3 - Discriminação empírica entre nuvens convectivas e cirrus. Dados do SSM/I a 86 GHz que foram utilizados para discriminar os dados de tempestades (T) e cirrus fino (C) no plano temperatura-inclinação.

FONTE: Adler e Negri (1993). p. 360.

2.5 - TÉCNICAS UTILIZADAS NO BRASIL

Algumas das técnicas de estimativa de precipitação apresentadas anteriormente já foram testadas no Brasil.

Alves (1987) analisou a técnica bi-espectral para sistemas que se desenvolveram em uma região do Estado de São Paulo utilizando como verdade terrestre os dados do radar meteorológico na Banda-C de Bauru. Este autor concluiu que a imagem VIS fornece mais informações sobre o campo de chuva que a imagem IV, conforme já observado por Tsonis et al.(1985).

Moraes et al. (1989) aplicaram as técnicas CST, Arkin e NAW para um evento meteorológico ocorrido sobre o nordeste de São Paulo. Os resultados dos modelos foram comparados com dados de pluviógrafos de nove estações instaladas na área de estudo. Os autores observaram que do ponto de vista quantitativo é necessário fazer avaliações adicionais para adaptar as técnicas para as condições meteorológicas regionais do país, uma vez que, qualitativamente, os resultados estimados são consistentes com os observados.

Martin et al. (1990) testaram cinco técnicas utilizando dados de imagens IV para a estimativa de precipitação sobre a Amazônia durante o segundo experimento ABLE (Amazon Boundary Layer Experiment). As técnicas foram escolhidas devido a dois fatores: precisão e custo. As cinco técnicas são: ARK, versão GPI (Arkin and Meisner, 1987); NAW (Negri et al., 1984); CST (Negri e Adler, 1988); IRT (Infrared Regression Technique); e, a técnica interativa de Martin e Holland (1982, 1986).

A técnica IRT utilizou um algoritmo não linear para temperatura, e foi sugerida após os resultados dos estudos de tempestades no verão da Flórida, utilizando dados de radar.

Esta técnica estima a taxa de precipitação

no período de três horas (R) a partir de dados de imagens IV do satélite GOES. A equação é da forma:

$$R = a f r, \quad (2.17)$$

onde a é uma constante; e f e r são variáveis, função da temperatura (em K).

Considerando custo e desempenho, os autores apontaram o IRT como a melhor técnica para a estimativa de precipitação na Amazônia. Ressaltam ainda que todas as técnicas superestimaram a precipitação para pequenas taxas e que explicaram 1/4 a 1/3 da variância das observações obtidas pelos medidores de precipitação diária. Os resultados obtidos com a técnica CST não foram satisfatórios, possivelmente devido ao fato da tropopausa na Amazônia ser mais alta do que no sul da Flórida, invalidando os coeficientes do algoritmo (Adler e Negri, 1988 citado por Martin et al., 1990).

Carvalho e Massambani (1992) avaliaram a relação entre os pontos com temperatura mínima local nas imagens IV e a precipitação medida por radar em eventos semi-estacionários ocorridos durante o verão de 1989 sobre o estado de São Paulo. Neste estudo, os autores utilizaram a metodologia descrita por Carvalho e Massambani (1990), que separa o conjunto de dados com temperatura mínima de 233 K em quatro grupos onde variam as propriedades de textura. A metodologia mostrou-se capaz de selecionar as regiões das nuvens com maiores chances de produzirem precipitação em tempo real.

Por sua vez, a técnica CST foi aplicada por Moraes (1992) na Bacia do Rio Curu no Estado do Ceará. Para obter resultados consistentes aos dos pluviômetros, o autor alterou o coeficiente linear da equação que estima a taxa

de precipitação no modelo unidimensional de nuvem. Comparando a estimativa da precipitação média estimada pela técnica e o valor obtido pelo pluviômetro, observou que a técnica subestimou em 16% o total de precipitação.

Em um estudo realizado para o estado do Ceará, Cavalcanti et al. (1992) associaram tipos de textura com as classes de nuvem no canal IV do METEOSAT . A técnica CST foi utilizada para calcular as inclinações que, juntamente com a temperatura T, foram usados para obter a distribuição de frequência bivariada (T x S). Pela análise desta distribuição de frequência pode-se separar as temperaturas na classes "céu claro" e "precipitação intensa". A inclinação, entretanto, não apresenta características que possibilitam a separação dos tipos de cobertura para todas as classes.

França et al (1990) apresentam uma metodologia para delimitar campo de precipitação em tempo quase real utilizando análise de agrupamento para construir os grupos de chuva e não chuva. A avaliação do desempenho do algoritmo em delimitar chuva e não-chuva é feita utilizando a metodologia de Tsonis e Isaac (1985).

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

3.1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste na adaptação de uma técnica de estimativa de precipitação por satélite na região de São Paulo. A técnica adaptada é a CST, desenvolvida por Adler e Negri (1988).

A adaptação foi feita a partir da implementação de algumas modificações nas rotinas da técnica CST. O fluxograma, mostrado na Figura 3.1, esquematiza as principais atividades desenvolvidas para a adaptação da técnica CST, realizadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A localização e abrangência da área em estudo são apresentados neste capítulo, assim como são definidos os materiais e as técnicas relacionadas à abordagem metodológica utilizada.

3.2 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a área de abrangência do Radar Meteorológico de Ponte Nova, que está instalado no Município de Biritiba-Mirim. O radar meteorológico de Ponte Nova está localizado na coordenada $23^{\circ} 36' 07''\text{S}$ e $45^{\circ} 58' 40''\text{W}$. A área de quantificação da precipitação monitorada pelo radar corresponde a uma região com raio de 180 Km, conforme apresentada na Figura 3.2. Esta área foi escolhida para a adaptação da CST devido à disponibilidade de dados de radar, considerados neste trabalho como verdade terrestre.

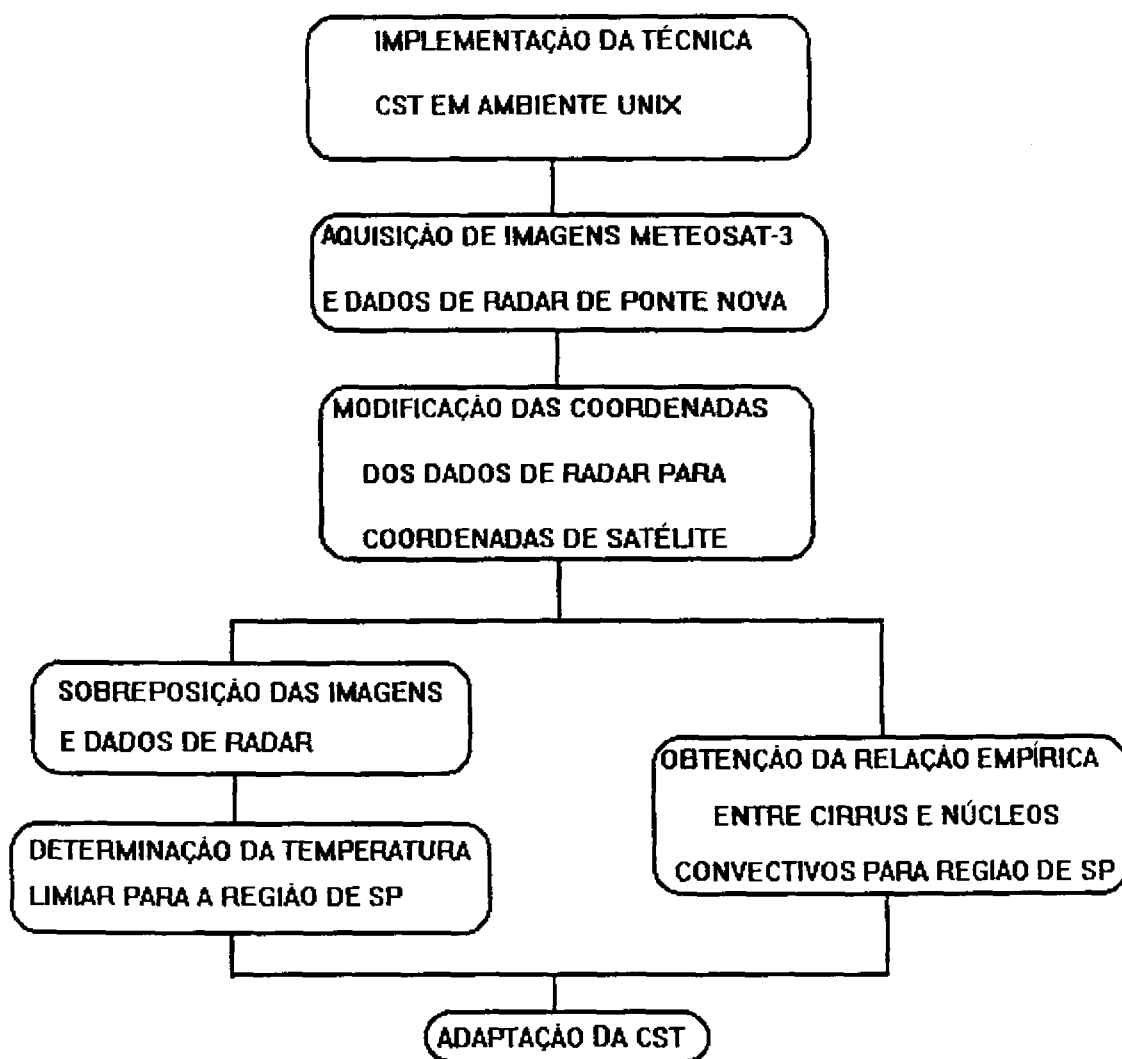


Fig. 3.1 - Fluxograma da implementação da CST realizada no INPE.

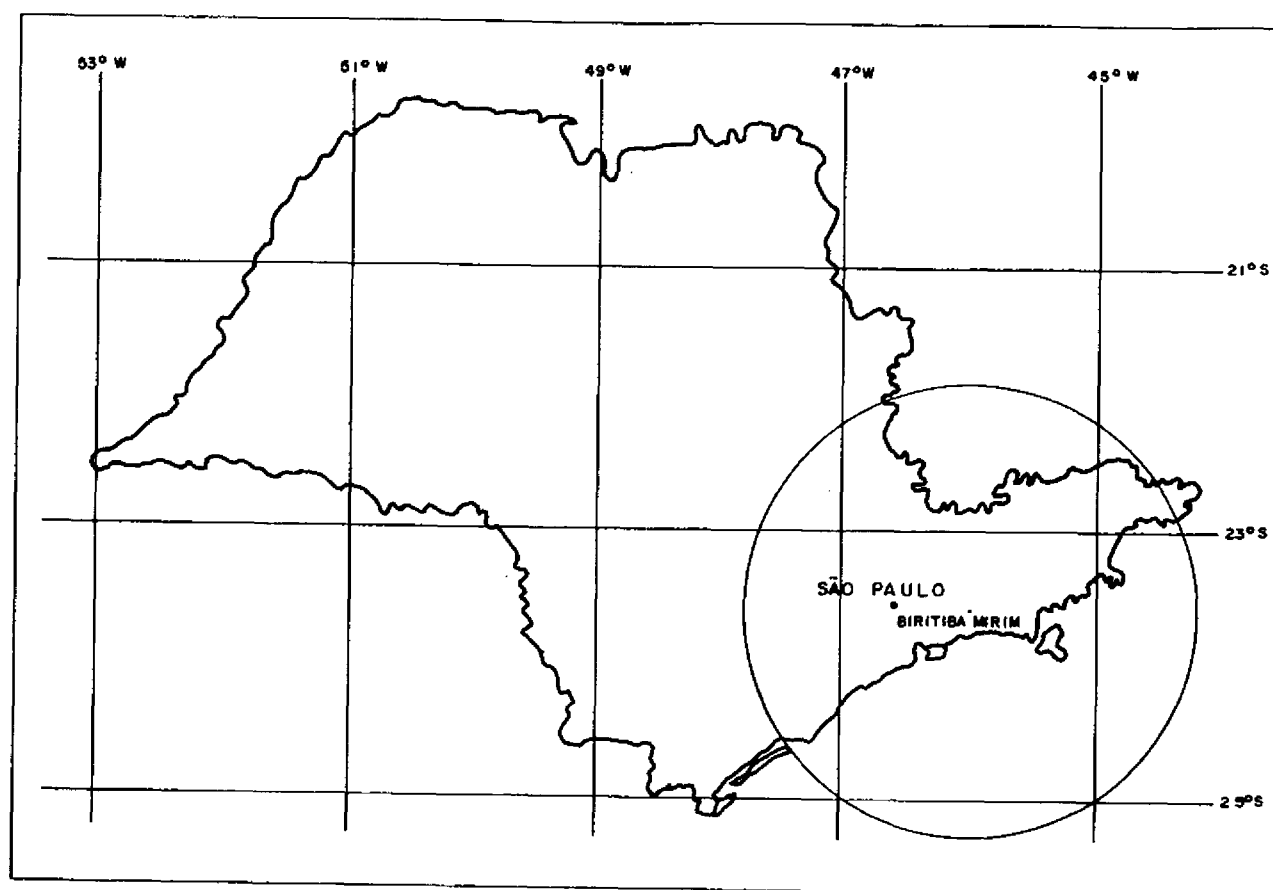


Fig. 3.2 - Raio de Abrangência do Radar de Ponte Nova
FONTE: Pereira et al. (1988). p.4

3.3 - TABELA DE CONVERSÃO DE NÍVEL DE CINZA PARA TEMPERATURA

A CST foi originalmente concebida para utilizar dados do satélite METEOSAT-4. Como neste estudo utilizaram-se dados do satélite METEOSAT-3, foi necessário desenvolver um algoritmo computacional para a conversão dos níveis de cinza dessas imagens para temperaturas. Inicialmente obtiveram-se os valores de radiância (R) a partir da equação:

$$R = a (c - c_0), \quad (3.1)$$

onde c_0 é o valor do nível de cinza calibrado com o corpo negro mantido a 90 K a bordo do satélite ("space count"); c é o valor do nível de cinza da cena; e a é a verdadeira calibração do sensor IV (ESOC, 1988), estimada a partir de:

$$a = \text{FAG} \times \text{MIEC}, \quad (3.2)$$

onde "Fine Adjustment of Gain" (FAG) é derivado do corpo negro e representa a variação fracional da sensibilidade; e MIEC é o fator de calibração do MIEC ("Meteorological Information Extraction Centre").

Os valores de c_0 , FAG e MIEC são encontrados no conjunto de dados de interpretação que acompanha a documentação das imagens. Esta documentação normalmente é enviada junto com as imagens das 00:00, 06:00, 18:00 e 24:00 GMT. Esses valores podem variar a cada doze horas nos horários das 2:30 e 14:30 GMT devido a calibração com o corpo negro.

Calculada R, a temperatura é obtida a partir de uma tabela de conversão de radiância em temperatura. Essa tabela possui valores de radiância variando de 0,062 a

$20,680 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ e temperaturas de 100 a 388 K.

O cálculo de R foi implementado em estação de trabalho através de uma rotina em linguagem C contendo as Equações 3.1 e 3.2, e a tabela de conversão de radiância em temperatura. Os dados de entrada para esta rotina constituem-se na documentação de cada imagem, para criar uma tabela de conversão de nível de cinza em temperatura. Assim, obtém-se rapidamente a temperatura de cada pixel nas imagens IV.

3.4 - AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a adaptação da técnica CST aqui proposta são necessários dois tipos de dados: os do satélite METEOSAT-3 e os do radar Meteorológico de Ponte Nova. A seguir apresentam-se algumas considerações sobre os mesmos.

3.4.1 - SATÉLITE METEOSAT-3

O terceiro satélite geoestacionário europeu (pré-operacional) METEOSAT-3 entrou em órbita no primeiro lançamento do foguete Ariane-4, em junho de 1988, para ser posicionado a 0°W . Originalmente teve como missão cobrir o intervalo entre o fim do programa pré-operacional e o lançamento do primeiro satélite da série operacional. Durante o verão de 1991, foi reposicionado para 50°W para permitir o posicionamento do satélite METEOSAT-4 a 0°W . Em 20 de fevereiro de 1993, o METEOSAT-3 foi novamente deslocado, agora para 75°W , para aumentar a cobertura temporal sobre o hemisfério oeste (de Waard, 1993).

O radiômetro a bordo do METEOSAT-3 imagea a terra em 3 bandas espectrais: VIS ($0,4$ a $1,10 \mu\text{m}$), IV termal ($10,5$ a $12,5 \mu\text{m}$) e vapor de água (VA) ($5,7$ a $7,1 \mu\text{m}$). Os sensores de imageamento VIS e IV são

redundantemente configurados.

A cada rotação do satélite é feito o imageamento de uma linha que cobre 5 Km ao norte da linha anteriormente imageada. O telescópio que contém o radiômetro faz um ângulo de 18° no sentido sul-norte, varrendo 2500 linhas em 25 minutos, imageando todo o disco da terra. A imagem de todo o disco é obtida a cada trinta minutos, sendo que os cinco minutos restantes são utilizados para reposicionamento e estabilização do telescópio. Este pode ser comandado da superfície para cobrir pequenas áreas, possibilitando uma maior frequência de imageamento do setor desejado.

As imagens do canal IV e VA são compostas por 2500 colunas e 2500 linhas com uma resolução espacial de 5 Km no ponto sub-satélite. Por sua vez, as imagens VIS é de 5000 colunas e 5000 linhas com uma resolução espacial de 2,5 Km no ponto sub-satélite, sendo que uma única imagem diária é recebida com resolução plena. As imagens emitidas a cada meia hora são do tipo "B" (coluna/linha sim e coluna/linha não), reduzindo a resolução espacial real a 5 x 5 km no nadir.

3.4.2 - RADAR METEOROLÓGICO DE PONTE NOVA

O Radar Meteorológico de Ponte Nova proporciona o monitoramento de sistemas precipitantes em tempo real, de forma contínua em grandes áreas e com boa resolução espacial. O radar banda S está instalado no morro do Marco Gegrar junto à Barragem de Ponte Nova no Município de Biritiba-Mirim, numa altitude de 916 m com máxima visada livre horizontal. Este ponto dista cerca de 100 Km da cidade de São Paulo. A área de monitoramento do radar corresponde a uma região com raio de 240 Km sendo que a quantificação da precipitação é efetuada para um raio

inferior a 180 Km. A conversão da refletividade do radar para taxa de precipitação é feita através da relação $Z = 200 R^{1.66}$ (Marshall e Palmer, 1948), onde Z é o fator de refletividade do radar (mm^6/m^3) e R é a taxa de precipitação (mm/h).

A Figura 3.2 mostra o raio de abrangência do radar do Estado de São Paulo, enquanto a Tabela 3.1 apresenta as principais características técnicas.

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DO RADAR METEOROLÓGICO DE PONTE NOVA

Diâmetro da antena :	4 m
Tipo da antena:	parabólica
Ganho da antena:	38,66 dBz
Largura do feixe:	2°
Tipo de polarização:	vertical
Elevação:	-4° a 90°
Rotação em azimuth (6rpm):	360°
Taxa de elevação máxima:	18°/s
Duração do pulso:	1,6 µs
Potência de transmissão:	650 kW
Frequência do transmissor:	2,7-2,9 GHz
Frequência de repetição do pulso:	250 pps
Distância máxima quantificada:	180 Km
Taxa mín prec. quantificada:	0,50 mm/h (190 Km)
Refletividade mín detectada:	18 dBz (190 Km)

FONTE: Adaptada de FCTH, 1987

O sistema computacional do radar controla, automaticamente, a antena e a aquisição dos dados do campo de refletividade. A cada 10 minutos é feita a varredura em azimuth e elevação de até 30°, em um raio de 240 Km. A varredura completa leva cerca de 4 minutos. Os níveis de intensidade recebidos são armazenados em unidade de fita e provisoriamente armazenados em unidade de disco rígido para serem processados e transmitidos pelo CTH (Centro Tecnológico de Hidráulica). Os produtos disponíveis ao usuário são os seguintes:

- Mapas CAPPI ("Constant Altitude Plan Position Indicator"): apresentam taxas de precipitação para altitudes entre 1,5 e 18,0 Km, em um raio de 180 Km, discretizados em pixels de 2 Km x 2 Km.
- Mapas ECHO TOP: apresentam a altura máxima dos ecos de precipitação com uma taxa equivalente de 1 mm/h, para o mesmo raio de 180 Km.
- Mapas de precipitação acumulada: computados através da medida de precipitação pelo CAPPI e acumulada no intervalo de tempo estabelecido para a geração de produtos especificados pelo operador, para o mesmo raio de 180 Km.
- Corte transversal: apresenta a estrutura vertical de precipitação ao longo de um corte transversal ao longo de dois pontos previamente escolhidos pelo operador.
- Mapas de previsão: apresentam o resultado da correlação espaço-temporal do campo de precipitação via CAPPI. Esses mapas permitem a identificação da direção e velocidade de deslocamento das áreas com chuva. Apresenta também previsões para pontos previamente identificados pelo operador.

O produto de radar a ser utilizado neste estudo é o CAPPI, que é gerado operacionalmente na altitude de 3,0 Km.

Na comparação entre as observações de satélite e as taxas de precipitação obtidas pelo radar é necessário entender e considerar as limitações do radar como verdade terrestre (Petty e Katsaros, 1992). Como todo radar, o radar de Ponte Nova também está sujeito a erros

devido, entre outros a atenuação atmosférica, espalhamento e "overshooting" do feixe (devido a resolução finita da antena e a curvatura da terra, respectivamente) e principalmente a incerteza quanto a verdadeira relação Z-R (devido as variações na distribuição do tamanho da gota). Outros erros são função das características do radar e sua localização, como por exemplo, obstruções locais ou distantes do feixe do radar, atenuação da onda, calibração do hardware do radar, e, procedimento de processamento e interpolação (Browning e Collier, 1989).

No caso do Radar de Ponte Nova, os erros encontrados ocorrem, principalmente nos casos de chuva intensa, devido a não utilização da relação Z-R mais adequada para a área de abrangência do radar. Uma maneira de minimizar a ocorrência de erros é calibrar o radar em tempo real com uma rede extensa de pluviógrafos (Barros e Carrera, 1992).

3.5 - SELEÇÃO DE IMAGENS METEOSAT-3 E DADOS CAPPI DO RADAR DE PONTE NOVA

Durante o período de dezembro de 1993 a fevereiro de 1994 foram coletados, simultaneamente, dados de radar (tipo CAPPI, coletados pelo radar meteorológico de Ponte Nova) e de satélite (imagens IV, com resolução plena, obtidas pelo satélite METEOSAT-3).

Durante o período de 23 de janeiro a 2 de fevereiro de 1994, algumas imagens e/ou documentações destas não puderam ser gravadas devido a problemas operacionais. Após a determinação das datas e dos horários com disponibilidade de dados de radar e de satélite, foram selecionados os casos onde a precipitação era de origem convectiva.

Na Tabela 3.2 estão listados os horários e

datas das imagens que foram utilizadas na sobreposição dos dados de radar e de satélite.

TABELA 3.2 - DATAS E HORÁRIOS DAS IMAGENS UTILIZADAS PARA DETERMINAR A TEMPERATURA LIMIAR

DATA	HORÁRIO (HL)
01/01/94	16:30 - 20:00
04/01/94	00:30 - 04:30
07/01/94	14:00 - 24:00
08/01/94	00:30 - 04:00
03/02/94	15:00 - 22:00
05/02/94	00:30 - 07:00
05/02/94	16:30 - 22:00
07/02/94	00:30 - 07:30
08/02/94	01:30 - 22:00
09/02/94	17:00 - 20:30
10/02/94	15:00 - 21:30
11/02/94	16:00 - 21:30
12/02/94	15:00 - 22:00
13/02/94	00:30 - 08:00
13/02/94	15:00 - 22:00
15/02/94	18:00 - 21:30
17/02/94	15:00 - 22:00
18/02/94	13:00 - 19:30
19/02/94	16:00 - 22:00
20/02/94	00:30 - 06:00
21/02/94	17:00 - 20:00
23/02/94	16:00 - 21:00

Na Tabela 3.3 estão listados os horários e datas utilizados para calcular a equação empírica entre cirrus e núcleos convectivos. Foram utilizados os dados referentes aos horários das 16:00 HL às 24:00 HL, de acordo com procedimento proposto por Adler e Negri (1988).

TABELA 3.3 - DATAS E HORÁRIOS DAS IMAGENS UTILIZADAS PARA DETERMINAR A EQUACÃO DISCRIMINANTE

DATA	HORÁRIO (HL)
07/01/94	17:00 - 22:00
21/01/94	17:30 - 22:00
03/02/94	17:00 - 24:00
05/02/94	16:30 - 22:00
10/02/94	16:00 - 21:30
11/02/94	16:00 - 22:00
13/02/94	17:00 - 22:00
15/02/94	18:00 - 21:30
17/02/94	17:00 - 22:00
19/02/94	16:00 - 22:00

De forma a testar a CST adaptada, algumas imagens, que não foram utilizadas na determinação da temperatura limiar ou da função discriminante, foram selecionadas. As datas e os horários dessas imagens estão listados na Tabela 3.4. Os horários foram selecionados segundo o procedimento proposto por Adler e Negri (1988).

TABELA 3.4 - DATAS E HORÁRIOS DAS IMAGENS UTILIZADAS PARA TESTAR A CST

DATA	HORÁRIO (HL)
10/12/93	16:30 - 18:30
17/12/93	16:30 - 17:30
19/12/93	16:30 - 21:30
28/12/93	16:30 - 20:30
29/12/93	16:30 - 20:30

3.6 - MODIFICAÇÃO DAS COORDENADAS DOS DADOS DE RADAR PARA AS COORDENADAS DE SATÉLITE

Os dados CAPPI do radar meteorológico de Ponte Nova são fornecidos em coordenadas cartesianas, enquanto aqueles obtidos pelo METEOSAT-3 são apresentados em coordenadas de satélite. Um algoritmo, denominado

RADSAT, foi desenvolvido em linguagem C para compatibilizar os dados de radar e os de satélite. O programa envolve duas etapas: a transformação dos dados de radar em coordenadas mercator (latitude-longitude); e, a transformação destas para coordenadas de satélite.

A seguir descreve-se o algoritmo para a transformação das coordenadas dos dados de radar para coordenadas de satélite.

3.6.1 - TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS DE RADAR DE COORDENADAS CARTESIANAS PARA COORDENADAS MERCATOR

Os dados CAPPI do radar de Ponte Nova são fornecidos em coordenadas cartesianas e remapeados para projeção latitude-longitude. Para realizar esta transformação, utiliza-se a projeção Mercator.

A projeção Mercator, desenvolvida por Gerardus Mercator em 1569, marcou o começo das modernas projeções em mapas. Esta projeção tem sido utilizada para auxiliar a navegação desde a exploração dos mares à era da exploração espacial.

Nesta projeção, o eixo x se encontra ao longo do Equador ($\theta_0 = 0^\circ$, onde θ_0 é a latitude do Equador), enquanto o eixo y situa-se ao longo do meridiano central ($\phi_0 = 0^\circ$, onde ϕ_0 é a longitude do meridiano central). Os meridianos são igualmente espaçados em linhas retas. Os paralelos são unicamente linhas retas espaçadas ortogonalmente aos meridianos. O espaçamento entre os paralelos aumenta quando próximo aos polos. A convergência dos meridianos não ocorre, e a distorção se torna excessiva em ambas as direções do polo, de tal forma que os polos nunca se encontram. Esta projeção é especialmente conveniente para mapeamento das regiões equatoriais, pois

apresenta mínima distorção em ambos os lados do Equador. Determinado o tipo de projeção, definiu-se a elipsóide como a figura geométrica que melhor se aproxima do formato da Terra. Vários pesquisadores sugerem valores para o semi-eixo maior e a excentricidade, para melhor representar um segmento especial ou toda a Terra. Neste trabalho, o elipsóide utilizado que melhor representa a área entre os trópicos e o Equador é o IUGG 67 (Pearson II, 1990).

Sendo o formato da Terra um elipsóide, as equações da transformação inversa necessitam de uma interação convergente para determinar ϕ (Snyder, 1983). Uma série de Taylor é utilizada para evitar a interação no cálculo de ϕ . A equação simplificada de ϕ é dada por:

$$\phi = X + \frac{(e^2/2 + 5e^4/24 + e^6/12 + \dots) \text{sen}2X - (7e^4/48 + 29e^6/240 + \dots) \text{sen}4X + (7e^6/48 + \dots) \text{sen}6X + \dots}{1} \quad (3.3)$$

onde:

$$\begin{aligned} X &= \pi/2 - 2 \arctan(t) \\ \phi &\text{ é a latitude do ponto } y; \\ e &\text{ é a excentricidade igual a } 0,08182; \\ t &= \exp(-y/a); \\ a &\text{ é o semi-eixo maior do elipsóide igual a } 6378160 \text{ m;} \\ e, y &\text{ determina os pontos paralelos ao meridiano central em coordenadas cartesianas.} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Para calcular θ , a equação utilizada é:

$$\theta = x/a + \theta_0 \quad (3.5)$$

onde θ é a latitude do ponto y ; x determina pontos paralelos ao Equador, em coordenadas cartesianas; θ_0 e a são conforme definidos anteriormente.

Desta forma, são calculadas as latitudes e longitudes de cada ponto dos dados de radar, tendo como

ponto inicial a latitude e longitude do radar de Ponte Nova.

3.6.2 - TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS DE RADAR DE COORDENADAS MERCATOR PARA COORDENADAS DE SATÉLITE

O próximo passo na transformação dos dados de radar de coordenadas mercator para coordenadas de satélite é a conversão das latitudes e longitudes para a projeção do satélite (no caso, o METEOSAT-3). Para isso, é importante ter uma navegação precisa para as imagens de satélite (Heymsfield et al., 1987).

Os dados do radar remapeados são projetados para o sistema de coordenadas do satélite geoestacionário, para então ocorrer a comparação direta das características do topo da nuvem.

Como a resolução espacial do satélite METEOSAT-3 é de 5 Km (no ponto sub-satélite) e a do radar de Ponte Nova é de 2 Km, não é possível comparar diretamente esses dois tipos de dados. Devido à curvatura da Terra, nem sempre o número de pixels é o mesmo, para que as áreas sejam equivalentes. Para superar essa dificuldade, foi desenvolvida uma rotina para determinar o número de pixels de radar, n , equivalente a cada pixel da imagem METEOSAT-3. A média e a moda desses n valores foram calculadas e contrastadas com o valor original dos pixels, para definir aquela medida que melhor representa os dados de radar. A moda foi selecionada por representar melhor a distribuição espacial dos pixels com precipitação, quando comparada aos dados de radar.

Segundo Doneaud et al. (1987), é necessário levar em consideração alguns pontos antes de se proceder a comparação entre os dois tipos de dados (radar e satélite).

Isto para se evitar a inclusão de características de nuvens suspeitas não detectadas pelo radar, pois estes respondem a diferentes características das nuvens, para diferentes níveis atmosféricos. O posicionamento espacial das observações do satélite (relativo à localização do radar) necessita de correção devido à precisão limitada das correções atmosféricas. Finalmente, as diferenças temporais entre os conjuntos de dados radar-satélite podem variar em, no máximo, 10 minutos.

3.7 - SOBREPOSIÇÃO DOS DADOS

Os dados de radar e satélite foram sobrepostos com a finalidade de determinar a temperatura limiar (nível de cinza limiar) que melhor caracterize as áreas de precipitação das de não precipitação, considerando os dados de radar como a verdade terrestre. Para determinar as áreas de chuva e não chuva nos dados de satélite definiu-se uma temperatura limiar abaixo da qual todos os pixels eram classificados como chuva. Várias temperaturas foram testadas dentro de um determinado intervalo, que englobou as temperaturas sugeridas por Negri e Adler (1993) e Adler e Negri (1988).

A escolha da temperatura limiar foi feita utilizando várias medidas sugeridas por Tsonis (1988), que são listadas a seguir. Note-se que elas se referem aos dados na imagem de satélite:

- 1) Probabilidade de detecção (PDD) definida por:

$$PDD = R_r / A_r \quad (3.6)$$

- 2) Razão de alarme falso (RAF) definida por:

$$RAF = 1 - (R_r/A_s) \quad (3.7)$$

3) Erro percentual, f , expresso por:

$$f = (N_R + R_N) / (N + R) \quad (3.8)$$

onde:

$$R = R_R + R_N; \text{ e,} \quad (3.9)$$

$$N = N_R + N_N \quad (3.10)$$

e:

N_N : número de pontos corretamente classificados como não precipitação;

N_R : número de pontos incorretamente classificados como não precipitação (perdidos);

R_N : número de pontos incorretamente classificados como precipitação (alarme falso);

R_R : número de pontos corretamente classificados como precipitação (acerto);

A_S : área de precipitação delimitada pelo satélite, expressa por $A_S = R_N + R_R$; e

A_R : área de precipitação delimitada pelo radar.

Caso todos os pixels de chuva e de não chuva detectados pelo radar coincidam com aqueles detectados pelo satélite, então $PDD = 1$, $RAF = 0$ e $f = 0$. Entretanto, conforme Tsonis e Isaac (1985) nenhuma destas medidas individualmente pode ser considerada como a mais representativa do sucesso, pois cada uma delas fornece informação adicional sobre o sucesso na delimitação da área de precipitação, a partir dos dados de satélite.

Assim, considerou-se mais adequado utilizar o resultado da Equação 3.11 como indicador da temperatura limiar a ser utilizada. Esta soma foi calculada para todas as imagens disponíveis, com exceção daquelas empregadas para validação do algoritmo modificado.

$$\text{SUM} = ((0-\text{FAR})^2 + (1-\text{PDD})^2 + (0-f)^2)^{1/2} \quad (3.11)$$

A distribuição dos valores de SUM foi então encontrada, tendo-se definido como temperatura limiar aquela que apresentou maior frequência de SUM próxima a zero.

3.8 - DETERMINAÇÃO DOS PIXELS ASSOCIADOS A NUVENS CONVECTIVAS E CIRRUS

Após se estabelecer a temperatura limiar, determinaram-se os pixels que correspondiam a núcleos convectivos e cirrus em todas as imagens selecionadas, para a obtenção da função discriminante entre cirrus e núcleos convectivos. O algoritmo utilizado na sobreposição de dados radar e satélite determina os pixels convectivos e cirrus.

Os pixels convectivos correspondem àqueles corretamente classificados como chuva (R_r), enquanto que os pixels associados a nuvens cirrus correspondem àqueles incorretamente classificados como chuva (alarme falso), R_n .

Foi escolhida a temperatura de 253 K, sugerida por Adler e Negri (1988) e de Negri e Adler (1993). Foram identificados todos os pixels que apresentaram temperatura abaixo de 253 K e calculada a inclinação (S) para cada pixel de cada imagem utilizada, segundo a Equação 2.11.

Após a listagem de todas as temperaturas e inclinações, utilizou-se uma filtragem dos pontos gerados para apenas trabalhar com aqueles referentes aos topos de nuvens. Esta filtragem foi feita utilizando a rotina da CST que determina os topos das nuvens.

Com todas as temperaturas e inclinações foi possível calcular a equação discriminante de núcleos convectivos e cirrus para a adaptação da CST às condições atmosféricas do estado de São Paulo.

3.9 - OBTENÇÃO DA RELAÇÃO EMPÍRICA DISCRIMINANTE ENTRE CIRRUS E NÚCLEOS CONVECTIVOS

Conforme mencionado no Capítulo 2, a técnica CST exige a eliminação das nuvens cirrus, o que pode ser feito através da utilização da técnica de análise discriminante. Um método empregado para determinar a função discriminante é a regressão, que é descrita nessa seção.

A função discriminante será calculada para dois grupos de interesse, nuvens cirrus (A) e núcleos convectivos (B), e duas variáveis independentes, $T_{\text{mín}}$ e S . Segundo Davis (1973), a equação discriminante é determinada a partir da solução do sistema de equações:

$$[\lambda] = [D] \cdot [s_p^2]^{-1}, \quad (3.12)$$

onde, aqui, $[s_p^2]^{-1}$ é a matriz inversa de dimensões 2×2 de variâncias e co-variâncias conjunta das m variáveis em estudo ($T_{\text{mín}}$ e S); $[\lambda]$ é o vetor dos coeficientes da função discriminante (λ_1 e λ_2); e, $[D]$ é o vetor das diferenças entre as médias multivariadas dos grupos A e B. O j -ésimo elemento do vetor $[D]$ é dado por:

$$D_j = \bar{A}_j - \bar{B}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} A_{ij}}{n_A} - \frac{\sum_{i=1}^{n_B} B_{ij}}{n_B}, \quad (3.13)$$

onde j é a variável em estudo, sendo que $j = 1$ para a variável S e $j = 2$ para a variável $T_{\text{mín}}$; X_{ij} é a i -ésima observação da variável j no grupo X , $X = A$ ou B .

Para se obter a matriz de variâncias e covariâncias conjunta (s_p^2), utiliza-se a matriz das somas dos quadrados e produtos cruzados de todas as variáveis do grupo A [SPA] e uma matriz similar para o grupo B [SPB]. Assim, cada membro da matriz é calculado a partir de:

$$SPX_{jj} = \sum_{i=1}^{n_X} (X_{ij})^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n_X} X_{ij}^2}{n_X}, \quad (3.14)$$

onde X representa os grupos A e B; SPX_{jj} representa cada um dos membros da matriz para o grupo X; X_{ij} é a i-ésima observação da variável j no grupo X ou na média de n_X observações; e X_{ij} é a i-ésima observação da variável j no grupo X ou na média de n_X observações.

A matriz [SPX] é dada por:

$$[SPX] = \begin{bmatrix} SPX_{11} & SPX_{12} \\ SPX_{21} & SPX_{22} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A matriz de variância e covariância conjunta (s_p^2) pode ser calculada por:

$$[s_p^2] = \frac{[SPA] + [SPB]}{n_A + n_B - 2}. \quad (3.16)$$

Após a obtenção de $[s_p^2]$, calcula-se a matriz inversa $[s_p^2]^{-1}$. Com esta matriz e o vetor [D] determina-se o vetor $[\lambda]$, conforme a Equação 3.12.

A função discriminante é dada por:

$$L = \lambda_1 * T_{\text{mín}} + \lambda_2 * S, \quad (3.17)$$

sendo que L é calculado pela equação:

$$L = \lambda_1 * \bar{T} + \lambda_2 * \bar{S}, \quad (3.18)$$

onde \bar{T} é a temperatura média entre os dois grupos; e, \bar{S} é a inclinação média entre os dois grupos.

Finalmente, para definir o ponto de separação entre os dois grupos, soluciona-se a seguinte equação:

$$S = - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} * T + \frac{L}{\lambda_2}, \quad (3.19)$$

a qual é a equação discriminante para as condições físicas de região estudada.

3.10 - ADAPTAÇÃO DA CST

Após implementadas todas as modificações, a CST adaptada foi aplicada para 21 imagens de dezembro de 1993, conforme ilustra a Tabela 3.4. Os resultados encontrados foram comparados aos dados de radar de Ponte Nova. Foram feitas também comparações entre a CST não adaptada e os dados de radar para determinar qual técnica (original ou adaptada) apresentou uma melhor estimativa de precipitação sobre a região de São Paulo.

3.11 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Várias medidas foram calculadas para determinar o desempenho dos diferentes algoritmos (CST original, CST utilizando temperatura limiar igual a 225 K e CST utilizando temperatura limiar de 229 K) e os dados de radar e entre os diferentes algoritmos. Esses algoritmos são doravante designados por CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉,

respectivamente. Sejam $Y(i,j)_r$ e $Y(i,j)_s$ os valores do pixel (i,j) obtidos pelos algoritmos (e/ou sistema) r e s , respectivamente ($r, s = \text{radar, CST, CST}_{225} \text{ e } \text{CST}_{229}, r \neq s$). Defina-se $D(i,j)$ como a diferença entre os valores, conforme a seguinte expressão:

$$D(i,j) = Y(i,j)_r - Y(i,j)_s, \quad (3.20)$$

onde $i = 1, \dots, n_1$; $j = 1, \dots, n_2$; $r, s = \text{radar, CST, CST}_{225}, \text{CST}_{229}, r \neq s$.

Seja $n = n_1 * n_2$ o número total de pixels na imagem. As medidas utilizadas na identificação do algoritmo que apresentaram melhor desempenho foram (Krug, 1992):

- 1) RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático) calculado através de:

$$\text{RMSE} = \left[\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} [D^2(i,j)/(n)] \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

- 2) correlação entre os dados de radar e CST.
- 3) Tendência, definida como a diferença entre as médias dos dois conjuntos de dados:

$$\text{bias} = \bar{Y}(i,j)_r - \bar{Y}(i,j)_s \quad (3.22)$$

onde:

$$\bar{Y}(i,j)_r = \sum Y(i,j)_r / n, \text{ e}$$

$$\bar{Y}(i,j)_s = \sum Y(i,j)_s / n.$$

3.12 - TESTE T-STUDENT PARA PARES EMPARELHADOS

Foi realizado também um teste t para verificação ou não da existência de diferença significativa entre os resultados obtidos pelos diferentes algoritmos (CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉) e os dados de radar, entre os diferentes algoritmos entre si.

O teste t utilizado neste estudo foi o de dados emparelhados. Assim, para se verificar a existência ou não de diferença significativa entre os resultados da CST e os da CST₂₂₉, por exemplo, considerou-se, para cada pixel da imagem, a dupla (CST, CST₂₂₉). Testes foram realizados entre os seguintes conjuntos de dados: a) radar e CST; b) radar e CST₂₂₅; c) radar e CST₂₂₉; d) CST e CST₂₂₅; e) CST e CST₂₂₉; e, finalmente f) CST₂₂₅ e CST₂₂₉.

Sejam $Y(i,j)_r$ e $Y(i,j)_s$ os valores do pixel (i,j) obtidos pelos algoritmos (e/ou sistema) r e s, respectivamente (r, s = radar, CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉, $r \neq s$). O teste t de dados emparelhados considera a diferença entre os valores, e não os valores individuais. Assim, o teste baseia-se no valor da variável D (Hays, 1970).

Para testar se existe diferença significativa ou não entre os dados obtidos por diferentes métodos ou algoritmos, a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) são expressas:

$$H_0: E(M_d) = 0$$

$$H_1: E(M_d) \neq 0,$$

e o teste baseia-se no valor da estatística t dada por:

$$t = (M_d - E(M_d)) / \text{est } \sigma_{M_d}, \quad (3.23)$$

onde:

$$M_d = \sum_i D(i,j) / N, \quad (3.24)$$

onde $E(M_d)$ é a média dos valores $D(i,j)$. $E(M_d) = 0$ (se a hipótese nula é verdadeira) e

$$\text{est } \sigma_{M_d} = (\sum_i D(i,j)^2 / N - M_d^2)^{1/2} / (N-1)^{1/2} \quad (3.25)$$

é uma estimativa do desvio padrão dos $D(i,j)$'s.

Para um nível de significância (α) de 5%, a hipótese nula é aceita se $-t_{\alpha/2, N-1} < t < t_{\alpha/2, N-1}$.

3.13 - EFEITO DE DISTÂNCIA

Vários fatores introduzem diferenças significativas entre as medidas de taxa de precipitação medidas pelo radar e pelas técnicas de precipitação por satélite. Segundo Zawadzki (1984), estes fatores podem ser agrupados em fontes de erros aleatórios, erros sistemáticos e erros referentes ao efeito de distância entre o radar e o local máximo de estimativa de precipitação (local de instalação do medidor no solo ou de comparação com os dados das técnicas de estimativa). Os principais fatores das fontes de erros referentes ao efeito de distância são: dimensão do volume da amostra do radar, juntamente com a não uniformidade do campo de refletividade; aumento na altura com a variação do volume da amostra; sinal mínimo detectável; e, presença de propagação e sombras.

Na comparação entre as estimativas de radar e CST, é notada, principalmente, a presença de erros referentes ao efeito de distância. Com isso, este tipo de efeito foi estudado aqui para a comparação das estimativas de radar e CST₂₂₉ (escolhido como referência para o teste)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Conforme apresentado no Capítulo 3, várias alterações foram efetuadas na técnica CST antes de implementá-la para a região de São Paulo. Neste capítulo são apresentadas as modificações da técnica, assim como as estimativas de precipitação obtidas pela implementação da técnica CST modificada e original. Ambas as estimativas são comparadas com as taxas de precipitação medidas pelo radar meteorológico de Ponte Nova, neste trabalho entendido como a verdade terrestre.

As rotinas para calcular as taxas de precipitação pela técnica CST estão implementadas no programa REALTIME cedido por Negri. Foi necessário acrescentar-se ao REALTIME uma rotina para a conversão dos valores de nível de cinza em temperaturas, conforme Seção 3.3. Esta rotina se encontra no Apêndice A.

A seguir são apresentados os resultados da implementação do programa REALTIME modificado, no que diz respeito às alterações da técnica original.

4.2 - SOBREPOSIÇÃO DOS DADOS DE RADAR E DE SATÉLITE

Os dados CAPPI, do radar de Ponte Nova e as imagens do satélite METEOSAT-3, foram colocados em um mesmo sistema de coordenadas e na mesma resolução espacial. A Figura 4.1 apresenta um exemplo da sobreposição para o dia 10/02/94 às 20:00 HL. Esta sobreposição foi efetuada utilizando o programa RADSAT.

Após a sobreposição dos dados, determinou-se a temperatura limiar correspondente à ocorrência de chuva e não chuva para a região de São Paulo. A Figura 4.2 apresenta a distribuição das temperaturas limiares resultantes da análise de 189 imagens disponíveis.

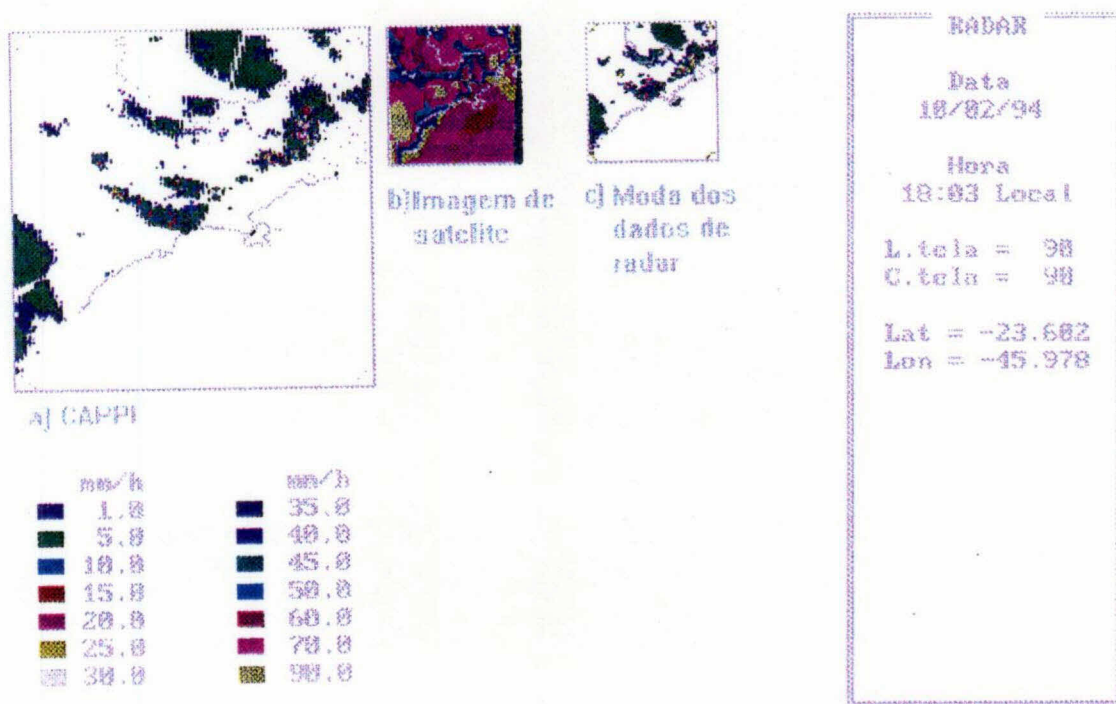


Fig. 4.1 - Resultado do programa RADSAT para o dia 10/02/94 às 20:00 HL.

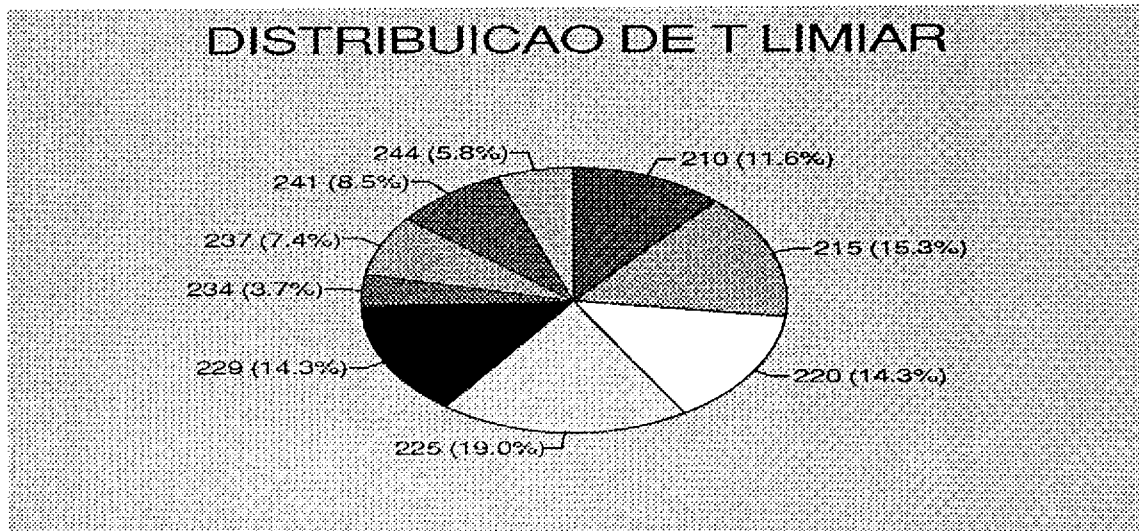


Fig. 4.2 - Gráfico da distribuição das temperaturas limiares nas 189 imagens analisadas.

As temperaturas selecionadas como limiar foram 225 K e 229 K. Das 189 imagens utilizadas, 19% apresentavam limiar de 225 K; este percentual representa a maior concentração das imagens analisadas. A temperatura de 229 K foi também selecionada por apresentar uma frequência alta (14,3%) e por abranger todas as temperaturas menores que 229 K. Neste caso, 84,5% das imagens selecionadas apresentam limiar menor ou igual a 229K. Os limiares obtidos para a região de São Paulo são menores do que os encontrados por Adler e Negri (1988) e Negri e Adler (1993). Aparentemente, a diminuição do limiar está associada à ocorrência de uma maior frequência de nuvens convectivas profundas nos trópicos, consequentemente apresentando topos com temperaturas mais frias.

Carvalho e Massambani (1992), ao associar temperatura mínima local e precipitação, a partir de dados de Bauru (SP) e do satélite meteorológico GOES, utilizaram 233 K como temperatura limiar. A diferença entre o valor sugerido por estes autores e o sugerido neste trabalho pode

ser possivelmente explicado pela utilização de um outro satélite (GOES) e radar (radar meteorológico de Bauru), e, também, por se referir a um outro período de tempo (fevereiro de 1989).

4.3 - DEFINIÇÃO DA EQUAÇÃO DISCRIMINANTE

Com o objetivo de eliminar as nuvens cirrus foram determinados todos os pontos com nuvens cirrus e núcleos convectivos. A equação discriminante estimada para a região de São Paulo foi:

$$S = 0,47 (T - 209) \quad (4.1)$$

onde T e S correspondem à temperatura do pixel e à inclinação do pixel dada pela equação 2.10, respectivamente.

Na Figura 4.3 são mostrados todos os pontos utilizados no cálculo da equação discriminante, enquanto na Tabela 4.1 são apresentadas as equações discriminantes dos estudos desenvolvidos por Adler e Negri (1988), Negri e Adler (1993) e a encontrada no presente trabalho (Scofield, 1994).

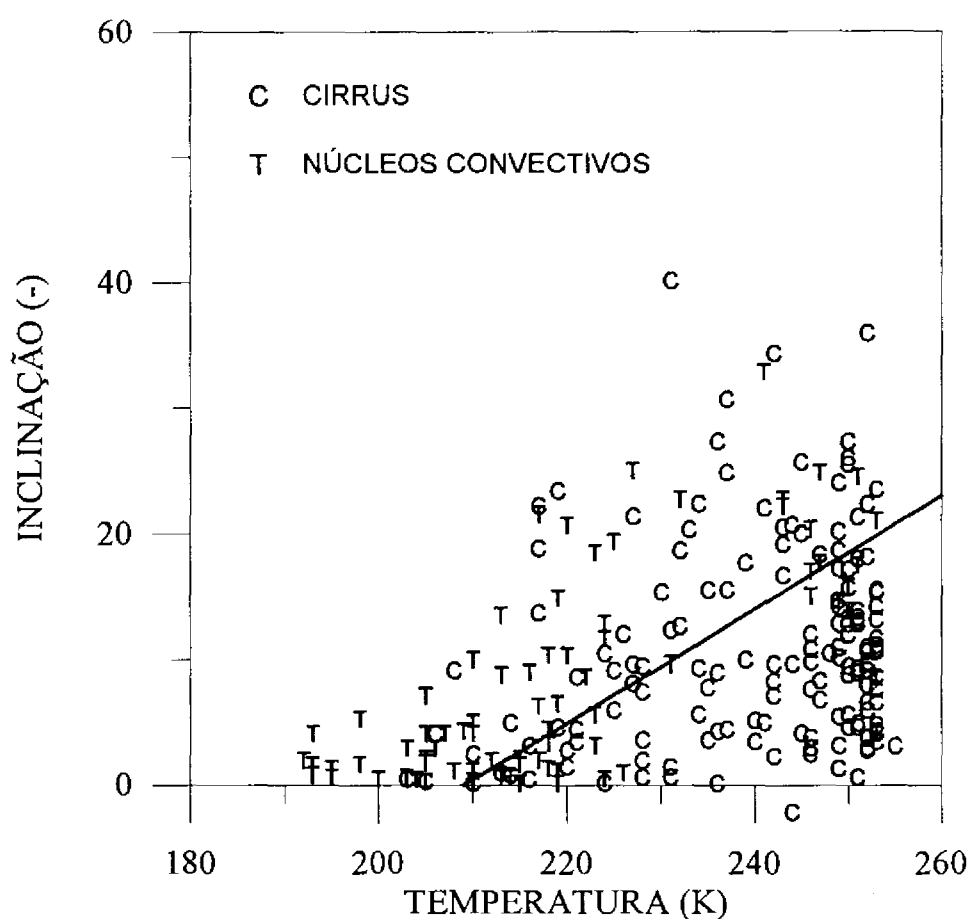


Fig. 4.3 - Distribuição espacial dos pontos utilizado no cálculo da equação discriminante.

TABELA 4.1 - EQUAÇÕES DISCRIMINANTES ENCONTRADAS NOS ESTUDOS DESENVOLVIDOS EM SÃO PAULO, FLORIDA E JAPÃO

LOCAL	EQUAÇÃO	FONTE
Flórida(EUA)	$S = 0,56 (T-217)$	Adler e Negri (1988)
Japão	$S = 2 (T-217)$	Negri e Adler (1993)
São Paulo	$S = 0,47 (T-209)$	Scofield (1994) ¹

1 - Equação elaborada neste trabalho pela autora (pág. 39).

Os resultados da Tabela 4.1 mostram que o coeficiente angular da reta para a região de São Paulo é 19% menor que o coeficiente angular da reta encontrada para a Flórida e aproximadamente 325% menor que àquele proposto para o Japão. Esta diferença pode estar associada à não utilização de dados do sensor SSM/I (Seção 2.4.4) para a região de São Paulo. Este sensor, que opera na frequência de 86 GHz, fornece dados mais apropriados para discriminar os pontos de chuva dos de não chuva.

Com relação ao coeficiente linear das equações propostas, nota-se que o valor encontrado para São Paulo (209 K) é menor que aquele sugerido por Adler e Negri (1988) e Negri e Adler (1993), 217 K. Esta diferença pode estar associada ao fato de os topos dos núcleos convectivos atingirem maiores altitudes nos trópicos.

4.4 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO DE SÃO PAULO

Objetivando contrastar os resultados obtidos pela aplicação da CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉, as estimativas de precipitação obtidas através destas técnicas foram todas colocadas na mesma resolução espacial e no mesmo sistema de coordenadas dos dados do radar de Ponte Nova. As Figuras 4.4a e 4.4b mostram as imagens de satélite meteorológico e as correspondentes estimativas de precipitação obtidas pelo radar, pelas técnicas CST, pela CST₂₂₅ e pela CST₂₂₉, os dias 19/12/93 às 18:30 HL e do dia 28/12/93 às 19:30 HL, respectivamente. As imagens foram realçadas com cores falsas para destacar a atividade convectiva e a precipitação associada. Pode-se notar que os núcleos convectivos (representados em magenta na imagem de satélite) são relativamente bem reproduzidos pelas três técnicas aplicadas (CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉), nas duas imagens exemplo.

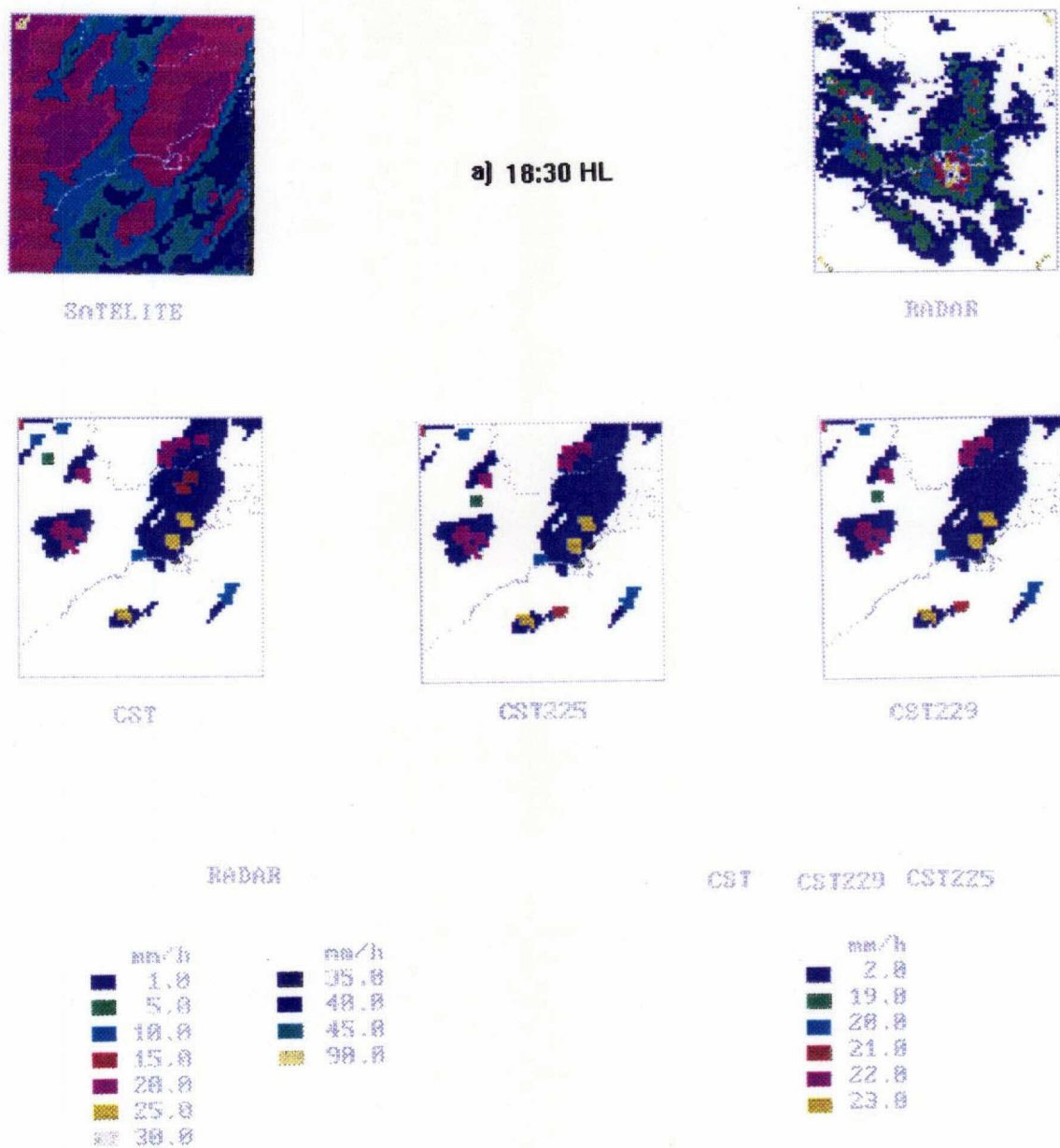


Fig. 4.4 - (a) Imagem de satélite do dia 19/12/93 às 18:30 HL e as correspondentes estimativas de precipitação obtidas pelo radar e pelas técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉.

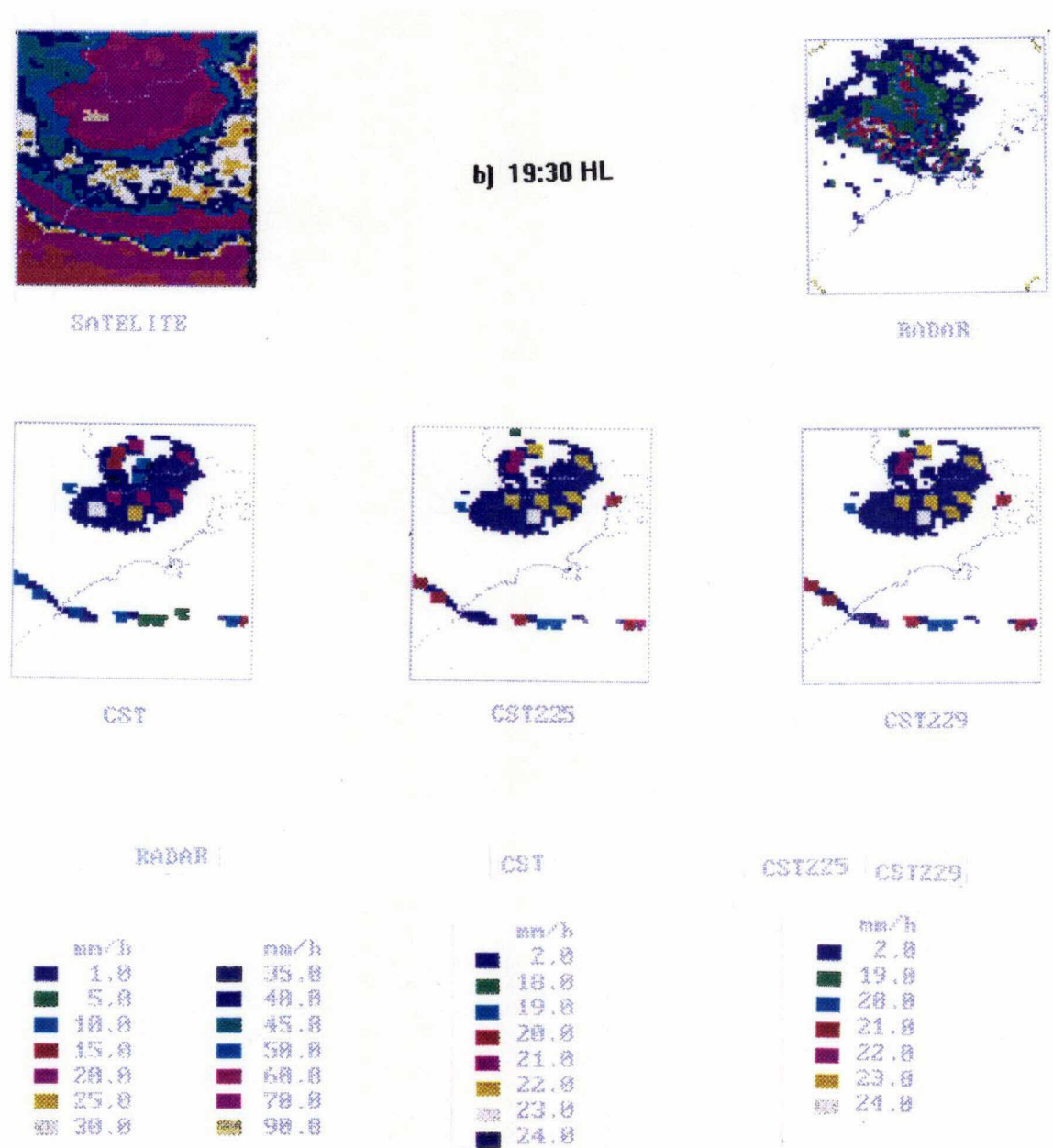


Fig. 4.4 - (b) ídem a (a), para a imagem adquirida em 28/12/93 às 19:30 HL.

A seguir são mostrados os resultados das diversas medidas utilizadas (RMSE, correlação, Tendência e teste-t) para avaliar o desempenho das técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉. A apresentação é feita separadamente para os dados horários e diários.

4.4.1 - RAIZ QUADRADA DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (RMSE)

a) Horária

A Figura 4.5 apresenta a distribuição dos valores do RMSE para as 21 imagens estudadas, obtidos para as técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉, com relação ao radar.

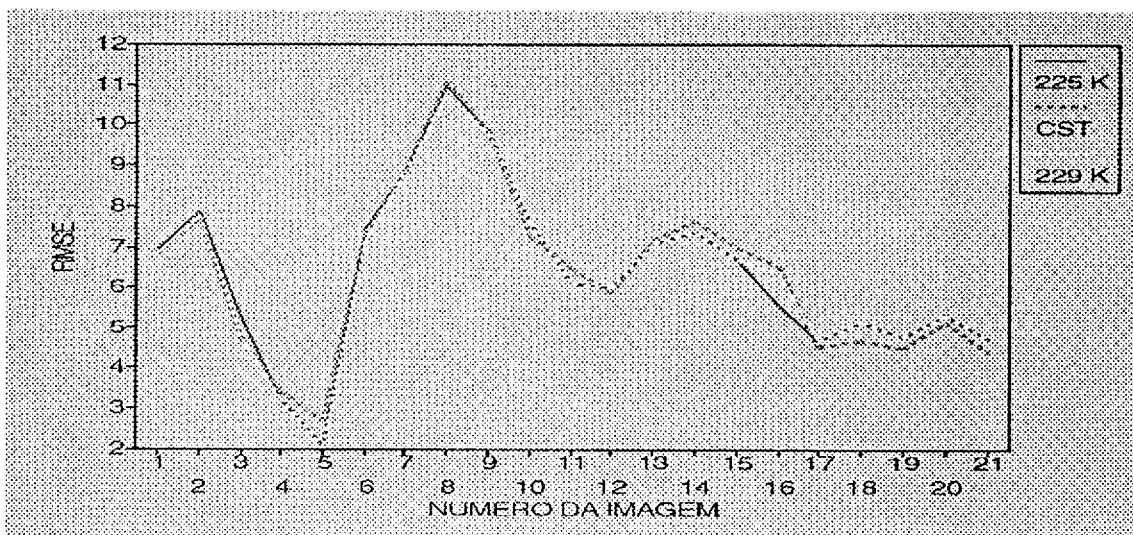


Fig. 4.5 - Comparação do RMSE das três técnicas em estudo: CST; CST₂₂₅ e CST₂₂₉

Para associar cada imagem estudada ao número da imagem encontrado no eixo x da Figura 4.5, foi criada a Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - NÚMEROS DAS IMAGENS UTILIZADAS NO TRABALHO

NÚMERO DA IMAGEM	DIA	I M A G E M MÊS	HORA
1	10	12	16
2	10	12	17
3	10	12	18
4	17	12	16
5	17	12	17
6	19	12	16
7	19	12	17
8	19	12	18
9	19	12	19
10	19	12	20
11	19	12	21
12	28	12	16
13	28	12	17
14	28	12	18
15	28	12	19
16	28	12	20
17	29	12	16
18	29	12	17
19	29	12	18
20	29	12	19
21	29	12	20

A análise visual dos resultados mostra que há pouca diferença entre os valores de RMSE para os algoritmos CST₂₂₅ e CST₂₂₉. Os três algoritmos têm um comportamento bastante semelhante, diretamente proporcional à incidência de chuva. Note-se que os menores valores (obtidos nas datas 17/12 e 29/12) estão associados à menor incidência de chuva, enquanto os maiores (obtidos em 19/12) estão associados à maior incidência de chuva.

b) Diária

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de RMSE obtidos para: radar x CST; radar x CST₂₂₅; radar x CST₂₂₉; CST x CST₂₂₅; CST x CST₂₂₉; e, CST₂₂₅ x CST₂₂₉.

TABELA 4.3 - VALORES DE RMSE OBTIDOS PARA AS ESTIMATIVAS DE RADAR E DAS TÉCNICAS

Técnica	RMSE (mm)
RADAR x CST	55,30
RADAR x CST ₂₂₅	56,34
RADAR x CST ₂₂₉	56,02
CST x CST ₂₂₅	8,66
CST x CST ₂₂₉	10,13
CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	5,63

Observa-se que as três técnicas (CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉) apresentam resultados muito semelhantes entre si, quando se utiliza o radar como referência. As estimativas obtidas pela CST₂₂₅ se assemelham bastante àquelas obtidas pela CST₂₂₉. O desempenho das técnicas para esta medida são consistentes e apresentam um baixo desempenho enquanto estimadores de precipitação, tomando os dados de radar como referência.

4.4.2 - CORRELAÇÃO

Foram calculadas as correlações entre as estimativas de precipitação fornecidas pelo radar e aquelas obtidas pela implementação das técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉. Estas correlações foram calculadas para os dados horários e diários.

a) Horária

As Figuras 4.6 a 4.8 apresentam os histogramas das correlações entre as estimativas de precipitação fornecidas pelo radar e aquelas obtidas através das técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉, respectivamente.

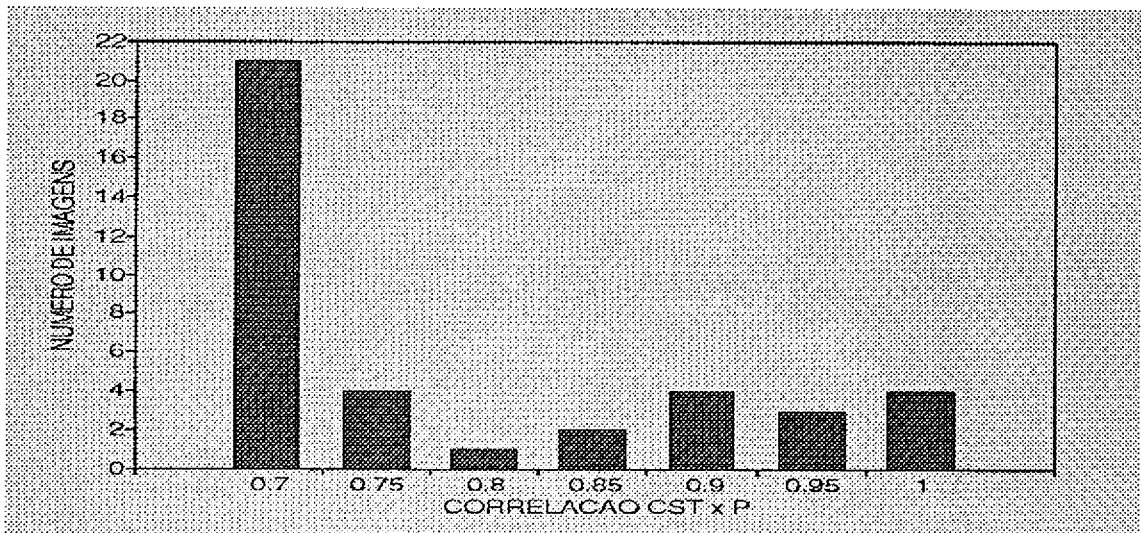


Fig. 4.6 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST.

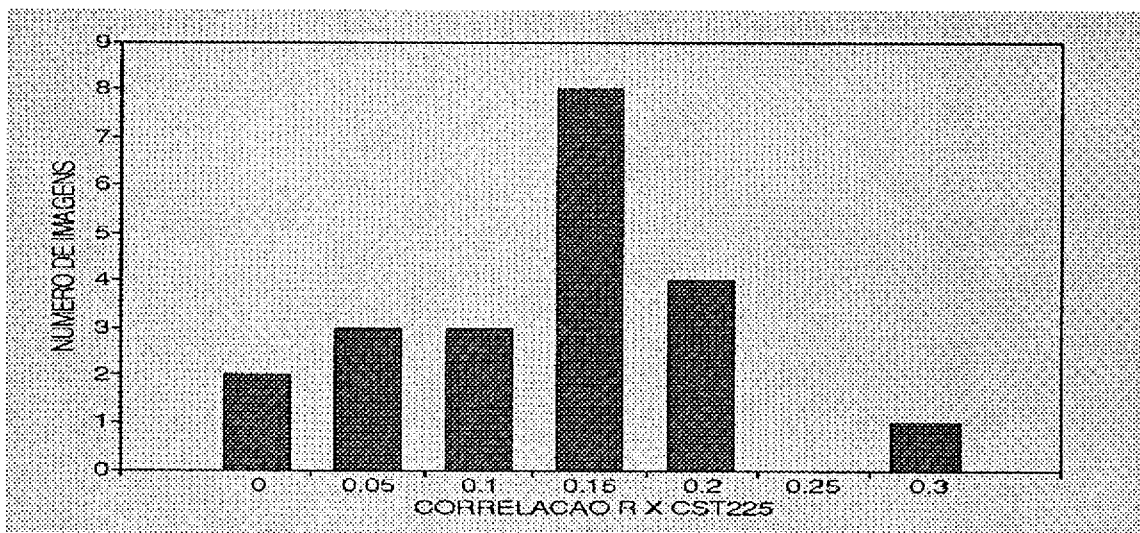


Fig. 4.7 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST₂₂₅.

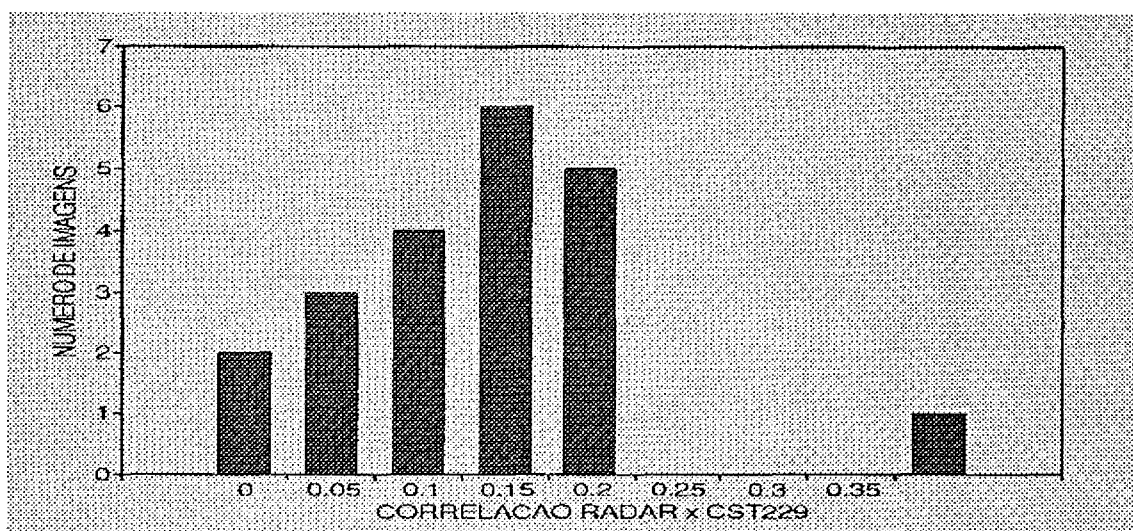


Fig. 4.8 - Histograma das correlações entre os dados de radar e as estimativas de precipitação obtidas através da técnica CST₂₂₉

Nota-se pelos histogramas apresentados nas Figuras 4.6 a 4.8 que há uma baixa correlação entre as estimativas fornecidas pelo radar e aquelas obtidas pelas técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉. Por exemplo, 71% das 21 imagens analisadas apresentaram correlação radar x CST e radar x CST₂₂₅ menor que 0.2, enquanto que 95% das imagens apresentaram correlação radar x CST₂₂₉ menor que 0.2. Isto aponta para um baixo desempenho das três técnicas aqui utilizadas, tendo-se as estimativas de radar como verdade terrestre.

Os histogramas das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas técnicas CST e CST₂₂₅; CST e CST₂₂₉; e, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ são apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.11.

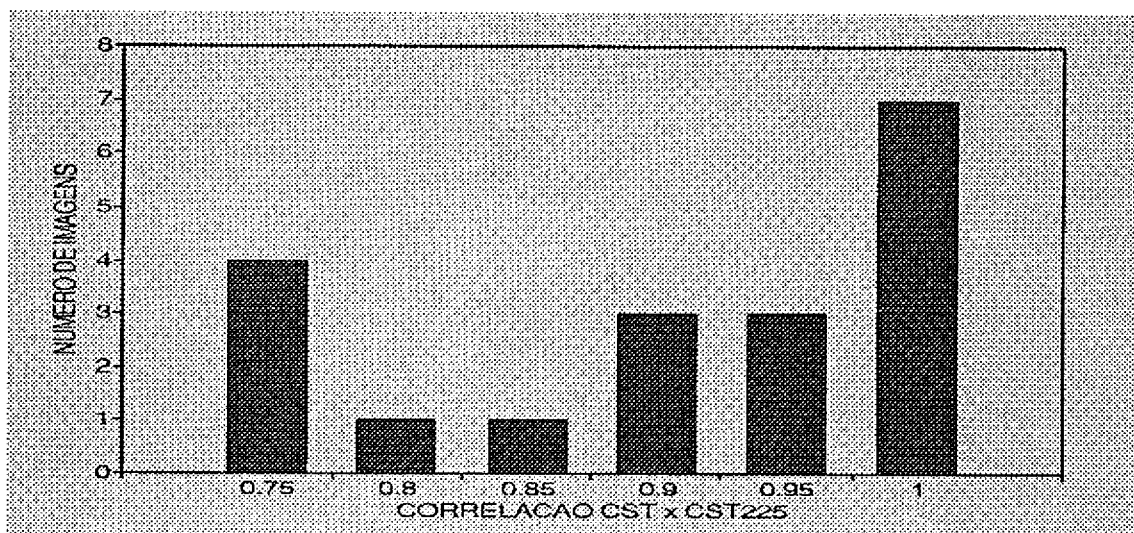


Fig. 4.9 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST e CST₂₂₅

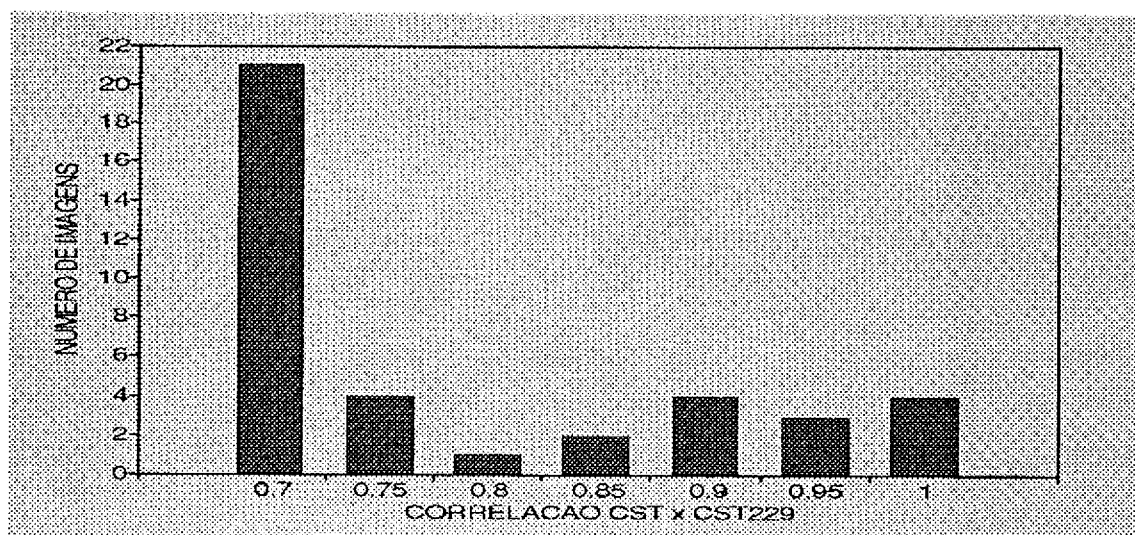


Fig. 4.10 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST e CST₂₂₉

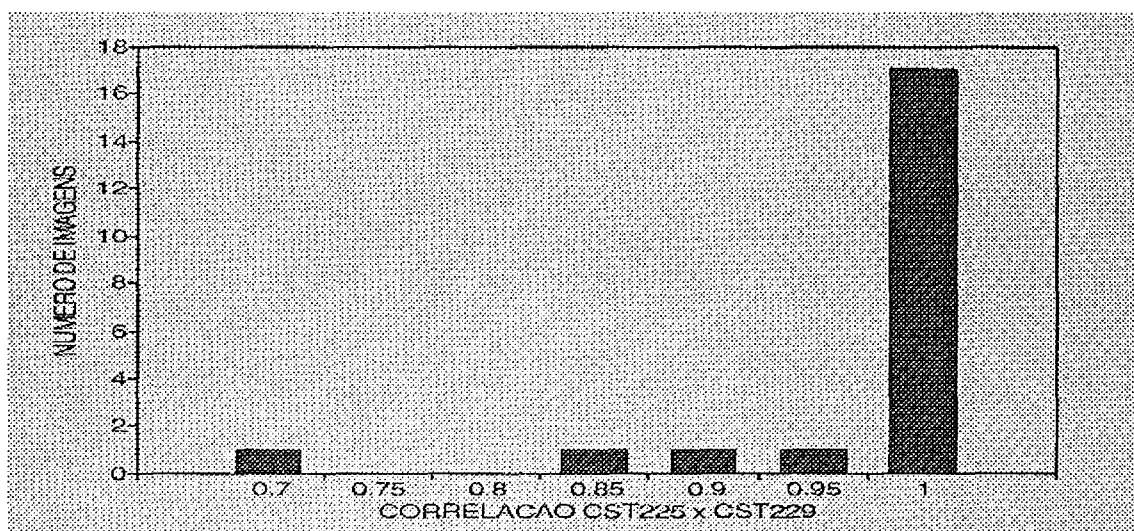


Fig. 4.11 - Histograma das correlações entre as estimativas de precipitação obtidas pelas CST₂₂₅ e CST₂₂₉

Os histogramas nas Figuras 4.9 a 4.11 mostram que há uma correlação muito boa entre as estimativas de precipitação fornecidas pelas diferentes técnicas. Note a altíssima correlação entre as estimativas fornecidas pela CST₂₂₅ e CST₂₂₉, indicando uma grande concordância de resultados e uma possível "insensibilidade" das estimativas à mudanças na temperatura limiar.

A Tabela 4.4 apresenta as médias aritméticas das correlações horárias das estimativas obtidas pelo radar e pelas técnicas implementadas, e entre estas técnicas.

TABELA 4.4 - MÉDIAS DAS CORRELAÇÕES HORÁRIAS DAS ESTIMATIVAS DE RADAR E DAS TÉCNICAS

Técnica	Correlação
RADAR x CST	0,111
RADAR x CST ₂₂₅	0,109
RADAR x CST ₂₂₉	0,115
CST x CST ₂₂₅	0,800
CST x CST ₂₂₉	0,800
CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	0,967

b) Diária

Na Tabela 4.5 são apresentadas as correlações diárias entre as estimativas de radar e as técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉, e entre estas técnicas.

TABELA 4.5 - MÉDIAS DAS CORRELAÇÕES DIÁRIAS ENTRE AS ESTIMATIVAS DE RADAR E DAS TÉCNICAS

Técnica	Correlação
RADAR x CST	0,272
RADAR x CST ₂₂₅	0,248
RADAR x CST ₂₂₉	0,255
CST x CST ₂₂₅	0,895
CST x CST ₂₂₉	0,857
CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	0,957

As correlações mais altas obtidas para os dados diários, em relação aos dados horários, estão em concordância com os resultados em Negri e Adler (1993).

A alta correlação observada entre CST_{225} e CST_{229} (0,967, horária; 0,957, diária) indica um alto grau de relação entre os resultados obtidos através dessas duas técnicas, sugerindo que a temperatura limiar de 225 ou 229 K não altera significativamente as estimativas de precipitação obtidas por uma ou outra. Por outro lado, as baixas correlações observadas entre radar e CST (0,272), radar e CST_{225} (0,248) e radar e CST_{229} (0,255) indicam que a estimativa de precipitação obtidas através da técnica CST (modificada ou não) não são eficientes, tendo os dados de radar como verdade terrestre.

4.4.3 - TENDÊNCIA

a) Horária

A Figura 4.12 apresenta a distribuição dos valores de Tendência obtidas para as 21 imagens estudadas (na Tabela 4.2 estão apresentadas a associação dos números presentes na Figura 4.12 e as imagens), através da aplicação dos três algoritmos aqui considerados (CST, CST_{225} e CST_{229}) e tendo as estimativas de radar como referência.

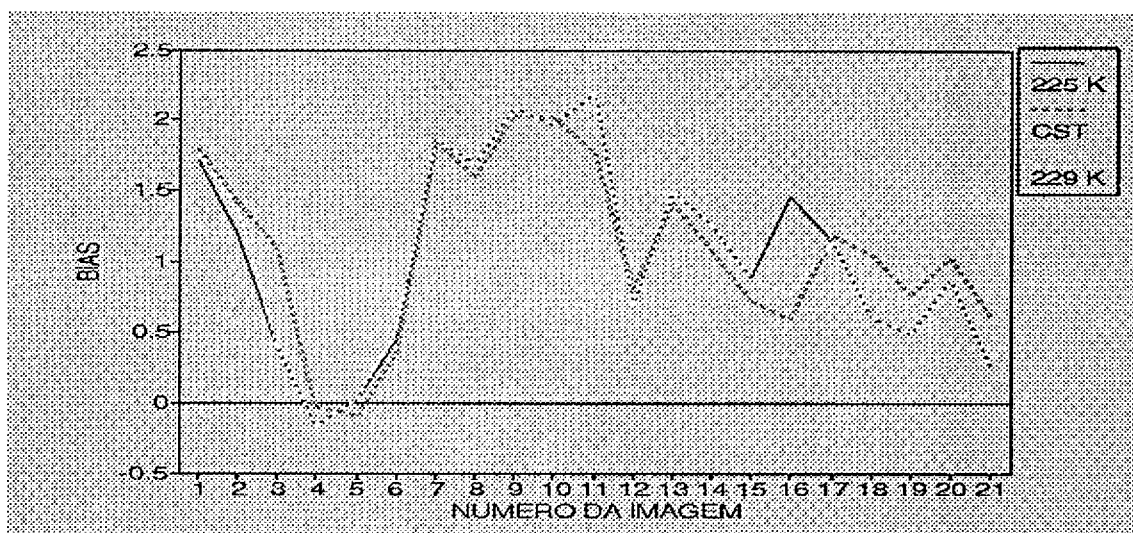


Fig. 4.12 - Valores da Tendência obtidas para as técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉

A análise dos dados revela que os valores de Tendências obtidos para as técnicas CST₂₂₅ e CST₂₂₉ são muito semelhantes, ou seja, as técnicas apresentam um desempenho bastante semelhante também para esta medida.

Os resultados obtidos para a Tendência corroboram aqueles fornecidos pela outra medida, a saber, correlação e RMSE.

b) Diária

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de Tendência utilizando as estimativas das técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ para as imagens diárias, tendo as estimativas de radar como referência. Os valores de Tendência são também fornecidos para as estimativas obtidas através das diferentes técnicas.

TABELA 4.6 - VALORES DE TENDÊNCIA OBTIDOS ENTRE AS ESTIMATIVAS DE RADAR E DAS TÉCNICAS

Técnica	Tendência (mm)
RADAR x CST	22,09
RADAR x CST ₂₂₅	23,53
RADAR x CST ₂₂₉	22,51
CST x CST ₂₂₅	-1,43
CST x CST ₂₂₉	-1,10
CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	0,43

Como nas medidas anteriores, os valores de Tendência indicam uma certa homogeneidade dos resultados obtidos pelas diferentes técnicas, mas especificamente entre CST₂₂₅ e CST₂₂₉, assim como uma certa discrepância entre as estimativas de radar e as produzidas pelas três técnicas investigadas.

4.4.4 - TESTE T-STUDENT DA DIFERENÇA ENTRE MÉDIAS EMPARELHADAS

a) Horária

As Figuras 4.13 a 4.15 apresentam os histogramas dos valores t de Student encontrados para os seguintes pares de dados: radar x CST; radar x CST₂₂₅; e, radar x CST₂₂₉, para as 21 imagens analisadas.

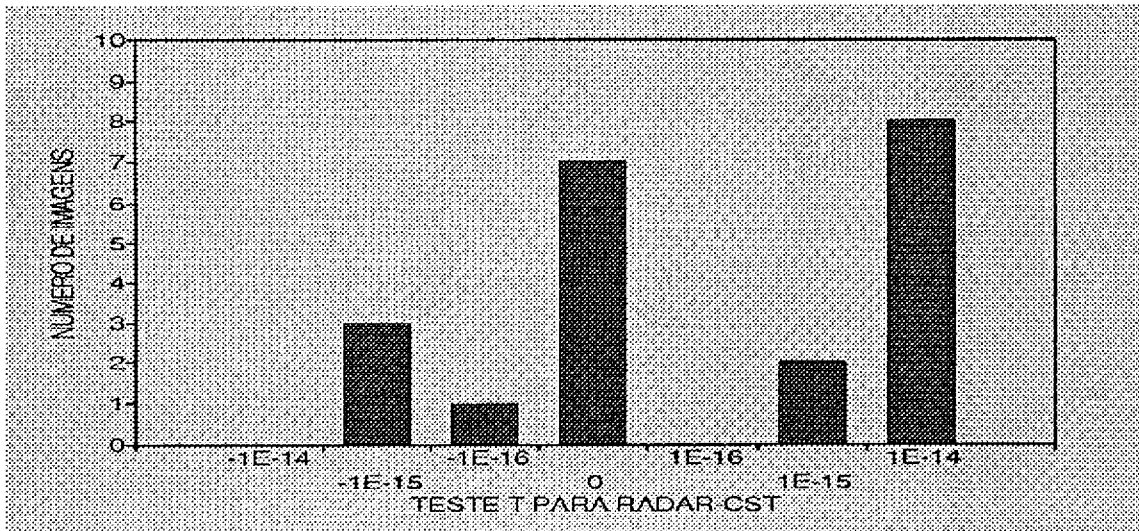


Fig. 4.13 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST

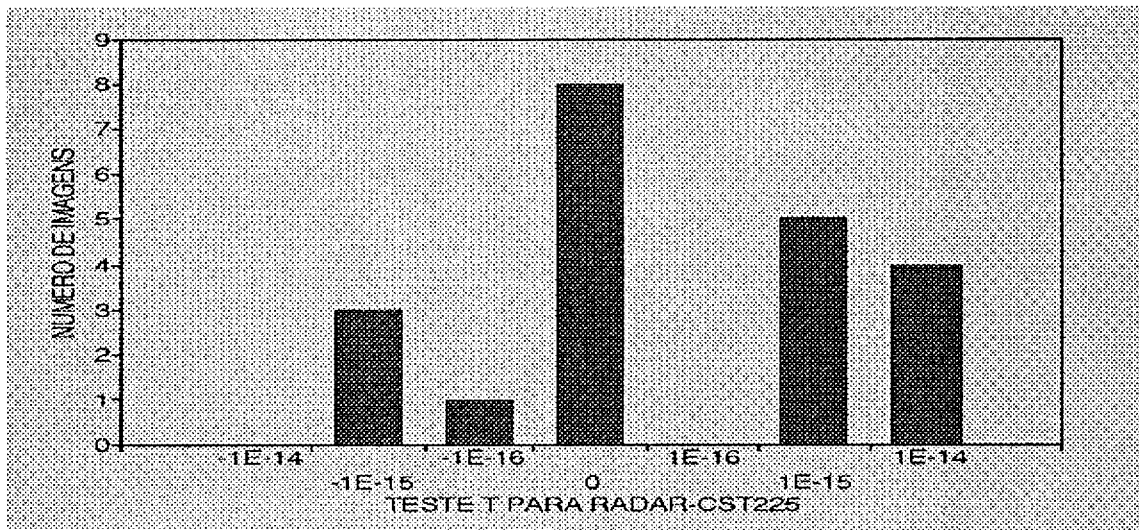


Fig. 4.14 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST₂₂₅

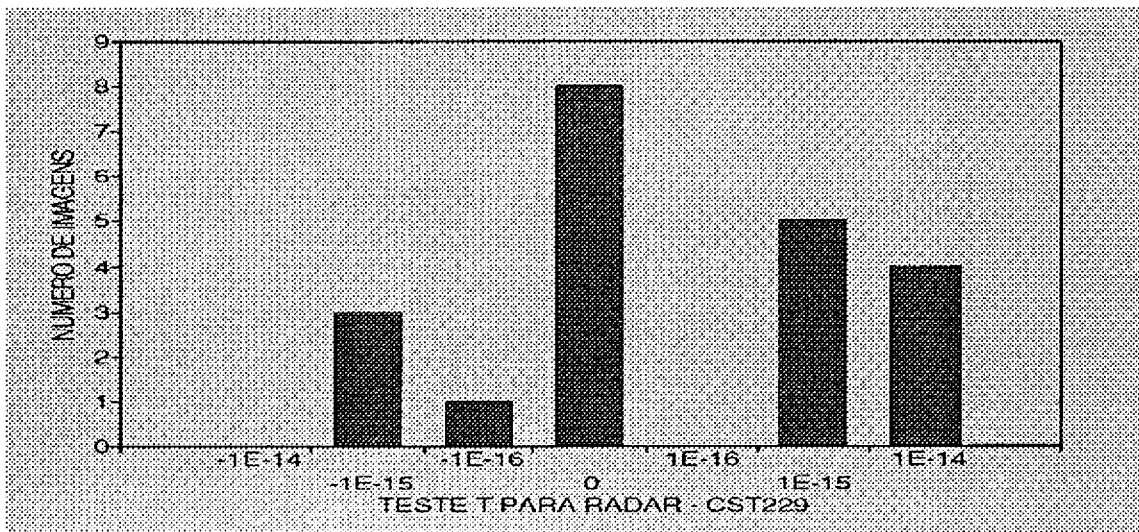


Fig. 4.15 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas radar x CST₂₂₉

Note-se que os valores t obtidos são todos altamente significativos, indicando que há diferença significativa entre as estimativas obtidas pelo radar e pelas técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉. Os testes unilaterais do tipo $H_0: E(M_d)=0$ versus $H_1: E(M_d) > 0$ levam à rejeição da hipótese nula, indicando que as estimativas obtidas pelas três técnicas subestimam as estimativas de precipitação obtidas pelo radar.

As Figuras 4.16 a 4.18 apresentam os valores t de Student obtidos para os pares de dados: CST x CST₂₂₅; CST x CST₂₂₉; e, CST₂₂₅ x CST₂₂₉ para as 21 imagens analisadas.

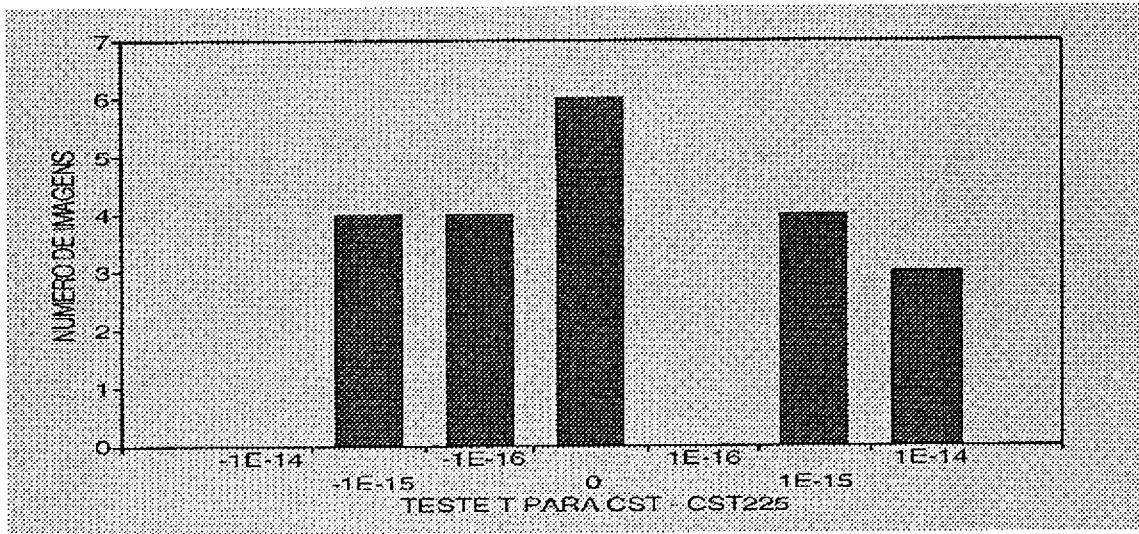


Fig. 4.16 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas CST x CST₂₂₅

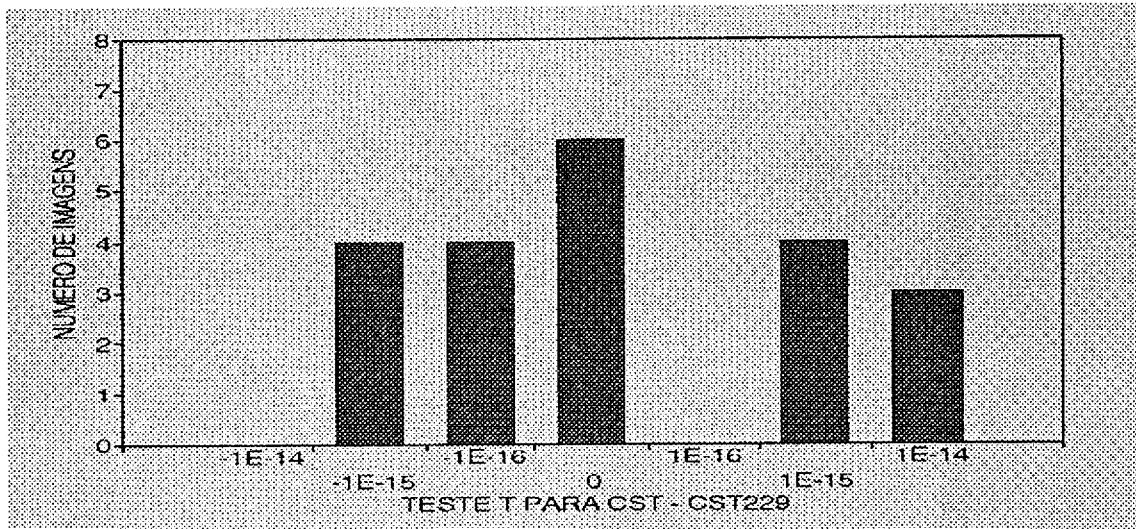


Fig. 4.17 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas CST x CST₂₂₉

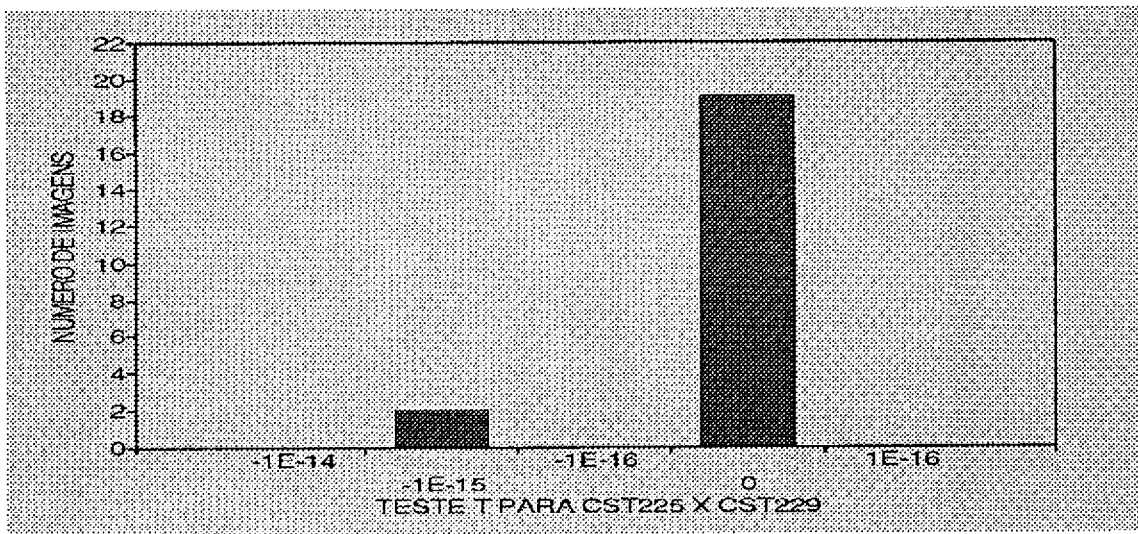


Fig. 4.18 - Histograma dos valores t de Student para o par de estimativas CST₂₂₅ x CST₂₂₉

A análise dos resultados mostra que há diferença significativa entre as estimativas obtidas pelas técnicas modificadas (CST₂₂₅ e CST₂₂₉) e a técnica originalmente proposta por Adler e Negri (CST). Por outro lado, as estimativas obtidas pela CST₂₂₅ e CST₂₂₉ não são significativas ao nível de significância de 5%, indicando, mais uma vez, que as estimativas obtidas pelas duas técnicas são bastante semelhantes.

b) Diária

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados do teste t de Student para os pares de dados diários: radar x CST, radar x CST₂₂₅, radar x CST₂₂₉, CST x CST₂₂₅, CST x CST₂₂₉, e CST₂₂₅ x CST₂₂₉.

TABELA 4.7 - VALORES T DE STUDENT PARA OS PARES DE DADOS DE RADAR, CST, CST₂₂₅ E CST₂₂₉

PAR	VALOR T
RADAR x CST	33,01
RADAR x CST ₂₂₅	35,00
RADAR x CST ₂₂₉	33,38
CST x CST ₂₂₅	1,22
CST x CST ₂₂₉	1,45
CST ₂₂₅ x CST ₂₂₉	-1,29

4.4.5 - MÉDIA DOS DADOS DE RADAR

a) Horária

A Tabela 4.8 mostra os valores das médias das estimativas horárias de precipitação obtidas pelo radar, assim como os valores de RMSE/média do radar e Tendência/média do radar.

TABELA 4.8 - MÉDIAS DE PRECIPITAÇÃO DO RADAR

IMAGEM (dd.mm.hh)	MÉDIA (mm)	RMSE/MÉDIA			TENDÊNCIA/MÉDIA		
		CST	CST ₂₂₅	CST ₂₂₉	CST	CST ₂₂₅	CST ₂₂₉
10.12.16	2,19	3,12	3,13	3,17	0,81	0,80	0,78
10.12.17	2,36	3,25	3,28	3,33	0,60	0,58	0,50
10.12.18	1,56	3,00	3,01	3,34	0,70	0,71	0,26
17.12.16	0,43	7,72	10,45	10,45	0,06	0,52	0,52
17.12.17	0,22	11,95	9,12	9,12	0,44	0,08	0,08
19.12.16	1,43	5,11	4,95	5,16	0,24	0,30	0,30
19.12.17	2,31	3,81	3,81	3,81	0,79	0,79	0,79
19.12.18	3,03	3,65	3,62	3,62	0,52	0,56	0,56
19.12.19	2,96	3,32	4,69	4,69	0,68	0,70	0,70
19.12.20	2,79	2,59	2,71	2,71	0,72	0,70	0,70
19.12.21	2,23	2,90	2,73	2,73	0,78	0,98	0,98
28.12.16	1,73	3,37	3,46	3,46	0,46	0,40	0,40
28.12.17	2,39	2,98	2,94	2,94	0,59	0,62	0,62
28.12.18	2,45	3,10	2,98	2,98	0,44	0,50	0,50
28.12.19	2,23	3,12	2,99	2,99	0,32	0,40	0,40
28.12.20	2,10	3,09	2,63	2,63	0,27	0,69	0,69
29.12.16	1,35	3,34	3,58	3,58	0,87	0,84	0,84
29.12.17	1,43	3,26	3,58	3,58	0,73	0,42	0,42
29.12.18	1,32	3,37	3,58	3,58	0,57	0,37	0,37
29.12.19	1,59	3,22	3,34	3,34	0,44	0,55	0,55
29.12.20	1,15	3,76	4,05	4,05	0,53	0,22	0,22

A Tabela 4.9 apresenta os valores da relação RMSE/média do radar e Tendência/média do radar para cada uma das técnicas.

TABELA 4.9 - RELAÇÕES HORÁRIAS DE RMSE/MÉDIA E TENDÊNCIA/MÉDIA

PAR	RMSE/MÉDIA	TENDÊNCIA/MÉDIA
RADAR X CST	395%	55%
RADAR X CST ₂₂₅	388%	54%
RADAR X CST ₂₂₉	352%	53%

Os valores de RMSE/média do radar reportados por Negri e Adler (1993) para o Japão estão compreendidos entre 200 e 300 %. Aqui, esse valor está em torno de 400 % para a CST e CST₂₂₅ e 350% para a técnica CST₂₂₉. Entretanto, os valores da Tendência/média do radar é de 100% enquanto neste estudo os valores para as três técnicas se encontram em torno de 55%.

b) Diária

A Tabela 4.10 apresenta um resumo dos valores médios da relação RMSE/média e Tendência/média do radar para cada uma das técnicas.

TABELA 4.10 - RELAÇÕES DIÁRIAS DE RMSE/MÉDIA E TENDÊNCIA/MÉDIA

PAR	RMSE/MÉDIA	TENDÊNCIA/MÉDIA
RADAR X CST	141%	56%
RADAR X CST ₂₂₅	144%	60%
RADAR X CST ₂₂₉	143%	58%

Negri e Adler (1993) obtiveram valores de RMSE/média em torno de 200% para o Japão, utilizando a técnica CST. Aqui, os valores encontrados para as técnicas original e adaptadas estão em torno de 145 %. Com relação aos valores de Tendência/média do radar, Negri e Adler (1993) encontraram valores em torno de 50 %, enquanto neste trabalho são apresentados valores em torno de 58%.

4.4.6 - EFEITO DE DISTÂNCIA

Na comparação entre as estimativas de radar e as técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ foi notada,

principalmente, a presença de erros referentes ao efeito de distância. Foram estudadas as várias medidas (RMSE, tendência e correlação) na comparação da técnica radar x CST₂₂₉ para as distâncias de 80 e 30 Km do radar.

A seguir são mostrados os resultados das diversas medidas mencionadas acima para as distâncias de 80 e 30 Km do radar. A apresentação é feita separadamente para os dados horários e diários.

a) Horária

A Tabela 4.11 apresenta os valores de RMSE, correlação (CORR), Tendência (TEND) e média do radar para as distâncias (DIST) de 30, 80 e 180 Km na comparação das estimativas de precipitação entre os dados de radar e da CST₂₂₉.

TABELA 4.11 - MEDIDAS ESTATÍSTICAS HORÁRIAS DA COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE RADAR E CST₂₂₉

DIST (Km)	Nº DE IMAGENS	RMSE (mm)	CORR (-)	TEND (mm)	MÉDIA RADAR (mm)	RMSE ---- MÉDIA	TEND ---- MÉDIA
30	17	11,0	0,20	-6,7	5,8	189	116
80	19	9,0	0,15	-4,0	4,6	194	86
180	21	6,4	0,11	-1,1	1,9	350	53

Nota-se que quanto menor a distância do radar, maior é a correlação e os valores do RMSE e da Tendência (em valor absoluto) entre os dados de radar e da CST₂₂₉. Desta forma, procede a hipótese do desempenho da técnica ser inversamente proporcional a distância de afastamento do local de instalação do radar.

Comparando-se os valores da relação RMSE/Média e Tendência/Média encontrados em Negri e Adler

(1993) (200-300% e 100%, respectivamente) às encontradas na Tabela 4.11 para as distâncias de 30 e 80 Km, pode-se dizer que estes valores estão dentro desta faixa propostas pelos autores. Já comparando-os os valores encontrados para a distância de 180 Km, observa-se um decréscimo na relação RMSE/Média e um aumento na relação Tendência/Média.

b) Diária

A Tabela 4.12 apresenta os valores de RMSE, correlação, Tendência e média do radar para as distâncias de 30 e 80 Km na comparação das estimativas de precipitação entre os dados de radar e da CST₂₂₉.

TABELA 4.12 - MEDIDAS ESTATÍSTICAS DIÁRIAS DA COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE RADAR E CST₂₂₉

DIST (Km)	Nº DE IMAGENS	RMSE (mm)	CORR (-)	TEND (mm)	MÉDIA RADAR (mm)	RMSE ---- MÉDIA	TEND ---- MÉDIA
30	17	149,0	0,41	-138	150	160	89
80	19	99,0	0,37	- 79	98	103	81
180	21	56,0	0,25	- 22	39	143	58

Na comparação das medidas encontradas para as estimativas de precipitação diárias, nota-se um aumento da correlação e dos valores de RMSE e da Tendência (em valor absoluto) entre os dados de radar e da CST₂₂₉. Desta forma, procede a hipótese do desempenho da técnica ser inversamente proporcional a distância de afastamento do local de instalação do radar, como também foi notado na estimativa de precipitação diária.

Comparando-se os valores das relações RMSE/Média e Tendência/Média encontrados na Tabela 4.12 com àqueles encontrados em Negri e Adler (1993) (200% e 50%, respectivamente) e posteriormente com àqueles encontrados

na Tabela 4.10, nota-se, em ambos os casos, uma diminuição na relação RMSE/Média e um aumento na relação Tendência/Média.

O teste t foi aplicado para as estimativas diárias e horárias. Notou-se que os valores t para estimativa horária são altamente significativos, indicando que há diferença significativa entre as estimativas obtidas pelo radar e a técnica CST₂₂₉, como ocorreu anteriormente para a estimativa horária. Este teste também indicou que as estimativas pela CST₂₂₉ sub-estimam as estimativas de precipitação obtidas pelo radar.

4.4.7 - TESTE DE SENSIBILIDADE DE TEMPERATURA

Com o objetivo de investigar se a temperatura limiar afeta significativamente as estimativas de precipitação, realizou-se um teste de sensibilidade nas imagens dos dias 29/12/93 e 19/12/93, ambas referentes às 18:30 HL.

A Figura 4.19 apresenta os valores de RMSE obtidos com a utilização das equações discriminantes da Tabela 4.1 (Negri e Adler, 1993; Scofield, 1994). As temperaturas investigadas estavam contidas no intervalo 210 a 240 K, variando de 5 K.

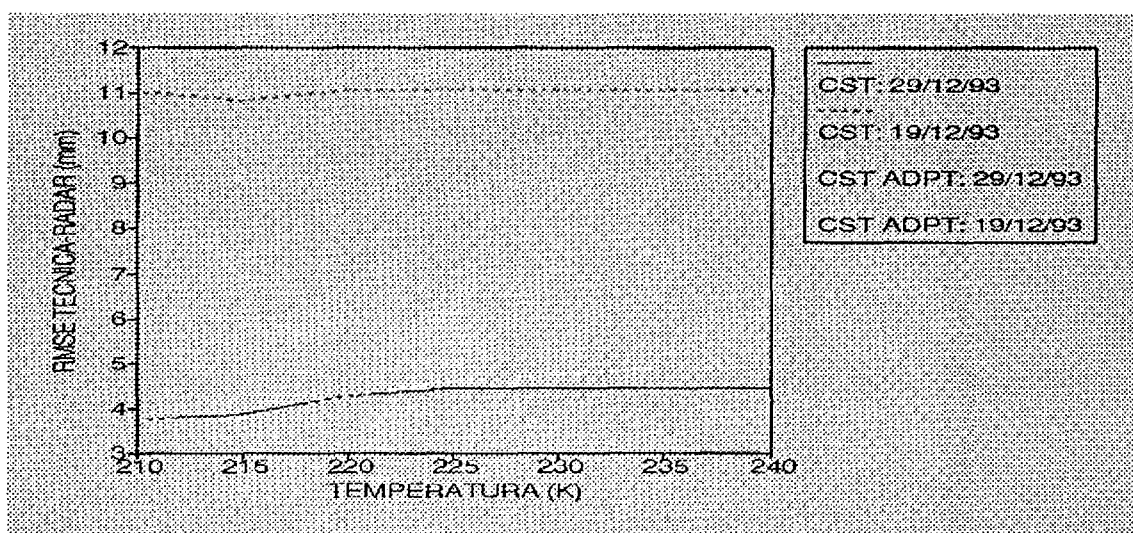


Fig. 4.19 - Variação dos valores de RMSE para temperaturas no intervalo de 210 a 240. K

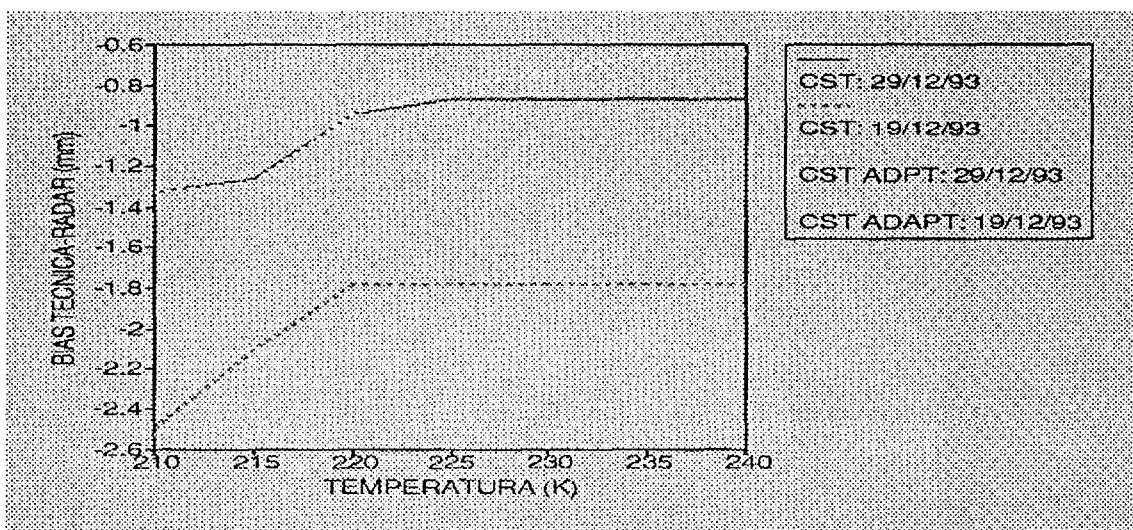


Fig. 4.20 - Variação dos valores da Tendência para temperaturas no intervalo de 210 a 240. K

Na imagem do dia 19/12, os valores de RMSE para a técnica CST adaptada (temperatura variável) são bastante próximos daqueles obtidos para a CST original, para temperatura maior que 215 K, sendo que a técnica adaptada consistentemente fornece valores menores que a técnica original. Já no dia 29/12, esta tendência não se

verifica, sendo os valores de RMSE bastante semelhantes para a CST original e adaptada para temperaturas menores que 225 K, e maiores para a CST adaptada quando a temperatura for maior que 225 K. Note, entretanto, que há maior incidência de núcleos convectivos na imagem do dia 19/12 que na de 29/12 (ver Tabela 4.6), ocasionando valores bem diferenciados de RMSE nas duas imagens, para todas as técnicas aplicadas.

A Figura 4.20 mostra o gráfico da variação dos valores de Tendência (Tendência) com a variação da temperatura, no mesmo intervalo de temperatura estudado para o RMSE. Nota-se que para a imagem do dia 29/12, e para temperaturas inferiores a 225 K, as técnicas CST original e adaptadas fornecem valores praticamente idênticos, enquanto que para temperaturas superiores a 225 K, a técnica CST se estabiliza, enquanto as técnicas adaptadas fornecem valores crescentes de Tendência. Para a imagem do dia 19/12, as técnicas adaptadas fornecem consistentemente valores menores de Tendência que a técnica original.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho tem como objetivo geral implementar uma técnica para estimar precipitação sobre a região Sudeste do Brasil, utilizando-se imagens transmitidas pelo satélite meteorológico METEOSAT. Embora atualmente existam diversas metodologias para este fim, optou-se pela técnica CST (Convective Stratiform Technique), porque esta foi originalmente desenvolvida para estimar precipitação essencialmente de natureza convectiva, como é o caso da região Sudeste.

A implementação da CST para a região de São Paulo envolveu a definição de uma nova temperatura limiar nas imagens infravermelho, para separação de áreas de chuva e não chuva e o cálculo da equação discriminante entre núcleos convectivos e nuvens cirrus. Isto foi feito porque a técnica CST foi originalmente desenvolvida para condições atmosféricas (temperatura, umidade, movimentos verticais, etc.), diferentes daqueles que ocorrem no Brasil.

O desempenho da CST adaptada foi avaliado com as estimativas simultâneas de precipitação obtidas pelo radar meteorológico de Ponte Nova (São Paulo), para um raio de aproximadamente 180 Km.

As medidas utilizadas para estudar o desempenho das técnicas foram: RMSE, Tendência e correlação. Os resultados obtidos para as análises horárias com relação a CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ comparados com os dados de radar são RMSE: 6,35 mm, 6,34 mm e 6,32 mm; Tendência: 1,1 mm, 1,1 mm e 1,1 mm; e, correlação: 0,111, 0,112 e 0,115, respectivamente. No caso das estimativas diárias com relação a CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ versus radar

obtêm-se 55,3 mm, 56,2 mm e 56,3mm (RMSE); 0,27, 0,25 e 0,25 (correlação); e, 22,09 mm, 22,51 mm e 23,53 mm (Tendência), respectivamente. Estes resultados, como esperado, mostram que as estimativas diárias são melhores que as horárias.

As três técnicas CST, CST₂₂₅ e CST₂₂₉ apresentam um desempenho similar para as medidas realizadas de RMSE, Tendência e correlação. Com relação à CST, a Tendência caracteriza melhor o desempenho da técnica que o RMSE.

Os resultados encontrados para CST₂₂₉ apresentam melhor desempenho que a CST₂₂₅ para as medidas investigadas. Entretanto, o desempenho é somente marginalmente melhor, podendo-se indicar a temperatura de 229 K como uma temperatura limiar adequada para a região de estudo.

Os testes de sensibilidade indicam um comportamento pouco diferenciado das técnicas com as variações de temperatura. Entretanto, esta observação depende da medida que está sendo investigada. A RMSE aparenta ser a medida menos sensível a variações de temperatura que a Tendência.

Devido a possíveis problemas de bordas nas medidas de precipitação de radar, avaliou-se o efeito de distância comparando-se as estimativas de precipitação do radar e CST₂₂₉. Os resultados encontrados para as distâncias de 30 Km e 80 Km do radar para as avaliações horárias são: 11 mm (RMSE), 0,20 (correlação); e, -6,7 mm (Tendência) para 30Km e 9 mm (RMSE), 0,15 (correlação); e, -4,0 mm (Tendência) para 80 Km. Os resultados para as avaliações diárias são: 149 mm (RMSE), 0,41 (correlação); e, -138 mm (Tendência) para 30Km e 99 mm (RMSE), 0,37

(correlação); e, -79 mm (Tendência) para 80 Km. Estes resultados demonstram que o radar de Ponte Nova apresenta o efeito de borda, ou seja, quanto menor a região de comparação entre os dados de radar e satélite melhor o desempenho das estimativas.

No que se refere ao desempenho da CST, é importante lembrar de suas limitações. O CST utiliza o modelo unidimensional de nuvens utilizado por Adler e Negri (1988). Este modelo possui várias limitações, como por exemplo, considera apenas movimento ascendente da porção de nuvem, não simula o efeito de cisalhamento vertical do vento e é um modelo unidimensional (Negri and Negri, 1984). Atualmente vários modelos tridimensionais que poderão aprimorar as estimativas de precipitação. Além disso, o radar meteorológico de Ponte Nova necessita de calibração em tempo real com uma rede extensa de pluviógrafos para assegurar bons resultados.

Sugere-se, para fins de pesquisas futuras, estudar períodos maiores de tempo e utilizar como verdade terrestre os dados proveniente de uma rede de pluviógrafos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler, R; Mack, R.A. Thunderstorm cloud height-rainfall relations for use with satellite rainfall estimation techniques. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 23(2):280-296, Feb. 1984.

Adler, R.F.; Negri, A.J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 27(1):30-51, Jan. 1988.

Alves, M.A.S. **Diagnóstico de precipitação via satélite: uma avaliação da técnica biespectral**. (Tese de Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

Arkin, P.A. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. **Monthly Weather Review**, 107(10):1382-1387, Oct. 1979.

Arkin, P.A.; Meisner, B.N. The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over Western Hemisphere during 1982-84. **Monthly Weather Review**, 115(1):51-57, Jan. 1987.

Barrett, E.C. The estimation of monthly rainfall from satellite data. **Monthly Weather Review**, 98(10):322-327, Oct. 1970.

Barrett, E.C. The tropical Far East: ESSA Satellite evaluations of high season climatic patterns. **Geography Journal**, 137(5):535-555, 1971.

- Barros, M.T.L.; Carrera, C.V.M. Evaluation of Z-R equations for a meteorological radar in São Paulo, Brazil. **International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar**, 7., University of Hannover, Germany, 7-10 Sep. 1992. Paper 4.
- Bellon, A.; Lovejoy, S.; Austin, G.L. Combining satellite and radar data for the short-range forecasting of precipitation. **Monthly Weather Review**, 108(10):1554-1566, Oct. 1980.
- Browning, K.A.; Collier, C.G. Nowcasting of precipitation systems. **Reviews of Geophysics**, 27(3):345-370, Aug. 1989.
- Carvalho, L.M.V.C.; Massambani, O. Análise de Textura na imagem IV de satélites meteorológicos e aplicações ao estudo da convecção. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6., Manaus, 1990. **Anais**. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990, v.2, p.743-747.
- Carvalho, L.M.V.C.; Massambani, O. A temperatura mínima local em imagens IV e a precipitação via radar em eventos semi-estacionários In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., São Paulo, 1992. **Anais**. Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1992, v.1, p.769-773.
- Cavalcanti, E.P.; Ceballos, J.C.; Valadão, C.E.A. Análise de textura em imagens METEOSAT visando aplicação da técnica CST. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., São Paulo, 1992. **Anais**. Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1992, v.1, p.117-121.
- Davis, J.C. Analysis of multivariate data In: **Statistics and data analysis in geology**. New York, John Wiley, 1973. cap. 7, p.442-452.
- de Waard, J. Extended Atlantic weather coverage provided by Meteosat-3. **ESA Bulletin**, 74:20-27, May 1993.

- D'Souza, G.; Barrett, E.C.; Power, C.H. Satellite rainfall estimation techniques using visible and infrared imagery. **Remote Sensing Review**, 4(2):379-414, 1990.
- Doneaud, A.A.; Miller Jr, L.R.; Vonder Haar, T.H.; Laybe, P. The area-time-integral technique to estimate convective rain volumes over area applied to satellite data - a preliminary investigation. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 26(1):156-169, Jan. 1987.
- European Space Operation Centre (ESOC) Meteosat-3 Calibration Report, Darmstad, Aug-Sept 1988. **Issue 2**
- Follansbee, W.A. **Estimation of average daily rainfall from satellite cloud photographs**. Washington, D.C., NOAA, 41p., 1973. (Technical Memorandum NESS 44)
- Follansbee, W.A. **Estimation of daily precipitation over China and the URSS using satellite imagery**. Washington, D.C., NOAA, 30p., 1976. (Technical Memorandum NESS 81)
- França, G.B.; Oliveira, J.L.; Almeida, F.C. Determinação de área de chuva e não chuva na imagem do satélite (GOES) utilizando a análise de agrupamento. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 6., Manaus, 1990. **Anais**. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990, v.2, p.758-762.
- Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FTCH) **Radar Meteorológico de Ponte Nova**: atividades para instalação do radar de Ponte Nova. São Paulo, 1987. 132p.
- Gamache, J.F; Houze, Jr., R.A. Water budget of a mesoscale convective system in the tropics. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 40(7):1835-1850. 1983

- Gairola, R.M.; Krishnamurti, T.N. Rain rates based on SSM/I, ORL and raingauge data sets. **Meteorological Atmospheric Physics**, 50(1):165-174. 1992
- Griffith, C. G.; Woodley, W.L.; Grube, P.G.; Martin, D.W.; Stout, J. Sikdar, D.N. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery-visible and infrared studies. **Monthly Weather Review**, 106(8):1153-1171, Aug. 1978.
- Hays, W.L.; Winkler, R.L. **Statistics: probability, inference, and decisions**. Chicago, Holt, Rinhart e Winston, 1970. 1 v.
- Heymsfield, G.M.; Ghosh, K.K.; Chen, L.C. An interactive system for compositing digital radar and satellite data. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 22(5):705-713, May 1987.
- Kidd, C.; Barrett, E.C. The use of passive microwave imagery in rainfall monitoring. **Remote Sensing Review**, 4(2):415-450, 1990.
- Kilonsky, B.J.; Ramage, C.S. A technique for estimating tropical open-ocean rainfall from satellite observations. **Journal of Applied Meteorology**, 15(9):972-975, Sept. 1976.
- Krug, T. **Statistical approaches to the estimation of missing values arising in remotely sensed data**. (Doctor of Philosophy) - Department of Probability and Statistics. University of Sheffield, England, 1992. v.1.
- Lovejoy, S.; Austin, G.L. The delineation of rain areas from visible and infrared satellite data for GATE and mid-latitudes. **Atmosphere-Ocean**, 17(1):77-92, Jan. 1979a.

- Lovejoy, S.; Austin, G.L. The source of error in rain amount estimating schemes from GOES visible and IR satellite data. **Monthly Weather Review**, 107(8)1048-1054, Aug. 1979b.
- Marshall, T.S; Palmer, W.McK. The distribution of raindrops with size. **Monthly Weather Review**, 5(1)165-166, Jan. 1948.
- Martin, D.W.; Howland, M.R. Rainfall over the Arabian sea during the onset of the 1979 monsoon, **Nature**, 300 (5893):628-630, 1982.
- Martin, D.W.; Howland, M.R. Grid history: a geostationary satellite technique for estimating daily rainfall in the tropics. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 25(2):184-195, Feb. 1986.
- Martin, D.W., Goodman, B.; Schmit, T.J. Estimates of daily rainfall over the Amazin Basin. **Journal of Geophysical Research**, 95(D10):17043-17050, Sept. 1990.
- Moraes, J.C. Estimativa de precipitação por satélite: aplicação da técnica CS na bacia do Rio Curu-Ceará. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., São Paulo, 1992. **Anais**. Instituto Astronômico e Geofísico da USP, 1992, v.1, p.173-177.
- Moraes, J.C.; Ferreira, M.E.; Conforte, J.C. Estimativa de precipitação por meio de satélite: uma avaliação das técnicas CST, NAW e ARKIN. In: Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8., Foz de Iguaçu, 1989. **Anais**. Foz do Iguaçu, 1989, v.1, p.389-395.
- Negri, A.J; Adler, R.F. Relation of satellite-based thunderstorm intensity to radar-estimated rainfall. **Journal Applied Meteorology**, 20(3):288-300, March 1981.

Negri, A.J. Cloud-top structure of tornadic storm on 10 April 1979 from rapid scan and stereo satellite observations. **Bulletin American Meteorological Society**, 63(10)1151-1159, Oct. 1982.

Negri, A.J.; Adler, R.F.; Wetzell, P.J. Rain estimation of the Griffith Woodley Technique. **Journal Climate Applied Meteorology**, 23(1):102-116, Jan. 1984.

Negri, A. J.; Adler, R. F. An intercomparison of three satellite infrared rainfall techniques over Japan and Surrounding Waters. **Journal of Applied Meteorology**, 32(2):357-373, Feb. 1993.

Panofsky, H.A; Brier, G.W. **Some applications of statistics to meteorology**. Pennsylvania State University, 1958. 224p.

Pearson II, F. Conformal projections. In: **Map projection: theory and applications**. Florida, CRC, 1990. cap. 5 p.189-200.

Petty, G.W.; Katsaros, K.B. Nimbus-7 SMMR precipitation observations calibrated against surface radar during TAMEX. **Journal Applied Meteorology**, 31(6):489-505, Jun. 1992.

Pereira, M.N.; Kurkdjian, M. de L.N. de O. **Atualização do uso da terra do Município de São José dos Campos através de dados de sensoriamento remoto**. INPE, 1988. 71p. (INPE-4479-RPE/562)

Scofield, R.A. The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. **Monthly Weather Review**, 115(12)1773-1792, Dec. 1987.

Scofield, R.A.; Oliver, V.J. **A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery**. Washington, D.C. NOAA-NESS, 47p., 1977. (NOAA Technical Memorandum NESS 86)

Snyder, J.P. **Map Projections used by the U.S. Geological Survey**. 2.ed. Washington, United States Government Printing Office, 1983. (Geological Survey Bulletin 1532)

Stout, J.E.; Martin, D.W, Sikdar, D.N. Estimating GATE rainfall with geosynchronous satellite images. **Monthly Weather Review**, 107(5):585-598, May 1979.

Tsonis, A.A. On the separability of various classes from the GOES visible and infrared data. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 23(11):1393-1409, Nov. 1984.

Tsonis, A.A. Determining rainfall intensity and type from GOES imagery in the midlatitudes. **Remote Sensing of Environment**, 21(1):29-36, Jan. 1987.

Tsonis, A.A. Single thresholding and rain area delineation from satellite imagery. **Journal of Applied Meteorology**, 27(11):1302-1306, Nov. 1988.

Tsonis, A.A.; Isaac, G.A. On a new approach for instantaneous rain area delineation in the mid-latitudes using GOES data. **Journal of Climate Applied Meteorology**, 24(11):1208-1218, Nov. 1985.

Woodley, A. A.; Griffith, C. G; Stromatt, S.C. The influence of GATE convective rainfall from SMS-I imagery. **Journal of Applied Meteorology**, 19(4):388-408, Apr. 1980.

Zawadzki, I Factors affecting the precision of radar measurements of rain. In: Conference on Radar Meteorology, 22., Zurich, Switzerland, Sept. 10-13, 1984. **Proceedings**. American Meteorological Society. Boston, United States, 1984, p.251-256.

APÊNDICE APROGRAMA DE CONVERSÃO: RADIANCIA EM TEMPERATURA

```

/*****
Nome      : tempmet                      V1-00
Autor   : Egidio Arai                  mai-93
Resumo  : Criacao de um arquivo contendo 255 niveis
          de cinza e temperaturas relativas.
Entradas : Niveis de cinza de 0 a 255
Saídas  : Arquivo contendo niveis de cinza e a
temperatura
          correspondente em graus Kelvin.
*****/

#include <stdio.h>

#include <math.h>

main( argc, argv )
int  argc;
char *argv[];
{
    FILE *fp;

    char tab_tmp[22],          /* nome da tabela de
temperatura */
    arq_doc[22];              /* nome do arquivo de
documentacao */

    unsigned int i, j,        /* variaveis auxiliares
*/
    ano, dia, hora;

    double v[500];
    double temper,calir,irspc, temp_ant;

    /*-----
                          Inicializacoes
    -----*/

    /* Identificacao da funcao */
    printf ("\n Criando arquivo de temperatura para
satelite METEOSAT \n");

    memset (arq_doc, 0, sizeof(arq_doc) );
    memset (tab_tmp, 0, sizeof(tab_tmp) );

    if ( argc < 2 )
    {
        printf("\nEntre com o nome do arquivo de

```

```

documentacao : ");
    scanf("%s",arq_doc);
}
else
    strcpy (arq_doc,argv[1]);

    printf ("\n nome do arquivo = %s\n",arq_doc);

    j =
extra_doc_meteosat(arq_doc,&calir,&irspc,&ano,&dia,&hora);

    sprintf (tab_tmp,
"tab%02d%03d.%02d",ano,dia,hora/100);
    printf ("\n nome da tabela = %s\n",tab_tmp);

    if ((fp = fopen (tab_tmp,"wt")) == NULL)
    {
        printf ("\n Erro na abertura do arquivo
%s\n",tab_tmp);
        goto fim;
    }

    if ( j < 0 ) goto fim;

    j = param_met3(v);

    if ( j < 0 ) goto fim;

    temp_ant = 315.;

/*-----
                        Loop principal
-----*/

    printf ("\n Data = %3d-%4d %d\n",dia,ano,hora);

    for (i = 0; i < 256; i++)
    {

        tempmet3(i,v,calir,irspc,&temper);
        if ( temper == 0. ) temper = temp_ant;
/*      if ( temper < 1.0 ) temper = temp_ant;
        temp_ant = temper;*/
        fprintf (fp,"%3d %10.6f\n",i,temper);
        temp_ant = temper;
    }

fim:
    printf ("\n Fim de execucao\n");
}

```

```

tempmet3(nc,v,calir,irspc,temp)
int  nc;      /* Nivel de cinza do pixel da imagem      */
double v[];    /* valores de radianca para o METEOSAT-3 */
double calir, /* fator de calibracao do infravermelho */
/*
      irspc; /* Nivel de cinza do espaco */
double *temp; /* Temperatura em graus Celsius */
{
    int m,pos;
    double t,t2,r0,r1,r2;

    nc = 255 - nc;

    if((double)nc < irspc)
    {
        *temp = 0.;
        return(0);
    }

    r0 = calir * ((double)nc - irspc) * 1.015;

    pos = -100;
    for(m=0;m<300;m++)
    {
        if(v[m] >= r0)
        {
            if(m == 0)      r1 = r2 = 0.;
            else
            {
                r2 = v[m-1];
                r1 = v[m];
            }
            pos = m;
            break;
        }
    }

    if(pos == -100) { *temp = 0.; return(0); }

    t2 = 100.;
    t2 = t2 + (float)pos - 1.;

    if(r1 == r2) t = t2;
    else
    {
        if(r0 < r1 || r0 > r2) t = t2;
        else t = (r0 - r2)/(r1-r2) + t2;
    }

    *temp = t - 273.15;

/*  *temp = t;*/

```

```

}

int param_met3(v)
double v[];
{
    FILE *fp;
    char buf[40],a1[8],a2[8],a3[8],a4[8],a5[8];
    int status,i;

    if ((fp = fopen ("rad.dat","rt")) == NULL)
    {
        printf ("\n Erro na abertura do arquivo
rad.dat\n");
        return(-1);
    }

    i=0;
    for(;;)
    {
        memset(buf,0,8);
        memset(a1,0,8);
        memset(a2,0,8);
        memset(a3,0,8);
        memset(a4,0,8);
        memset(a5,0,8);

        status = fgetline(fp,buf,40);
        if(status == 0) break;

        memcpy(a1,&buf[0],7);
        memcpy(a2,&buf[7],7);
        memcpy(a3,&buf[14],7);
        memcpy(a4,&buf[21],7);
        memcpy(a5,&buf[28],7);

        v[i] = atof(a1);
        v[i+1] = atof(a2);
        v[i+2] = atof(a3);
        v[i+3] = atof(a4);
        v[i+4] = atof(a5);
        i+=5;
    }

    return (0);
}

int extra_doc_meteosat(nome,calir,irspc,anoo,diaa,horaa)
char nome[];
unsigned int *anoo, *diaa, *horaa;
double *calir,*irspc;
{
    char xx[10];
    unsigned char buf[3072];

```

```

    unsigned int  ano,dia,hora;
    FILE *fp;
    double  calirr,irspcc,ganho;

    if ((fp = fopen (nome,"rb")) == NULL)
    {
        printf ("\n Erro na abertura do arquivo
%s\n",nome);
        return(-1);
    }

    fread(buf,1,3072,fp);

    ano  = buf[34] * 256 + buf[35];
    dia  = buf[36] * 256 + buf[37];
    hora = buf[38] * 256 + buf[39];

    if ( ano >= 2000 ) ano -= 2000;
    else      ano -= 1900;

    *anoo = ano;
    *diaa = dia;
    *horaa = hora;

    memcpy(xx,&buf[131],6);
    xx[5] = 0;

    calirr = atof(xx)/100000.;

    memcpy(xx,&buf[136],3);
    xx[3] = 0;

    irspcc = atof(xx)/10.;

    *calir = calirr;
    *irspc = irspcc;

    return (0);
}

fgetline (fp,buf,max_len)
FILE *fp;
char buf[];
int max_len;
{
    int  n;
    char ch;

    n = 0;

    while ( n < max_len )
    {
        if ( ( ch = fgetc(fp) ) == EOF ) break;

```

```
        buf[n] = ch;
        n++;
        if ( ch == '\n' ) break;
    }
    return (n);
}
```


APÊNDICE B

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Barrett, E.C.; Martin, D.W **The use of satellite data in rainfall monitoring**. New York, Academic Press, 1981. 340p.