



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-14205-TDI/1106

**UM MODELO DE ESTIMATIVA DOS VENTOS PARA  
OS BAIXOS NÍVEIS UTILIZANDO IMAGENS DOS  
CANAIS VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO  
( $3,9\mu\text{m}$ )**

Renato Galante Negri

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 09 de dezembro de 2005.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/02.22.12.08>>

INPE  
São José dos Campos  
2006

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

## **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-14205-TDI/1106

**UM MODELO DE ESTIMATIVA DOS VENTOS PARA  
OS BAIXOS NÍVEIS UTILIZANDO IMAGENS DOS  
CANAIS VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO  
( $3,9\mu\text{m}$ )**

Renato Galante Negri

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 09 de dezembro de 2005.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/02.22.12.08>>

INPE  
São José dos Campos  
2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

N312u Negri, Renato Galante.  
Um modelo de estimativa dos ventos para os baixos níveis utilizando imagens dos canais visível e infravermelho próximo ( $3,9\mu\text{m}$ ) / Renato Galante Negri. – São José dos Campos : INPE, 2006.  
151p. ; (INPE-14205-TDI/1106)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Orientadores : Drs. Nelson Jesus Ferreira e Luiz Augusto Toledo Machado.

1. Vento. 2. Circulação atmosférica. 3. Satélites meteorológicos. 4. Nuvens. 5. Sensoriamento remoto. I. Título.

CDU 528.711.7

---

Copyright © 2006 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2006 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Meteorologia**

Dr. **Prakki Satyamurty**



---

**Presidente / INPE / SJCampos - SP**

Dr. **Nelson Jesus Ferreira**



---

**Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP**

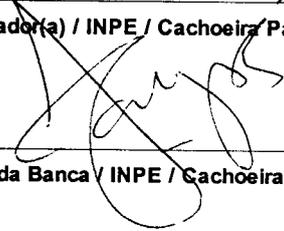
Dr. **Luiz Augusto Toledo Machado**



---

**Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP**

Dr. **Juan Carlos Ceballos**



---

**Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP**

Dra. **Leila Maria Vespoli de Carvalho**



---

**Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP**

**Aluno (a): Renato Galante Negri**

**São José dos Campos, 09 de dezembro de 2005**

## RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo sobre estimativas de direção e velocidade do vento na baixa troposfera baseado no deslocamento de nuvens. O trabalho incluiu o desenvolvimento de um método automático para avaliar o vento utilizando imagens dos canais visível e infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ), ambos do satélite geoestacionário GOES-12. O estudo utilizou imagens do canal visível na estimativa do vento durante o período diurno e do canal infravermelho próximo para estimar o vento durante a noite. O trabalho explorou as altas resoluções espaciais das imagens do canal visível, que possuem a resolução de 1x1 km no ponto subsatélite, bem como o grande contraste entre as nuvens baixas (Alto Albedo) e a superfície do planeta (Baixo Albedo). Essa diferença de contraste entre os albedos da superfície e as áreas cobertas por nuvens facilita a detecção das nuvens e consequentemente, o seu rastreamento. Na detecção das nuvens baixas no período noturno, as imagens do canal infravermelho próximo mostraram-se mais eficazes do que as dos canais infravermelho janela e do vapor d'água. Foi possível estimar, com êxito, o vento sobre as regiões oceânicas, mas a estimativa sobre a região continental foi insatisfatória, devido à falta de homogeneidade das superfícies continentais. Vegetação e orografia influenciam na formação e desenvolvimento das nuvens, ao contrário do que ocorre com as nuvens situadas sobre os oceanos, que tendem a manter sua estrutura por um tempo mais longo. Tais modificações na morfologia prejudicam o processo de rastreamento das nuvens sobre as regiões continentais. Recomenda-se a utilização das imagens dos canais infravermelho próximo e visível para a estimativa do vento nos níveis baixos.



# **LOW-LEVEL WIND EXTRACTION FROM VISIBLE AND SHORTWAVE (3,9 $\mu$ m) INFRARED CHANNELS IMAGE DATA**

## **ABSTRACT**

This study presents development and results of an automated tool for the estimation, based on cloud displacement, of wind speed and direction within the low troposphere. The data were originated by visible and near infrared (3,9  $\mu$ m) channels images by geostationary GOES-12 satellite. The study utilized visible channel images in estimating the variables during daylight time and near infrared images for the nightly period. Both the high spatial resolutions of the visible channel (1 x 1 km at the subsatellite point) and the high contrast between low clouds and the Earth surface were highly beneficial. Such contrast difference between the surface and cloud-covered areas albedos makes cloud detection easier and so, by means of consequence, its tracking. For the detection of low clouds in the nightly period, the near infrared channel presented more efficient images than window infrared and water vapor channels. The estimation of wind related variables was successful when associated with oceanic areas, but such did not happen with wind in continental settings, due to lack of surface homogeneity. Both vegetation and orography have an influence in cloud development, unlike what happens with oceanic clouds, that tend to keep their structures for a longer period of time. Such morphological changes hamper the tracking of the clouds over continental areas. For estimating the wind variables in low levels, near infrared and visible channel images are recommended.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	23
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	27
<b>CAPÍTULO 3 - CONCEITOS E TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DE                   NUVENS E EXTRAÇÃO DO VENTO.....</b>	31
3.1 - Processo de Rastreamento de Nuvens.....	31
3.2 - Determinação da Altura dos Vetores.....	34
3.3 - Controle de Qualidade.....	39
3.4 - O Uso do Canal 2 do GOES (Infravermelho Próximo – 3,9 $\mu\text{m}$ ).....	41
3.4.1 - Contaminação Solar no Canal Infravermelho Próximo.....	41
3.4.2 - Ruído do Canal 2 (3,9 $\mu\text{m}$ ) do Satélite GOES.....	43
3.4.3 - Infravermelho Próximo – Algoritmos de Ajuste e Realce de Imagem.....	45
<b>CAPÍTULO 4 - DADOS E METODOLOGIA.....</b>	49
4.1 – Dados.....	49
4.1.1 - Satélite GOES 12 – Imageador GOES I-M.....	50
4.2 - Processo de Rastreamento.....	52
4.3 - Correção Radiométrica.....	55
4.4 - Classificação das Nuvens a Serem Rastreadas.....	56
4.4.1 - Imagens do Canal Visível.....	57
4.4.2 - Imagens do Infravermelho Próximo (3,9 $\mu\text{m}$ ).....	66
4.5 - Controles de Qualidade.....	67
4.5.1 - Limiar de Porcentagem de Pixels Não Rejeitados.....	67

4.5.2 - Teste de Simetria.....	67
4.5.3 - Teste de Consistência Espacial.....	68
4.6 - Determinação do Nível de Pressão (Altura) dos Vetores.....	68
<b>CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO E AJUSTE DOS TESTES DE CONTROLE DE QUALIDADE.....</b>	<b>71</b>
5.1 - Teste Dimensão das Janelas Alvo/Coeficiente de Correlação.....	76
5.2 - Teste da Mínima Porcentagem.....	85
5.3 - Avaliação do Teste de Simetria.....	90
5.4 - Avaliação do Teste de Consistência Espacial.....	93
<b>CAPÍTULO 6 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DOS VETORES.....</b>	<b>105</b>
6.1 - Avaliação do Método.....	115
<b>CAPÍTULO 7 - O CANAL - 3,9µm.....</b>	<b>119</b>
7.1 - Detecção das Nuvens Cirrus e Nevoeiros (Classificação de Nuvens) .....	119
7.2 - Ajustes dos Parâmetros do Modelo.....	120
7.3 - Determinação da Altura dos Vetores.....	122
7.4 - Avaliação.....	123
<b>CAPÍTULO 8 - ESTIMATIVA DO VENTO UTILIZANDO IMAGENS DOS CANAIS INFRAVERMELHO PRÓXIMO E VISÍVEL DO SATÉLITE GOES-12.....</b>	<b>127</b>
<b>CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES GERAIS.....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1.1 - Diagrama representando o procedimento de rastreamento, mostrando como são escolhidas as matrizes para o cálculo da correlação.....	34
3.2.1 - Histograma das temperaturas de brilho de nuvens baixas e oceano descoberto. A temperatura estimada da base da nuvem é mostrada.....	35
3.4.1 - Espectro de transmissão da atmosfera terrestre.....	42
3.4.2.1 - Radiância versus temperatura de brilho para os canais do satélite GOES 12 em 3,9 $\mu\text{m}$ e 10,7 $\mu\text{m}$ respectivamente.....	44
4.1.1.1 - Imageador GOES.....	51
4.2.1 - Exemplo de janelas alvo e de procura para estimativas de vento utilizando-se imagens do satélite GOES.....	54
4.4.1.1 - Diferenças na resolução espacial dos canais visível e infravermelho próximo.....	59
4.6.1 - Diagrama representando as etapas do modelo de extração de ventos utilizando imagens do canal 1 (visível) do satélite GOES 12.....	70
5.1 - Recortes utilizados nas avaliações e ajustes dos testes.....	72
5.2 - Recorte A referente à imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.....	72
5.3 - Recorte B referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.....	73
5.4 - Recorte C referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.....	74
5.5 - Recorte D referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.....	74
5.6 - Recorte E referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.....	75
5.1.1 - Comparação entre o campo de vento extraído a partir do recorte D utilizando a janela alvo com dimensão 11 e coeficiente de correlação 0,9. A esquerda foi atribuído valor aleatório aos pixels rejeitados na classificação de nuvens e a direita utilizou-se o mesmo valor para todos os pixels rejeitados.....	77
5.1.2 - Comparação entre o campo de vento extraído a partir do recorte D utilizando a janela alvo com dimensão 29 e coeficiente de correlação 0,6. A esquerda foi atribuído valor aleatório aos pixels rejeitados na classificação de nuvens e a direita utilizou-se o mesmo valor para todos os pixels rejeitados.....	79
5.1.3 - Porcentagem maior de vetores obtidos utilizando um valor aleatório versus um valor constante.....	80
5.1.4 - Pressão ao nível médio do mar referente às 12 horas do dia 21 de setembro de 2004.....	81

5.1.5 -	Campos de vento referente ao recorte D, utilizando a janela alvo com dimensão 15, coeficiente mínimo de correlação 0,9. O par à esquerda se refere ao caso em que foi utilizado um valor aleatório e o par a direita se refere ao caso em que um valor constante foi utilizado na substituição dos pixels rejeitados.....	82
5.1.6 -	Quantidade de vetores com velocidade superior a 20 m/s para o caso em que foi utilizado um valor constante na substituição dos pixels rejeitados durante a classificação de nuvens.....	83
5.1.7 -	Porcentagem de vetores com velocidade superior a 20 m/s utilizando um valor aleatório em substituição aos pixels descartados.....	84
5.2.1 -	Quantidade de vetores rejeitados pelo teste da mínima porcentagem, em relação ao total de vetores rejeitados.....	86
5.2.2 -	Porcentagem de vetores com velocidade superior a 20 m/s aceitos pelo teste obtida para diferentes valores da porcentagem de corte.....	87
5.2.3 -	Campos de vento obtidos antes da aplicação do teste do limiar de porcentagem de pixels substituídos.....	88
5.2.4 -	O par de campos à esquerda mostra o resultado obtido utilizando o limiar 10% de pixels e o par a direita refere-se ao limiar de 20% para janelas com dimensão 15 e 17, respectivamente.....	88
5.2.5 -	Campos de vento obtidos utilizando o limiar de 30% de pixels rejeitados.....	89
5.3.1 -	Porcentagem de vetores aceitos pelo teste cuja velocidade é superior a 20m/s (esquerda) e porcentagem de vetores rejeitados pelo teste de simetria em comparação aos resultados sem a sua aplicação (direita). Esses valores referem-se ao caso em que a janela alvo de dimensão 15 foi utilizada.....	92
5.4.1 -	Campo de vento obtido após a aplicação do primeiro teste de consistência espacial proposto.....	95
5.4.2 -	Campo de vento obtido após a aplicação do teste de consistência espacial baseado na diferença em relação à velocidade dos vetores vizinhos.....	98
5.4.3 -	Campo de vento obtido após a aplicação do teste da diferença vetorial.....	100
5.4.4 -	Linhas de corrente do campo de vento em 850hPa e pressão ao nível médio do mar e referentes ao dia 21 de setembro de 2004 as 12UTC.....	101
5.4.5 -	Campos de vento resultantes sem a aplicação do controle de qualidade (esquerda) e com a aplicação de todos os testes do controle de qualidade (direita).....	102
6.1 -	Segmento utilizado para calcular o histograma de cada vetor.....	106
6.2 -	Histograma típico para uma região oceânica com presença de nuvens e áreas de céu claro.....	108

6.3 -	Soma de todos os histogramas calculados de cada segmento utilizado para a determinação da altura dos vetores. Cada curva representa a soma de todos os histogramas utilizando um dado valor da dimensão da matriz utilizada no cálculo do histograma.....	109
6.4 -	Padrões gerais dos histogramas calculados.....	111
6.5 -	Nível de indeterminação da altura utilizando matrizes com dimensão variável para o cálculo dos histogramas.....	113
6.6 -	Nível de indeterminação da altura utilizando matrizes com dimensão fixa para o cálculo dos histogramas.....	114
6.7 -	Erro quadrático médio do campo de vento em relação ao campo de vento calculado pelo NCEP.....	116
6.8 -	Erro quadrático médio do campo de vento em relação ao campo de vento calculado pelo NCEP para o caso em que foi aplicada a correção na temperatura de brilho devido à absorção do vapor d'água presente nas camadas superiores ao alvo.....	117
7.4.1 -	Erro quadrático médio da série de campos de vento em relação aos campos calculado pelo NCEP.....	124
7.4.2 -	Campo de vento nos baixos níveis referente ao dia 25 de março de 2005, 02:22 UTC. Campo estimado utilizando imagens do canal infravermelho próximo do satélite GOES-12.....	125
8.1 -	Campo de pressão ao nível médio do mar fornecido pelo NCEP, referente ao dia 24 de março de 2005, 00:00 UTC.....	131
8.2 -	Campo de vento estimado pelo modelo baseado nas imagens do canal infravermelho próximo (3,9 $\mu$ m) referente ao dia 24 de março de 2005, 1:22 UTC.....	132
8.3 -	Recorte do campo apresentado na figura 8.2 mostrando uma parte do campo de ventos com mais detalhes.....	133
8.4 -	Campo de vento estimado pelo modelo baseado nas imagens do canal visível para o dia 24 de março de 2005, 1522 UTC.....	134
8.5 -	Recorte do campo apresentado na figura 8.4 mostrando uma parte do campo de ventos com mais detalhes.....	135



## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
3.4.1 - Subdivisão do espectro infravermelho.....	43
4.1.1.1 - Características do instrumento imageador (GOES 12).....	51
4.4.1.1 - Parâmetros utilizados no processo de classificação de nuvens da imagem do canal visível, para imagens entre 14 e 17 horas (GMT).....	64
4.4.1.2 - Estatística das variáveis apresentadas na tabela 4.4.1.1.....	66
8.1 - 8.1 - Avaliação dos campos de vento estimados para o período de 21 a 25 de março em relação aos campos do NCEP e a avaliação realizada por Laurent et al., (2002) para o modelo operacional da DSA.....	129
8.2 - 8.2 - Avaliação dos campos de vento estimados para o período de 21 a 25 de março de 2005, comparada às estatísticas dos campos da EUMETSAT.....	130



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>CPTEC</b>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>DSA</b>	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
<b>ECWMF</b>	<i>European Centre for Medium-range Weather Forecasts</i>
<b>EUMESAT</b>	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
<b>FLISS</b>	<i>Fast Line-by-line Satellite signal Simulator</i>
<b>GOES</b>	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
<b>INPE</b>	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
<b>IVJ</b>	Infravermelho Janela
<b>IVP</b>	Infravermelho Próximo
<b>LBA</b>	<i>Large scale Biosphere Atmosphere experiment),</i>
<b>LSBTD</b>	<i>Longwave-shortwave brightness temperature difference</i>
<b>NCAR</b>	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
<b>NCEP</b>	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
<b>NOGAPS</b>	<i>Navy Operational Global Atmospheric Prediction System</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>UTC</b>	<i>Cordinated Universal Time</i>
<b>VIS</b>	Visível
<b>WETAMC</b>	<i>Amazon Mesoscale Campaign – Wet season</i>
<b>WV</b>	<i>Water Vapour</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Desvio Padrão
$\sigma_{\text{nuvem}}$	desvio padrão do conjunto de nuvens
$\Delta v$	menor diferença vetorial entre $V_1$ e $V_2$
$\Delta T$	intervalo de tempo entre duas imagens de satélite
$\Delta S_{\text{max}}$	deslocamento máximo esperado para um conjunto de nuvens
$\mu\text{m}$	unidade de medida (micrometro)
$\gamma_{\text{sim}}, \alpha_{\text{sim}}$	parâmetros de ajuste do teste de simetria
$\alpha_{\text{ce}}$	parâmetro de ajuste do teste de consistência espacial
$r_{m,n}$	Coefficiente de correlação
$\text{dim}$	ordem da matriz alvo
$\text{dim}^2$	dimensão da matriz alvo
$T_{i,j}$	valor do pixel correspondente a i-ésima linha e j-ésima coluna, $1 \leq i \leq \text{dim}$ , $1 \leq j \leq \text{dim}$ na janela alvo.
$\bar{T}$	média dos pixels na matriz (janela) alvo.
$S_{k,l}$	valor do pixel correspondente a k-ésima linha e l-ésima coluna na matriz de procura, $1 \leq k \leq \text{dim}2$ , $1 \leq l \leq \text{dim}2$ .
$\bar{S}(m,n)$	valor médio dos pixels da sub área (janela alvo) na janela de procura no deslocamento (m,n).
$\text{regl}$	numero de pixels do segmento
$T_{\text{base}}$	temperatura da base das nuvens
$T_{\text{nuvem}}$	temperatura média do conjunto de nuvens
$V_1$	vetor calculado entre a imagem no instante $t_0$ e $t_0-30$ minutos
$V_2$	vetor calculado entre a imagem no instante $t_0$ e $t_0+30$ minutos
$V_{\text{max}}$	velocidade máxima do vento esperada
$\text{DimJP}$	dimensão da janela de procura
$\text{DimJA}$	dimensão da janela alvo

F	fator de reflectância
R	reflectância
Z	ângulo zenital de incidência da radiação solar
S	constante solar
L	radiância medida pelo sensor do satélite
h	fator de correção da anisotropia da superfície refletora
$IV_{i,j}$	pixel da i-ésima linha e j-ésima coluna de uma imagem do canal 2 do satélite GOES-12
$V_{k,l}$	pixel da k-ésima linha e l-ésima coluna de uma imagem do canal 2 do satélite GOES-12
$P_{xl_n(i,j)}$	valor espectral (reflectância ou temperatura de brilho) do pixel do canal n.
D	distância euclidiana
MDE	mínima distância euclidiana
P	ponto associado a cada par de pixels definidos e respectivos coeficientes de textura
C	centróide
V	pixel de uma imagem do canal visível
IV	pixel de uma imagem do canal infravermelho janela
$R_{flc(i)}$	i-ésimo valor típico de fator de reflectância característico de um determinado tipo de nuvem
$T_b(i)$	i-ésimo valor típico de temperatura de brilho para uma dada classe de nuvem
$T_{ch1(i)}$	i-ésimo valor típico do coeficiente de textura para o canal 1
$T_{ch4(i)}$	i-ésimo valor típico do coeficiente de textura para o canal 4
TV	coeficiente de textura de um pixel do canal visível
TIV	coeficiente de textura de um pixel do canal infravermelho
$\overline{pxl}$	pixel médio
$d_n$	distância geográfica entre vetores

*Dif*      módulo da diferença vetorial  
u          componente zonal do vento  
v          componente meridional do vento



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Informações sobre a direção e velocidade do vento são de grande importância para inicialização dos modelos numéricos de previsão de tempo, análise sinótica da circulação atmosférica, estimativa de fluxos de massa e para o monitoramento da evolução de sistemas de nuvens.

Modelos numéricos de previsão de tempo necessitam dos dados correspondentes às condições iniciais para uso nas equações que os compõem. Esses dados são basicamente observacionais, como temperatura, pressão, umidade e vento. Quanto maior a qualidade e disponibilidade de dados observacionais utilizados na inicialização dos modelos numéricos de previsão de tempo, maior a precisão das previsões. Geralmente as medidas do vento são realizadas através de estações de superfície sobre os continentes e oceanos (navios) e as de ar superior por meio de radiossondas. Alguns aviões reportam informações meteorológicas na decolagem e no pouso.

Os dados observacionais coletados a partir das estações de superfície são os mais comuns e consistem em medidas pontuais, caso do vento a uma altura de 10 metros. Nas regiões oceânicas essas medidas são realizadas por bóias de custo de manutenção elevado, sendo um empecilho à instalação dessas estações. A cobertura espacial, por sua vez, acaba limitando a obtenção desse tipo de dado caso não exista uma distribuição razoável de estações de coleta.

Radiossondagens possibilitam realizar medidas diretas da atmosfera, fornecendo uma série de informações sobre o perfil atmosférico em várias alturas. Entre essas informações, estão a direção e velocidade do vento em uma localidade específica. O custo de manter uma boa cobertura espacial com alta frequência temporal de um continente como a América do Sul e as regiões oceânicas ao seu redor é elevado,

tornando inviável a utilização apenas de medidas feitas por radiossondagens. Além disso, o difícil acesso de regiões como a Amazônia impede a implementação de uma rede densa de radiossondagem no continente sul-americano.

Buscando novas formas de se medir os movimentos atmosféricos, há décadas se iniciou o uso de imagens de satélites meteorológicos geostacionários para estimar o vento a partir dos deslocamentos das nuvens. Essa técnica se revelou uma boa opção como alternativa ao uso das radiossondagens (Hubert e Whitney, 1971). Tais imagens apresentam alta resolução temporal (tipicamente 30 minutos) sendo possível estimar o vento simultaneamente para grandes áreas. Com os modelos atuais de estimativa do vento é possível obter um campo de vento a cada meia hora ou até menos. Geralmente, os modelos utilizando imagens de satélites geostacionários se baseiam em imagens de diversas faixas do espectro infravermelho (e.g., Laurent, 1993; Homlud, 1993; Eigenwilling e Fischer, 1982). Essas imagens possibilitam uma boa estimativa de vento nos níveis altos e médios, mas não são de grande utilidade para estimativa de ventos nos níveis baixos, pois o contraste entre a temperatura do topo das nuvens baixas e os demais alvos na superfície é relativamente pequeno.

Já nas imagens do canal visível, as nuvens baixas apresentam durante o período diurno um forte contraste com relação à superfície oceânica, pois as nuvens apresentam um albedo bastante superior ao dos oceanos. Com isso, as variáveis relativas ao vento nos níveis baixos podem ser estimadas em maior número e com maior precisão que os dados obtidos através dos canais infravermelhos termais (Laurent, 1993). O canal visível, contudo, depende da presença da radiação solar, não sendo, é claro, útil para o período noturno. Para estimar o vento durante o período noturno, o uso das imagens do canal infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ) é uma boa opção, pois possibilita a detecção das nuvens baixas com mais precisão que o canal infravermelho janela (Thomas et al., 1997). O canal de 3,9  $\mu\text{m}$ , além de operar na janela atmosférica, mostra características diferentes para nuvens cirrus e baixas, permitindo uma detecção mais precisa do vento em níveis baixos. Até o presente, foram realizados poucos estudos envolvendo o uso desse canal para estimar as variáveis associadas ao vento nos níveis baixos.

A estimativa do vento a partir de imagens de satélites teve início no final da década de 60 e na primeira metade dos anos 70 (Fujita et al., 1969; Whitney e Hubert, 1971). O rastreamento das nuvens era realizado manualmente e utilizava imagens dos canais infravermelhos. Com o passar dos anos e com o advento dos microcomputadores foram sendo desenvolvidos e implementados modelos automáticos de estimativa do vento. Onde existiam nuvens pouco espessas ou estruturas de vapor d'água passou-se a utilizar os canais na banda do vapor d'água (Eingenwilling e Fischer, 1981, Stewart et al., 1985; Laurent 1993). Também se estudou a aplicação dos canais que operam na banda de absorção do CO<sub>2</sub> (Menzel et. al., 1982). Assim, as estimativas via satélites geoestacionários de valores de variáveis associadas aos ventos se tornaram um produto importante, particularmente para produção de dados para modelos de previsão numérica do tempo (e.g., Radford 1989; Thoss 1992; Kelly 1992). Inicialmente, a utilização das imagens do canal visível se restringia a estudos de caráter geral sobre tempestades tropicais (Rodgers et. al., 1979). Na década de 90 essas imagens já eram utilizadas operacionalmente em modelos de estimativa das variáveis associadas ao vento (Andréas et. al., 1996).

No Brasil, apenas o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) possui modelos de estimativa do vento a partir de imagens de satélites, operados pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA). Tais modelos utilizam imagens dos canais infravermelho janela (10,7  $\mu\text{m}$ ) e do canal do vapor d'água (6,7  $\mu\text{m}$ ), ambos do satélite GOES-12. Os dois modelos são muito eficientes na estimativa do vento para os níveis altos e médios, porém não são capazes de estimar com precisão os ventos nos níveis baixos. O desenvolvimento de um modelo utilizando o canal visível é importante, pois seria capaz de estimar os ventos nos baixos níveis com precisão muito maior do que os modelos em operação na DSA e assim preencher essa lacuna. Como esse canal só é útil durante o período diurno, o uso do canal infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ) seria uma alternativa mais adequada para estimativas de vento à noite. Sendo esse canal mais sensível a temperaturas mais elevadas, espera-se que os resultados sejam melhores do que os obtidos utilizando o canal infravermelho janela.

O presente trabalho tem o intuito de contribuir para o aprimoramento do conhecimento das técnicas de estimativas de ventos. Consiste em desenvolver e testar um método automático para estimar o campo de vento para os níveis baixos a partir de imagens do satélite GOES-12, utilizando imagens do canal visível para o período diurno e imagens do canal infravermelho em  $3,9 \mu\text{m}$  para o período noturno. O objetivo é desenvolver e disponibilizar uma ferramenta que forneça informações sobre o movimento atmosférico nos níveis baixos e que se aplique principalmente à previsão numérica de tempo.

Entre os obstáculos vencidos no correr do desenvolvimento deste trabalho estiveram a complexidade na estimativa da altura dos vetores, o controle de qualidade dos dados e a determinação das diferentes escalas espaciais de cômputo do vento. O Capítulo seguinte resume e apresenta o conhecimento adquirido até hoje na determinação das variáveis associadas ao vento em níveis baixos e detalha dificuldades contornadas e processos utilizados.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este Capítulo apresenta um breve histórico sobre os métodos de estimativa de vento a partir do rastreamento de nuvens nas imagens de satélites geoestacionários.

Campos de vento estimados a partir do rastreamento dos deslocamentos das nuvens nas imagens de satélites são estimados desde o início da década de 70. Hubert e Whitney (1971) descrevem procedimentos e dados utilizados na extração dos vetores vento a partir de imagens dos satélites geoestacionários da época. O processo de determinação do vento no início dos anos 70 se baseava em métodos subjetivos. Inicialmente se preparava um filme com uma seqüência de imagens obtidas pelo satélite a intervalos de 30 minutos. A seqüência era projetada numa tela e repetida uma série de vezes. Assim, selecionavam-se manualmente organizações de nuvens com posições inicial e final possíveis de determinar, além de se classificar os tipos de nuvens presentes na seqüência de imagens. Os vetores vento eram calculados Após essa seleção e com base nas informações obtidas sobre as posições inicial e final dos alvos. Segundo descrição dos autores, a altura dos vetores era determinada a partir da sondagem mais próxima da nuvem. O método assumia que a diferença vetorial mínima entre velocidade da nuvem e velocidade de vento medida pela radiossonda ocorria no nível da nuvem e assim a altura estava determinada. Esse método de estimativa dos ventos tinha o grande inconveniente de ser realizado manualmente, o que, realçam os autores, demandava um tempo considerável.

Com o passar dos anos, computadores mais potentes possibilitaram o desenvolvimento de modelos automáticos de estimativa do vento. A estimativa do vento a partir de modelos automáticos é muito mais eficiente do que aquela realizada manualmente. O algoritmo de rastreamento, porém, determina erroneamente alguns vetores, que apresentam por isso valores incoerentes. Um controle de qualidade deve ser aplicado,

portanto, aos vetores resultantes do processo. Inicialmente, esse controle de qualidade era realizado manualmente por pessoa preparada que avaliava os campos de vento e eliminava vetores julgados incoerentes. Buscando desenvolver um processo totalmente automático para a estimativa do vento, foram desenvolvidos procedimentos automatizados de controle de qualidade.

No princípio da década de 80, estudos indicaram a utilidade do canal do vapor d'água (Eingenwilling e Fischer, 1981), que tornou possível detecção e conseqüente rastreamento de estruturas de vapor d'água puro, não apenas de nuvens como no caso do canal infravermelho. A estimativa do vento utilizando esse canal era satisfatória para os níveis médios e altos (Endlich e Wolf, 1981; Stewart et al, 1985). Vários estudos sobre o impacto desses novos produtos foram realizados e mostraram sua eficácia para a previsão de tempo (Kallberg et al. 1982).

No início da década de 90, a estimativa dos campos de vento já era operacionalizada a partir de quatro satélites geoestacionários: Geostationary Environmental Sattelite (GOES), Meteosat, Geostationary Meteorological satellite (GMS) e INSAT. Os modelos de estimativa do vento desse período utilizavam basicamente os canais do infravermelho e do vapor d'água. Com esses canais, a estimativa do vento nos níveis baixos ainda não era satisfatória apesar de todos os avanços mencionados, já que nesses dois tipos de imagens o contraste entre os alvos mais baixos e a superfície era muito baixo, além de a detecção das nuvens baixas não ser muito precisa. Buscando uma forma de melhorar a estimativa dos ventos nos níveis baixos, estudou-se a utilização do canal visível.

Uma qualidade muito importante das imagens do canal visível é a detecção precisa de nuvens do tipo stratocumulus (900-800 hPa) (Andreas et al., 1996). Para os ventos na baixa troposfera, na região tropical, apenas os dados do canal do visível permitem que se obtenha um contraste suficiente para nuvens baixas e pequenas, para então monitorar seus deslocamentos, deduzindo a velocidade e direção dos ventos. Como nos trópicos a quantidade de vapor d'água na atmosfera é elevada, a absorção da radiação de onda

longa pelo vapor nos níveis mais altos impede que os sensores dos satélites captem a radiação emitida pelas das nuvens baixas.

Laurent et al. (1991) em seu estudo sobre extração de ventos utilizando imagens do canal visível, colheram bons resultados para a extração das componentes do vento dos níveis inferiores. Obtiveram um número de vetores para os baixos níveis superior ao dobro do alcançado utilizando imagens do infravermelho. Comparando os resultados que utilizam os canais visível e infravermelho, os autores obtiveram um índice de acerto muito próximo entre os dois métodos. Laurent (1994) também estudou a possibilidade de se melhorar o rastreamento para os níveis baixos em um caso multicamadas, utilizando um modelo de classificação de nuvens para os casos em que nuvens baixas e altas estivessem presentes. Com isso era possível determinar os pixels correspondentes a cada tipo de nuvem, permitindo o uso diferenciado conforme a necessidade. O grande problema encontrado nessa técnica é a confiabilidade da seleção dos pixels correspondentes às nuvens altas.

A utilização do canal visível mostrou um grande avanço na estimativa do vento. Havendo a limitação óbvia já mencionada para o período noturno. A solução já foi mencionada: a utilização durante a noite do canal infravermelho próximo em 3,9  $\mu\text{m}$  (Thomas et al. 1997). Esse canal, conforme já mencionado, proporciona um contraste maior para as nuvens baixas, pois a radiância das gotículas de água é superior à dos cristais de gelo das nuvens altas e das regiões de superfície. Com uma imagem do canal infravermelho é possível distinguir as nuvens baixas dos demais alvos presentes nas nuvens. Atualmente vários centros de previsão de tempo possuem modelos de estimativa do vento que utilizam imagens dos canais infravermelhos, vapor d'água e visível.

Segue um breve comentário sobre os principais conceitos presentes nos diversos modelos de estimativa do vento encontrados na literatura.



## CAPÍTULO 3

### CONCEITOS E TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DE NUVENS E EXTRAÇÃO DO VENTO

Este Capítulo resume as principais etapas do desenvolvimento de um modelo de estimativa de vento.

#### 3.1 Processo de Rastreamento de Nuvens

A técnica de rastreamento automático de nuvens foi realizada inicialmente utilizando o método das correlações cruzadas proposto por Leese et al. (1971). Essa técnica descarta o rastreamento individual de nuvens devido à complexidade dessa tarefa mesmo em se contando com um computador potente. A técnica emprega um método computacional intensivo, selecionando um dado conjunto de nuvens em uma área e deduzindo o movimento desse conjunto. Usa-se duas imagens consecutivas de uma dada região em um dado período, defasadas de 30 minutos. Inicialmente é escolhida na primeira imagem uma matriz alvo, quadrada de ordem  $n$ . O problema então é encontrar na imagem sucessiva a matriz de mesma ordem que mais se assemelhe à matriz alvo escolhida na primeira imagem, ou seja, determinar na segunda imagem a localização do conjunto de nuvens selecionado na imagem anterior.

Supondo que a velocidade do vento não exceda certo valor, espera-se que tal conjunto de nuvens apresente um deslocamento máximo num dado intervalo de tempo. Portanto é conveniente delimitar uma área na segunda imagem para onde se espera que o conjunto de nuvens se tenha deslocado. Isso evita que o algoritmo procure por toda a imagem pelo conjunto de nuvens, economizando um tempo computacional considerável. Costuma-se definir na segunda imagem uma matriz de procura onde é esperado que estejam localizadas as nuvens a rastrear. Essa matriz é sempre maior que a matriz alvo, de forma a que a matriz alvo, deslocada verticalmente ou horizontalmente na segunda

imagem, estará sempre contida na matriz de procura. O coeficiente de correlação é calculado para cada uma das posições tomadas pela matriz alvo usando a Equação 3.1.1:

$$r_{m,n} = \frac{\sum_{i=1}^{\dim} \sum_{j=1}^{\dim} [S_{i+m,j+n} - \bar{S}(m,n)](T_{i,j} - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\dim} \sum_{j=1}^{\dim} [S_{i+m,j+n} - \bar{S}(m,n)]^2 \sum_{i=1}^{\dim} \sum_{j=1}^{\dim} (T_{i,j} - \bar{T})^2}} \quad (3.1.1)$$

$$\bar{S}(m,n) = \frac{1}{\dim^2} \sum_{i=1}^{\dim} \sum_{j=1}^{\dim} S_{i+m,j+n} \quad (3.1.2)$$

Em que:

$\dim$ : ordem da matriz alvo.

$\dim^2$ : dimensão da matriz de procura.

$T_{i,j}$ : valor do pixel correspondente a i-ésima linha e j-ésima coluna,  $1 \leq i \leq \dim$ ,  $1 \leq j \leq \dim$  na janela alvo.

$S_{k,l}$ : valor do pixel correspondente a k-ésima linha e l-ésima coluna na matriz de procura,  $1 \leq k \leq \dim 2$ ,  $1 \leq l \leq \dim 2$ .

$\bar{T}$ : média dos pixels na matriz (janela) alvo.

$\bar{S}(m,n)$ : valor médio dos pixels da sub área (janela alvo) na janela de procura no deslocamento (m,n).

Esse método tem como hipótese que a organização espacial do campo de nuvens sofre poucas modificações no intervalo de tempo entre as imagens, sendo possível localizá-lo na imagem sucessiva. No deslocamento (m, n), r, assume-se que a posição onde o coeficiente de correlação for maior é a posição final da matriz alvo, ou seja, o local onde o conjunto de nuvens selecionado na primeira imagem se encontra na imagem seguinte. Empregando um algoritmo de navegação apropriado é possível transformar os dados de deslocamento da matriz alvo em um vetor de vento.

O método das correlações cruzadas apresenta um bom funcionamento, porém mesmo utilizando um computador rápido o processamento da equação mencionada é longo. Laurent et al. (2002) testaram vários tamanhos para as janelas alvo e procura: 32x32 e 96x96, 16x16 e 48x48 e 12x12 e 48x48 pixels. Foi observado que quanto menor o tamanho das janelas, maior o número de vetores de vento obtidos. Logo, basta diminuir o tamanho das janelas para aumentar o nível de detalhamento do campo de vento em função do número de vetores. Também concluíram que o tamanho 16x16 é mais adequado na estimativa do vento utilizando o canal do vapor d'água.

Outro método utilizado para o rastreamento automático é o método da mínima distância euclidiana. Este método é semelhante ao método das correlações cruzadas, estando a diferença basicamente na equação utilizada para comparar as janelas alvo das duas imagens, expressa por;

$$Dist = \sqrt{\sum_{l=1}^{reg1} \sum_{c=1}^{reg1} [a(l,c) - b(l + LC, c + CC)]^2} \quad (3.1.3)$$

*reg1*: número de pixels do segmento listado

*l*: linhas

*c*: colunas

*a*: pixel da imagem 1

*b*: pixel da imagem 2

*LC*: linha deslocada na imagem secundária

*CC*: coluna deslocada na imagem secundária

Caso a correlação seja inferior a um valor definido, por exemplo 0,5, o vetor é desprezado (houve uma variação significativa no campo de nuvens entre os dois instantes). O uso da distância euclidiana é computacionalmente bem mais eficiente que a correlação cruzada e apresenta resultados semelhantes. A Figura 3.1.1 ilustra o procedimento de deslocamento em espiral da janela alvo entre as duas imagens.

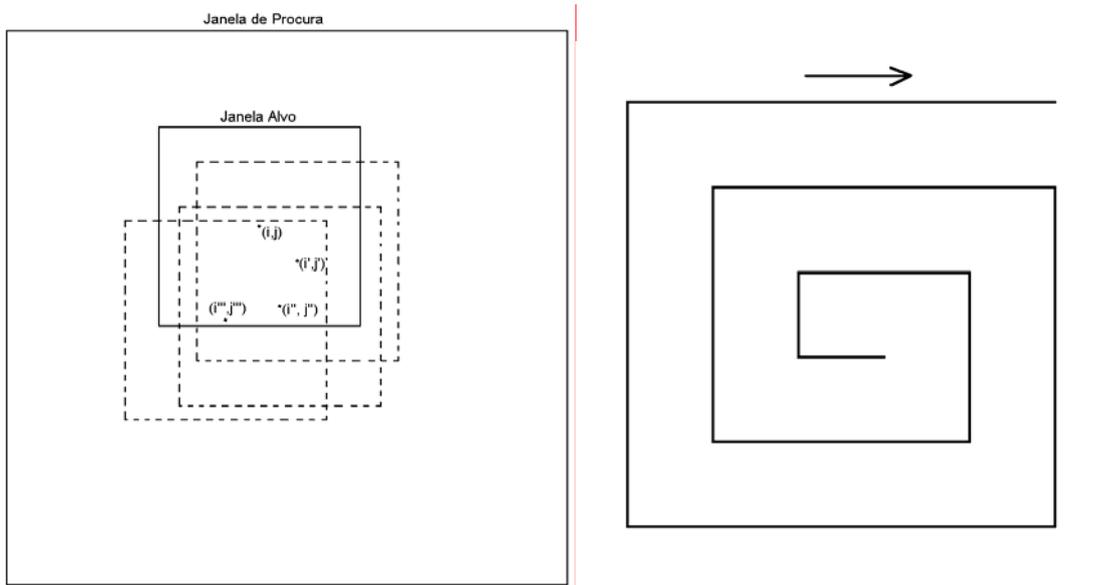


FIGURA 3.1.1 – Diagrama representando o procedimento de rastreamento, mostrando como são escolhidas as matrizes para o cálculo da correlação. A espiral mostra a posição do centro da matriz (janela alvo).

Os deslocamentos feitos em espiral permitem que os cálculos sejam otimizados, já que a estrutura rastreada é primeiro procurada o mais perto da posição inicial, se afastando gradualmente.

### 3.2 Determinação da Altura dos Vetores

Não basta obter as componentes zonal e meridional do vento. É também importante distinguir o nível do escoamento que tais vetores descrevem. Para isso é necessário estimar a altura da nuvem rastreada. Os satélites captam a radiação emitida por toda uma camada finita da atmosfera além de um determinado nível, ocasionando erros na determinação da altura dos ventos ao se utilizar imagens dos canais infravermelhos. Esses erros na determinação da altura podem gerar problemas durante a assimilação de dados de um modelo numérico, já que a informação de um dado nível pode ser atribuída a outro.

Muitos métodos para determinar a altura dos vetores foram desenvolvidos no passado. Fritz and Winston (1962) comparava a temperatura de brilho do topo da nuvem medida no canal infravermelho janela com o perfil de temperatura da região de interesse. A altura da nuvem era determinada onde a temperatura de brilho da nuvem e a temperatura do ar fossem mais próximas. Esse método assumia que a nuvem era opaca e preenchia todo o campo de visada do sensor do satélite. O método apresentava um ótimo funcionamento para regiões com nuvens estratiformes densas. Para nuvens semi-transparentes e cumulus pequenos, contudo, o método era pouco eficaz. Mosher (1976), Reynolds e Vonder Haar (1977) melhoraram a técnica proposta por Fritz e Winston (1962), permitindo sua aplicação a regiões com cobertura fracionada e estimando a emitância das nuvens a partir de dados do canal visível. Utilizando um modelo de espalhamento múltiplo, a reflectância das nuvens no canal visível era utilizada para calcular a espessura óptica e com isso, a emissividade da nuvem no canal infravermelho podia ser calculada. Esse método ainda era, porém, ineficiente para as nuvens semi-transparentes.

Um outro método (Hasler, 1981), utilizava observações estereográficas feitas simultaneamente por dois satélites geossíncronos. Era mais eficiente que os métodos baseados nos canais infravermelhos (desenvolvidos até 1981) na determinação da altura das nuvens. Possuía, no entanto, a limitação importante de só poder ser realizado nas regiões de overlap dos dois satélites, onde as medidas simultâneas podiam ser sincronizadas.

Outra técnica combina dados do canal infravermelho janela com dados do canal da absorção pelo CO<sub>2</sub> (Smith et al., 1970; Smith and Platt, 1978; Menzel, 1980). Deduzida a partir da equação de transferência radiativa, a altura da nuvem é determinada pela razão dos desvios da radiância da nuvem e valores correspondentes para céu aberto em dois ou mais canais espectrais. Essa técnica, em princípio, funciona bem para todos os tipos de nuvens. No entanto, como são utilizadas as diferenças entre medidas radiométricas, os resultados desse método são incertos quando o valor dessa diferença é

inferior ao nível de ruído dos sensores, o que pode ocorrer principalmente no caso de nuvens baixas.

Laurent (1993) utilizou o canal infravermelho para avaliar a temperatura do topo da nuvem em uma primeira aproximação. Conhecendo o perfil de pressão e temperatura da atmosfera no local da estimativa do vento, a altura do topo da nuvem é tomada como sendo o nível da atmosfera onde a temperatura é igual à temperatura de brilho medida pelo sensor do satélite. Seguindo esse princípio, Laurent calculava a temperatura de brilho das estruturas dos níveis altos utilizando a função de Planck e uma função de filtro radiométrico. Com isso, era determinado um nível de pressão correspondente à temperatura calculada para o topo da nuvem. Esse nível de pressão era então interpolado a um nível previsto pelo centro europeu de meteorologia ECMWF – European Organization for the exploitation of meteorological satellites. É necessário aplicar uma correção na altura das nuvens semi-transparentes, que apresentam temperaturas de brilho mais quentes do que a temperatura efetiva do topo. Essa necessidade se origina de parte da radiação emitida pela superfície atravessar a nuvem, fazendo com que a quantidade de radiação medida pelo satélite seja maior do que aquela que apenas a nuvem emitiu (soma das emissões da nuvem e superfície). Desta forma, se as alturas dos vetores obtidos pelo rastreamento dessa classe de nuvens não forem corrigidas, os vetores serão associados em um nível inferior ao real, já que quanto mais quente, supõe-se mais baixa a nuvem.

Um outro problema encontrado durante a determinação da altura do topo de uma nuvem é a diminuição da temperatura de brilho medida pelo satélite ocasionada pela absorção contínua do vapor d'água presente nas camadas da atmosfera acima do topo da nuvem observada (Schmetz 1986). Tal efeito de absorção cria tipicamente um decréscimo da temperatura real da ordem de 1 a 2 K. A correção desse efeito geralmente reduz a altura atribuída à nuvem de cerca de 40hPa em relação à estimada pelo modelo. Schmetz (1986) mostra também que o déficit para a temperatura de brilho para o nadir não excede 2 K para nuvens com topo por volta de 2 km de altura nas regiões tropicais.

Ainda, esse efeito provocado pela absorção do vapor d'água diminui rapidamente com o aumento da altura do topo da nuvem.

Como para o canal visível a informação direta é a reflectância e não a temperatura de brilho, as técnicas descritas não se aplicam diretamente a tal canal. Andreas et al (1997) utilizaram o canal visível na extração dos vetores de vento e utilizaram para a determinação do nível desses vetores uma superposição de imagens dos canais visível e infravermelho. Em particular, esse método ajusta a temperatura de brilho observada para uma nuvem baixa a um nível de pressão utilizando dados de um modelo de previsão de curto prazo do ECMWF. O intuito era atribuir ao vetor vento a altura mais próxima possível da altura real. Segundo Dunion et al. (2002) a altura da nuvem rastreada pode ser associada ao perfil atmosférico local utilizando um processo similar de sobreposição de canais a partir de imagens do satélite GOES. Isso é feito tomando os 20% pixels mais frios (temperatura de brilho) da área escolhida para ser rastreada (alvo) para representar o topo da nuvem. Combinado esses valores com os perfis de temperatura do Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS), a altura do vetor pode ser estimada.

Hasler et al. (1979) encontraram, a partir de medidas de vento realizadas por aviões, que para nuvens do tipo cumulus e cirrus isolados que se encontram nas regiões tropicais a diferença entre o movimento do topo da nuvem e o movimento de sua base provocados pelo vento varia entre 0,9 e 1,7 m/s. Como a temperatura da base da nuvem não pode ser estimada diretamente do espaço, um critério para tal deve ser desenvolvido. O mesmo autor sugere que as nuvens nos níveis baixos, sobre os oceanos, se movem com os ventos à sua base. Logo, ventos em níveis baixos não devem ser associados aos ventos na altura do topo da nuvem, mas na altura de sua base.

O histograma de temperatura de brilho mostrado na Figura 3.2.1 é um resultado típico para um segmento de imagem, referente a uma região oceânica. Dois picos podem ser observados no histograma. O conjunto que contém o pico à esquerda representa o segmento da imagem que contém nuvens e o outro conjunto, à direita, representa o

segmento oceânico. Esse histograma pode ser ajustado por duas gaussianas incompletas, (vide Figura 3.2.2) descrevendo cada um dos dois grupos. O ponto de intersecção entre as duas gaussianas pode ser interpretado como sendo o ponto limite entre céu coberto e céu claro. Le Marshall et al. (1994) sugerem que a temperatura da base da nuvem seja inferida a partir de um histograma como o mostrado na Figura 4, de acordo com a Equação 3.2.1:

$$T_{base} = T_{nuvem} - \sqrt{2}\sigma_{nuvem} \quad (3.2.1)$$

em que:

$T_{nuvem}$  : temperatura média do conjunto de nuvens

$\sigma_{nuvem}$  : desvio padrão do conjunto de nuvens

O valor  $\sqrt{2}\sigma_{nuvem}$  é o ponto tomado no limite do cluster onde a função de densidade de probabilidade assume o valor  $1/e$ . Le Marshall et al. (1994) dizem que reduzir a altura atribuída aos vetores nos níveis baixos geralmente proporciona um melhor ajuste, gerando um erro de estimativa menor.

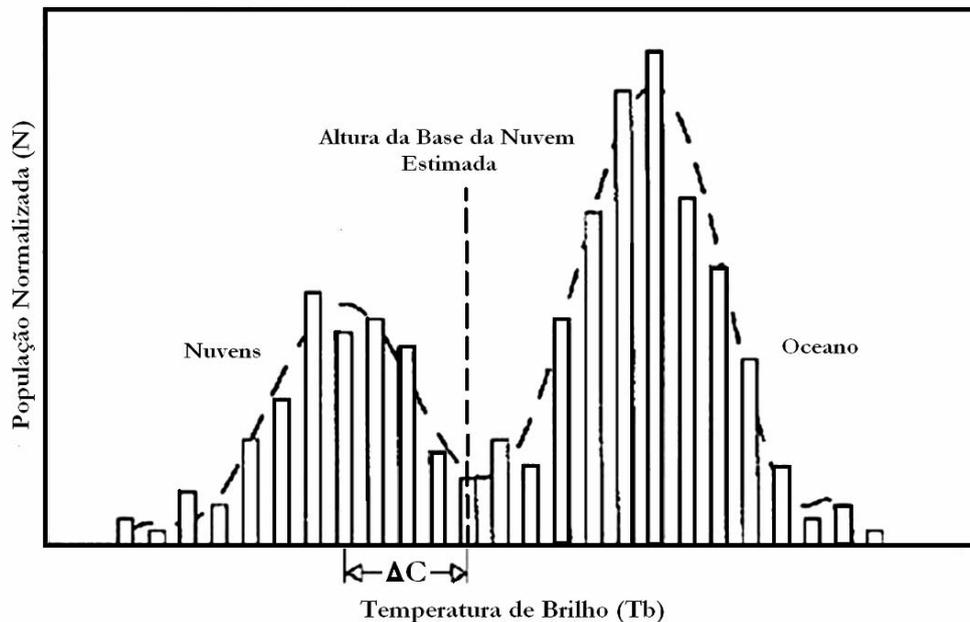


FIGURA 3.2.1 - Histograma das temperaturas de brilho de um segmento de imagens que contém nuvens baixas e oceano descoberto. A temperatura estimada da base da nuvem é mostrada pela linha tracejada.

FONTE: Adaptada de Le Marshall et al. (1994).

### 3.3 Controle de Qualidade

Conforme mencionado anteriormente, é necessário que os resultados obtidos através dos cálculos realizados na extração das componentes do vento passem por algum tipo de controle de qualidade que verifique a validade dos vetores. Testes para controle de qualidade dos vetores geralmente se baseiam na verificação da aceleração do vetor e sua direção em relação aos vetores próximos e na comparação a campos de vento previstos por modelos numéricos. Para Holmlund et al (2001) todos os vetores que apresentavam velocidade ou direção fora de determinados parâmetros pré-definidos devem ser descartados. Ainda que, segundo eles, essas aproximações e definições de limiares sejam bastante eficientes e uma ferramenta muito útil para eliminar erros grosseiros dos algoritmos de extração, esses métodos não fornecem qualquer informação sobre a qualidade dos vetores gerados.

Um teste muito importante é o teste de simetria. Esse teste consiste em calcular o vetor vento entre as imagens em  $t_0$  e  $t_0-30$  min e compará-lo ao vetor obtido entre as imagens  $t_0$  e  $t_0+30$  min. Caso tais vetores sejam muito diferentes um do outro, o vetor original será rejeitado, pois é assumido que a correlação existente que deu origem a ele foi baseada em formações de nuvens aleatórias e não a partir de um conjunto específico. Quantificando esse critério, consideramos  $\vec{V}_1$  o vetor calculado entre  $t_0$  e  $t_0-30$  min e  $\vec{V}_2$  o vetor calculado entre as imagens em  $t_0$  e  $t_0+30$  min;  $\vec{V}_2$  não é descartado caso a Equação 3.3.1 seja verdadeira. As constantes  $a$  e  $b$  são escolhidas convenientemente tornando o teste mais severo ou mais brando.

$$|\vec{V}_1 - \vec{V}_2| < a + b|\vec{V}_1| (m/s) \quad a, b \in \mathfrak{R} \quad (3.3.1)$$

Outro teste desenvolvido por Laurent et al (2002) tem o intuito de verificar a consistência espacial dos vetores de vento obtidos pelo método de extração. Tal método calcula, as diferenças vetoriais entre cada um dos vetores obtidos e os vetores na vizinhança, em um raio de 4 graus e em uma camada de 100 hPa acima ou abaixo. Ainda outro teste utilizado no controle de qualidade dos vetores é o teste de consistência espacial. Este teste visa avaliar a consistência espacial de cada vetor em relação aos vetores vizinhos. Sendo  $\Delta\vec{V}$  a menor diferença vetorial,  $\vec{V}_1$  será desprezado caso a relação a seguir não seja satisfeita:

$$|\Delta\vec{V}| < a(b|\vec{V}_1| + c) (m/s) \quad ; a, b, c \in \mathfrak{R} \quad (3.3.2)$$

A aplicação desse teste proporciona a remoção de cerca de 12% dos vetores, levando a uma redução do erro quadrático médio total. Em seu estudo, Laurent et al (2002) observaram que a velocidade de referência não apresentou diminuição, mas um ligeiro aumento. Conclui-se que o teste não desprezou os vetores de maior velocidade, e sim os vetores inconsistentes espacialmente. A velocidade do vetor obtido também deve ser avaliada levando em consideração o tamanho da janela de procura utilizada e o intervalo

de tempo entre as imagens utilizadas. Por exemplo, em se utilizando imagens com intervalos curtos, como 30 minutos ou menos, velocidades baixas são perfeitamente aceitáveis.

### **3.4. O Uso do Canal 2 do GOES (Infravermelho Próximo – 3,9 $\mu\text{m}$ )**

#### **3.4.1. Contaminação Solar no Canal Infravermelho Próximo**

A banda do infravermelho próximo é suscetível à contaminação solar durante a fase diurna devido à sua proximidade do espectro visível. Logo, para o uso deste canal durante o dia, deve-se levar em conta a contribuição solar. Nuvens do tipo cirrus apresentam pouca reflexão da radiação solar e nuvens cumulus são altamente refletivas na banda do infravermelho próximo. Como os cumulus de baixos níveis são os alvos mais abundantes nos baixos níveis, essa reflectância provoca problemas no seu rastreamento devido a efeitos de saturação do sensor do satélite.

A Figura 3.4.1 apresenta o espectro de transmissão da atmosfera terrestre nas faixas do infravermelho próximo, médio e distante. O espectro corresponde a uma camada de 1830 m de ar acima do nível do mar e com 40% de umidade relativa a 25°C. Na parte de baixo da figura, estão indicadas as bandas de absorção de alguns componentes do ar atmosférico responsáveis pela forma da curva de transmissão. Por exemplo, sabe-se que o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) absorve acentuadamente nas faixas de 2,7 $\mu\text{m}$ , 4,26  $\mu\text{m}$  e acima de 14  $\mu\text{m}$ , fazendo com que a transmitância do ar em relação à radiação de onda longa, seja baixa nestas regiões. É importante ressaltar que a figura se refere a uma camada de ar de quase 2 km de espessura. Obviamente, para distâncias menores ocorre uma absorção menor, ficando o formato da curva alterado.

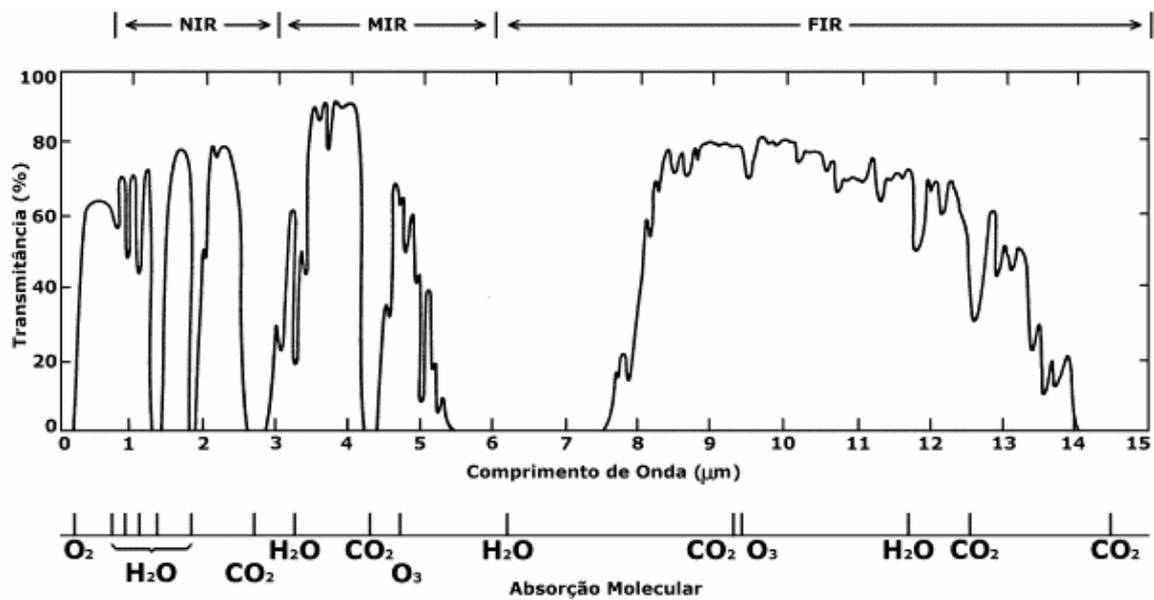


FIGURA 3.4.1 – Espectro de transmissão de uma faixa da atmosfera terrestre no espectro infravermelho, mostrando a absorção molecular de diferentes gases que compõe a atmosfera.

FONTE: Adaptada de Satellite Meteorology.

Geralmente, os sensores (a bordo de satélites) sensíveis no espectro infravermelho operam nas faixas de 3-5  $\mu\text{m}$  e 8-14  $\mu\text{m}$  devido à baixa absorção da atmosfera nesses intervalos. Essas regiões são conhecidas por janelas atmosféricas devido a essa característica de baixa absorção da radiação de onda longa. A Tabela 3.4.1 resume a subdivisão do espectro infravermelho, utilizada por Hudson e que é mais comum na literatura, principalmente na área de sensores (as siglas foram mantidas em Inglês).

TABELA 3.4.1 – Subdivisão do espectro infravermelho.

Designação	Abreviação	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )
Infravermelho próximo	NIR	0,75-3
Infravermelho médio	MIR	3-6
Infravermelho distante	FIR	6-15
Infravermelho extremo	XIR	15-1000

A componente da radiação proveniente das nuvens cumulus medida na banda 3,9  $\mu\text{m}$  durante o dia pelo sensor GOES pode parecer tão quente quanto a superfície do oceano. Isso torna o trabalho de detecção extremamente difícil e aumenta potencialmente os erros. A utilização desse canal na detecção e rastreamento de nuvens na fase diurna não é portanto indicada, sendo de mais utilidade durante a noite. Na Tabela 3.4.1, a banda do infravermelho próximo é definida como sendo o intervalo entre os comprimentos de onda 0,75  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ . Assim, o canal 3,9  $\mu\text{m}$ , citado inúmeras vezes neste texto, não pertence, segundo a subdivisão proposta por Hudson, à banda do infravermelho próximo, mas sim ao infravermelho médio. Contudo, como é comum na literatura que os canais dos satélites que operam nessa faixa sejam citados como operando no infravermelho próximo será essa a designação adotada nesse texto, e não a subdivisão proposta por Hudson.

### 3.4.2 Ruído do Canal 2 (3,9 $\mu\text{m}$ ) do Satélite GOES

Um grande inconveniente do sensor do satélite GOES que opera na banda de 3,9  $\mu\text{m}$  é o nível de ruído elevado para alvos com temperatura baixa. A Figura 3.4.2.1 apresenta a comparação entre as radiâncias dos canais 2 (3,9  $\mu\text{m}$ ) e 4 (10,7  $\mu\text{m}$ ) do satélites GOES.

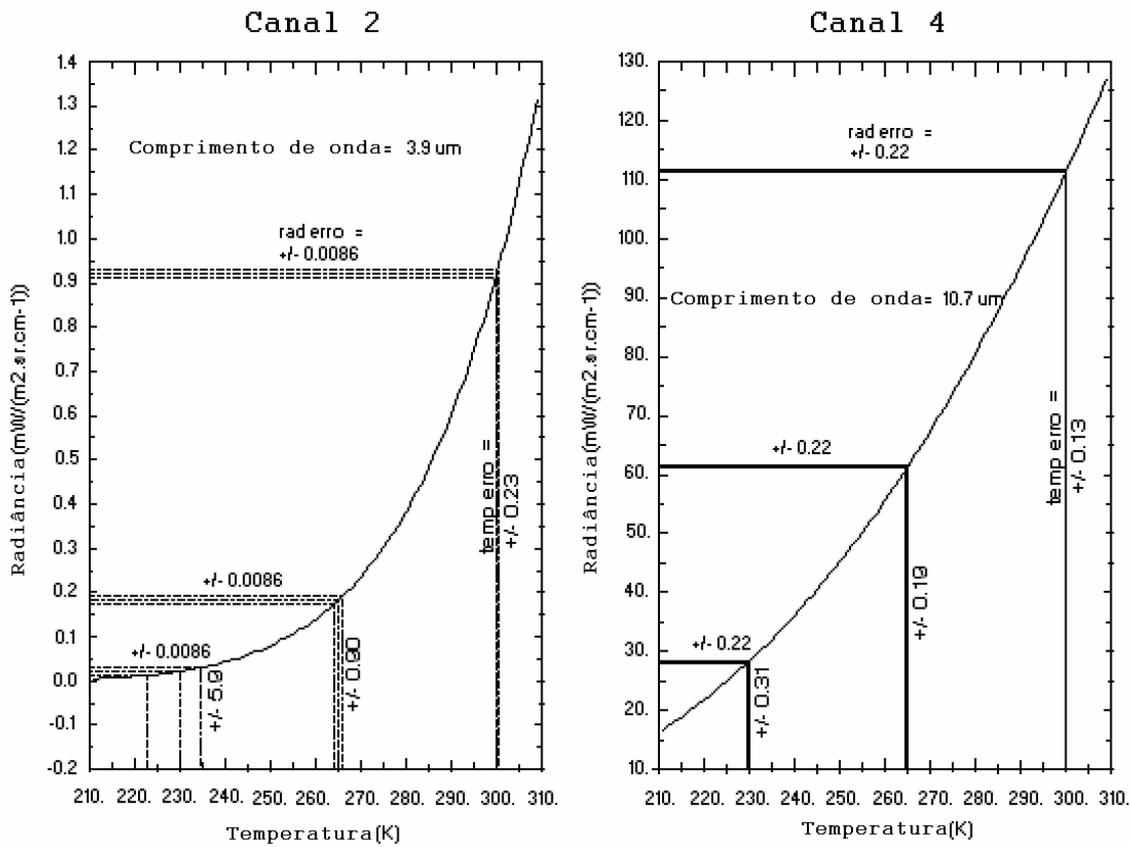


FIGURA 3.4.2.1 – Radiância versus temperatura de brilho para os canais do satélite GOES-12 em 3,9  $\mu\text{m}$  e 10,7  $\mu\text{m}$  respectivamente.

FONTE: Adaptada de

<http://www.cira.colostate.edu/ramm/goes39/toc.htm>

Nota-se que para o comprimento de onda de 10,7  $\mu\text{m}$  (direita), a radiância medida apresenta um comportamento quase linear se comparado à curva referente à relação radiância/temperatura de brilho para o comprimento de onda de 3,9  $\mu\text{m}$  (esquerda). Com isso, para o comprimento de onda 10,7  $\mu\text{m}$  a radiância da temperatura de brilho pode ser determinada com precisão para as temperaturas quentes e frias das cenas. Para o comprimento de onda 3,9  $\mu\text{m}$ , nota-se que o valor da radiância cai rapidamente à medida que a temperatura diminui. O gráfico apresentando à esquerda na Figura 2.4.2.2 mostra o ruído da temperatura equivalente em função da temperatura dos alvos presentes numa cena qualquer, para os comprimentos de onda 3,9  $\mu\text{m}$  e 10,7  $\mu\text{m}$ . Nota-

se que a precisão da temperatura que pode ser medida no canal 3,9  $\mu\text{m}$  é baixa para temperatura abaixo de 250 K, com erro de 2 K. O crescimento do erro se torna muito acentuado à medida que o valor da temperatura diminui. Assim, esse canal não é muito útil para cenas com temperaturas muito baixas, destinando-se ao uso no rastreamento de nuvens baixas nas regiões tropicais, principalmente oceânicas e que apresentam altas temperaturas de brilho.

### **3.4.3. Infravermelho Próximo – Algoritmos de Ajuste e Realce de Imagem**

O canal do infravermelho próximo apresenta gradientes pequenos de temperatura de brilho nos níveis quentes mais baixos. Isso acaba limitando a eficiência de um algoritmo de rastreamento em detectar os alvos (nuvens). Uma técnica foi desenvolvida para melhorar as imagens no infravermelho próximo, realizando um aumento do contraste da temperatura de brilho na extremidade quente do espectro (níveis inferiores). Essa técnica alonga a temperatura de brilho na faixa de 50 a 160 (counts) para o intervalo 0 a 255. Tal artifício aumenta consideravelmente o gradiente nos níveis inferiores, ao custo da diminuição do gradiente nos níveis médios e altos da imagem. Portanto, a detecção fica estritamente limitada a nuvens em níveis inferiores a 600 hPa. Essa técnica de realce da imagem é realizada no conjunto das três imagens do infravermelho próximo usadas no rastreamento das nuvens. Uma imagem na janela atmosférica coincidente da imagem no infravermelho próximo é utilizada para determinar a altura das nuvens no rastreamento e por fim, na extração do vento. Dunion e Velden (2002) concluíram que o canal infravermelho próximo 3,9  $\mu\text{m}$ , a bordo do satélite GOES, é, para a estimativa do vento em baixos níveis (600-950 hPa), superior ao canal infravermelho médio 10,7  $\mu\text{m}$ , utilizando a cobertura de nuvens como traçador, tanto na meso-escala quanto na escala sinótica.

Segundo Lee et al. (2000), o cálculo da diferença entre os canais infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho janela (10,7 $\mu\text{m}$ ) é uma ferramenta muito útil para o rastreamento de nuvens no período noturno, pois auxilia na determinação dos diferentes tipos de nuvens, principalmente distinguindo nuvens altas (cirrus) de nuvens baixas

(cumulus). Esse método é conhecido por LSBTD (longwave-shortwave brightness temperature difference, 10,7–3,9  $\mu\text{m}$ ). Os autores dizem que sobre nuvens baixas, o LSBTD depende de vários fatores, entre eles o tamanho das gotas que formam as nuvens e a absorção do vapor d'água presente entre as nuvens e o sensor do satélite, (principalmente para as nuvens baixas). Segundo eles, o LSBTD assume valores positivos para as nuvens baixas, pois na banda de 10,7  $\mu\text{m}$  a temperatura de brilho de tais nuvens é próxima da emissividade de um corpo negro e para o comprimento de onda de 3,9  $\mu\text{m}$ , a temperatura de brilho é inferior a de um corpo negro. Logo, a diferença entre esses canais é sempre positiva. Para áreas de céu aberto, a superfície continental e as áreas oceânicas geralmente assumem valores de LSBTD iguais ou pouco abaixo de zero. Dessa forma, existe um contraste entre essas regiões e as nuvens baixas.

Em locais onde o tamanho das gotas das nuvens é relativamente pequeno (regime de condensação continental) o LSBTD assume valores na faixa de 2 a 6 graus. Já sobre locais com gotas maiores (oceanos em latitudes médias sob regime de condensação marítimo) o LSBTD tende a ser menor, de 1 a 2 graus. Sobre os oceanos tropicais, acima do topo das nuvens baixas, a atenuação provocada pelo vapor d'água acaba neutralizando os efeitos provocados pela emissividade de tais nuvens, assim o LSBTD assume valores de 0 a 1 grau. Porém, o oceano com céu descoberto na região tropical apresenta valores de LSBTD por volta de 2 a 3 graus negativos gerando assim contraste com as nuvens nas imagens realçadas por esse método.

Utilizando dados do imageador dos satélites GOES 8 e 9, Lee et al. (1997) discutem o monitoramento da evolução e movimento das nuvens estratiformes baixas. Particularmente os autores discutem como uma seqüência de imagens bi-espectrais, baseada nos canais infravermelho próximo 3,9  $\mu\text{m}$  e infravermelho janela 10,7  $\mu\text{m}$ , pode ser utilizada para esses propósitos. Essa técnica apresenta uma série de problemas relacionados ao rastreamento de nuvens baixas. As nuvens baixas são muito difíceis, ou até impossíveis, de serem detectadas durante a noite, devido ao baixo contraste entre elas e a superfície nas imagens dos canais térmicos.

Durante o período diurno, a radiação solar torna as nuvens estratiformes baixas mais brilhantes nas imagens do canal infravermelho próximo dos satélites GOES. Isso torna difícil distinguir tais nuvens da superfície continental coberta por neve ou cirrus densos. O canal infravermelho próximo fornece freqüentemente uma delimitação superior das nuvens baixas nas imagens, pois as gotas produzem uma reflectância maior que as nuvens de gelo ou as áreas cobertas por neve. Nuvens observadas no infravermelho próximo apresentam emissividade significativamente baixa se comparadas ao infravermelho janela (onda longa) (Hunt, 1973; Yamanouchi e Kawaguchi, 1992).

Thomas et al. (1997) utilizaram um produto de reflectância de onda curta para a identificação dos diferentes tipos de nuvens. Esse produto consistia em uma combinação de dados de ondas longa e curta, similar ao LSBTD, porém utilizado para o período diurno. Tal produto é expresso como uma proporção da reflectância medida em relação à máxima reflectância teórica para uma dada cena, de 0 a 100%. Essa formulação torna ideal a comparação entre a informação dos canais térmicos e o canal visível.



## **CAPÍTULO 4**

### **DADOS E METODOLOGIA**

Este Capítulo descreve a estrutura do modelo de estimativa do vento para os dois tipos de imagens utilizadas (visível e infravermelho próximo) e apresenta uma breve consideração sobre cada etapa do processo, destacando dificuldades esperadas e possíveis soluções. O Capítulo posterior descreve em detalhe as características do modelo de estimativa do vento.

#### **4.1 Dados**

O modelo desenvolvido para a extração dos ventos na baixa troposfera é baseado no rastreamento das nuvens presentes nas imagens do satélite geostacionário GOES-12. Nesse processo, são utilizadas imagens do canal 1 (banda visível, 0.55-0.75  $\mu\text{m}$  com resolução espacial de 1x1 km no ponto sub-satélite) e imagens do canal 2 (infravermelho próximo, 3,9  $\mu\text{m}$ , com resolução de 4x4 km). As imagens do canal 1 são utilizadas para a extração de vento no período diurno e as imagens do canal 2 para o período noturno.

As imagens são recebidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais DSA, do CPTEC. Essas imagens abrangem a América do Sul e parte dos oceanos adjacentes. Existem certas particularidades na utilização das imagens de cada canal, devido ao tipo de informação contida em cada uma delas. Na imagem do canal visível, cada pixel representa uma medida do fator de refletância de um dado local da superfície e nas imagens do canal infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ), cada pixel está associado ao valor da temperatura de brilho dos alvos que compõem a cena.

O trabalho utilizou para avaliação dos vetores de vento deduzidos pelo modelo radiossondagens semelhantes às usadas nos modelos operacionais e referentes ao período de 21 a 25 de março de 2005 realizadas em diversos pontos da América do Sul disponíveis no banco de dados da DSA,. Também foram utilizados os campos de vento das reanálises do National Center for Environmental Predictions (NCEP) para a comparação entre os vetores de vento obtidos pelo modelo, principalmente sobre as regiões oceânicas, já que em tais locais a existência de dados provenientes de radiossondagens é escassa ou praticamente nula.

O trabalho utilizou análises do modelo ETA para estimativa do nível de condensação por levantamento, que auxiliou na estimativa da altura da base das nuvens baixas, além se servir como referência na avaliação da ferramenta na sua fase de teste de qualidade. O presente estudo utilizou uma série contínua de imagens com a finalidade de simular a realidade, com problemas como falhas nos dados e outros mais comuns na fase operacional de qualquer modelo.

#### **4.1.1. Satélite GOES 12 – Imageador GOES I-M**

O satélite GOES-12 está posicionado sobre o equador na longitude de  $75^{\circ}\text{W}$ . O GOES I-M é um imageador radiométrico de cinco canais, sendo um operando no visível e os outros quatro operando no infravermelho. Ele foi desenvolvido para medir a radiação emitida pelo sistema Terra-atmosfera.

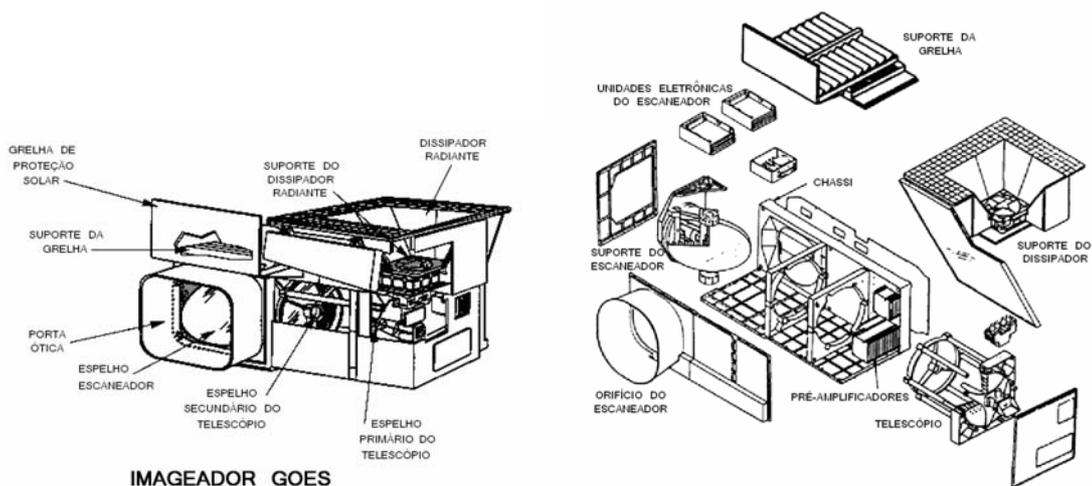


FIGURA 4.1.1.1 - Imageador GOES.

FONTE: Adaptada de <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/>

TABELA 4.1.1.1 – Características técnicas do instrumento imageador (GOES 12).

Número do canal	1 (Visível)	2 (Ondas curtas)	3 (Umidade)	4 (IR 1)	5 (IR 2)
Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	0,55 – 0,75	3,80 - 4,00	6,50 – 7,00	10,20 – 11,20	11,50 – 12,50
Resolução espacial	1 km	4 km	4 km	4 km	4 km
Calibrador radiométrico	Espaço e um corpo negro interno a 290 K				
Frequência de calibração	Espaço: 2,2 seg (full disc), 9,2 or 36,6 sec (setor/area) Infravermelho: 30 minutos				
Precisão absoluta do sistema	Canal infravermelho: menor ou igual a 1 K Canal visível : 5% da radiação máxima da cena				
Taxa de amostragem das imagens	Full disc, menor ou igual a 26 minutos				

## 4.2. Processo de Rastreamento

O processo se baseia em rastrear as nuvens presentes nas imagens do satélite, determinando o seu deslocamento e assim deduzindo direção e velocidade do vento. Parte-se da hipótese de que as modificações ocorridas nos campos de nuvens entre as duas imagens se deve somente ao deslocamento provocado pelo campo de vento. Para esse rastreamento, é utilizado um par de imagens de uma mesma região com intervalo de tempo de 30 minutos. Na imagem no instante  $t_0$ , são escolhidas estruturas de nuvens e a técnica se baseia em determinar a localização dessas estruturas escolhidas na imagem subsequente (no tempo  $t_0+30$  min).

Conhecendo a posição geográfica de cada estrutura em cada uma das imagens e o intervalo de tempo entre as imagens, é possível determinar a velocidade do vento que provocou o deslocamento das nuvens e também a sua direção, já que são conhecidas as posições inicial e final das estruturas. Porém, geralmente não é possível localizar uma estrutura idêntica na segunda imagem pois as nuvens ou um conjunto delas se modificam tanto pela ação dos ventos quanto pelo seu próprio ciclo de vida. Dessa forma, o que se procura é a estrutura mais semelhante possível. Como esse processo de rastreamento é automático, a escolha das estruturas a serem rastreadas é feita de forma sistemática. Chamando de imagem 1 a imagem onde são selecionadas as nuvens a serem rastreadas e de imagem 2 a imagem seguinte, o processo de rastreamento é realizado da seguinte forma:

Determina-se na imagem 1 subáreas, denominadas janelas alvo, que contêm as estruturas a procurar na imagem 2. Uma sub-área é uma matriz quadrada de pixels obtida a partir da imagem 1. Determinada a janela alvo na imagem 1, procura-se a mesma estrutura (janela alvo) na imagem seguinte em uma região em torno da janela alvo na imagem 1. A avaliação da semelhança entre elas é feita a partir do cálculo da correlação entre as duas matrizes (janelas alvo). A direção e a velocidade do vento são obtidas a partir da localização geográfica do pixel central da janela, nas imagens 1 e 2, sendo determinada pela janela da imagem 2 com a melhor correlação com a janela da

imagem 1. A região de procura da estrutura de nuvens na imagem 2 é denominada janela de procura. Essa nova matriz possui dimensão maior que a dimensão da janela alvo, já que sua função é delimitar uma região onde serão procuradas as estruturas semelhantes, evitando que a busca seja feita por toda a imagem 2.

A janela de procura é determinada em relação à dimensão da janela alvo. Assumindo que a velocidade máxima que o modelo é capaz de captar é  $V_{\max}$ , tem-se que num intervalo de tempo  $\Delta t$  o deslocamento máximo que uma dada estrutura pode realizar será  $\Delta S_{\max} = V_{\max} \Delta t$ . Assim, a dimensão de tal janela é dada por:

$$\text{DimJP} = 2 \Delta S_{\max} + \text{DimJA} \quad (4.2.1)$$

Supondo que a velocidade máxima do vento que será captado pelo modelo seja de 150 km/h, sabendo-se que o intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas sempre será de 30 minutos e como cada pixel da imagem representa uma área de 1 km<sup>2</sup> (para imagens do canal 1), a Equação anterior pode ser escrita como:

$$\text{DimJP} = 150 + \text{DimJA} \quad (4.2.2)$$

Já para o canal infravermelho, basta assumir que cada pixel representa uma área de 4 x 4 km. Em resumo, cada sub-matriz quadrada contida na janela de procura, de mesma dimensão que a janela alvo, é comparada com a matriz alvo em questão. A comparação entre cada par de janelas alvo é feita calculando a correlação entre ambas matrizes (janelas), pelo método do coeficiente de correlação cruzada conforme descrito no Capítulo introdutório, seguindo um movimento em forma de espiral. A Figura 4.2.1 mostra duas imagens do canal visível, como as utilizadas no processo de rastreamento. Nas imagens estão representadas as janelas alvo (quadro menor) e a de procura (quadro branco maior). As dimensões na figura são meramente ilustrativas, sendo menores na realidade.

Imagem Central ( $t_0$ )

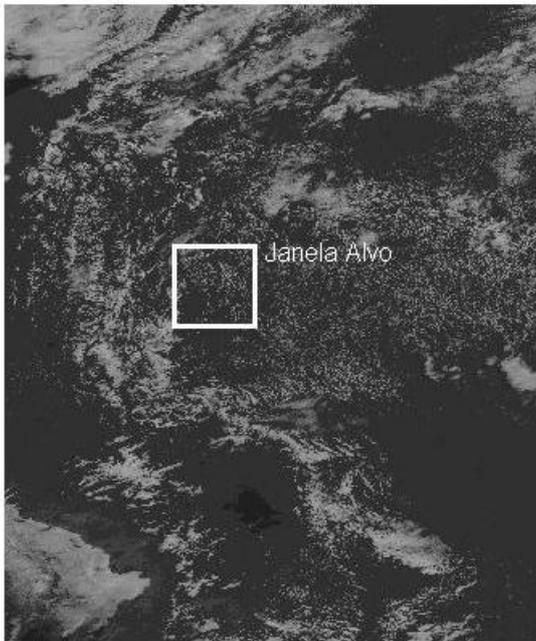


Imagem Posterior ( $t_0+30\text{min}$ )



FIGURA 4.2.1 - Exemplo de janelas alvo e de procura para estimativas de vento utilizando-se imagens do satélite GOES. A janela de procura visa delimitar a região onde é esperado que o conjunto de nuvens procurado esteja localizado.

No processo de rastreamento é necessário um conjunto de três imagens consecutivas, com intervalo de tempo de 30 minutos. A utilização de três imagens tem como objetivo, realizar um teste de consistência espacial para cada vetor extraído. Esse teste visa avaliar a simetria entre um vetor extraído de um par de imagens no tempo  $t_0$  e  $t_0+30$  min e um outro par extraído no tempo  $t_0-30$  min e  $t_0$ . Esse teste é chamado de teste de simetria e será discutido em detalhes no próximo Capítulo.

### 4.3. Correção Radiométrica

Antes de iniciar o processo de rastreamento das estruturas utilizando imagens do canal visível, é necessário realizar a correção radiométrica dessas imagens. Esse é o primeiro passo após a seleção das imagens do canal visível a serem utilizadas - essa etapa é exclusiva desse canal. Quando são utilizadas as imagens do canal infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ) a correção radiométrica não é realizada, já que o tipo de informação contido nas imagens desse canal não é mais o fator de reflectância, e a informação não depende da posição solar, mas da temperatura de brilho dos alvos. Nesse caso, pode-se assumir que as nuvens são superfícies isotrópicas.

Essa correção é realizada para converter o fator de reflectância de cada pixel em um valor de reflectância. Sabe-se que fator de reflectância depende do ângulo de incidência da radiação solar. Tal conversão é realizada segundo a Equação 4.3.1.

Sabe-se que as nuvens não são necessariamente superfícies isotrópicas para a radiação visível, conhecidas também por superfícies Lambertianas. Uma superfície é dita Lambertiana quando reflete radiação na mesma intensidade em todas as direções. Nessa correção, supõe-se que as nuvens sejam superfícies isotrópicas, o que conduz a alguns erros para grandes ângulos zenitais. A radiação refletida, particularmente a radiação solar, é de grande importância para a meteorologia por satélites. Essa radiação refletida é quantificada de muitas formas. A mais comum é a reflectância bidirecional  $\gamma_r$ , definida como sendo a fração da radiação na direção incidente que é refletida numa dada direção.

Resumindo, a relação entre o fator de reflectância  $F$  e a reflectância  $R$  é:

$$F = \frac{\pi L}{S}, \quad R = \frac{hF}{\cos Z} \quad (4.3.1)$$

Sendo  $L$  a radiância medida pelo sensor do satélite,  $S$  o fluxo específico (relativo à faixa espectral observada) proveniente do Sol que incide sobre o topo da atmosfera,  $Z$  o ângulo zenital solar e  $h$  o fator de correção da anisotropia da superfície refletora. Geralmente  $h$  não excede 1,2 e não se conhecendo com precisão esse valor é mais indicado considerá-lo igual a 1, valor que representa a refletância lambertiana (Lubin e Weber, 1995).

#### **4.4. Classificação das Nuvens a Serem Rastreadas**

Visto que o modelo de extração de ventos a ser desenvolvido o faz nos níveis baixos, não havendo interesse nos ventos nos níveis médios e altos, tem-se que as nuvens baixas devem ser identificadas e separadas das demais nuvens. É interessante que as nuvens médias e altas sejam eliminadas das imagens para não interferirem no cálculo das correlações. O método utilizado para eliminar as nuvens altas e médias é substituir os pixels que representarem essas classes de nuvens por um valor aleatório ou constante qualquer, conforme mostrado adiante.

Para as imagens do canal visível, a classificação é feita utilizando um conjunto de parâmetros que definem as possíveis classes de nuvens e regiões de superfície que podem estar presentes numa imagem. Compara-se os atributos de cada pixel com todos os parâmetros pré-definidos e aquele parâmetro correspondente à maior semelhança define a classe de nuvem (ou superfície) que o pixel avaliado representa. Esse método é explicado com mais detalhes na Seção 4.4.1. Já as imagens do canal infravermelho próximo são classificadas a partir de um limiar de temperatura de brilho. Pixels que apresentam temperatura de brilho inferior ao limiar são assumidos como sendo nuvens médias ou altas e descartados. Além disso, a diferença entre os pixels das imagens dos canais infravermelho próximo e infravermelho janela identifica nuvens semitransparentes.

#### 4.4.1 Imagens do Canal Visível

Para a classificação das nuvens das imagens do canal 1, utiliza-se uma outra imagem do canal infravermelho janela (canal 4, 10,7  $\mu\text{m}$ ) referente à mesma cena. A utilização de uma imagem do canal infravermelho deve-se à redução da temperatura de brilho das nuvens à medida que elas vão assumindo altura mais elevada., sua temperatura de brilho diminui. Com isso é possível estimar sua altura. Obviamente, esse conjunto de imagens é referente ao mesmo conjunto de imagens do canal visível selecionado anteriormente. Vale ressaltar que essas imagens do canal 4 (infravermelho janela) apresentam resolução espacial menor que as imagens do canal visível utilizadas, sendo a resolução espacial de 4x4 km no ponto subsatélite para o canal 4.

Devido às diferentes resoluções espaciais entre os dois tipos de imagens (visível/infravermelho), uma área representada por um pixel na imagem do infravermelho corresponde a uma área de 16 pixels na imagem do canal visível. Dessa forma, é necessário definir um processo que permita a comparação entre elas, associando cada pixel da imagem do canal visível a um pixel na imagem do canal infravermelho. Optou-se inicialmente por associar cada pixel da imagem do canal visível ao pixel da imagem do canal infravermelho de latitude e longitude mais próximas. Esse método mostrou-se muito lento do ponto de vista computacional e de certa forma desnecessário, já que para todo pixel do canal visível que estivesse contido numa área representada por um pixel do canal infravermelho, obviamente, a latitude e longitude deste pixel seriam as mais próximas. A melhor forma encontrada foi associar cada pixel da imagem do canal 4 a 16 pixels distintos da imagem do canal 1. Os pixels foram associados aos pares, da seguinte maneira:

$$(IV_{i,j}, V_{k,l}) \quad \begin{array}{l} 4i-3 \leq k \leq 4i \\ 4j-3 \leq l \leq 4j \end{array}$$

em que:

$IV_{ij}$ : pixels da imagem do canal infravermelho

$V_{k,l}$ : pixels da imagem do canal visível

Essa metodologia de comparação entre os dois tipos distintos de imagens traz consigo a inconveniência de que, alguns pixels representando nuvens médias e ou altas continuam presentes na imagem mesmo após a classificação das nuvens e também que pixels representando nuvens baixas podem ser descartados. Isso ocorre porque nem sempre essas regiões de 4 x 4 pixels da imagem do canal visível irão conter pixels representando somente nuvens altas, médias ou baixas. Com certeza existirão situações em que entre os 16 pixels que compõem esses conjuntos existirão pixels representando nuvens altas e médias. Assim, caso o pixel da imagem do canal infravermelho que será comparado a esse conjunto de 4 x 4 pixels do canal visível represente uma região de nuvens altas ou médias, todos os 16 pixels do canal visível serão descartados e conseqüentemente os pixels representando as nuvens baixas serão eliminados. Já no caso em que o pixel do canal infravermelho representa uma região de nuvens baixas, todos os 16 pixels serão preservados, mantendo-se dessa forma pixels representando nuvens altas e ou médias na imagem. Essa segunda situação cria uma preocupação maior, pois a imagem pode ser contaminada com nuvens altas e médias. Mesmo com essa desvantagem, o método mostrou-se eficiente, pois testes de consistência geralmente eliminam os vetores contaminados por nuvens altas e médias. A Figura 4.4.1.1 exemplifica a relação entre as diferentes resoluções.

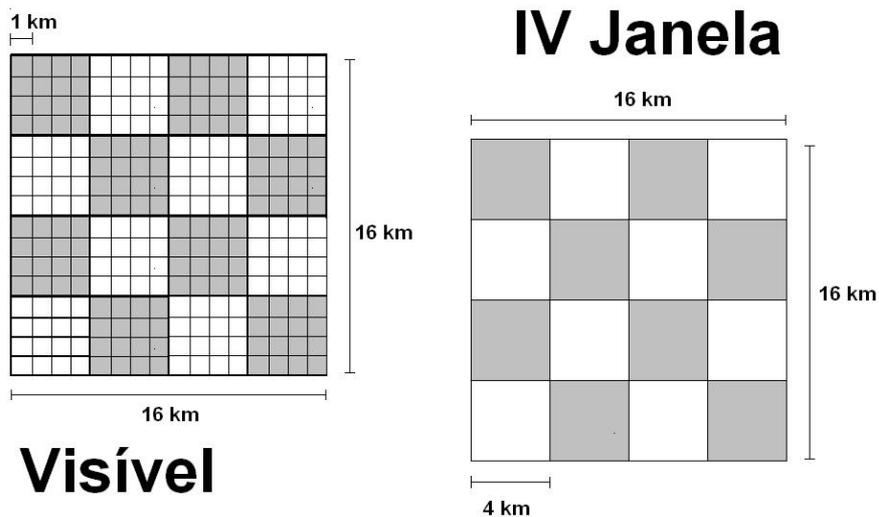


FIGURA 4.4.1.1 – Diferenças na resolução espacial dos canais visível e infravermelho próximo.

O objetivo do método de classificação adotado é definir em qual situação entre uma série os mesmos atributos de um dado pixel melhor se ajusta a um determinado padrão de nuvem. Cada situação define um tipo de nuvem presente na região ou sua ausência (céu claro), representada pelo pixel. Os atributos avaliados no método são:

- fator de reflectância (visível 0.55-0.75 $\mu$ m)
- temperatura de brilho (infravermelho janela 10.2-11.2 $\mu$ m)
- textura no canal visível
- textura no canal infravermelho

O conceito de textura se baseia na variância espacial dos pixels circunvizinhos ao pixel em questão. Por exemplo, a textura de um pixel  $p(i,j)$ , é definida pelo logaritmo da variância espacial na matriz quadrada de ordem três formada pelos pixels adjacentes ao pixel  $p(i,j)$ .

$$Tex_n(P_{c,l}) = \text{Log}(\text{Var}(Pxl_n(i,j))) ; \begin{matrix} i \in [c-1, c+1] \\ j \in [l-1, l+1] \end{matrix} \quad (4.4.1.1)$$

em que:

$Pxl_n(i,j)$ : valor espectral (reflectância ou temperatura de brilho) no canal n.

Var: variância espacial dos pixels que compões a matriz de ordem três.

Esses parâmetros de textura, utilizados no processo de classificação, visam diferenciar uma região com a presença de nuvens baixas esparsas de uma nuvem do tipo cirrus semitransparente. Sabe-se que numa região onde existam nuvens baixas esparsas há a presença da componente da radiação de onda longa emitida pela superfície não absorvida pelas nuvens e assim medida pelo sensor do satélite. Dessa forma, o sinal medido numa área onde existam nuvens baixas muito próximas umas das outras formando quase uma única estrutura será diferente de um campo onde as nuvens baixas que o formam estejam distantes entre si, apresentando locais onde a superfície esteja exposta. Sendo assim, essas regiões são diferentes tanto na componente da reflectância da radiação solar quanto na radiação de onda longa medida. A definição da melhor situação a que um dado pixel se ajusta é feita através do cálculo da distância entre o ponto do espaço formado pelos quatro atributos enumerados acima e os pontos formados pelos mesmos atributos das situações pré-definidas.

Com os pares de pixels definidos, são calculados os coeficientes de textura para cada pixels e conseqüentemente cada par de pixels fica representado por um ponto de um espaço de quatro dimensões, formado pelas quatro variáveis apresentadas anteriormente. A seguir é calculada a distância euclidiana do ponto referente às quatro variáveis em relação a cada um dos pontos (centróides) pré-definidos. A menor distância encontrada entre o ponto referente às quatro variáveis e um dos centróides do conjunto define qual a classe de nuvens aquele par de pixels representa, ou seja, a classe de nuvens representada pelo centróide mais próximo encontrado.

Lembrando que dados dois pontos **A** e **B** pertencentes a um espaço vetorial de dimensão  $n$   $\mathbf{E}_n$ , considerando os vetores  $\mathbf{A} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $\mathbf{B} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , onde  $x_1, \dots, x_n$  e  $y_1, \dots, y_n$  são suas  $n$  coordenadas, diz-se que este espaço é euclidiano com métrica unitária se seus eixos são ortogonais de forma que a distância  $D$  entre os pontos **A** e **B** for definida por:

$$D = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad x_n, y_n \in \mathfrak{R} \quad (4.4.1.2)$$

Assim, a distância entre cada ponto representando pelas quatro variáveis e um dos centróides pré-definidos fica:

A distância entre cada ponto representando pelas quatro variáveis e um dos centróides pré-definidos fica:

Sejam:  $P = (V, IV, TV, TIV)$  e  $C = (Rflc(i), Tb(i), Tch1(i), Tch4(i))$   $P, C \in \mathfrak{R}^4$  então

$$MDE = \|P + C\| \quad (4.4.1.3)$$

$$MDE = \sqrt{(V - Rflc(i))^2 + (IV - Tb(i))^2 + (TV - Tch1(i))^2 + (TIV - Tch4(i))^2} \quad (4.4.1.4)$$

em que:

$MDE$ : mínima distância euclidiana

$V$ : valor do pixel (fator de reflectância) da imagem do canal visível (ch1)

$IV$ : valor do pixel (temperatura de brilho) da imagem do canal infravermelho janela (ch4)

$Rflc(i)$ :  $i$ -ésimo valor típico de fator de reflectância característico de um determinado tipo de nuvem

$Tb(i)$ : i-ésimo valor típico de temperatura de brilho para uma dada classe de nuvem

$TV$ : textura do pixel do canal visível

$TIV$ : textura do pixel do canal infravermelho

$Tch1(i)$ : i-ésimo valor típico do coeficiente de textura para o canal 1

$Tch4(i)$ : i-ésimo valor típico do coeficiente de textura para o canal 4

$P$ : ponto associado a cada par de pixels definidos

$C$ : centróides

Esse conjunto de situações (centróides) foi obtido utilizando um método estatístico e iterativo conhecido por “agrupamento dinâmico” (Desbois et al., 1982), método esse utilizado por Bottino (2000) em seu trabalho sobre a estimativa da radiação solar a partir de satélites, em que era necessária a classificação do tipo de nuvens existentes na atmosfera. Segundo Bottino (2000), esse método é simples e requer pouco tempo computacional em relação a outras técnicas como a “fuzzy logic”(Baum et al., 1997), “gray level cooccurrence matrix”(Chen et al., 1989) ou “gray level difference vector”(Welch et al., 1989).

Os valores dos centróides utilizados no método de classificação de nuvens são definidos selecionando diferentes tipos de nuvens ou cenas de céu claro por nefanálise de uma série de imagens, extraíndo pequenas amostras de pixels representando cada tipo de nuvens e calculadas as respectivas variáveis dos centróides. Em seu trabalho, os autores utilizaram uma serie de dez dias de imagens do satélite GOES 8, em todos os canais.

Assim, cada pixel é considerado como um vetor num espaço de quatro dimensões, sendo  $p(x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{13n})$  com  $n=1,2,\dots,N$ , onde  $N$  é o número de amostras selecionadas numa dada imagem. Um conjunto de  $K$  grupos pode ser definido seguindo o procedimento de agrupamento dinâmico descrito por Desbois (1982). Inicialmente, definindo  $K$  vetores de referência ou “sementes”  $r_k(r_{1n}, r_{2n}, \dots, r_{13n})$  com  $k = 1,2,\dots,K$  a distância do  $n$ -ésimo vetor  $p_n$  ao  $k$ -ésimo vetor de referencia  $r_k$  é dada por

$$d_{nk} = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (x_{in} - r_{ik})^2} \quad (4.4.1.5)$$

Cada pixel é classificado associando-o ao vetor de referência mais próximo, definindo assim K grupos com dimensões  $N_1, N_2, \dots, N_k$  e os centróides são dados pelos respectivos vetores médios  $r_k^{(1)}$ , definidos por

$$r_{ik}^{(1)} = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} x_{ik,n} \quad (4.4.1.6)$$

Então, esses centróides formam um novo conjunto de sementes e os  $N$  vetores  $p_n$  são mais uma vez classificados. O procedimento é repetido sucessivamente, gerando centróides  $r_k^{(m)}$ ,  $m=1,2,\dots$ . É esperado que a distância dos centróides seja menor a cada passo e essa iteração termina em  $m=M$ , tal que todas as distâncias  $K = |r_k^{(m)} - r_k^{(m-1)}| < \xi$ .

Os conjuntos de centróides utilizados nesse trabalho foram gerados operacionalmente pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA), seguindo o método descrito no parágrafo anterior, porém utilizando imagens do satélite geoestacionário GOES 12. Esses valores típicos de fator de reflectância, temperatura de brilho e coeficientes de textura são apresentados na Tabela 4.4.1.1. Essa tabela mostra os parâmetros que definem os centróides utilizados na classificação das imagens com horários entre as 14 e 17 horas (UTC). As siglas *sup*, *cu*, *ci*, *st* e *mc* indicam respectivamente situações de superfície, nuvens do tipo cumulus, cirrus, stratus e estruturas multicamadas.

TABELA 4.4.1.1 -Exemplos de parâmetros utilizados no processo de classificação de nuvens da imagem do canal visível, para imagens entre 14 e 17 horas (UTC).

<b>Reflectância (Rflc)</b>	<b>Temperatura de Brilho (Tb)</b>	<b>Textura ch1 (Tch1)</b>	<b>Textura ch4 (Tch4)</b>	<b>Classe de Nuvem</b>
6,263623	294,7716	0,672055	0,235557	sup1
10,3006	292,6508	3,569456	0,576243	cu1a
12,23408	291,1831	7,219145	0,850345	cu1b
9,813646	289,2452	2,208847	2,234113	ci1
17,44517	283,3706	5,301281	1,396684	cu2a
15,32624	284,5088	9,199865	2,877657	cu2b
18,85569	268,5291	6,669042	8,693629	ci3
13,21975	279,6729	3,932895	4,875134	ci2a
18,44346	270,2194	2,854056	2,530967	ci2b
13,70144	287,7444	11,91255	1,294913	cu1c
8,140364	287,2695	1,110299	0,602903	sup2
34,67897	280,424	4,91783	0,539164	st1a
18,60749	283,6476	17,39203	2,27087	cu2c
27,99451	277,4907	15,78173	5,149066	ci2c
35,5984	250,3256	3,358226	2,271407	mc1a
10,32426	301,6965	1,003564	0,687334	sup3
31,84801	255,9279	5,338012	5,173239	ci4a
31,5418	284,8604	9,886568	0,949423	cu2d
34,24892	254,0667	13,55247	14,27911	ci4b
63,77084	269,8746	26,7892	4,27663	cu2e
70,35501	254,7892	12,22275	3,016356	mc1b
36,7181	272,885	9,139524	2,480558	st1b
48,75183	280,4805	15,17402	1,741708	cu2f
51,07131	279,786	8,589729	0,641953	st1c
54,75353	235,0458	5,465758	3,994409	mc3a
54,63417	279,3077	3,631948	0,298292	st1d
51,45581	244,0381	10,24971	8,104668	mc2
53,61735	231,6547	2,911727	1,414942	mc3b
56,66713	259,8792	4,727997	1,326369	st2
74,70372	217,5136	3,725581	1,199561	mc4

FONTE: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA).

Vale ressaltar que esses parâmetros não são os mesmos para todos os horários do dia, pois o ângulo de incidência dos raios solares em relação às nuvens varia ao longo do dia. Como as nuvens em geral não são superfícies Lambertianas (isotrópica), ou seja, não refletem a radiação incidente com a mesma intensidade em todas as direções, o sinal medido pelo sensor do satélite varia na sua intensidade à medida que o ângulo de incidência dos raios solares varia.

Como o objetivo é determinar o campo de vento em níveis baixos, a opção adotada foi eliminar os pixels correspondentes a outros tipos de nuvens na preparação das imagens do canal visível para a aplicação da técnica de rastreamento. Desta forma a busca da estrutura do campo de nuvens na imagem subsequente é definida exclusivamente pelas nuvens baixas. Para executar essa eliminação foi proposto substituir o valor dos pixels rejeitados por algum outro valor. Duas opções surgiram: substituí-los sempre por um mesmo valor ou atribuir um valor aleatório para cada pixel eliminado. A escolha da melhor opção será descrita posteriormente. No processo, para cada imagem são aproveitados para a extração do vento apenas os pixels classificados como sendo nuvens do tipo cumulus (cu1x e cu2x) e nuvens estratiformes do tipo 1 (st1x). O valor da reflectância dos demais pixels que se relacionam a outras classes são alterados. Dessa forma, esses pixels causam interferência mínima nos cálculos das correlações. Os valores de reflectância, temperatura de brilho e os dois parâmetros de textura são normalizados pela Equação 4.4.1.7 antes de se realizar o cálculo da mínima distância euclidiana. Dessa forma é possível atribuir o mesmo peso a variáveis cujos valores apresentam ordens de magnitude diferentes.

$$pxl_{i,j} = \frac{pxl_{i,j} - \overline{pxl}}{\sigma} \quad (4.4.1.7)$$

em que:

$pxl_{i,j}$  : valor associado a um dado pixel (reflectância, temperatura de brilho ou parâmetro de textura)

$\overline{pxl}$  : valor médio assumido (Tabela 4.4.1.2)

$\sigma$  : desvio padrão

Os valores de  $\sigma$  e  $\overline{pxl}$  estão diretamente associados aos parâmetros utilizados na classificação de nuvens, variando assim para cada horário. Por exemplo, no caso da tabela mostrada acima, tais valores são:

TABELA 4.4.1.2 - Estatística das variáveis apresentadas na Tabela 4.4.1.1.

	média( $\overline{pxl}$ )	Desvio padrão ( $\sigma$ )
Fator de Reflectância	22,04977	19,56004
Temperatura de Brilho	282,8816	17,90104
Textura ch1	4,712251	4,749396
Textura ch2	1,319005	1,693604

#### 4.4.2 Imagens do Infravermelho Próximo (3,9 $\mu\text{m}$ )

Para as imagens do canal infravermelho próximo, a classificação não é realizada da mesma forma que para o canal visível. Como essa classificação visa apenas distinguir as nuvens baixas dos demais alvos presentes nas cenas, ela é feita a partir de um limiar de temperatura de brilho. Assim, todas as nuvens que apresentarem temperatura de brilho inferior a esse limiar serão descartadas, pois supõe-se que sejam nuvens médias ou altas. Buscando eliminar o problema da semi-transparência das nuvens, é calculada a diferença entre os canais 2 e 4 (infravermelho próximo, 3,9 $\mu\text{m}$  e infravermelho janela, 10,7 $\mu\text{m}$  respectivamente), do satélite GOES-12. O cálculo e a interpretação dessa diferença foram discutidos na Seção 3.4.3. A execução dessa técnica é discutida com detalhes mais adiante, no Capítulo dedicado aos ajustes do canal infravermelho.

A exclusão das nuvens médias e altas presentes nas imagens é feita seguindo o mesmo princípio aplicado às imagens do canal visível: são desprezados os pixels referentes às nuvens indesejadas (altas e médias), da mesma forma que ao processar as imagens do canal visível.

#### **4.5. Controles de Qualidade**

Após o cálculo dos vetores de vento, o resultado obtido passa por um controle de qualidade, composto por alguns testes que avaliam o nível de confiabilidade de cada vetor, verificando se estes descrevem algum movimento atmosférico real ou trata-se apenas de ruído. Segue um breve comentário sobre cada um dos testes que compõem o controle de qualidade, explicados com mais detalhe no Capítulo seguinte, quando da descrição das avaliações realizadas.

##### **4.5.1. Limiar de Porcentagem de Pixels Não Rejeitados**

Criado para este trabalho, o teste tem a finalidade de eliminar os vetores cuja matriz alvo seja composta por uma porção, em número maior que um valor pré-definido, de pixels que tiveram seu valor original substituído no processo de classificação de nuvens. O teste se baseia na ideia de que não é vantajoso utilizar uma janela alvo formada por poucos pixels de nuvens baixas e vários valores aleatórios, devido a sua baixa representatividade. Sua finalidade é diminuir o nível de ruído e o tempo de processamento, já que é realizado no início do processo de rastreamento logo após a escolha da janela alvo. Este é o primeiro teste do controle de qualidade aplicado.

##### **4.5.2. Teste de Simetria**

Após o cálculo de cada vetor extraído entre as imagens no tempo  $t_0-30$  minutos e a central e entre a central e  $t_0+30$  minutos, este teste é realizado entre os dois vetores.

Espera-se que a evolução do movimento atmosférico no intervalo de 30 minutos não implique em grandes modificações, tais como mudanças muito bruscas na velocidade e na direção do vento. Esse processo de controle de qualidade é amplamente utilizado de forma similar nos modelos de extração de vento desenvolvidos em outros centros de previsão, como a agência europeia EUMETSAT e a própria CPTEC/DSA.

O teste de simetria consiste em verificar a consistência temporal entre cada par de vetores obtidos a partir de cada segmento (janela alvo) da imagem central, onde um vetor é obtido a partir da imagem central e a imagem de 30 minutos anterior e entre a imagem central e a imagem de 30 minutos após (Laurent et al., 2002; Sakamoto e Laurent, 2003). Para verificar se os vetores são consistentes espacialmente, ou seja, se não apresentam velocidades e direções muito diferentes entre si, é calculada a diferença vetorial entre tais vetores e o resultado do cálculo é avaliado pela Equação 4.5.2.1. Caso a equação seja satisfeita o vetor é aceito pelo teste.

$$\gamma_{sim} \leq \alpha_{sim} |V_1 - V_2| \quad (4.5.2.1)$$

#### **4.5.3. Teste de Consistência Espacial**

Sua função é avaliar a consistência espacial entre os vetores extraídos, comparando cada vetor com os vetores circunvizinhos contidos numa determinada área (vizinhança) (Laurent et al., 2002). A intenção é eliminar vetores que não são homogêneos espacialmente, não descrevendo algum movimento atmosférico de interesse, ou seja, ruído.

#### **4.6. Determinação do Nível de Pressão (Altura) dos Vetores**

Esta é a última etapa do processo de estimativa do vento utilizando ambos os tipos de imagens (visível / infravermelho próximo) do satélite GOES-12.

A altura dos vetores é determinada a partir de uma técnica que se baseia no método proposto por Schmetz et al. (1996) e também utiliza um histograma calculado a partir do segmento de imagem (janela alvo) utilizado para estimar o vetor. A técnica implica no cálculo de um histograma distinto para cada vetor do campo restante após o controle de qualidade. Após calcular de todos os histogramas, eles são utilizados para estimar primeiro a temperatura da base das nuvens presentes nos respectivos segmentos de imagem e a seguir a altura da base dessas nuvens. A maneira pela qual essa temperatura é estimada é similar àquela proposta por Schmetz et al. (1996) e é discutida posteriormente com mais detalhes. A conversão entre a temperatura estimada para a base da nuvem em um nível de pressão (altura) é feita com base em um perfil de temperatura da atmosfera previsto por um modelo numérico de previsão de tempo, o modelo global de previsão numérica de tempo do CPTEC. Simplifica-se essa conversão considerando a temperatura de brilho da nuvem igual à temperatura da atmosfera ao seu redor.

Segue abaixo, um diagrama mostrando de forma simplificada as etapas do modelo de extração de ventos utilizando as imagens do canal visível do satélite GOES-12. Para o caso em que as imagens do canal infravermelho próximo são utilizadas, apenas a etapa referente à correção radiométrica não existe. As etapas restantes são executadas na mesma ordem, com algumas diferenças nos parâmetros de ajuste e na classificação de nuvens, executada de forma distinta para cada canal.

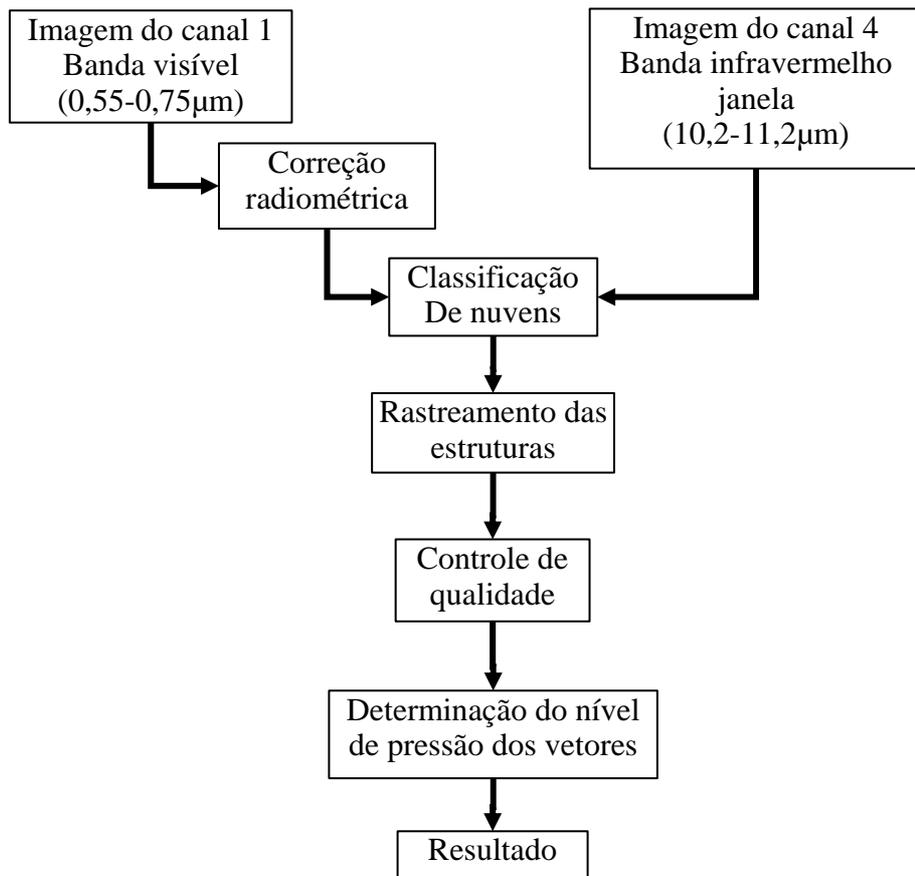


FIGURA 4.6.1 - Diagrama representando as etapas do modelo de extração de ventos utilizando imagens do canal 1 (visível) do satélite GOES 12.

## **CAPÍTULO 5**

### **AValiação E AJUSTE DOS TESTES DE CONTROLE DE QUALIDADE**

Após a estruturação do modelo de extração de ventos para a baixa troposfera, utilizando imagens provenientes do canal 1 do satélite GOES 12, é necessária a aplicação de testes de controle de qualidade dos vetores obtidos. Este Capítulo trata do ajuste da dimensão da janela alvo para cálculo dos vetores e dos ajustes e testes que compõem o controle de qualidade.

O processamento das estimativas para o canal visível (tamanho da imagem em torno de 188 megabytes) necessitava de um tempo de processamento muito elevado para a realização dos diversos testes necessários para a criação do modelo. Nas primeiras tentativas, o modelo demandava cerca de 4 horas para completar todo o processo. Viuse que isso inviabilizaria a realização dessa avaliação.

Para isso, na tentativa de solucionar esse problema, foram selecionados cinco recortes extraídos de uma seqüência de imagens do dia 21 de setembro de 2004, horários 15:45, 16:15 e 16:45 UTC, enumerados por A, B, C, D e E. Esses recortes foram selecionados visando a inclusão de diversas condições sinóticas com a presença de diferentes tipos de nuvens altas, médias e baixas. A Figura 5.1 apresenta esses cinco recortes extraídos, destacados num tom de cinza mais escuro.

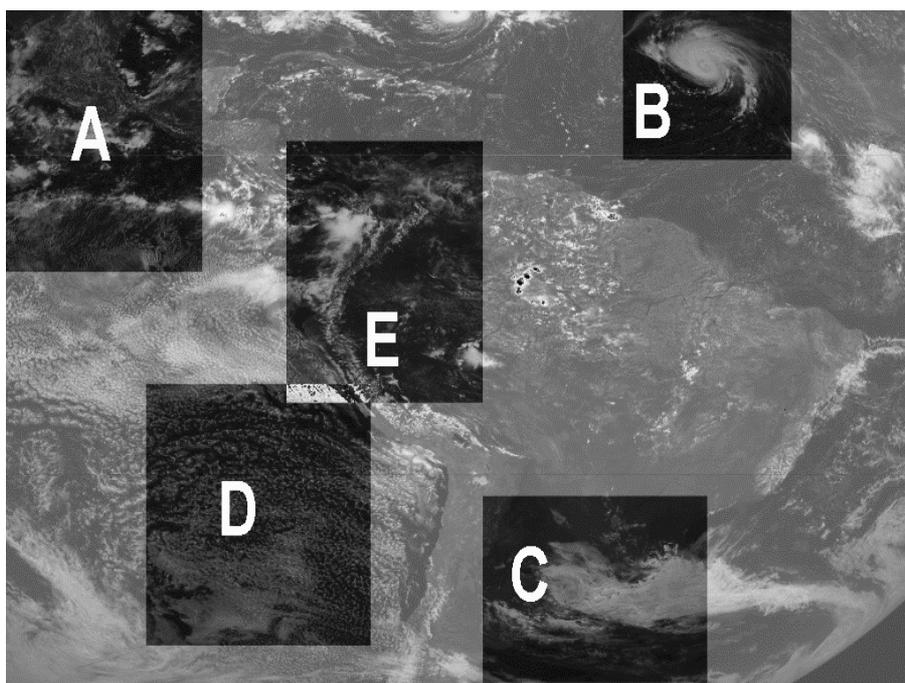


FIGURA 5.1 - Recortes utilizados nas avaliações e ajustes dos testes.

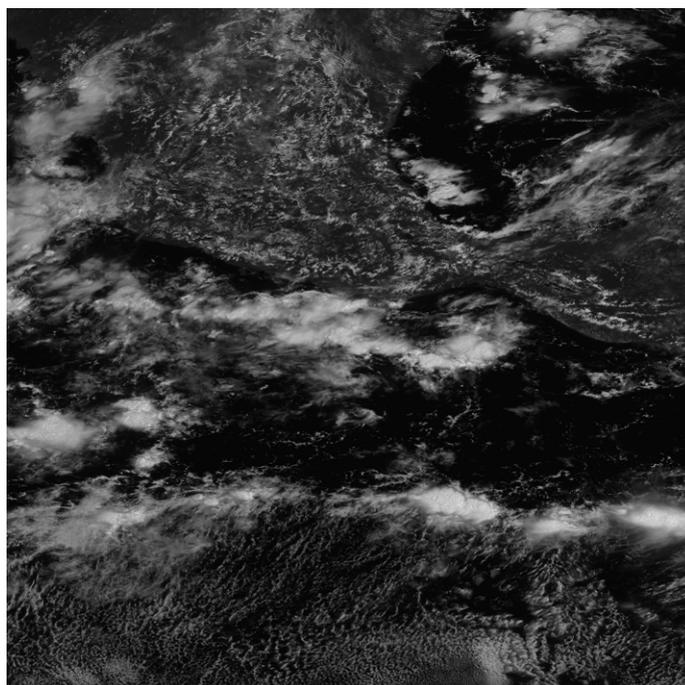


FIGURA 5.2 - Recorte A referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.

O recorte A, Figura 5.2, compreende parte da América Central e oceanos adjacentes, Ele apresenta nuvens baixas, médias e altas, como pode ser constatado após a classificação das nuvens, e também possui áreas de céu claro com superfície oceânica e continental.

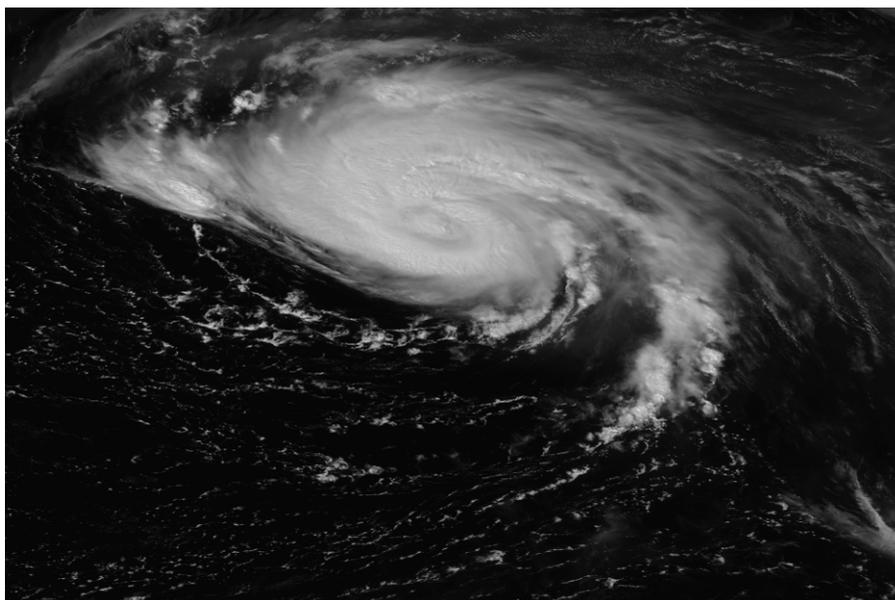


FIGURA 5.3 - Recorte B referente à imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.

O recorte B, Figura 5.3, foi escolhido por se tratar de uma situação onde há a presença de um ciclone tropical associado a um centro de baixa pressão em baixos níveis. Dessa forma, tem-se uma situação com presença de nuvens altas no centro da circulação, e algumas nuvens baixas ao seu redor. Esse recorte compreende uma região do oceano Atlântico, no hemisfério norte, próxima à costa norte da América do Sul. No recorte C, Figura 5.4, nota-se a presença de extensos campos de nuvens altas e médias.

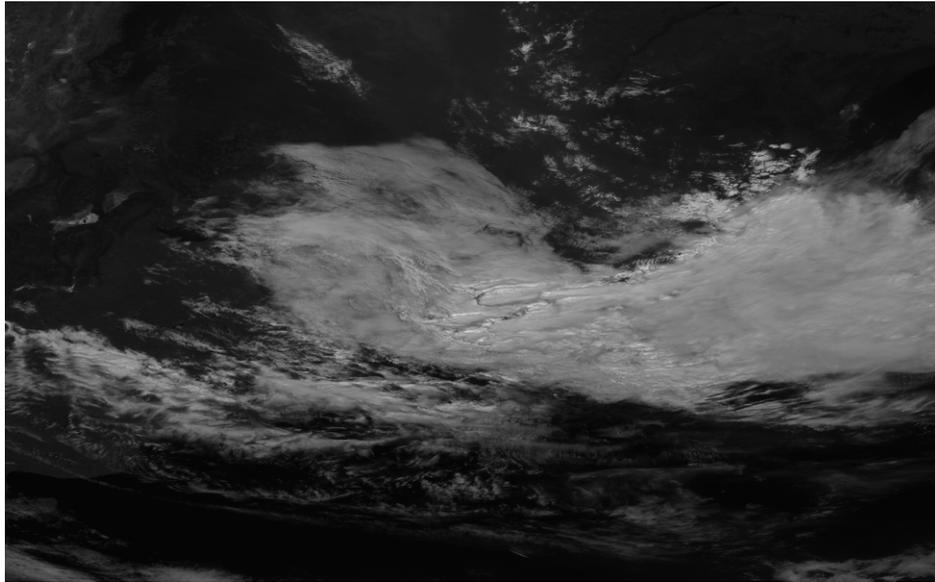


FIGURA 5.4 - Recorte C referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.

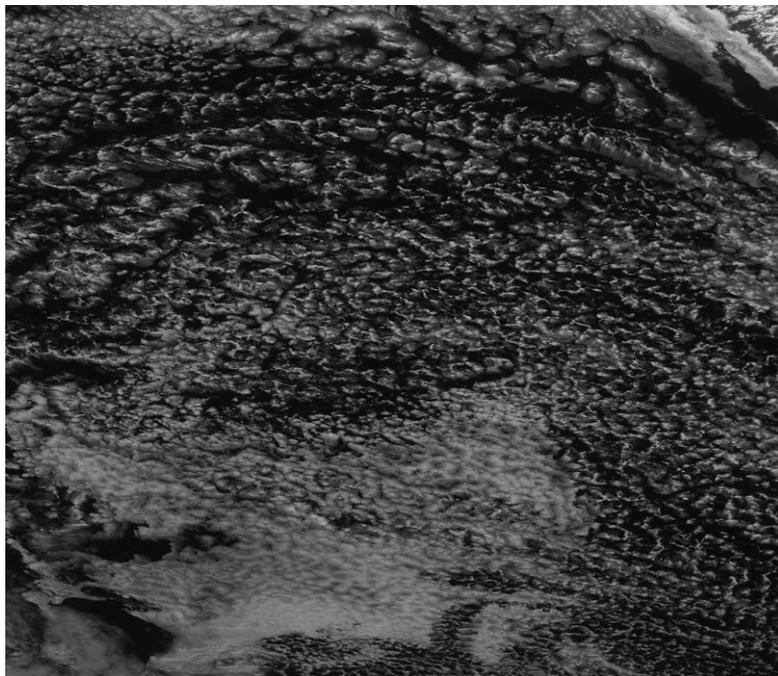


FIGURA 5.5 - Recorte D referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.

O recorte D, Figura 5.5, compreende uma região sobre o Oceano Pacífico, próxima da costa leste da América do Sul. Essa cena contém uma grande quantidade de nuvens baixas.

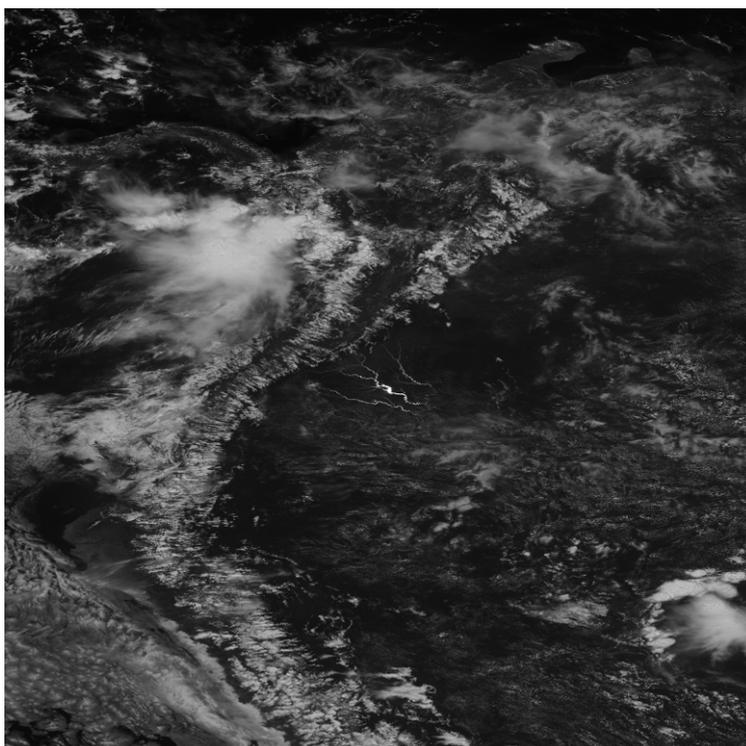


FIGURA 5.6.- Recorte E referente a imagem do canal visível, resolução 1x1 km, dia 21 de setembro de 2004, horário 16:15 UTC.

Finalmente, o recorte E, Figura 5.6, foi escolhido por ser uma região com grande atividade convectiva. Esse recorte corresponde a uma região no noroeste da América do Sul, apresentando diferentes tipos de nuvens. Somando as situações presentes nos cinco recortes descritos, tem-se uma boa amostra de uma seqüência típica de imagens que serão utilizadas pelo modelo de estimativa do vento, com a vantagem de que o custo computacional seja menor para a realização de diversos testes de sensibilidade.

As avaliações serão realizadas na seguinte seqüência:

- Determinação da dimensão da janela alvo e do coeficiente de correlação.
- Avaliação da técnica de substituição dos pixels por um valor aleatório ou constante.
- Aplicação e ajuste dos testes.
  - Teste da mínima porcentagem.
  - Teste de simetria.
  - Teste de consistência espacial.

### **5.1. Teste Dimensão das Janelas Alvo/Coeficiente de Correlação**

A primeira avaliação do modelo foi realizada para diagnosticar o impacto das diferentes dimensões das matrizes alvos combinadas a diferentes valores do coeficiente de correlação (valor de corte). O objetivo desta etapa foi avaliar o impacto da escolha do tamanho da janela de procura no resultado final da extração do vento. Adicionalmente a este teste, foi também avaliado o impacto da utilização de um valor constante ou um valor aleatório na substituição dos pixels rejeitados no processo de classificação de nuvens. Dessa forma, busca analisar o efeito da dimensão da janela alvo em função do número de vetores obtidos. Para realizar uma análise objetiva estipulou-se um valor de corte mínimo, baseado no coeficiente de correlação obtido entre as janelas alvos em imagens sucessivas e assim, determinar qual a dimensão mais apropriada da janela alvo e o valor mínimo para o coeficiente de correlação em função da população de vetores que serão aceitos no processo de determinação dos mesmos. Além disso, foram avaliadas as diferentes opções a serem empregadas na substituição dos pixels rejeitados, ie, aqueles não representativos de um campo de nuvens baixas.

Inicialmente foram testadas janelas alvo com dimensões de 9 a 35 pixels, para valores de cortes de correlação de 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 e 0.9. Essas análises foram realizadas utilizando um valor constante e valores aleatórios para substituir os pixels

correspondendo aos campos de nuvens médias e altas. Dessa forma, o modelo foi executado para cada um dos cinco recortes e os resultados de cada combinação unidos num único arquivo para as devidas análises e confecção dos gráficos e tabelas. As figuras abaixo referem-se ao recorte D e mostram um exemplo dos campos obtidos utilizando valores aleatório (à esquerda) e constante (à direita) para a substituição dos pixels rejeitados, utilizando uma janela de 11x11 pixels e um coeficiente de correlação de corte de 0,9.

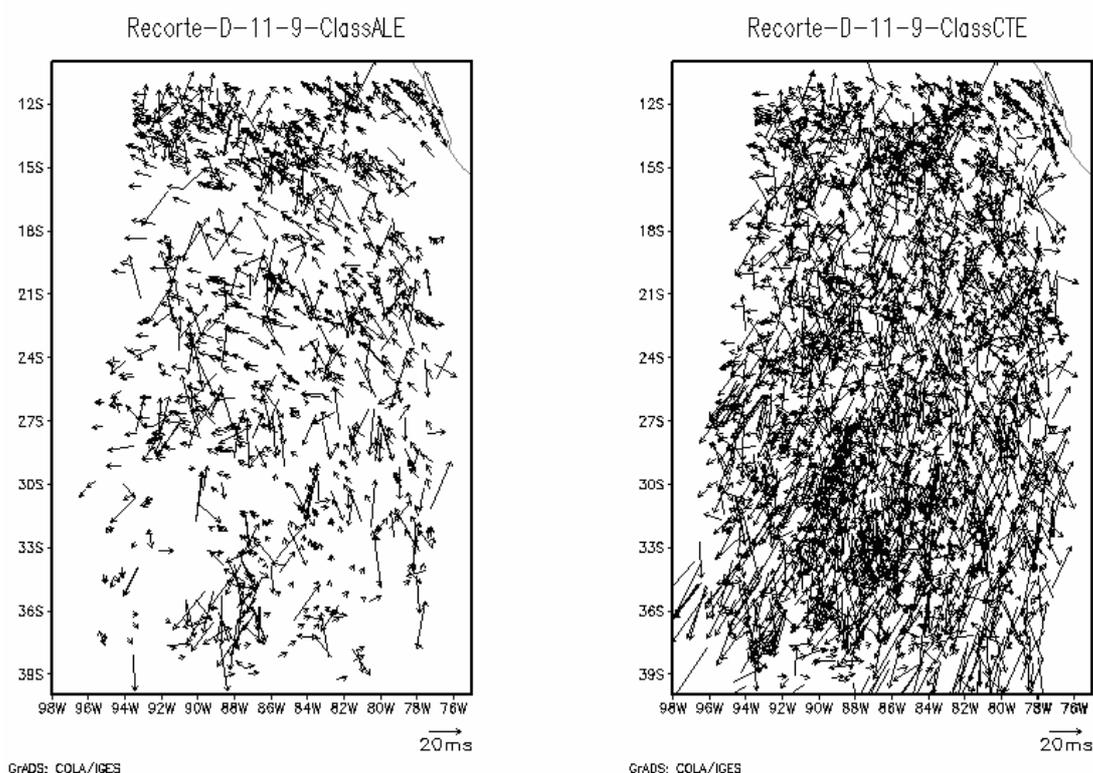


FIGURA 5.1.1 - Comparação entre o campo de vento extraído a partir do recorte D utilizando a janela alvo com dimensão 11 e coeficiente de correlação 0,9. À esquerda foi atribuído valor aleatório aos pixels rejeitados na classificação de nuvens e a direita utilizou-se um valor constante na substituição de todos os pixels rejeitados.

Na Figura 5.1.1, para o caso em que foi utilizado um valor constante (direita), nota-se uma maior população de vetores e um considerável número de vetores com velocidade elevada. Em todos os campos avaliados visualmente, a quantidade de vetores com velocidade elevada era maior quando utilizado um valor constante para substituir os pixels não representativos de nuvens baixas. Esse resultado se deve ao fato de que ao utilizar um valor constante surgem grandes áreas com o mesmo valor, e essas áreas acabam gerando alta correlação entre as imagens sucessivas. Logo, o modelo assume como que essas áreas são as melhores correlacionadas e conseqüentemente definindo um valor errôneo do campo de vento. Analisando o arquivo gerado pelo modelo, nota-se que para o caso em que foi utilizado valor constante, as velocidades mais altas estão geralmente relacionadas as correlações mais altas.

Na Figura 5.1.2, descrevendo a mesma cena da Figura 5.1.1, mas para uma janela alvo de dimensão 29, nota-se o mesmo tipo de ruído, conforme discutido na Figura 5.1.1. O teste realizado para os vários recortes, confirma que o ruído é principalmente associado aos vetores com velocidade elevada e inconsistente espacialmente em relação aos vetores vizinhos.

Pode ser observado que a quantidade de vetores obtidos quando os pixels foram substituídos por um valor constante é sempre maior do que quando foi utilizado um valor aleatório.

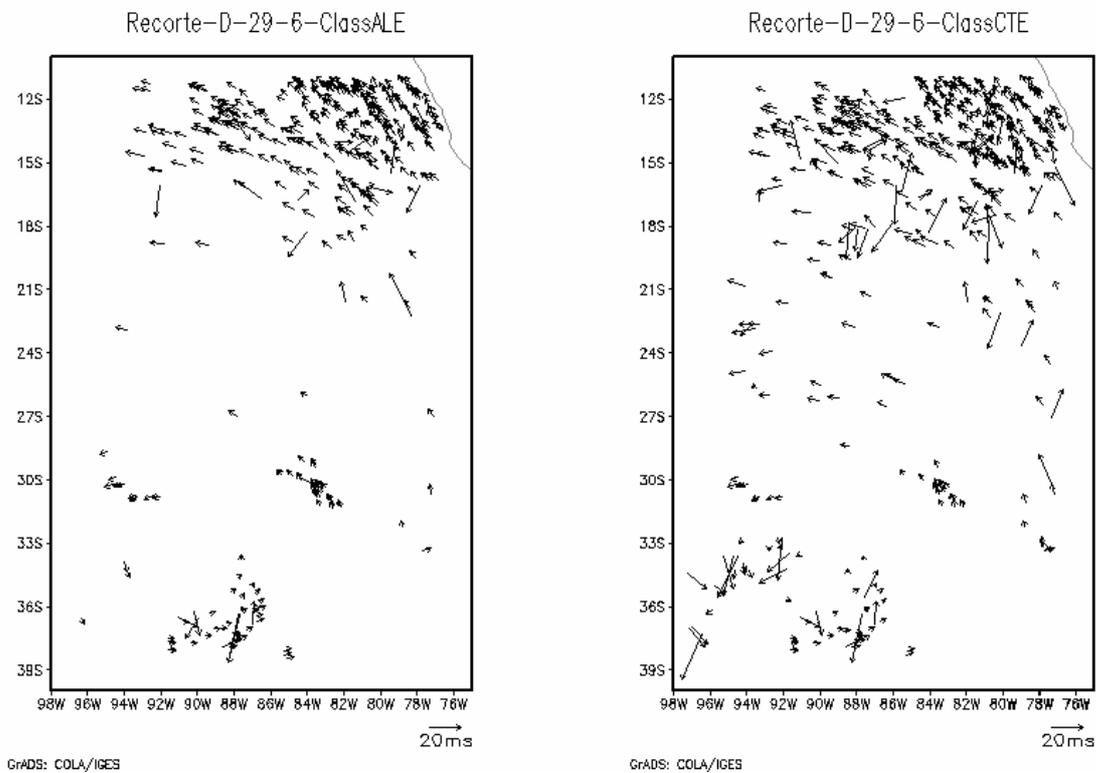


FIGURA 5.1.2 - Comparação entre o campo de vento extraído a partir do recorte D utilizando a janela alvo com dimensão 29 e coeficiente de correlação 0,6. À esquerda foi atribuído valor aleatório aos pixels rejeitados na classificação de nuvens e à direita utilizou-se o mesmo valor para todos os pixels rejeitados.

A curva no gráfico 5.1.3 representa a diferença entre o número de vetores obtidos utilizando um valor constante e valores aleatórios. Valores positivos indicam que o número de vetores para o caso em que um valor constante foi utilizado, é maior. O eixo vertical representa a diferença do número de vetores e o eixo horizontal representa os valores assumidos pelo coeficiente de correlação. Essa curva resulta da soma de todas as curvas referentes a cada dimensão assumida pela janela alvo (9 a 35).

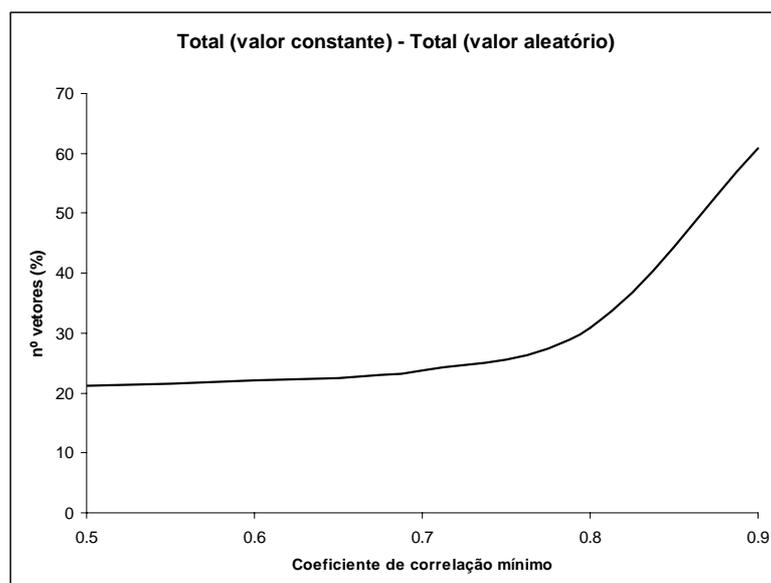


FIGURA 5.1.3 – Porcentagem maior de vetores obtidos utilizando um valor aleatório versus um valor constante.

Em uma análise superficial, parece vantajoso utilizar um valor constante na substituição dos pixels rejeitados e não valores aleatórios, já que a quantidade de vetores é maior utilizando um valor constante. Porém, analisando os campos de vento através de um programa de visualização gráfica, nota-se que em ambos os campos existem uma grande quantidade de vetores que aparentemente não descrevem nenhum movimento atmosférico, ou seja, trata-se de ruído. Para os casos em que foi utilizado um valor constante, o nível de ruído é visivelmente maior. Esses vetores indesejáveis (ruído) geralmente possuem direção muito diferente em relação aos vetores mais próximos, sendo inconsistentes espacialmente com eles e apresentam velocidade muito elevada, bem superior àquela que poderia ser aceita para um campo de ventos em baixos níveis para a situação sinótica do período utilizado. A Figura 5.1.4 mostra o campo de pressão ao nível médio do mar para as 12 horas do dia 21 de setembro de 2004.

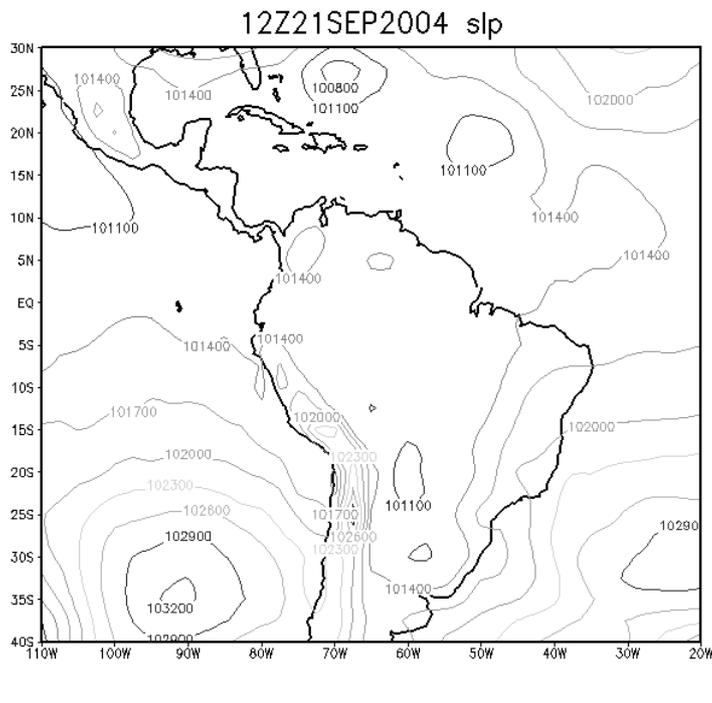


FIGURA 5.1.4 - Pressão ao nível médio do mar referente as 12 horas do dia 21 de setembro de 2004.

Baseado nos campos da re-análise do NCEP/NCAR e na análise visual de uma animação das três imagens utilizadas na extração, não são esperadas velocidades superiores a 20 m/s em baixos níveis para o dia 21 de setembro de 2004. Com o intuito de verificar de fato a inconsistência dos vetores com velocidade elevada, decidiu-se então separar os vetores em dois grupos distintos, um formado pelos vetores com velocidade menor ou igual a 20 m/s e outro com os vetores restantes, Observa-se na Figura 5.1.5, que o campo com vetores de velocidade superior a 20 m/s é praticamente desorganizado e não parece descrever algum movimento atmosférico, sendo assim apenas ruído. Já o campo formado pelos outros vetores é bem consistente espacialmente, mesmo apresentando alguns vetores inconsistentes espacialmente.

Na Figura 5.1.6 observa-se uma região de alta pressão sobre o oceano Pacífico, próximo à costa leste da América do Sul. Dessa forma, naquela região tem-se uma circulação

anti-ciclônica em baixos níveis. Essa circulação está representada nos campos referentes aos vetores com velocidade inferior a 20m/s, nas Figuras 5.1.7 e 5.1.8.

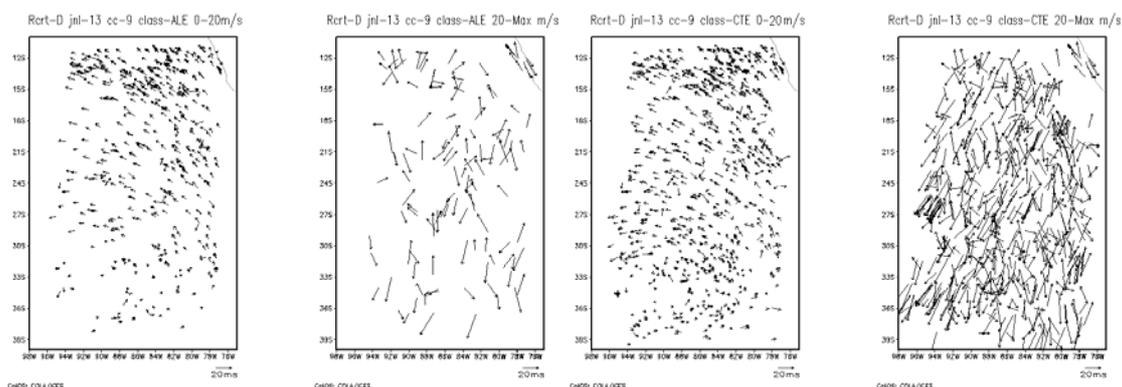


FIGURA 5.1.5 - Campos de vento referente ao recorte D, utilizando a janela alvo com dimensão 15, coeficiente mínimo de correlação 0,9. O par à esquerda se refere ao caso em que foi utilizado um valor aleatório foi utilizado na substituição dos pixels rejeitados e o par à direita se refere ao caso em que um valor constante foi utilizado para o mesmo fim.

Nas Figuras 5.1.5, partindo da esquerda para a direita, tem-se primeiro o campo com vetores cujas velocidades são inferiores ou iguais a 20 m/s e que a imagem utilizada na dedução dos mesmos foi classificada utilizando valores aleatórios na substituição dos pixels rejeitados, seguido pelo campo dos vetores com velocidade maior ou igual a 20 m/s. O terceiro campo também é formado por vetores com velocidade inferior a 20 m/s e o quarto campo é formado pelos vetores com velocidade superior a 20 m/s, porém para esses dois casos os pixels da imagem utilizada receberam um mesmo valor na classificação das nuvens.

Nas Figuras 5.1.6 e 5.1.7 são apresentados os gráficos mostrando a porcentagem de vetores cuja velocidade é superior a 20 m/s em relação ao total de vetores aceitos para cada dimensão assumida pela janela alvo.

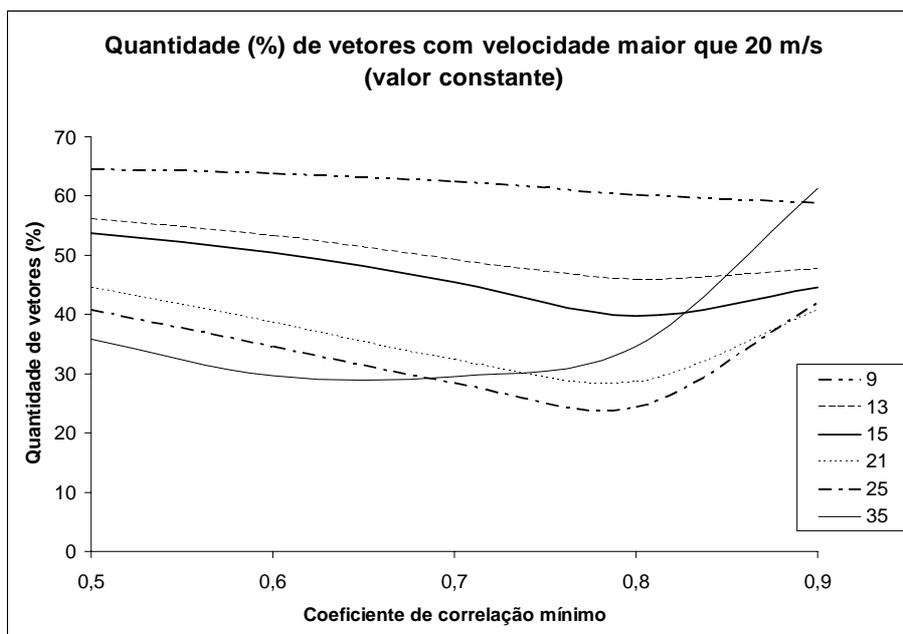


FIGURA 5.1.6 – Quantidade de vetores com velocidade superior a 20 m/s para o caso em que foi utilizado um valor constante na substituição dos pixels rejeitados durante a classificação de nuvens.

Nos gráficos mostrados nas Figuras 5.1.6 e 5.1.7, se observa que a medida em que se aumenta a dimensão da janela alvo, a porcentagem de vetores cuja velocidade é superior a 20m/s decai mais rapidamente para o caso em que um valor aleatório é utilizado na substituição dos pixels. Além disso, quando um valor aleatório é utilizado, a medida que o coeficiente de correlação assume valor maior a porcentagem desses vetores diminuí de forma mais acentuada.

Nesses testes, observou-se que a utilização da janela alvo com dimensão pequena, menor que 13 é ineficiente, já que a quantidade de ruído gerado foi muito elevada. Isso

pode ser explicado pelo fato da dimensão da janela alvo estar diretamente relacionada ao tipo de estrutura a ser rastreada.

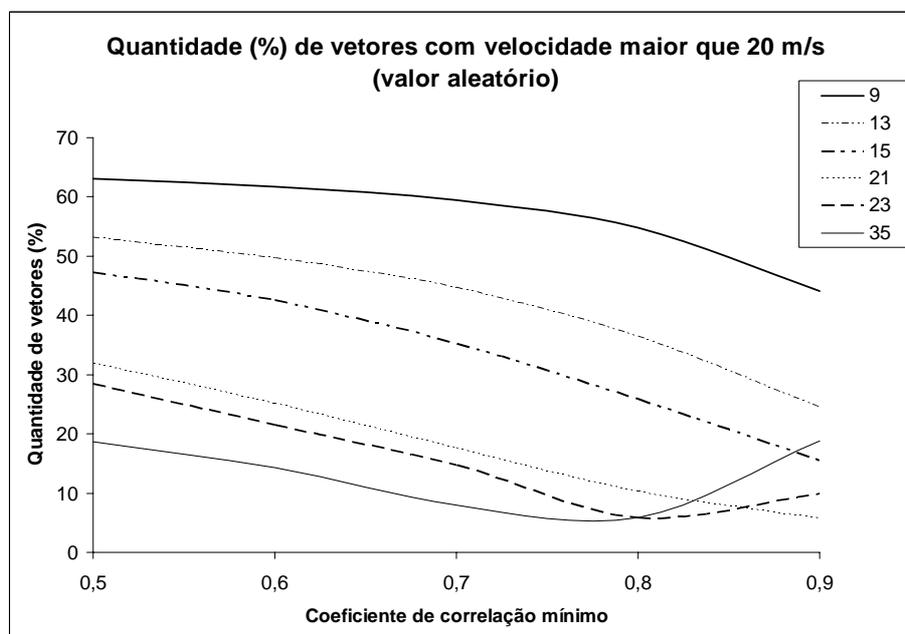


FIGURA 5.1.7 – Porcentagem de vetores com velocidade superior a 20 m/s utilizando um valor aleatório em substituição aos pixels descartados.

Utilizando pequenas janelas alvo, são rastreados pequenas estruturas de nuvens que são mais variáveis no tempo e, portanto incorrendo em erros na identificação desta estrutura em uma imagem subsequente (após 30 minutos). Já ao utilizar dimensões maiores, as estruturas de nuvens são mais conservativas, sendo assim mais fáceis de serem identificados na imagem seguinte.

Ficou evidente, como esperado, que quanto maior a dimensão da janela alvo utilizada, menor é a quantidade de vetores obtidos. Janelas com dimensões no intervalo de 13 a 21 mostraram-se uma boa opção, pois forneceram uma quantidade razoável de vetores para todos os recortes analisados, sendo que dentre os valores desse intervalo, as dimensões 15 e 17 mostraram-se como sendo uma boa escolha pois a quantidade de vetores obtidos é boa e a quantidade de ruído não é muito elevada. Já as janelas com dimensões acima

de 25, a quantidade de vetores foi muito baixa e conseqüentemente os campos de vento resultantes foram insatisfatórios. Utilizar um valor aleatório em substituição aos valores dos pixels rejeitados na classificação de nuvens foi julgado ser mais vantajoso do que substituí-los por um valor constante. Nos campos em que foi utilizada a substituição dos pixels rejeitados por valores aleatórios, a quantidade de ruído foi nitidamente menor do que quando utilizado um valor constante. No decorrer da aplicação e ajuste dos demais testes do controle de qualidade, é possível determinar qual das duas dimensões é mais indicada, sendo assim, a escolha desses dois valores trata-se de uma primeira aproximação.

Quanto ao coeficiente de correlação utilizado durante a série de testes realizada, observou-se que o valor 0,6 é uma boa escolha. Esse valor torna possível obter um campo de vento bem homogêneo e que não apresenta uma quantidade de vetores incoerentes extremamente elevada. Utilizando valores superiores a 0,6, a quantidade de vetores obtida passa a se tornar muito pequena e a quantidade de ruído ainda se mantém elevada. Portanto, ficou determinado que as dimensões da janela alvo a serem utilizadas com a maior precisão possível são as janelas entre 15 e 17. O coeficiente de correlação mínimo escolhido para que o vetor seja aceito é 0,6.

## **5.2. Teste da Mínima Porcentagem**

Nesse estudo, o teste da mínima porcentagem foi desenvolvido visando diminuir a quantidade de ruído nos campos de vento. O objetivo é eliminar janelas de busca em que a grande maioria dos pixels são provenientes dos valores aleatórios, i.e., eliminar janelas de busca em que a quantidade de estruturas de nuvens baixas é muito pequena e portanto, com alta probabilidade de obtenção de vetores de ventos errôneos. Este teste consiste em avaliar para cada janela alvo determinada na imagem no tempo  $t_0$ , se o percentual de pixels aleatórios que a compõe não ultrapassa um valor de corte. O segmento é descartado caso a janela avaliada ultrapasse essa porcentagem. Para exemplificar este teste apresentamos somente os resultados obtidos com o recorte D

utilizando as dimensões da janela alvo de 15 e 17 pixels e o coeficiente de correlação mínimo assumindo o valor 0,6.

A Figura 5.2.1 mostra o percentual de vetores rejeitados pelo teste da mínima porcentagem em relação ao total de vetores rejeitados para cada limiar de rejeição. A linha pontilhada representa o caso em que a janela alvo de dimensão 17 foi utilizada e a linha contínua a janela com dimensão 15. Ela mostra que a quantidade de vetores eliminados pelo teste é inversamente proporcional ao valor de corte.

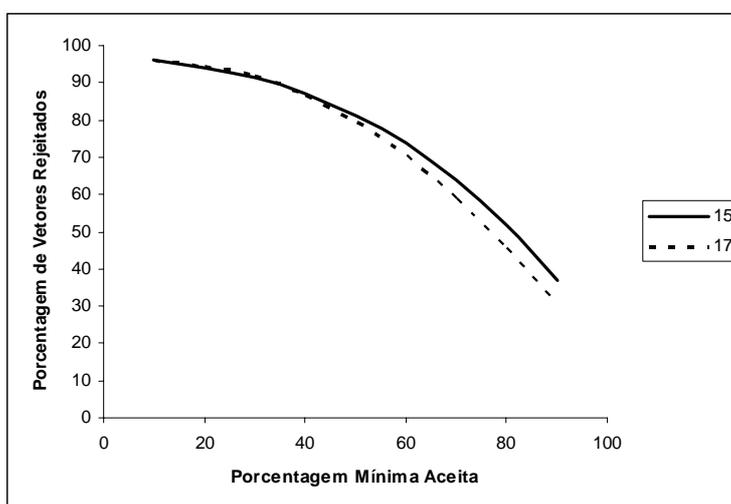


FIGURA 5.2.1 - Quantidade de vetores rejeitados pelo teste da mínima porcentagem em relação ao total de vetores rejeitados.

A Figura 5.2.2 mostra a quantidade de vetores com velocidade superior a 20 m/s que foram aceitos pelo modelo após a introdução desse teste. As linhas menos espessas representam os valores obtidos antes da aplicação do teste utilizando o coeficiente de correlação 0,6. A linha contínua se refere à janela alvo de dimensão 15 e a pontilhada a dimensão 17. As curvas mais espessas, contínuas e pontilhadas, representam os valores após a aplicação do teste e referem-se às janelas com dimensão 15 e 17 respectivamente. No eixo horizontal estão representados os valores de corte

(porcentagem mínima) e no eixo vertical a porcentagem de vetores com velocidade superior a 20 m/s.

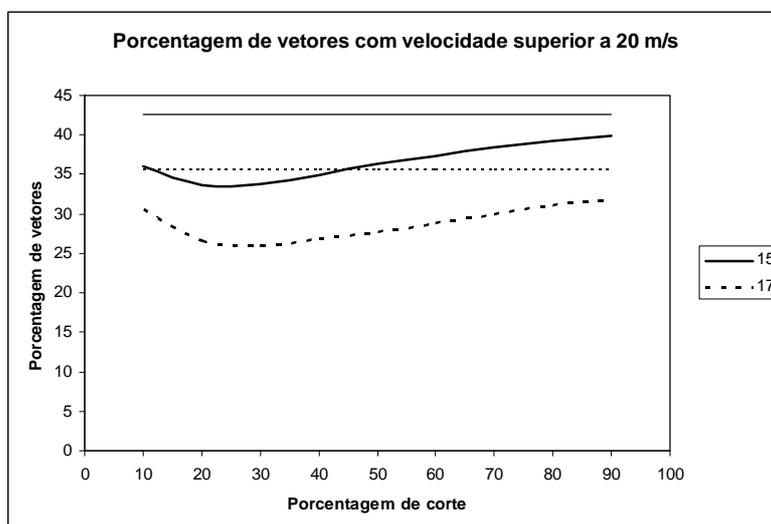


FIGURA 5.2.2 – Porcentagem de vetores com velocidade superior a 20 m/s que foram aceitos pelo teste da mínima porcentagem, obtida para diferentes valores da porcentagem de corte.

Observa-se na Figura 5.2.2 que entre os valores de corte 20% a 30% ocorre o valor mínimo de vetores com velocidade superior a 20 m/s em relação ao total de vetores para aquele valor de corte, ou seja, nesse intervalo o teste é mais eficiente na eliminação do ruído. No caso, generalizando que vetores com velocidade superior a 20m/s tratavam-se de ruído. Porém, como pode ser observado na Figura 5.2.1, o índice de rejeição é de cerca de 90%. Na Figura 5.2.3 é apresentado o campo referente ao recorte D antes de ser aplicado o teste do limiar de porcentagem. Nesse caso foram utilizados valores aleatórios na substituição dos pixels rejeitados e o coeficiente de correlação utilizado foi de 0,6.

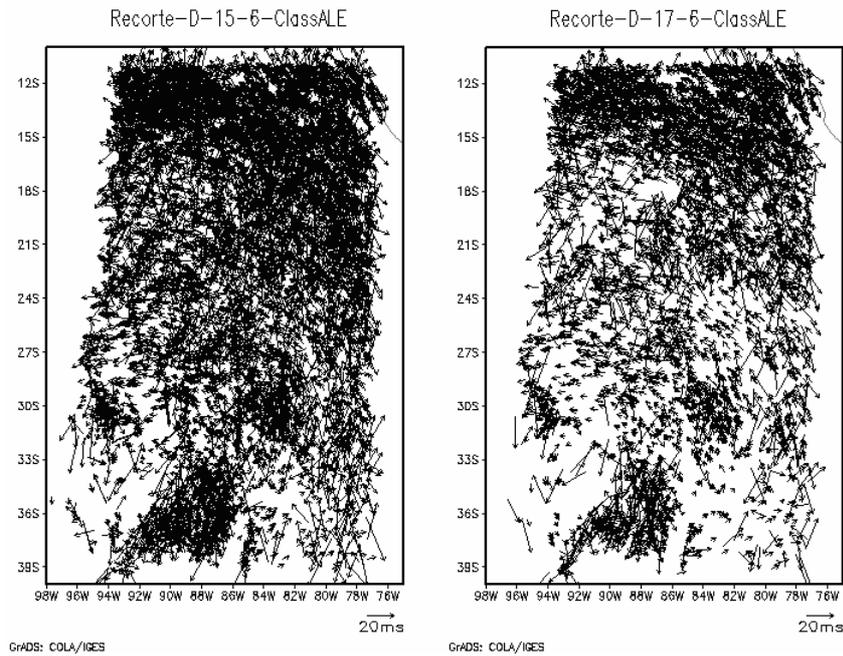


FIGURA 5.2.3 - Campos de vento obtidos antes da aplicação do teste do limiar de porcentagem de pixels substituídos.

Nas Figuras 5.2.4 a 5.2.6 são apresentados os campos referentes ao recorte D utilizando diferentes valores para o limiar de porcentagem de pixels.

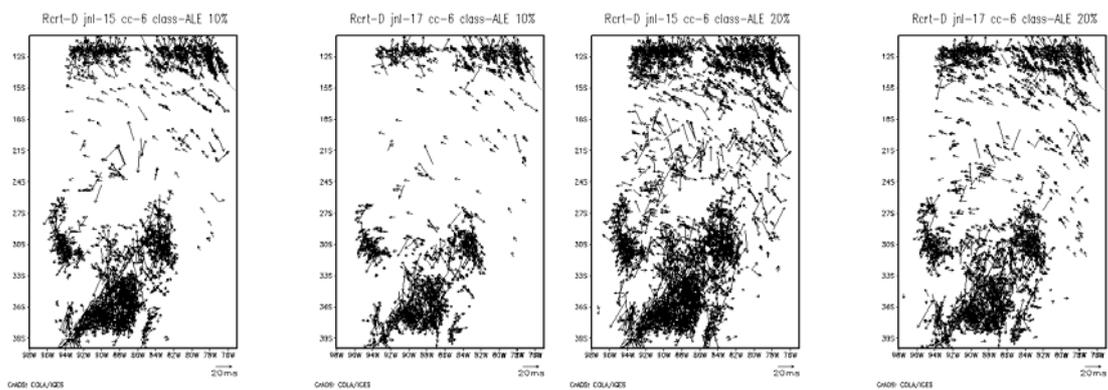


FIGURA 5.2.4 - O par de campos à esquerda mostra o resultado obtido utilizando o limiar 10% de pixels e o par à direita refere-se ao limiar de 20% para janelas com dimensão 15 e 17, respectivamente.

Comparando os campos apresentados na Figura 5.2.4 aos apresentados na Figura 5.2.3, observa-se que os limiares de 10% e 20% são muito severos, eliminando muita informação valiosa juntamente com o ruído e mesmo assim, alguns vetores errôneos permanecem nos campos. A Figura 5.2.5 mostra o campo após aplicar o teste utilizando o limiar de 30% de pixels não substituídos. Os resultados são mais satisfatórios que os campos mostrados na Figura 5.2.4.

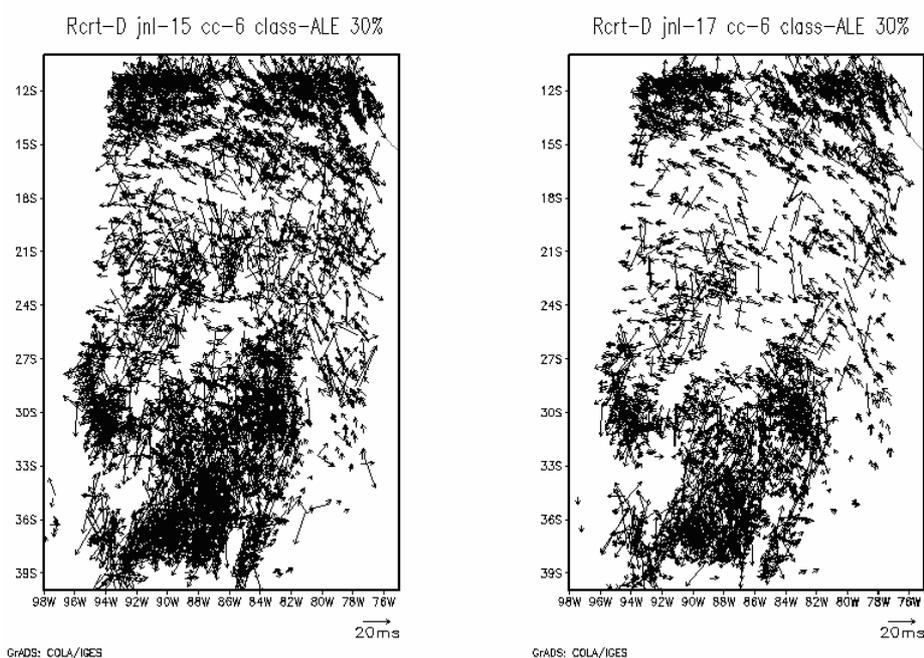


FIGURA 5.2.5 - Campos de vento obtidos utilizando o limiar de 30% de pixels rejeitados.

Utilizando o limiar de 40% ou superior, o nível de ruído se torna muito elevado comparado aos anteriores. Assim, a utilização de limiares maiores que 40% não se mostram adequados. Conclui-se que o limiar ideal situa-se em torno de 30% , i.e, somente janelas com mais de 70% de pixels com nuvens baixas serão utilizados para calcular o campo de vento. Os limiares de 40% e 50% talvez possam proporcionar um campo de vento mais satisfatório após a aplicação dos outros testes de controle de qualidade que serão desenvolvidos e aplicados posteriormente, porém, o limiar de 30%

evidencia-se como mais indicado. Além disso, concluiu-se que o uso da janela com dimensão 15 gera resultados satisfatórios e portanto, será utilizada nos próximos testes.

### 5.3 Avaliação do Teste de Simetria

Após ajustar a dimensão da janela alvo, os parâmetros do coeficiente mínimo de correlação e do teste da mínima porcentagem, avaliou-se o teste de simetria. Esse teste avalia a consistência temporal entre o par de vetores obtidos entre as imagens nos instantes  $t_0$  e  $t_0-30$  min e entre  $t_0$  e  $t_0+30$  min. Caso esses vetores sejam muito diferentes eles serão rejeitados pois não apresentam uma consistência temporal como seria esperado em um campo sinótico de nuvens baixas. Espera-se com esse teste, eliminar grande parte do ruído presente nos campos de vento. Esse teste foi utilizado por Laurent, (2002) no estudo sobre extração de ventos utilizando os canais do vapor d'água e infravermelho janela.

Seja  $v_1$  o vetor encontrado entre as imagens em  $t-30$  min e  $t_0$  e  $v_2$  o vento obtido por  $t_0$  e  $t+30$  min, o princípio do teste é verificar o quão diferentes são esses dois vetores entre si e essa comparação é feita baseando-se no módulo da diferença vetorial entre os vetores  $v_1$  e  $v_2$ . Caso o módulo do vetor diferença for superior a um valor predeterminado ele é descartado, pois é considerado que no intervalo de tempo de 30 minutos um campo de vento, em escala sinótica, não pode apresentar variações bruscas. Como a velocidade do vetor resultante é proporcional a diferença entre os vetores  $v_1$  e  $v_2$  (Schmetz e Nuret, 1987), o vetor  $v_2$  não é descartado se a seguinte equação for satisfeita:

$$\left| \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \right| < \alpha_{sim} + \left| \vec{v}_2 \right| \gamma_{sim} \quad (5.3.1)$$

Essa equação é similar àquela utilizada por Laurent et al, (2002) e Schmetz et al. (1993) sendo utilizada no modelo que está atualmente operacional na DSA. Contudo, foram alterados os parâmetros  $\alpha_{sim}$  e  $\gamma_{sim}$ , sendo ajustados de acordo com as necessidades para aplicação aos baixos níveis. A constante  $\gamma$  assume valores positivos menores que um, sua função é determinar um percentual da velocidade do vetor  $v_2$  e a constante  $\alpha$  indica um valor de referência da velocidade. Laurent, (1994) utilizando imagens do satélite METEOSAT nas bandas do vapor d'água (5,7 a 7,1) e infravermelho janela (10,5 a 12,5 um) utilizou como parâmetros do teste de consistência espacial os valores de  $\alpha_{sim}$  igual a 5m/s e  $\gamma_{sim}$  igual a 0.2. Fisicamente, a expressão avalia se o vetor  $v_2$  apresenta uma modificação além de um dado limiar em relação ao vetor  $v_1$ . É esperado para os ventos nos baixos níveis que não existam grandes mudanças nas componentes zonal e meridional sobre as regiões oceânicas no intervalo de tempo de uma hora, salvo situações atípicas como, por exemplo, o caso de rápidas penetrações de ciclones extratropicais. Dessa forma, não são esperadas mudanças abruptas na direção e ou velocidade do vento. Assim, os valores das constantes  $\alpha_{sim}$  e  $\gamma_{sim}$  são ajustados baseando-se na dinâmica da atmosfera nos níveis inferiores, particularmente sobre as regiões oceânicas.

Para ajustar o teste de consistência espacial, foram realizados testes utilizando diferentes valores para as constantes  $\alpha_{sim}$  e  $\gamma_{sim}$ . A constante  $\alpha$  assumiu valores inteiros no intervalo de 1 a 15 e a constante  $\gamma$  valores 0,1, 0,2, ..., 0,9. Apenas o recorte D será apresentado nesta avaliação pelos mesmos motivos citados nas seções anteriores. Na Figura 5.3.1 têm-se dois gráficos gerados a partir dos resultados obtidos pelas sucessivas execuções do modelo de estimativa do vento como descrito no parágrafo anterior. O gráfico mostrado à esquerda refere-se à porcentagem de vetores que possuíam velocidade superior a 20 m/s que foram aceitos pelo teste. Já o gráfico à direita representa a quantidade de vetores que foram rejeitados pelo teste. No eixo vertical estão representados os valores assumidos pela constante  $\alpha$  (Equação 5.3.1) e o eixo vertical compreende a porcentagem de vetores com velocidade superior a 20m/s que não foram eliminados pelo teste. As curvas referem-se ao valor assumido pela

constante  $\gamma_{sim}$  (Equação 5.3.1). A Figura 5.3.1 mostra os resultados referentes ao caso em que a janela alvo de dimensão 15 foi utilizada.

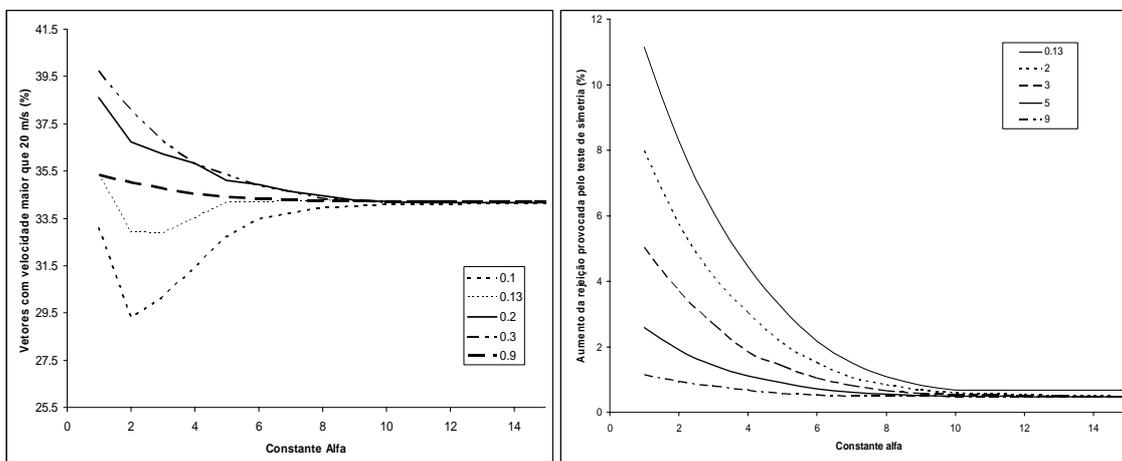


FIGURA 5.3.1 – Porcentagem de vetores aceitos pelo teste cuja velocidade é superior a 20m/s (esquerda) e porcentagem de vetores rejeitados pelo teste de simetria em comparação aos resultados sem a sua aplicação (direita). Esses valores referem-se ao caso em que a janela alvo de dimensão 15 foi utilizada.

Pode ser observado no gráfico à direita na Figura 5.3.1 que na situação mais severa, a quantidade de vetores eliminados aumenta em torno de 10% quando o teste de simetria é aplicado. Devido a grande quantidade de vetores obtidos, optou-se por ajustar o teste de forma severa, buscando eliminar a maior quantidade possível de vetores incoerentes mesmo que para isso alguns vetores válidos também fossem eliminados. Foram escolhidos os valores  $\alpha_{sim}=2$  e  $\gamma_{sim}=0,15$  para serem utilizados na Equação 5.3.1, pois com esses parâmetros conseguiu-se eliminar a maior quantidade de vetores com velocidade acima de 20m/s. Portanto, caso o módulo da diferença entre  $v_1$  e  $v_2$  (velocidade) for menor que 15% da velocidade de  $v_2$  adicionado a 2m/s, o vetor  $v_2$  é descartado.

Mesmo no caso em que o teste foi ajustado de forma extremamente severa, ainda observou-se a presença de vetores com velocidade incompatível com a situação sinótica. Sendo assim, o teste não foi capaz de eliminar totalmente o ruído presente no campo de vento. Contudo, sua aplicação mostrou-se válida, contribuindo para o processo de eliminação de grande parte dos vetores incoerentes.

Nesse momento, já é possível observar que os campos de vento obtidos em baixos níveis sobre a região continental são extremamente limitados. Isso deve-se principalmente a diminuição do contraste existente entre nuvem e superfície oceânica e nuvens e superfície continental; esses resultados são descritos nos trabalhos de Andreas et al. 1996 e Shenk, 1991. Também, as nuvens sobre o continente são influenciadas pela orografia e não são necessariamente representativos dos campos de vento de escala sinótica, os quais são de interesse para os modelos numéricos de previsão de tempo a médio prazo (Shenk, 1991).

#### **5.4 Avaliação do Teste de Consistência Espacial**

Mesmo após a aplicação do teste de simetria, verifica-se que ainda existe um número considerável de vetores errôneos. Comparando os pares de vetores  $v_1$  e  $v_2$  que o teste de simetria utiliza, foi observado que esses vetores com direção muito diferente dos demais a sua volta e com velocidade muito maior que não são excluídos pelo teste, possuem seu correspondente ( $v_1$ ) muito parecido. Assim, como esse teste avalia a consistência temporal entre as duas componentes extraídas dos pares de imagens baseando-se na diferença vetorial entre eles, o teste é ineficiente. Observa-se que mesmo aplicando o teste de simetria extremamente severo, ainda permanecem vetores errôneos.

Dessa forma, deve-se aplicar um teste que avalie cada vetor com os vetores à sua vizinhança na tentativa de eliminar esse ruído. Para melhorar a qualidade dos vetores extraídos por este método, um novo teste baseando-se na consistência espacial foi

desenvolvido. Vários trabalhos realizados sobre a extração de ventos a partir de imagens de satélites utilizam testes com o intuito de avaliar a consistência espacial dos vetores (Laurent et al, 2002, Holmlund, 1997). Esse teste foi desenvolvido, baseado nos testes semelhantes encontrados na literatura e também no teste similar aplicado nos modelos operacionais existentes na DSA. Inicialmente esse teste consistia em calcular a diferença escalar entre cada vetor e o seu vizinho mais próximo e verificar se a seguinte relação era satisfeita:

$$a > \frac{|\vec{v}_1 - \vec{v}_2|}{(b|\vec{v}_1| + c)} \quad (5.4.1)$$

Em que  $v_1$  é o vetor avaliado e  $v_2$  é seu vizinho mais próximo, a constante  $b$  assume um valor positivo menor que um, de forma a indicar um percentual da velocidade do vetor  $v_1$  e  $c$  é um valor de velocidade acrescida. A constante  $a$  é o limiar de corte o qual determina se o vetor avaliado será ou não descartado. Assim, o vetor  $v_1$  é rejeitado caso a Equação 5.4.1 não for satisfeita e ainda, o teste só é aplicado caso a distância entre  $v_1$  e  $v_2$  for menor que um dado  $\xi$  escolhido convenientemente. A Figura 5.4.1 mostra dois campos referentes ao recorte D, após a aplicação do teste citado acima. Note que ainda há presença de vetores indesejáveis.

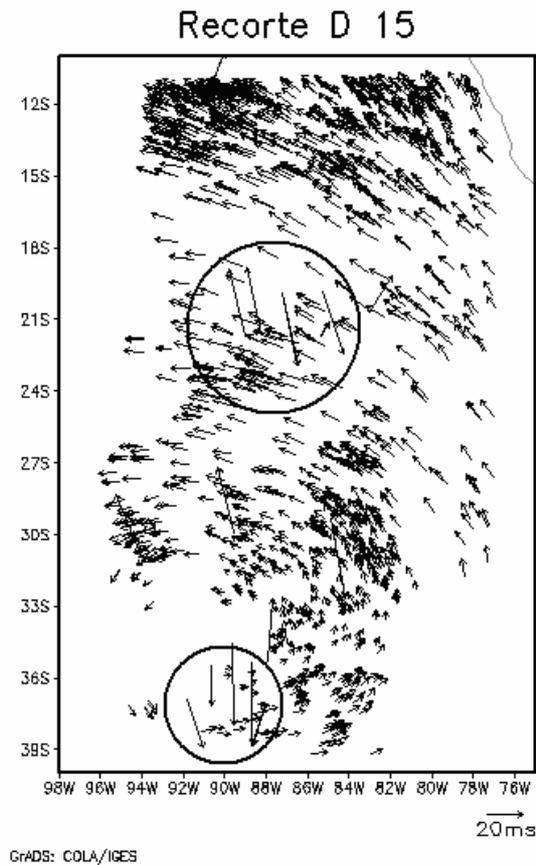


FIGURA 5.4.1 - Campo de vento obtido após a aplicação do primeiro teste de consistência espacial proposto. Muitos vetores inconsistentes ainda permanecem nos campos após a filtragem.

Por mais severo que esse teste fosse ajustado, os vetores indesejados não foram completamente eliminados, como mostrado na Figura 5.4.2.

Isolando algumas áreas pequenas de um campo, verificou-se que como havia muitos vetores errôneos, vários destes vetores possuíam o vetor vizinho mais próximo com direção e velocidade muito parecidas. Considerando que o teste é baseado na consistência espacial entre os vetores, baseado na diferença entre eles, estes vetores são aceitos como verdadeiros, já que a Equação 5.4.1 é satisfeita. Esse tipo de erro é relativamente comum uma vez que vetores errados podem ser produtos de erros na classificação de nuvens (nuvens baixas e altas classificadas como baixas), agrupados

especialmente, gerando regiões com vetores provenientes de níveis mais altos, consequentemente com velocidades mais altas. Esse fato pode ser visto na Figura 5.4.1 e (destacado pelos círculos).

Com o intuito de melhorar esse teste, decidiu-se comparar cada vetor avaliado com o conjunto de vetores, formado pelos vetores mais próximos e não unicamente com o vetor mais próximo como proposto anteriormente.

A execução deste novo processo, para o referido teste, consiste inicialmente em analisar para cada vetor, a quantidade de vetores numa dada vizinhança. Os vetores que não possuem uma quantidade mínima de vetores vizinhos a uma certa distância mínima são eliminados. Esse procedimento se justifica uma vez que o princípio desse teste é a comparação entre cada vetor com seus vizinhos mais próximos. Nos raros casos em que não existe uma quantidade mínima na área determinada, optou-se por descartá-los, tentando garantir uma qualidade melhor do campo final de vetores vento em detrimento do número total de vetores. Nota-se que, de uma forma geral, vetores isolados são frequentemente associados a erros no processo automático de rastreamento. Isto se deve, possivelmente, ao fato que esses vetores são provenientes de bordas de nuvens altas constantemente apresentando características radiométricas de cumulus de bom tempo, que não foram eliminadas durante a classificação de nuvens. Esse fato também pode ser provocado devido a pequena área definida para ser rastreada, de forma que o modelo tenha captado algum movimento de pequena escala, gerando esses vetores de velocidade elevada. Também, esse ruído pode ser provocado pelo aparecimento de nuvens devido a convecção, quando surgem nuvens semelhantes aquelas escolhidas para serem rastreadas numa região próxima, contida na janela de procura.

Nessa etapa, ficou evidente a grande importância que a classificação de nuvens impinge no campo final, influenciando todas as etapas seguintes a ela, ou seja, o processo de rastreamento, os testes de controle de qualidade e provavelmente a determinação da altura dos vetores. Esse novo método de processamento do teste apresentou resultados

muito satisfatórios em relação ao teste de consistência espacial aplicado anteriormente. Além disso, ele é muito mais eficaz, eliminando grande parte do ruído restante. O número de vetores eliminados pelo teste com um comportamento sinótico aparentemente correto foi drasticamente reduzido. O fato de se utilizar um teste escalar faz com que os limites de corte sejam muito rigorosos, portanto elimina-se também um número considerável de vetores corretos.

Esse teste é aplicado somente após verificar-se a existência de uma quantidade mínima de vetores numa dada área ao redor do vetor avaliado. A quantidade mínima definida foi a de três vetores e caso não existissem, o vetor a ser avaliado é rejeitado. A próxima etapa desse novo teste foi comparar o valor da velocidade do vetor avaliado com a média das velocidades dos  $k$  vetores mais próximos. A comparação é feita pela expressão 5.4.2, e caso ela seja satisfeita, o vetor é rejeitado.

$$\alpha_{ce} V(x) > \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k V(n) \quad (5.4.2)$$

Em que  $V(x)$  é a velocidade do vetor avaliado e  $V(n)$  são as  $n$  velocidades dos  $n$  vetores próximos a  $V(x)$ .

A constante  $\alpha_{ce}$  é ajustada de forma a definir quanto a velocidade do vetor pode ser superior a média da velocidade dos vetores vizinhos, assumindo um valor positivo menor que um. Assim, o objetivo dessa etapa é eliminar os vetores que possuem velocidade muito elevada em relação aos vetores próximos, ou seja, eliminar principalmente aqueles vetores de velocidade extremamente elevada, incompatíveis com a situação sinótica do período cujas cenas foram utilizadas. Essa etapa do teste mostrou ser muito eficiente na eliminação dos vetores com velocidades altas que, na maioria dos casos, tratam-se apenas de ruído. Isso pode ser constatado na Figura 5.4.2.

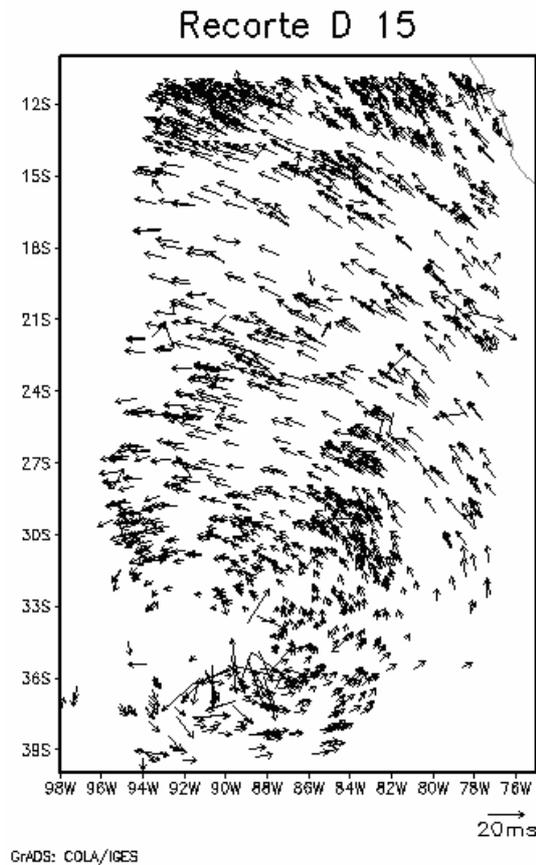


FIGURA 5.4.2 - Campo de vento obtido após a aplicação do teste de consistência espacial baseado na diferença em relação a velocidade dos vetores vizinhos.

A próxima etapa avalia a diferença do vetor analisado em relação aos vetores mais próximos. A diferença entre cada vetor recebe um peso diferente baseada na distância do vetor em questão. Esse peso é ajustado pela função  $f(x) = \frac{1}{e^{qx}}$ , com  $q = 1,83$ . O valor da constante  $q$  é ajustado empiricamente para que a função tenda a zero mais rapidamente e para que o teste apresente os melhores resultados. Dessa forma, tem-se que a contribuição de vetores cuja distancia seja maior que meio grau de latitude/longitude terá peso inferior a 40% na soma das diferenças. O teste consiste em verificar se a somatória das diferenças é inferior a um dado limiar, caso o seja, o vetor é aceito senão é rejeitado. A comparação é feita pela Equação 5.4.3:

$$\alpha_{ce} > \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k Dif(n) \frac{1}{e^{qd_n}} \quad (5.4.3)$$

Em que:

$Dif(n)$ : é o módulo da diferença vetorial entre o n-ésimo vetor mais próximo,

$d_n$  : distancia do n-ésimo vetor mais próximo

$q$ : constante

Uma vez eliminados os vetores inconsistentes espacialmente em relação ao aspecto da velocidade, essa etapa busca eliminar os vetores restantes que não descrevem o campo de ventos presente na cena.

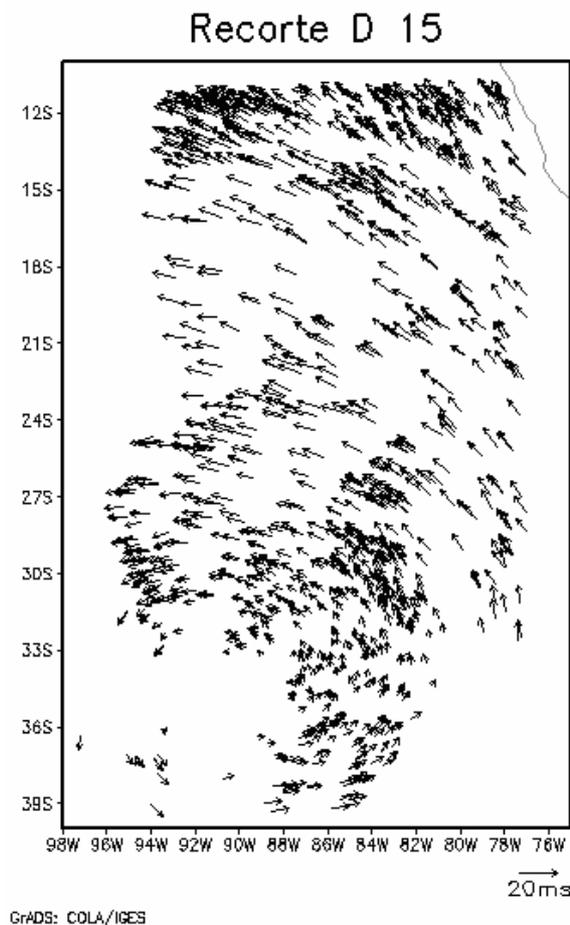


FIGURA 5.4.3 - Campo de vento obtido após a aplicação do teste da diferença vetorial, observa-se como a quantidade de ruído diminuiu consideravelmente.

Nota-se que essa etapa do teste eliminou aqueles vetores com direção inconsistente, presentes no campo de vento apresentado na Figura 5.4.2.

Após a aplicação de uma série de execuções do teste de consistência espacial, foram determinados os limiares de corte convenientes, buscando obter um campo de vento o mais homogêneo possível e que apresentasse a mínima quantidade de vetores errôneos. A direção dos vetores do campo resultante, referente ao recorte D condiz com a situação sinótica da região, como pode ser visto na Figura 5.4.4. O campo de vento estimado

refere-se aos baixos níveis, assim espera-se que a altura desses vetores não ultrapasse o nível de 700hPa. A presença de uma região de alta pressão com centro aproximadamente a 35 sul, 91 oeste condiz com o padrão descrito pelo campo mostrado na Figura 5.4.3. Realizando uma comparação preliminar entre os campos mostrados na Figura 5.4.3. e da re-análise fornecido pelo NCEP no nível de 850hPa verifica-se que a padrão do campo deduzido são similares.

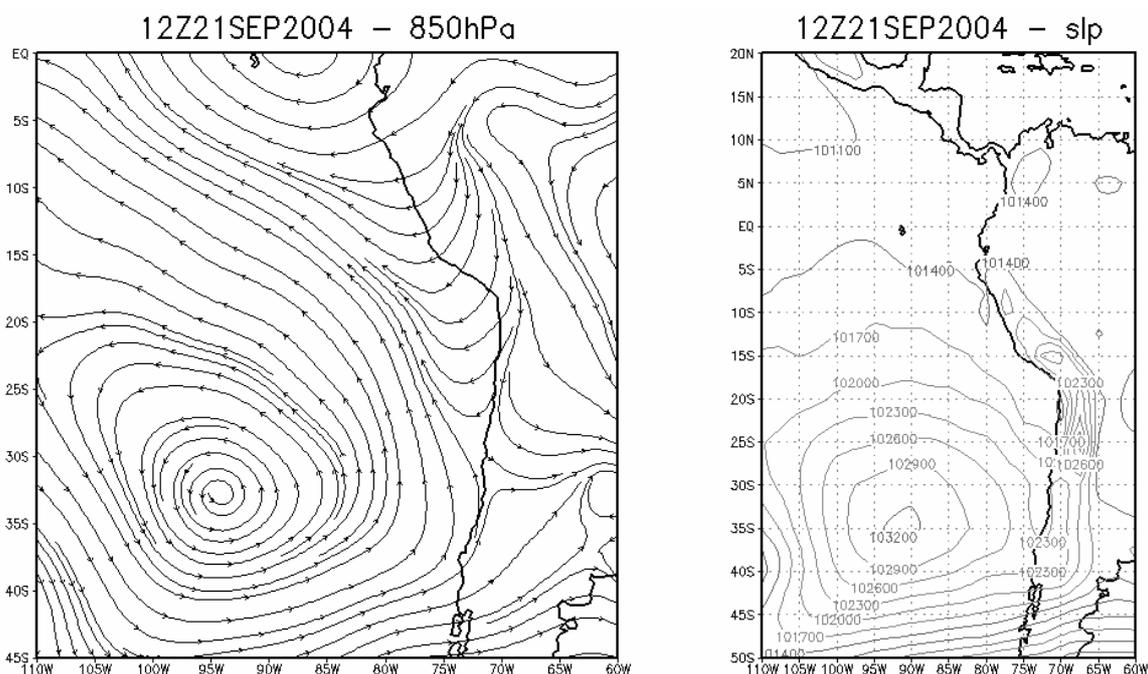


FIGURA 5.4.4 – Linhas de corrente do campo de vento em 850hPa e pressão ao nível médio do mar e referentes ao dia 21 de setembro de 2004 as 12 UTC.  
 FONTE: NCEP

Uma análise mais detalhada e a validação dos campos de vento serão apresentadas posteriormente após a determinação da altura dos vetores.

Na Figura 5.4.5 são apresentados dois campos referem-se ao recorte D, extraído da imagem do dia 21 de setembro de 2004. À esquerda é apresentado o campo sem controle de qualidade, onde o único parâmetro utilizado para rejeitar ou não um vetor é

o coeficiente de correlação e à direita é mostrado o mesmo campo, porém após a aplicação do teste de controle de qualidade. Torna-se evidente que a aplicação do controle de qualidade é importante para o processo de estimativa do vento a partir de imagens de satélites.

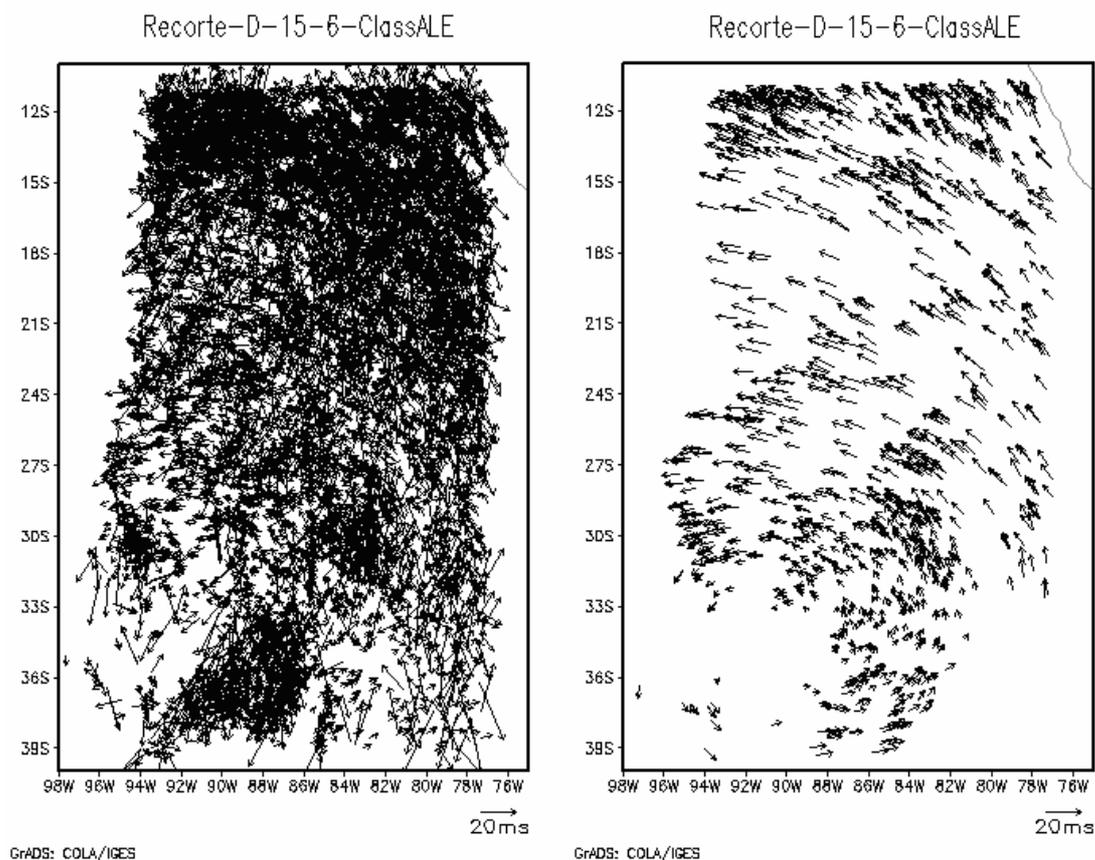


FIGURA 5.4.5 – Campos de vento resultantes sem a aplicação do controle de qualidade (esquerda) e coma aplicação de todos os testes do controle de qualidade (direita). Nota-se que o controle de qualidade é indispensável.

O campo de vento após a aplicação do teste de consistência espacial, aparentemente é consistente com a circulação atmosférica daquele local para o dia 21 de setembro de 2004. Uma avaliação mais objetiva será apresentada posteriormente para avaliar a

confiabilidade do método. Para a região compreendida pelo recorte D, onde no dia 21 de setembro a distribuição de nuvens baixas era homogênea e bem distribuída, preenchendo quase todo o segmento de imagem.

Nessas avaliações e testes, o grande problema foram os vetores com velocidade elevada e direção praticamente aleatória que foram deduzidos em grande quantidade pelo modelo. Também, pode-se notar que o modelo de estimativa do vento utilizando imagens do canal visível é mais eficiente sobre as regiões oceânicas do que sobre as regiões continentais. Esse fato se deve em parte a morfologia dos campos de nuvens em cada região (oceânica / continental).

Apesar dos campos de vento obtidos para a seqüência de imagens utilizadas nessa avaliação serem formados principalmente por vetores sobre as regiões oceânicas, é um resultado importante, pois com modelos utilizando imagens do canal infravermelho e vapor d'água, os campos obtidos para os baixos níveis são muito inferiores aos que foram obtidos com a utilização das imagens do canal visível.



## CAPÍTULO 6

### DETERMINAÇÃO DA ALTURA DOS VETORES

As nuvens baixas se deslocam em função do vento na altura da base da nuvem (Smith e Hasler 1976). Assim, a determinação da altura do vetor vento, a partir de técnicas que se baseiam na correlação de imagens sucessivas dos campos de nuvens baixas, usa a altura da base da nuvem. Como as imagens de satélite registram os topos das nuvens, técnicas especiais devem ser implementadas para obter informações sobre a altura da base da nuvem.

Schmetz et al 1996, descrevem uma técnica de determinação da altura dos vetores de vento em níveis baixos a partir da altura da base da nuvem. Essa técnica calcula para cada vetor vento o histograma do segmento da imagem central (tempo  $t_0$ ) utilizado no processo de rastreamento. A esse histograma, realizado com a imagem do canal infravermelho janela, são ajustadas duas gaussianas. O ponto de intersecção dessas gaussianas determina a temperatura da base da nuvem. A técnica se baseia na hipótese de os histogramas bimodais descreverem duas populações distintas, uma da superfície continental e outra das nuvens. A intersecção destas duas populações se refere à temperatura típica da base da população de nuvens presente no segmento de imagem. Logo, para determinar a temperatura da base da nuvem por essa técnica, é necessário que os histogramas calculados possuam uma determinada quantidade de pixels que representassem regiões de céu claro e pixels representando regiões de céu coberto. Caso o segmento que originou o vetor seja formado por uma região de apenas céu coberto, não é possível executar a técnica. Essa técnica descrita por Schmetz et al (1996) também foi discutida por Le Marshall et al. (1994), como apresentado no Capítulo 3.

O método de determinação do nível de pressão dos vetores utilizado neste trabalho baseou-se na técnica descrita por Schmetz et al 1996. Este método utiliza uma imagem

do canal infravermelho ( $10,7\mu\text{m}$ ) para o cálculo dos histogramas. Como o intuito desta técnica é determinar a temperatura da base da nuvem e, a partir daí inferir o nível de pressão em que ela se encontra, esse é o canal mais indicado, uma vez que fornece informação sobre a temperatura de brilho, que em uma primeira aproximação pode ser considerado como a temperatura real do objeto observado. No caso da imagem visível, a informação obtida é sobre o albedo do objeto observado.

A resolução espacial do canal infravermelho, como já foi dito, é 16 vezes menor que a resolução da imagem do canal visível (Figura 5.1). Dessa forma, caso fosse utilizada uma matriz que representasse a mesma área, esta seria formada por um número de pixels muito pequeno (16 vezes menor), não sendo suficiente para gerar um histograma representativo. Por exemplo, utilizar uma janela alvo com dimensão 16, ou seja, 256 pixels representaria uma área de  $16 \times 16 \text{ km}$  e sua respectiva janela no canal 4 seria formada por apenas 16 pixels. Por isso foram escolhidas na imagem do canal infravermelho, matrizes com ordem maior do que aquela matriz, que corresponde ao segmento do canal visível, mas de forma que sua correspondente (imagem do canal visível) estaria situada no centro desta da janela.

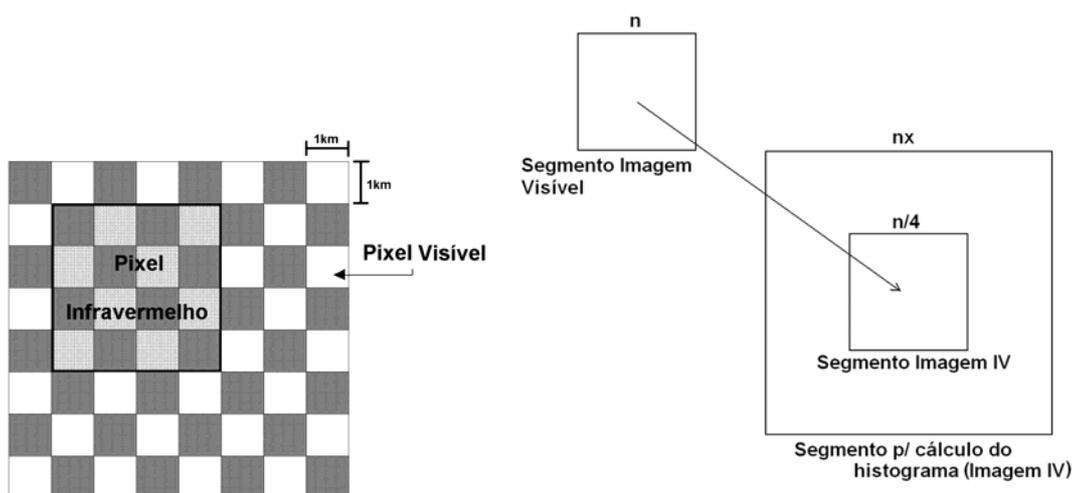


FIGURA 6.1 – Segmento utilizado para calcular o histograma de cada vetor.

Esta opção foi escolhida, levando em consideração que os campos de ventos em baixos níveis a serem determinados representam escalas de meso a sinótica, porque a grande maioria dos vetores obtidos estão sobre os oceanos.

Assim, calcula-se um histograma para cada segmento de imagem referente a cada vetor aprovado no controle de qualidade. Como já mencionado, os segmentos são extraídos da imagem do canal 4 no tempo  $t_0$  da seqüência de imagens utilizada no processo de estimativa do vento. Após cada cálculo de histograma a partir do segmento de imagem, ajusta-se uma curva polinomial de mínimos quadrados. A escolha do grau do polinômio ( $n$ ) foi feita empiricamente, elegendo-se um valor que fornecesse uma aproximação satisfatória. A utilização de um polinômio de grau 12 permitiu que a precisão da aproximação fosse suficiente para a execução da técnica, descrevendo com facilidade a distribuição característica das duas populações de pixels (nuvens e superfície). O polinômio ajustado ao histograma possui a mesma função das duas gaussianas utilizadas pelo método descrito por Schmetz et al, (1996), usado para determinar a zona de transição entre céu encoberto e céu claro, ou seja, a altura da base das nuvens. Tal zona de transição é representada pelo mínimo entre as duas populações do histograma. O ponto de mínimo que determina a temperatura encontra-se entre os dois máximos locais da função, como indicado na Figura 6.2. Para determiná-lo, deriva-se a função e a segunda raiz real encontrada (em ordem crescente), o que permite a obtenção da temperatura de base da nuvem.

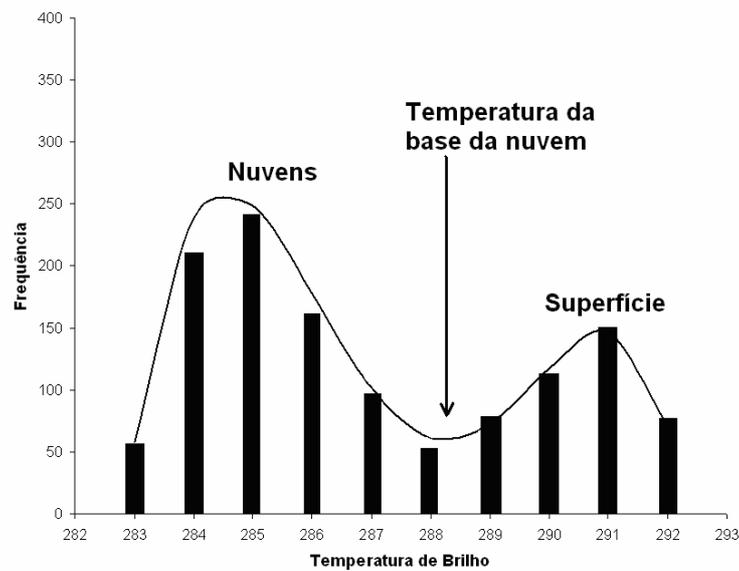


FIGURA 6.2 - Histograma típico para uma região oceânica com presença de nuvens e áreas de céu claro.

A temperatura da base da nuvem é transformada em um nível de pressão a partir da utilização do perfil fornecido pelo modelo global do CPTEC. Nessa conversão, assume-se que a temperatura de brilho no canal infravermelho seja a mesma que a do ar na sua proximidade. Só será necessário determinar a altura dos vetores caso o histograma apresente o padrão do exemplo da Figura 6.2, ou seja, com as duas populações de céu claro e céu encoberto, com uma região de mínimo entre elas. Caso o histograma não apresente esse padrão, a primeira derivada do polinômio ajustado não possuirá as três raízes no intervalo do histograma, conseqüentemente a altura não será determinada e o vetor será eliminado.

Durante a confecção dos histogramas, notou-se em alguns raros casos a presença de temperaturas de brilho muito baixas, provavelmente associadas a nuvens altas e médias. O modelo não prevê esse fato, pois deveriam estar sendo levados em consideração somente os pixels associados a nuvens baixas e a superfície, uma vez que a classificação de nuvens já deveria ter eliminado os pixels indesejados. Essas ocorrências podem ser

explicadas como pixels que foram classificados erroneamente na classificação de nuvens ou pixels que foram incluídos na sobreposição dos dois canais, e portanto, devem ser eliminados na elaboração do histograma. Assim, viu-se necessário determinar um intervalo de temperaturas de brilho para o cálculo dos histogramas de modo que qualquer pixel com temperatura fora do intervalo seria descartado. Desta forma, calculou-se os histogramas para cada segmento de imagem referente a cada vetor estimado e todos esses histogramas foram somados, dando origem a um único histograma. Isso foi feito para se estimar a frequência de ocorrência das temperaturas muito baixas, que estariam associadas aos pixels referentes a nuvens altas e médias que não foram eliminados durante a classificação de nuvens. A Figura 6.3 mostra os histogramas para a cena do dia 24 de março de 2005 as 15:52 UTC. Cada curva representa a soma de todos os histogramas, utilizando um segmento com uma dada dimensão; as dimensões utilizadas foram 8, 16, 32, 48, 64 e 72.

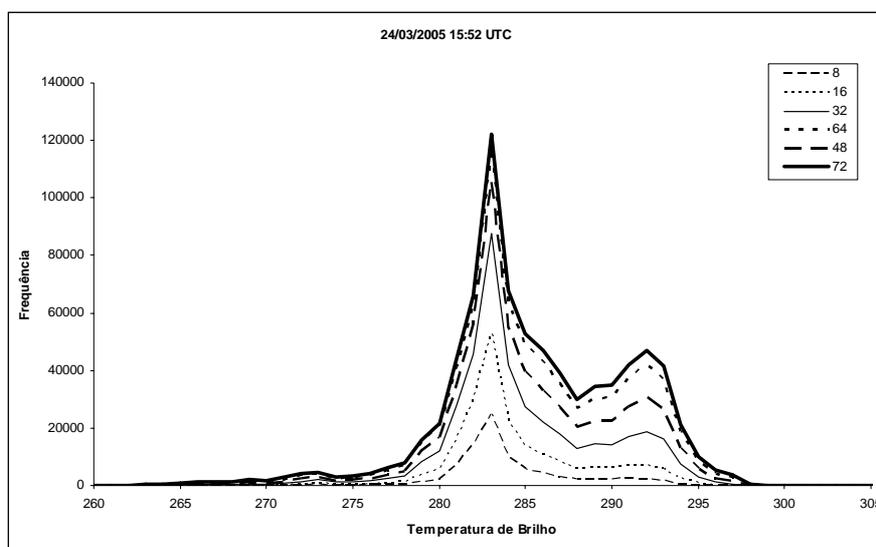


FIGURA 6.3 - Soma de todos os histogramas calculados de cada segmento utilizado para a determinação da altura dos vetores. Cada curva representa a soma de todos os histogramas utilizando um dado valor da dimensão da matriz utilizada no cálculo do histograma.

O uso de diferentes dimensões para os segmentos visou verificar a sensibilidade dos resultados às dimensões. Nota-se que os histogramas são semelhantes diferindo basicamente em relação ao valor da frequência, que obviamente é maior para os casos em que a dimensão dos segmentos é maior. Isso pode ser observado na Figura 6.3. Após a análise dos histogramas, concluiu-se que o truncamento da temperatura entre 273 e 300 K define um intervalo contendo as duas populações selecionadas. Observa-se na Figura 6.3, que a ocorrência de temperaturas abaixo de 275K é desprezível. O mesmo pode ser dito para temperaturas acima de 300K. (Schmetz et al., 1996) utilizam o intervalo 273 a 300K.

Inicialmente uma matriz de dimensão 16 foi utilizada para calcular o histograma com resultados insatisfatórios. A altura de muitos dos vetores era determinada acima do esperado e muitos vetores não tinham sua altura determinada. Verificando os histogramas gerados durante o processo de determinação da altura, observou-se três padrões para esses histogramas e os polinômios a eles ajustados, exemplificados na Figura 6.4.

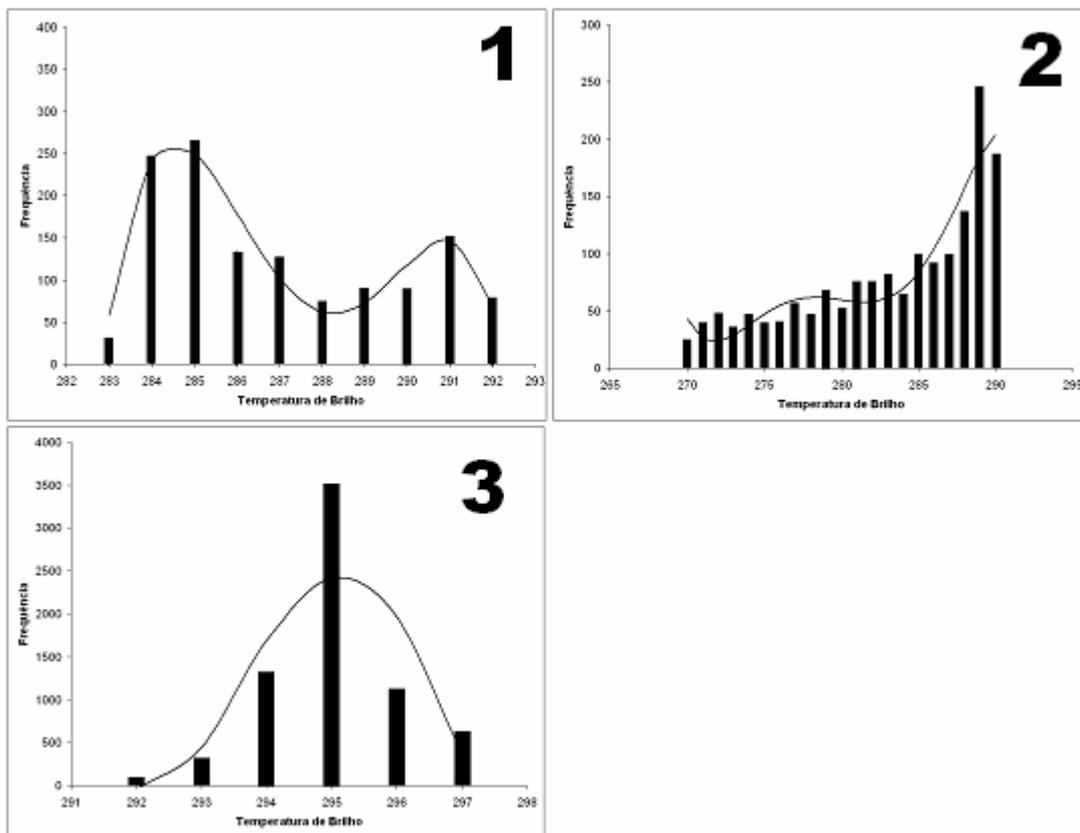


FIGURA 6.4 – Padrões gerais dos histogramas calculados.

Dentre os três casos exemplificados na Figura 6.4, apenas o caso 1 é interessante para a aplicação da técnica de estimativa da temperatura da base da nuvem. Note que para este caso tem-se bem definidas as duas populações (picos) e a derivada do polinômio ajustado possui três pontos de inflexão, sendo que um deles define o ponto de mínimo a ser utilizado para determinar a temperatura da base da nuvem. Os outros dois indicam os pontos de máximo. Para os casos 2 e 3, a altura do vetor não é determinada (são necessárias três raízes) - o valor da temperatura da base da nuvem baixa seria incoerente. Os casos 2 e 3 estão provavelmente associados a campos majoritariamente descritos por pixels na superfície, não apresentando uma população estatisticamente satisfatória de nuvens baixas para a determinação da altura.

Conforme já mencionado, foram testadas diversas dimensões de segmento para o cálculo da altura da base. Como referido anteriormente, pequenos segmentos não contém uma população de pixels suficiente para gerar um padrão semelhante ao mostrado na Figura 6.4. O resultado obtido mostra que quanto maior a dimensão desse segmento, melhor é o ajuste do polinômio com três raízes. Notou-se que janelas em torno de 100x100 pixels apresentam uma qualidade razoável na determinação da altura da base e representam razoavelmente as condições termodinâmicas homogêneas. Como medidas de radiossondagens que permitem descrever as bases das nuvens (através do cálculo do nível de condensação por levantamento) abrangem um raio de 200 km, 100 km é um raio bastante razoável para o uso desta janela. A partir dessa constatação, adotou-se o critério de não utilizar um valor fixo para cálculo de todos os histogramas, dimensionando o segmento para a elaboração do histograma, a partir de uma dimensão pequena e aumentá-la até que o método ajustasse um polinômio cuja primeira derivada possuísse três raízes reais no intervalo do histograma ou atingisse um valor máximo. O intervalo escolhido para as dimensões da matriz foi 16 a 100.

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram a relação entre a quantidade de vetores que tiveram sua altura determinada pelo método e aqueles que não a tiveram. A Figura 6.5 refere-se ao caso em que a dimensão das matrizes variava, aumentando até que fosse possível conseguir um conjunto de pixels suficiente para representar as duas populações (céu aberto / nuvens). O eixo horizontal representa os valores iniciais da dimensão das matrizes. Já a Figura 6.6 é semelhante à Figura 6.5, porém apresenta a relação para o caso em que a dimensão da matriz utilizada para calcular os histogramas era fixa. Estas duas figuras referem-se ao campo do dia 24 de março de 2005, horário 1552utc.

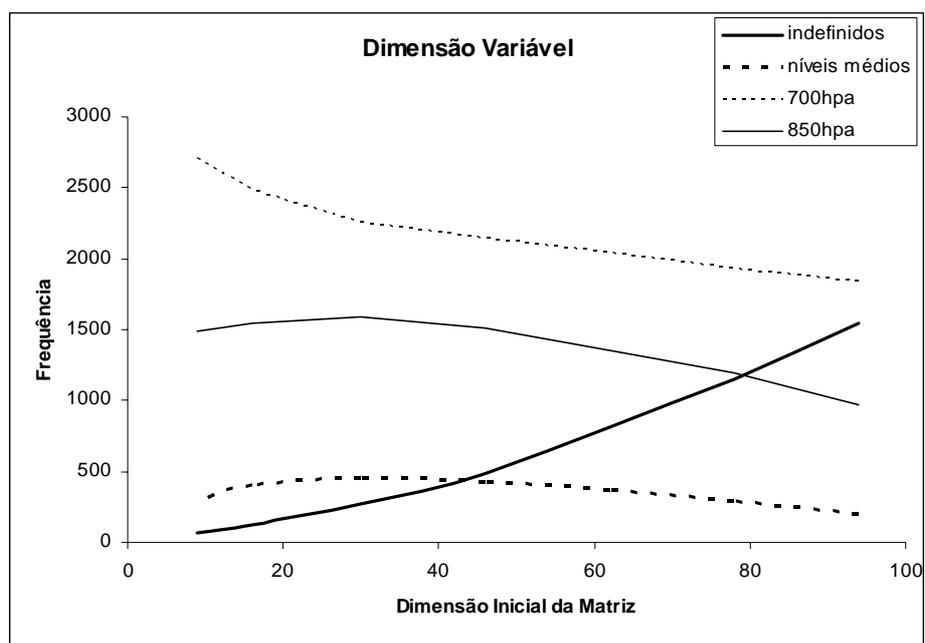


FIGURA 6.5 – Nível de indeterminação da altura utilizando matrizes com dimensão variável para o cálculo dos histogramas.

Observa-se que à medida que se aumenta a dimensão inicial das matrizes, a percentagem de vetores cuja altura é indefinida também aumenta. A quantidade de vetores que tiveram sua altura determinada entre 700hPa e 400hPa não teve uma grande variação. Nota-se também que para as menores dimensões uma percentagem maior de vetores teve sua altura determinada entre 850hPa e 700hPa.

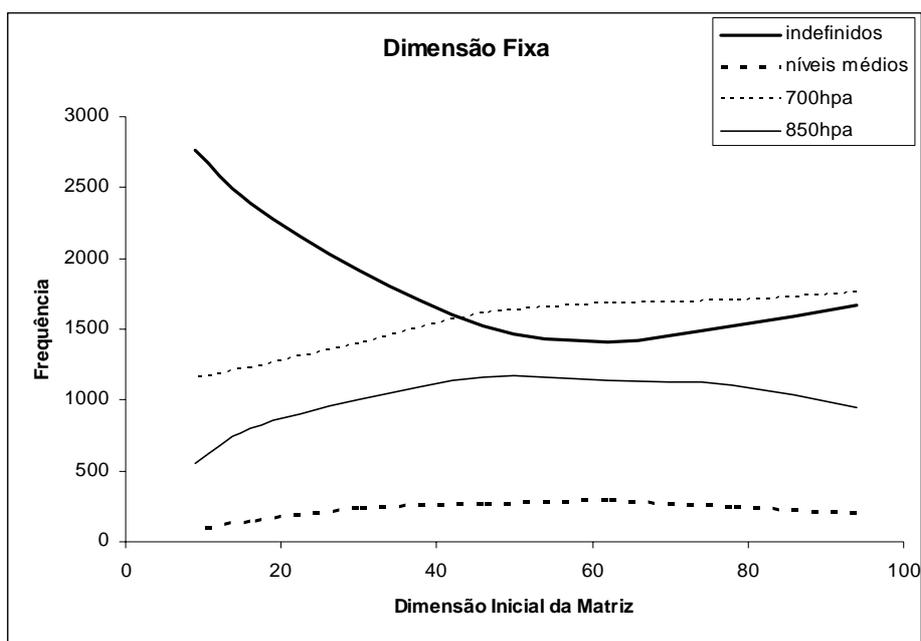


FIGURA 6.6 - Nível de indeterminação da altura utilizando matrizes com dimensão fixa para o cálculo dos histogramas.

Utilizando um valor fixo para a dimensão das matrizes utilizadas para calcular os histogramas, observa-se que a quantidade de vetores cuja altura não foi determinada é extremamente elevada quando comparada à quantidade obtida quando a dimensão da matriz era variável. A quantidade de vetores que tiveram sua altura determinada como sendo de níveis médios (700-400hPa) foi inferior à do caso em que a dimensão da matriz variava.

Comparando as duas opções de determinar as matrizes (valor fixo ou valor variável), a opção de tomar a dimensão variável se tornou uma escolha óbvia.

## 6.1. Avaliação do Método

Esta seção avalia os campos de vento após a determinação da altura dos vetores utilizando o método descrito na seção anterior. Em todos os campos deduzidos para a série de dias utilizada, a quantidade de vetores determinada sobre as regiões continentais é desprezível. A maior parte dos vetores foi estimada sobre as regiões oceânicas e isso trouxe um problema importante para a validação do modelo. O uso de perfis atmosféricos provenientes de radiossondagens seria a forma mais indicada para avaliar os campos de vento resultantes. Não existem, no entanto, dados disponíveis sobre as regiões oceânicas, onde a quantidade de vetores é maior e mais representativa. Assim, foi descartada a utilização de perfis atmosféricos feitos por radiossondas. Foram utilizados nessa avaliação apenas os dados de re-análise do NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

A princípio, esta avaliação visa verificar a precisão do método de estimativa da altura base da nuvem. A forma encontrada para determinar a correção da altura inferida foi o cálculo do RMS dos vetores em relação aos campos fornecidos pelo NCEP supondo que a altura determinada corretamente levaria a um erro calculado menor.

$$RMS = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2} \quad ; \quad \Delta x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^e - x_i^m) \quad (6.1.1)$$

em que :

$n$  é o número de amostras e  $u$  e  $v$  são as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente.

Os dados de vento do NCEP são fornecidos apenas nos níveis de 1000, 925, 850 e 700 hPa para os níveis baixos. Já os vetores do campo estimados pelo modelo deste trabalho

assumem altura (nível de pressão) em qualquer valor no intervalo de 1000 a 700 hPa. Assim, durante o cálculo do RMS e BIAS, os valores das componentes zonal e meridional dos campos do NCEP foram interpoladas de forma que a cada vetor do campo avaliado correspondesse a um vetor referente ao campo do NCEP no mesmo nível de pressão. Devido à baixa resolução espacial dos campos do NCEP em relação à resolução do campo resultante do modelo, apenas os vetores que estivessem à distância máxima de 1 grau de um vetor do campo do NCEP foram utilizados na avaliação.

A Figura 6.7 mostra o valor do RMS calculado entre os vetores extraídos da série e os campos do NCEP. O valor da altura dos vetores foi subestimado e superestimado em intervalos de 25hPa a fim de verificar a qualidade das estimativas da altura do vetor vento.

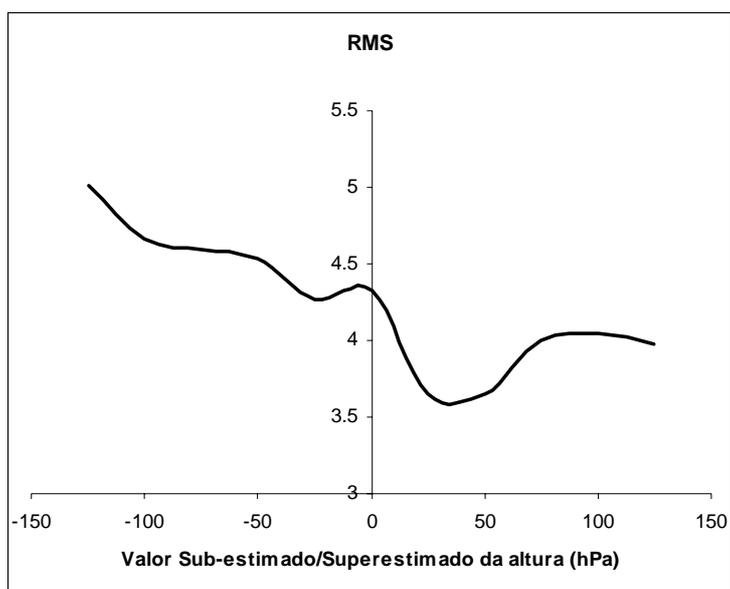


FIGURA 6.7 – Erro quadrático médio do campo de vento em relação ao campo de vento calculado pelo NCEP.

Pelo gráfico apresentado na Figura 6.7, nota-se que o menor valor do RMS ocorre quando a altura do vetor estimado é cerca de 25hPa maior que o valor dos campos obtidos pelo NCEP. Esse resultado mostra que as estimativas da altura do vento pelo método proposto são bastante razoáveis, ainda que com um bias de 25 hPa. Esse bias ocorre não em função do método empregado, mas no momento de considerar que a temperatura de brilho medida pelo satélite corresponde à mesma altura nos dados do NCEP. Devido à existência de vapor d'água acima do topo da nuvem a radiação emergente é parcialmente absorvida e portanto a temperatura de brilho é levemente reduzida. Utilizando o modelo de transferência radiativa FLISS (Fomin, 1994) e um perfil climatológico das regiões tropical e extratropical, calculou-se a absorção da radiação de onda longa na janela atmosférica em 10,7  $\mu\text{m}$ , na qual o canal 4 do satélite GOES-12 opera. Devido a essa absorção, é esperado para a região tropical um decréscimo de cerca de 1,5 K. Para a região extratropical espera-se um decréscimo de cerca de 1 K na temperatura de brilho. Aplicando essa correção à temperatura estimada para a base da nuvem obteve-se um resultado mais consistente do que o anterior. Isso pode ser visto na Figura 6.8.

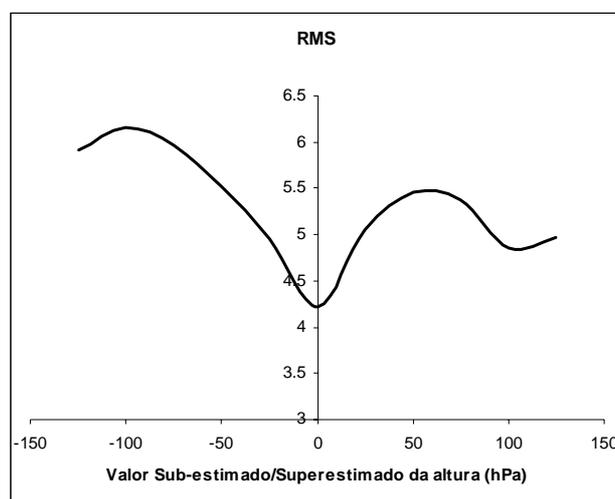


FIGURA 6.8 – Erro quadrático médio do campo de vento em relação ao campo de vento calculado pelo NCEP para o caso em que foi aplicada a correção na temperatura de brilho devido à absorção do vapor d'água presente nas camadas superiores ao alvo.

A Figura 6.8 mostra que o valor do erro aumenta à medida que subestimamos ou superestimamos a altura (nível de pressão) da base das nuvens, confirmando que a estimativa para a base da nuvem utilizada torna-se melhor com essa correção, sendo bastante coerente com os dados do NCEP.

Foi constatado que a técnica de determinação superestimou a altura dos vetores, já que subestimando em 25hPa e 50hPa a altura determinada para a base das nuvens o valor do erro quadrático médio (rms) foi menor. Isso mostra que a temperatura da base da nuvem está sendo determinada com valor inferior ao real. Esse fato pode ter ocorrido devido à absorção da radiação de onda longa pelo vapor presente nas camadas superiores. Schmetz (1986) diz que esse efeito de absorção cria tipicamente um decréscimo da temperatura real da ordem de 1 a 2 K. O autor diz que a correção desse efeito geralmente resulta numa diminuição da altura atribuída à nuvem, da ordem de cerca de 40hPa em relação à estimada pelo modelo.

Após a correção da altura atribuída aos vetores, o erro quadrático médio dos vetores dos campos deduzidos pelo modelo e os vetores fornecidos pelo NCEP são mais consistentes, aumentando à medida que a altura é subestimada ou superestimada. Seria interessante ter utilizado dados observacionais para serem comparados aos vetores determinados pelo modelo. Esses dados, contudo, estavam disponíveis apenas sobre o continente e a grande maioria dos vetores, quando não todos, se localizavam sobre as regiões oceânicas. Ainda, quando algum vetor era determinado sobre o continente, tratava-se de mero ruído ou, caso aparentasse ser um vetor válido, nenhum perfil de radiossonda estava disponível para o local.

## CAPÍTULO 7

### O CANAL - 3,9 $\mu\text{m}$

Os valores dos diversos parâmetros do modelo de estimativa do vento a partir de imagens do canal infravermelho próximo serão, na sua maioria, os mesmos utilizados nas imagens do canal visível. Serão alterados apenas aqueles parâmetros que, de alguma forma, estiverem relacionados às particularidades das imagens do canal infravermelho próximo.

#### 7.1 Detecção das Nuvens Cirrus e Nevoeiros (Classificação de Nuvens)

Na execução do processo de estimativa do vento com imagens do canal infravermelho próximo, as imagens também devem ser classificadas com o intuito de eliminar as nuvens médias e altas, pelos mesmos propósitos apresentados no capítulo referente ao canal visível.

O processo de classificação de nuvens para o canal infravermelho próximo é totalmente distinto daquele do canal visível. Para essas imagens, inicialmente as nuvens do tipo cirrus são identificadas e excluídas. Posteriormente, baseando-se num limiar de temperatura de brilho, as demais nuvens presentes na imagem são classificadas. A detecção das nuvens cirrus é feita utilizando a técnica da diferença entre os canais infravermelho próximo e infravermelho janela, conforme descrito no Capítulo 3 Seção 3.4.3 dessa dissertação. De acordo com Lee (2000), pixels cujos valores da diferença entre os canais são inferiores a  $-3$  K indicam a presença de nuvens cirrus, portanto, devem ser descartados. Essa diferença ocorre porque a transmissividade da nuvem cirrus no canal infravermelho janela é maior que no canal infravermelho próximo. Para a classificação dos demais pixels, utilizou-se como primeira aproximação o limiar de temperatura de brilho de 270 K, valor escolhido com base nos histogramas apresentados

na Figura 6.3. Vale lembrar que os histogramas foram calculados a partir de imagens classificadas pelo método aplicado ao canal visível.

Esses histogramas possibilitam estimar a temperatura mínima esperada para o topo das nuvens baixas. Além disso, o limiar de 270 K é razoável para realizar uma primeira separação entre nuvens baixas, altas e médias, pois espera-se uma certa absorção pelo vapor d'água da radiação emergente. Dessa forma, pixels com temperaturas de brilho com valores abaixo deste limiar são assumidos como representativos de campos de nuvens médias ou altas, sendo descartados das imagens. A forma utilizada para a eliminação dos pixels rejeitados foi substituir estes por um valor aleatório empregando o mesmo procedimento adotado na classificação das imagens do canal visível. Se existirem campos de nuvens médias incluídas nesta classificação, serão provavelmente descartadas nos testes de controle de qualidade.

## **7.2 Ajustes dos Parâmetros do Modelo**

Em relação à escolha da dimensão da janela alvo, foi utilizado o mesmo valor aplicado aos modelos atualmente em operação na DSA (Laurent e Machado, 1994). Nesse aspecto, tais modelos estão bem ajustados utilizando uma janela de 32 por 32 pixels. Ao contrário do que ocorria no canal visível, o canal 2 (3.9  $\mu\text{m}$ ) possui a mesma resolução espacial do canal 4. Os resultados mostraram que esse canal apresenta uma quantidade de ruído (vetores errôneos) menor do que quando a técnica é aplicada ao canal visível. Provavelmente esse fato está relacionado às diferenças da resolução dos canais. Considerando que o visível possui uma resolução espacial dezesseis vezes maior que o canal infravermelho próximo, espera-se que nesta escala espacial, a variabilidade temporal dos campos de nuvens seja maior, gerando uma quantidade de ruídos maior. Assim, como o nível de ruído é menor, optou-se por utilizar o coeficiente de correlação 0,5 (Laurent e Machado, 1994), uma vez que não há necessidade de testes rigorosos como aqueles demandados pelo canal visível.

O teste da mínima porcentagem, que verifica se uma quantidade mínima de pixels presentes nas janelas de procura não foi alterada pela classificação de nuvens, teve seu valor alterado em relação ao escolhido para o canal visível. Como a quantidade de ruído para esse modelo não é tão acentuada quanto para o modelo do canal visível, o limiar foi modificado. Escolheu-se o valor máximo de 50% de pixels presentes nas janelas de análise, ou seja, serão utilizadas para cálculo do vetor vento apenas aquelas em que pelo menos metade dos pixels não foram substituídos por valores aleatórios durante a classificação de nuvens.

Quanto ao ajuste do teste de controle de qualidade, o teste de simetria baseado na consistência temporal não foi modificado, visto que o passo de tempo entre as imagens é o mesmo, isto é, 30 minutos. A utilização de uma imagem com resolução espacial maior ou menor não terá grande influência nos atributos dos vetores, pois nas imagens com intervalo de tempo de 30 minutos entre si os movimentos de pequena escala acabam não sendo captados, restando apenas os movimentos de maior escala, próximos da escala sinótica. O teste de simetria avalia se o vento estimado sofre mudanças muito bruscas entre os intervalos de tempo  $t_0-30\text{min} - t_0$  e  $t_0 - t+30\text{min}$ , ou seja, se a direção e ou velocidade do vento se alteram além dos valores máximos esperados, quando se trata apenas de erro no processo de estimativa do vento.

O teste de consistência espacial, por sua vez, irá sofrer maior influência em relação ao teste desenvolvido para o canal visível. Para ser aplicado aos campos estimados a partir das imagens do canal visível, o teste foi ajustado de forma a comparar o vetor obtido com uma média dos vetores vizinhos em um raio de 1,5 graus visando eliminar o máximo de vetores errôneos para aquela resolução e relação de vizinhança. Decidiu-se utilizar a mesma distância de vizinhança para o canal infravermelho próximo, guardando, desta forma, a mesma escala de ajuste e controle de qualidade dos dados. Contudo, para o canal visível o valor médio a ser comparado é composto de um número bem maior de vetores, portanto trata-se de um teste coerentemente mais rigoroso. A diferença marcante entre os campos obtidos a partir das imagens dos canais visível e

utilizando as do canal infravermelho próximo é o detalhamento do campo, muito maior no primeiro caso. Devido a esse maior detalhamento, a quantidade de vetores por área será maior para os campos do canal visível do que para os campos do infravermelho próximo, o que apenas disponibiliza mais vetores para o teste. A aplicação do teste com esse nível de ajuste apresentou resultados satisfatórios e não foi necessária qualquer outra modificação nos parâmetros. Ajustes de teste também foram aplicados, de forma que o mesmo ficasse menos severo, contudo, concluiu-se que estes parâmetros também se apresentaram bem adaptados para uso com o canal infravermelho próximo.

Os mesmos ajustes dos testes de controle de qualidade aplicados para o canal visível foram utilizados para a versão noturna do modelo de estimativa do vento, usando as imagens do canal 2 do satélite GOES-12, na banda de 3.9  $\mu\text{m}$ .

### **7.3 Determinação da Altura dos Vetores**

Para a determinação da altura dos vetores, o procedimento foi semelhante àquele aplicado ao canal visível: a mesma técnica de estimativa da altura da base das nuvens. Foi utilizada, da mesma forma, uma imagem do canal infravermelho janela (10,7 $\mu\text{m}$ ) e um perfil de temperatura proveniente do modelo global de previsão de tempo do CPTEC. A própria imagem do canal infravermelho próximo (3,9 $\mu\text{m}$ ) poderia ser utilizada, contudo, como o método já (havia sido) ajustado a partir de uma imagem do canal infravermelho janela, decidiu-se por manter o mesmo procedimento, uma vez que existem pequenas diferenças na emissividade das nuvens e na absorção do vapor d'água que poderiam influenciar nos resultados obtidos anteriormente. Isto se aplica principalmente para a correção da temperatura de brilho em função da absorção pelo vapor d'água entre o topo da atmosfera e o topo da nuvem.

## 7.4 Avaliação

Após serem calculados os campos de vento para a série de imagens do dia 21 ao dia 26 de março de 2005, o erro quadrático médio entre esses campos e aqueles fornecidos pela reanálise do NCEP foi calculado de maneira semelhante àquela feita para o caso do canal visível. Calculou-se ainda o RMS para diversas situações, subestimando e superestimando o valor da altura dos vetores.

Nesta série, apenas imagens do período noturno foram utilizadas, considerando-se que a utilização do canal infravermelho próximo visa a estimar o vento apenas para esse período. Sabe-se que a contaminação das imagens do canal provocada pela componente solar é muito expressiva e iria influenciar demasiadamente no processo de rastreamento das nuvens.

A Figura 7.4.1 mostra os valores do RMS subestimando e superestimando a altura da nuvem. Os valores negativos indicam que o valor do nível de pressão foi diminuído, consequentemente, a altura atribuída ao vetor foi aumentada.

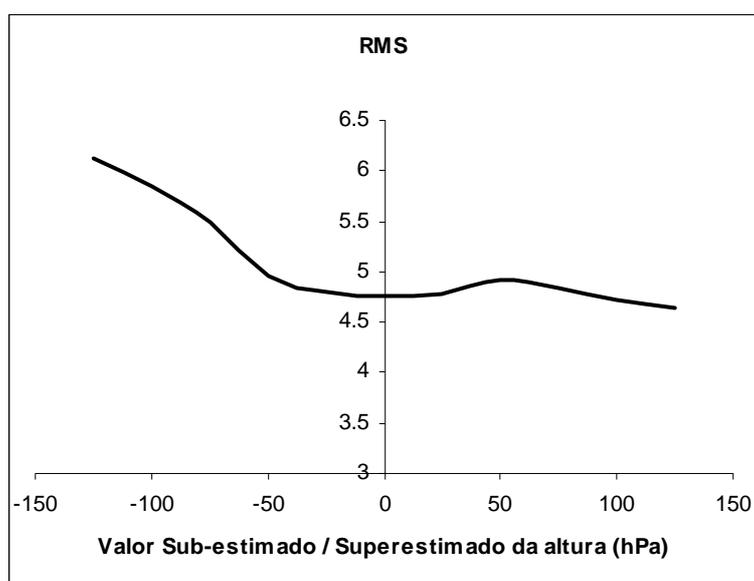


FIGURA 7.4.1 – Erro quadrático médio da série de campos de vento em relação aos campos calculado pelo NCEP.

A Figura 7.4.1 mostra que a técnica empregada na determinação da altura de vento desenvolvida para o canal visível também é útil para o canal infravermelho próximo. Evidencia ainda a correção aplicada para a absorção do vapor d'água presente acima das nuvens baixas.

Com relação aos campos de vento, o número de vetores geralmente é inferior aos obtidos com o canal visível, o que já era esperado tendo em vista a maior janela utilizada e a menor resolução espacial do canal infravermelho próximo, que limita o detalhamento das estruturas a serem rastreadas. No entanto, os campos obtidos foram satisfatórios, mostrando que a utilização das imagens do canal infravermelho próximo propicia com eficácia a estimativa do vento nos baixos níveis. A Figura 7.4.2 apresenta um campo de vento estimado utilizando imagens do canal infravermelho próximo.

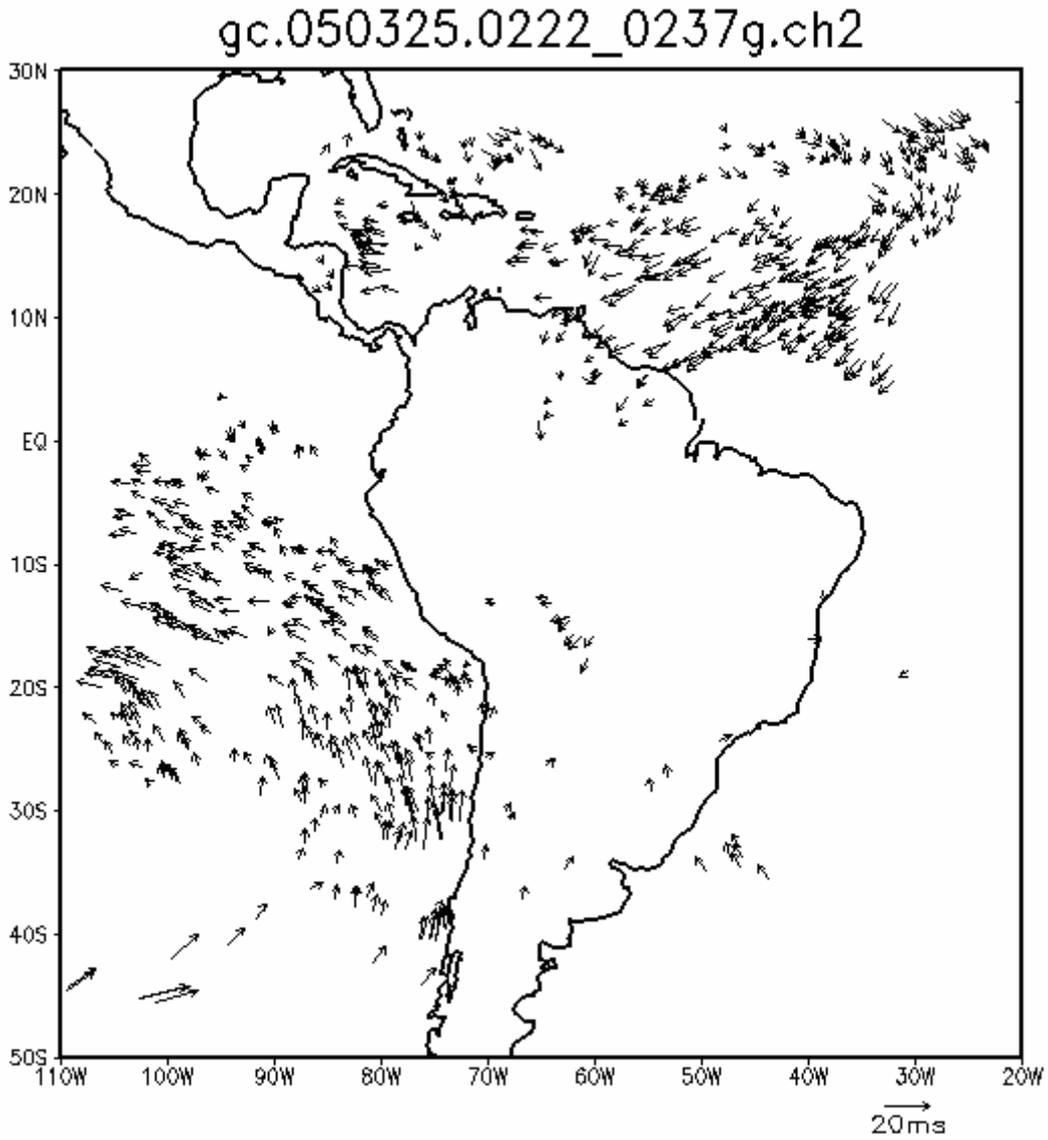


FIGURA 7.4.2 – Campo de vento nos baixos níveis referente ao dia 25 de março de 2005, 02:22UTC, estimado a partir de imagens GOES-12 do canal infravermelho próximo.



## **CAPÍTULO 8**

### **ESTIMATIVA DE VENTO UTILIZANDO IMAGENS DOS CANAIS INFRAVERMELHO PRÓXIMO E VISÍVEL DO SATÉLITE GOES-12**

O Capítulo 8 apresenta uma análise dos dois modelos desenvolvidos nesse trabalho para estimativas de vento. Para a análise foi utilizada uma série de imagens cobrindo o período de 21 a 25 de março de 2003. O objetivo da análise é verificar o desempenho dos dois modelos em uma simulação operacional.

Para o período diurno, foram escolhidas imagens do canal visível e para a fase noturna imagens do canal infravermelho próximo. Horários de transição entre o período noturno e diurno e vice-versa foram descartados porque a contaminação da componente solar nas imagens do canal infravermelho próximo é intensa. Essa característica altera fortemente o sinal medido pelo satélite e compromete certas etapas do modelo de estimativa do vento, tais como o processo de classificação de nuvens e estimativa da altura da base das mesmas. Para o canal visível, o ângulo zenital solar é muito alto, gerando grande anisotropia na medida (nuvens apresentam alta anisotropia principalmente para altos ângulos solares), além do mais, parte da imagem não recebe luz solar nestes horários. Na análise e para utilização do canal visível, deu-se preferência a horários contidos no intervalo de 10:00 a 20:00 UTC; para o canal infravermelho próximo, no intervalo de 22:00 a 08:00 UTC.

A série de campos de vento estimados no período de 21 a 25 de março de 2005 é composta por 9 campos do canal visível e 19 do canal infravermelho próximo. O número de campos para o canal visível foi menor devido à ausência de imagens para completar o trio necessário para o cômputo do vento. Como já especificado nos capítulos iniciais é necessária uma seqüência de três imagens com intervalo de 30

minutos para a execução do modelo de estimativa do vento, utilizando imagens dos canais visível e infravermelho próximo.

Devido à ausência de radiossondagens nas regiões oceânicas, essa série de dados foi comparada aos campos de vento da re-análise do NCEP a partir do cálculo do erro quadrático médio (RMS) e do viés (Bias) vetorial e da sua magnitude. Em geral, a quantidade de vetores sobre o continente foi desprezível para os campos obtidos com a utilização do canal visível ou infravermelho próximo.

A Tabela 8.1, além de apresentar uma comparação entre as estatísticas calculadas para o período de cinco dias em relação aos campos fornecidos pelo NCEP, evidencia também as estatísticas realizadas pela DSA (Laurent et al., 2002) –15 de janeiro e 03 de fevereiro de 1999 – para o modelo operacional, que utiliza imagens do canal infravermelho janela, do satélite GOES-12. Nesse cálculo foram utilizados dados de radiossondagens da campanha WETAMC/LBA com medidas intensivas (4 radiossondagens a cada 3 horas) entre 15 de janeiro e 25 de fevereiro de 1999, em uma área da Amazônia (Silva Dias, 2001, Silva Dias et al., 2001). Na primeira linha são mostrados os valores para a toda a série (canal visível e infravermelho próximo), nas duas linhas seguintes estão os valores calculados individualmente para cada tipo de imagem utilizada (modelo para imagens do canal visível e imagens do canal infravermelho próximo). Por último, encontram-se os resultados referentes ao modelo da DSA para os baixos níveis. Na Tabela 8.1, Vis/IVP indica as estatísticas para todo o conjunto de campos. Vis indica as estatísticas calculadas para os campos estimados a partir das imagens das imagens do canal visível e IVP aquelas calculadas para os campos estimados das imagens do canal infravermelho próximo. IVJ refere-se às estatísticas em relação ao modelo mantido operacionalmente pela Divisão, o qual utiliza imagens do canal infravermelho janela.

Tabela 8.1 - Avaliação dos campos de vento estimados para o período de 21 a 25 de março em relação aos campos do NCEP e a avaliação realizada por Laurent et al., (2002) para o modelo operacional da DSA.

	RMS Vetorial (m/s)	RMS da Velocidade (m/s)	Viés da Velocidade (m/s)	Diferença Média da Velocidade (m/s)	Nº Amostras
Vis/IVP	4.95	3.73	-0.28	0.66	13504
Vis	4.76	3.79	-0.11	0.43	6924
IVP	5.13	3.71	-0.42	0.89	6580
IVJ	10.3	4.9	0.5	3.5	44

Foram utilizados os dados apresentados no estudo realizado por Laurent et al., (2002), devido à ausência dessas estatísticas operacionalmente na DSA. Uma vez que o modelo operacional é pouco eficiente na estimativa do vento nos baixos níveis, a quantidade de vetores estimados é pequena. Em certos casos, como ocorreu em março de 2005, as estatísticas referentes aos vetores estimados para os baixos níveis não são calculadas devido aos poucos vetores disponíveis. Além da pequena quantidade de vetores, outro agravante é a escassez de radiossondagens. Nos poucos locais em que o vento dos baixos níveis é estimado, dificilmente existe uma radiossondagem. Assim, deu-se preferência à comparação realizada entre o modelo operacional da DSA e os perfis de radiossondagens da campanha WETAMC/LBA (Laurent, 2002). Na Tabela 8.1, observa-se que a precisão do modelo operacional da DSA é inferior à precisão dos modelos desenvolvidos neste trabalho. O resultado mostra que a utilização das imagens dos canais visível e infravermelho próximo são mais indicadas para estimar o vento nas camadas inferiores da troposfera do que as imagens do canal infravermelho janela.

A Tabela 8.2, por sua vez, apresenta alguns valores das estatísticas calculadas pela EUMETSAT para seus respectivos modelos de estimativa do vento a partir de imagens dos canais visível e infravermelho. Estas se referem ao mês de setembro de 2004. Não foram utilizados valores mais recentes ou referentes ao mesmo período devido à indisponibilidade de tais dados. O ideal seria o uso de dados observacionais referentes ao mesmo período e local dos campos obtidos nesse estudo. Vale ressaltar que os dados

dos modelos da DSA e EUMETSAT foram comparados a radiossondagens. Todos os dados das Tabelas 8.1 e 8.2 são referentes ao vento nos baixos níveis.

Tabela 8.2 - Avaliação dos campos de vento estimados para o período de 21 a 25 de março de 2005, comparada às estatísticas dos campos da EUMETSAT.

	RMS Vetorial (m/s)	Viés Vetorial (m/s)	Nº Amostras
Vis	4.76	0.11	6924
IVP	5.13	0.42	6580
Vis Eumetsat	3.64	-1.31	22921
IVJ Eumetsat	3.99	-1.22	27283

Observa-se nas duas tabelas que, em relação ao RMS vetorial, os valores entre o modelo operacional da DSA e os desenvolvidos neste trabalho estão próximos. Por outro lado, comparando-se ao RMS calculado pela EUMETSAT, o resultado é melhor. O viés dos modelos desenvolvidos nesse trabalho é menor do que aqueles calculados pela DSA e pela EUMETSAT. Observa-se ainda, na Tabela 8.1, que os resultados obtidos a partir das imagens do canal visível são melhores do que as do canal infravermelho próximo. É preciso levar em conta que os campos estimados pela EUMETSAT e as estatísticas apresentadas na Tabela 8.2 foram obtidos a partir de imagens de um satélite diferente (METEOSAT) além de pertencerem a outras regiões do planeta. Essa comparação mostra que o modelo de estimativa desenvolvido neste trabalho apresenta uma capacidade de estimar o vento similar à de um dos modelos desenvolvidos por outro centro de pesquisa.

Em geral, no período de 21 a 25 de março de 2005 uma região de alta pressão estava presente sobre o oceano Pacífico, próximo à costa oeste da América do Sul. Essa configuração permaneceu durante toda a semana estudada sendo bem descrita pelo modelo de estimativa do vento (ver Figuras 8.2 a 8.5). Para o dia 24 de março, observa-se a presença de duas regiões de alta pressão, uma localizada sobre o oceano Pacífico,

com centro próximo de 100 W e 40 S e outra sobre o oceano Atlântico, ao norte da América do Sul, aproximadamente a 50 W e 25 N. Devido a essas configurações, espera-se uma circulação anti-ciclônica em baixos níveis para as duas regiões descritas, as quais são observadas nos campos referentes ao dia 24 de março. Isso mostra que o modelo foi capaz de representar a situação sinótica desses locais.

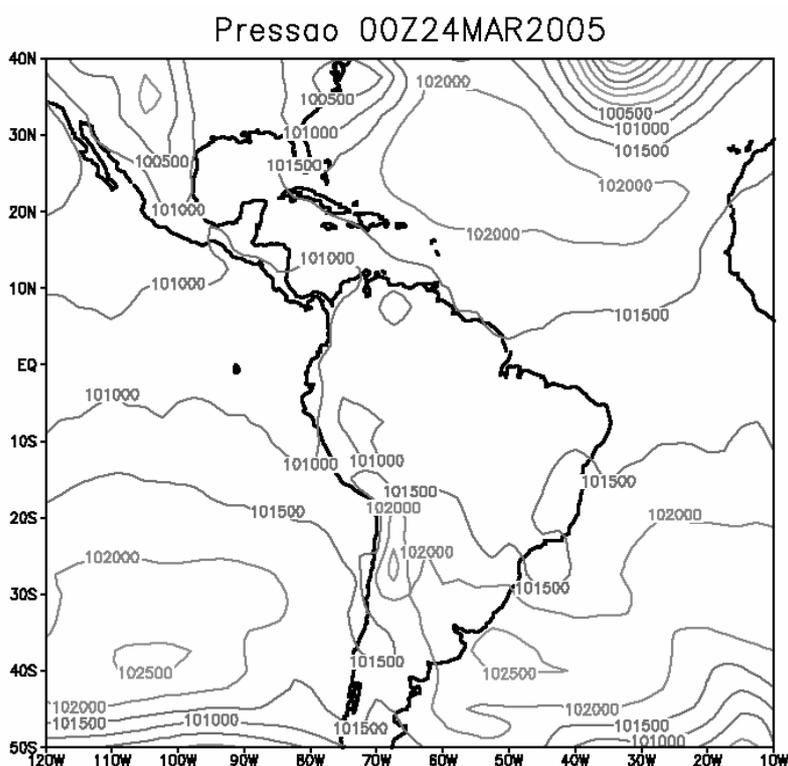


FIGURA 8.1 – Campo de pressão ao nível médio do mar fornecido pelo NCEP, referente ao dia 24 de março de 2005, 00:00 UTC.

As Figuras 8.2 a 8.5 mostram dois campos de vento obtidos para o período utilizado, sendo que as duas primeiras referem-se a um campo em que as imagens do infravermelho próximo foram utilizadas e as duas últimas referem-se ao caso em que se utilizou as imagens do visível. Observa-se que o nível de detalhamento do campo obtido com as imagens do canal visível e resolução espacial de 1x1 km é maior do que para os

obtidos com imagens do infravermelho próximo. Isto se dá porque as imagens do infravermelho próximo apresentam uma resolução espacial degradada em relação à imagem do visível (16 vezes menor em área).

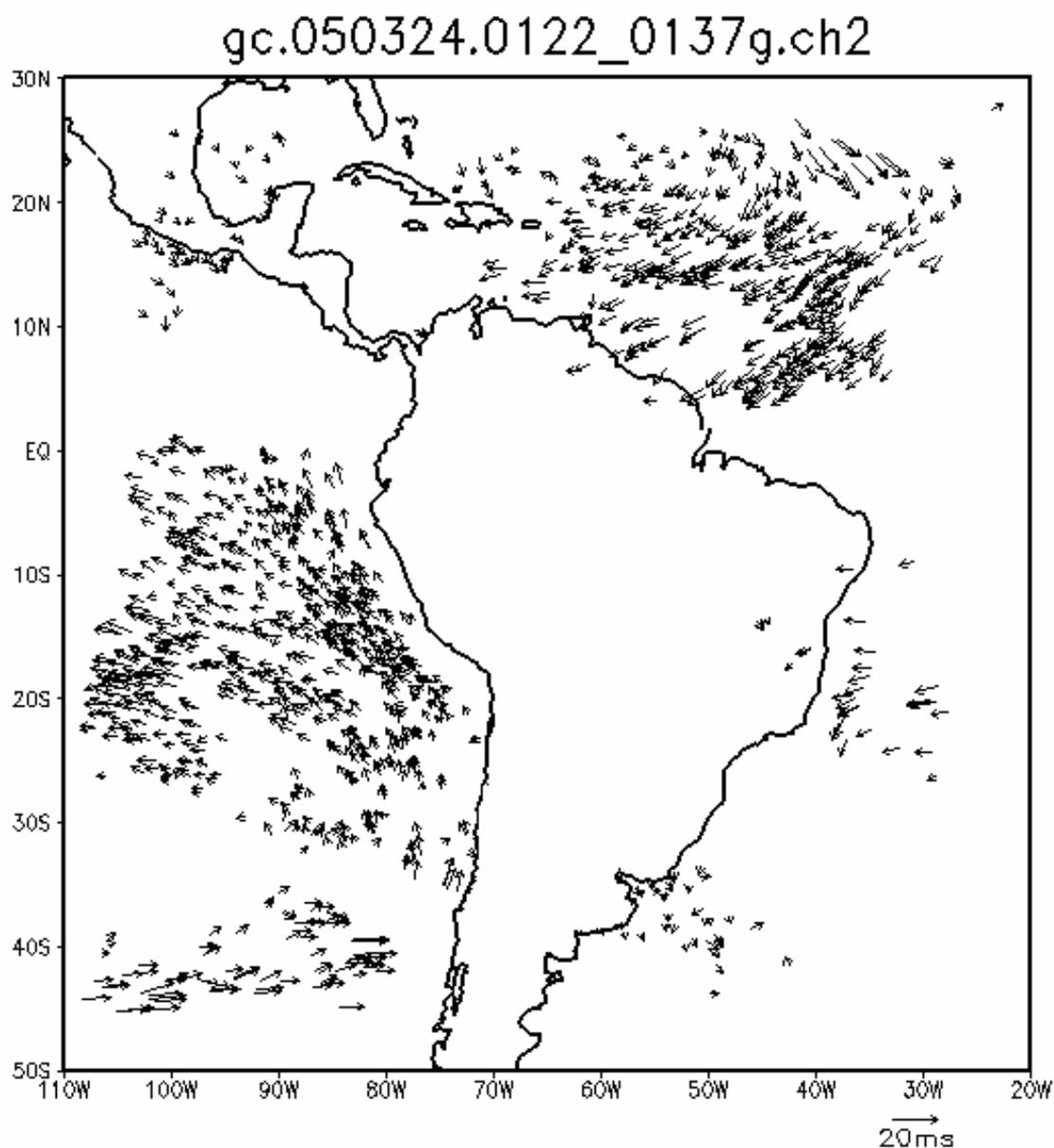


FIGURA 8.2 – Campo de vento estimado pelo modelo baseado nas imagens do canal infravermelho próximo (3,9  $\mu\text{m}$ ) referente ao dia 24 de março de 2005, 01:22 UTC.

A Figura 8.3 mostra parte do campo apresentado na figura anterior com mais detalhes. Observa-se uma circulação anti-ciclônica em baixos níveis, a oeste da América do Sul, esperada de acordo com a configuração sinótica do período.

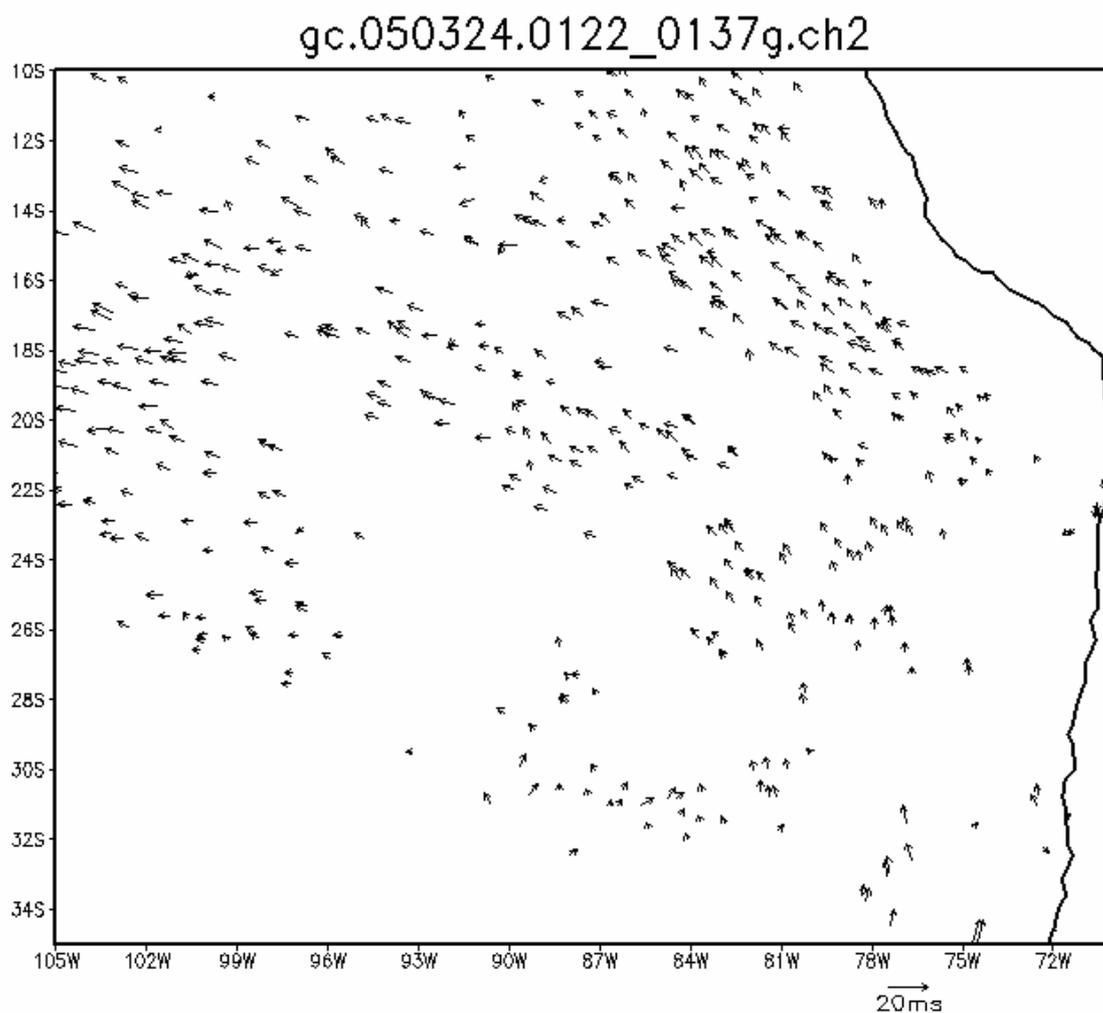


FIGURA 8.3 – Recorte do campo apresentado na figura 8.2 mostrando uma parte do campo de ventos com mais detalhes.

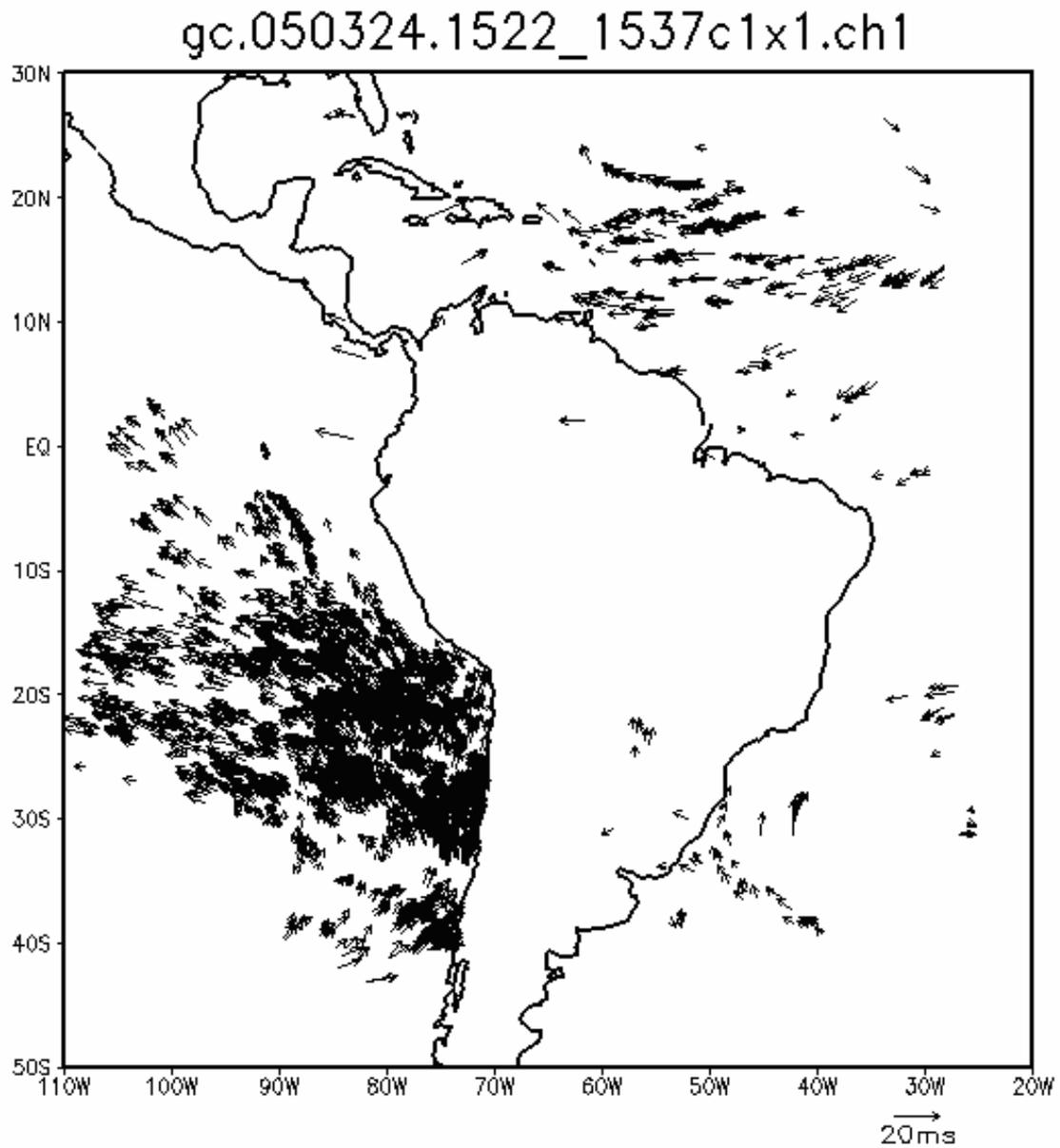


FIGURA 8.4 – Campo de vento estimado pelo modelo baseado nas imagens do canal visível para o dia 24 de março de 2005, 1522 UTC.

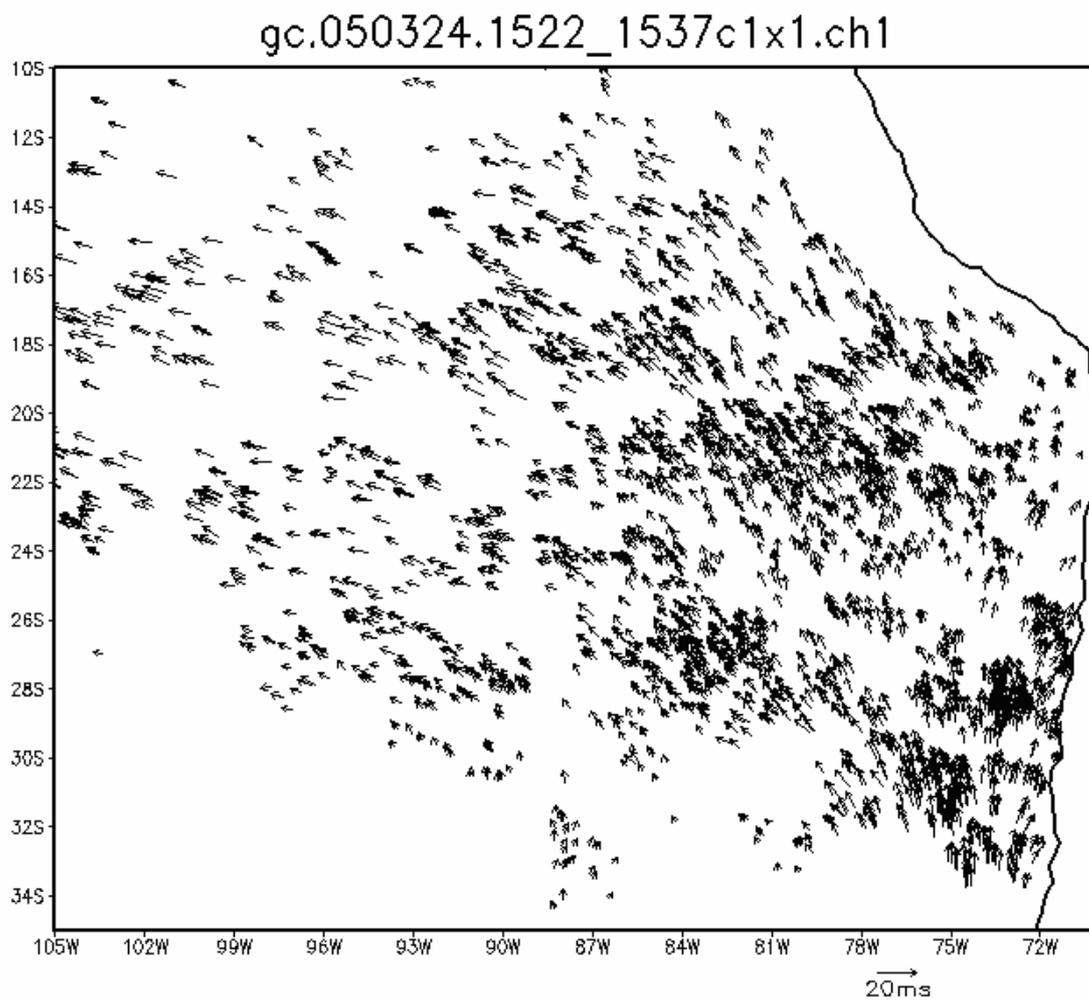


FIGURA 8.5 – Recorte do campo apresentado na figura 8.4 mostrando uma parte do campo de ventos com mais detalhes.



## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES GERAIS

Esse trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo para estimar o vento em baixos níveis a partir do deslocamento das nuvens presentes em imagens de satélites. Como se pode observar, as imagens dos canais visível e infravermelho próximo são mais indicadas que os canais infravermelho janela (10,7  $\mu\text{m}$ ) e vapor d'água (6,5 $\mu\text{m}$ ) para estimar o vento em baixos níveis. O canal vapor d'água localiza-se em uma banda de forte absorção atmosférica, não permitindo destacar as propriedades da superfície. Já o canal infravermelho janela apresenta um pequeno contraste entre nuvens baixas e superfície, em função da proximidade entre as temperaturas de emissão. O canal visível foi utilizado explorando sua alta resolução espacial, com o intuito de obter um campo de vento altamente detalhado e mais preciso, devido ao alto contraste entre a superfície (baixo albedo) e as nuvens em geral (alto albedo). O canal infravermelho próximo foi utilizado na estimativa do vento durante a noite, considerando-se que o canal visível é inutilizável nesse período e que o canal infravermelho próximo apresenta maior sensibilidade a temperaturas mais quentes, o que permite, em função da diferente emissividade das nuvens, diferenciar cirrus finos de cumulus.

Os resultados obtidos nesse trabalho, para nuvens baixas, foram muito mais satisfatórios em número e qualidade do que os obtidos com o canal infravermelho janela, que é utilizado em um modelo de estimativa do vento atualmente operacional na DSA. Foi possível comprovar que o emprego dos dois canais (visível e infravermelho próximo), na estimativa do vento em baixos níveis é apropriado e muito útil em função da densidade e qualidade dos vetores obtidos. O desempenho do modelo foi muito bom sobre as regiões oceânicas. Nestas as modificações sofridas pelos campos de nuvens no intervalo de tempo de 30 minutos geralmente não são tão expressivas quanto as modificações sobre o continente e se associam mais ao campo de vento do que aos

fatores locais (orografia, por exemplo), conforme observado nos campos de vento sobre o continente.

Apesar de os modelos se mostrarem eficientes na estimativa do vento sobre as regiões oceânicas, não foram capazes de efetuar com a mesma eficiência a estimativa na região continental. Esse fato se deve a um menor contraste entre a nuvem e a superfície sobre os continentes e principalmente, devido ao curto tempo de vida destas nuvens e sua dinâmica, que é fortemente influenciada pela orografia. Esses fatores são consideravelmente importantes, uma vez que o modelo apresenta a hipótese básica de que as modificações no campo de nuvem são exclusivamente devidas à advecção pelo vento na base da nuvem. Contudo, o impacto provocado pelos inúmeros testes de controle de qualidade que precisaram ser implementados, uma vez que essa hipótese não é sempre verificada, reduziu drasticamente o número de vetores obtidos sobre as regiões continentais. Outro ponto a ser considerado é que o conjunto de imagens utilizado apresentava reduzido número de nuvens baixas sobre o continente. Uma série de imagens mais longa pode ser útil para verificar se a redução drástica ocorrida é exclusiva deste conjunto em particular ou se não se pode esperar, a partir deste método, uma descrição do campo de nuvens baixas sobre o continente. A grande maioria dos métodos encontrados na literatura para nuvens baixas é aplicada somente sobre os Oceanos.

Uma etapa importante que compõe os dois modelos desenvolvidos é a técnica de estimativa da altura da base das nuvens, utilizada para determinar o nível de pressão dos vetores estimados. Assumindo que as nuvens baixas se deslocam devido ao vento da base conforme (Smith e Hasler 1976), para cada vetor a técnica estima a temperatura da base da nuvem com a finalidade de determinar o nível de pressão do vetor vento encontrado. Determinar este nível com precisão é tão importante quanto determinar a direção e a velocidade do vento, pois o vento sofre alterações significativas com a altura. A determinação da altura da base das nuvens, por outro lado, além de útil, pode também auxiliar na estimativa da umidade do ar na superfície abaixo das nuvens. Uma

vez determinada a altura da base das nuvens, obtém-se também o nível de condensação por levantamento. Nas regiões de céu claro, é possível conseguir com precisão a temperatura da superfície do oceano através do uso de imagens de satélite. Com estas informações é possível estimar a umidade do ar na superfície do oceano. Não foram realizados testes ou avaliações para verificar essa aplicação, assim, fica apenas a sugestão de aplicação da técnica desenvolvida.

Os dois modelos apresentados no trabalho foram desenvolvidos a partir dos modelos que se encontram atualmente em operação na DSA. Pelo fato de utilizarem imagens de canais diferentes e de visarem a estimativa do vento em baixos níveis, em que os modelos operacionais da DSA são pouco eficientes, os novos modelos tiveram que ser adaptados significativamente. Diversas novas rotinas e processos foram desenvolvidos, principalmente no que se refere à classificação de nuvens, testes de controle de qualidade, combinação de diferentes canais e determinação de altura do vetor.

O procedimento de classificação das nuvens, por exemplo, foi introduzido com o intuito de eliminar nuvens médias e altas e, assim, evitar que influenciasses no processo de rastreamento. Um grande problema encontrado foi a diferença entre as resoluções espaciais dos canais visível e infravermelho janela. O processo de classificação exigia que cada pixel da imagem do canal visível fosse associado a um pixel da imagem do canal infravermelho. Devido à diferença das resoluções, a informação radiométrica de dezesseis pixels distintos nas imagens do visível tinha de ser associada à informação de um mesmo pixel da imagem do infravermelho janela. Essa associação trazia o inconveniente de que pixels da imagem do visível representando nuvens baixas fossem associados a um pixel da imagem do infravermelho que representasse nuvens médias ou altas. Classificando as nuvens presentes nas imagens foi possível substituir os pixels referentes a nuvens médias e altas por um valor aleatório. Esse procedimento de substituição dos rejeitados por números aleatórios melhora significativamente a qualidade dos campos obtidos e evita que o vento nas camadas atmosféricas médias e

altas seja estimado, já que o visível é adaptado apenas para a estimativa do vento em baixos níveis.

Com relação aos testes aplicados aos vetores para o controle de qualidade, parte foi desenvolvida exclusivamente nesse trabalho e os testes baseados nos modelos da DSA tiveram que ser modificados e adaptados. O teste de consistência espacial dos vetores, por exemplo, foi elaborado de forma a considerar separadamente a velocidade e direção dos vetores, diferentemente daquele que o originou, avaliando cada vetor do campo de vento em relação aos vetores em uma determinada vizinhança. Esse novo teste se mostrou bastante eficiente e permitiu eliminar uma grande quantidade de vetores errôneos sem que fosse retirada uma grande quantidade de vetores corretos. O teste de simetria, que faz parte das rotinas de controle de qualidade do modelo operacional da DSA e se baseia no conceito da existência de uma consistência temporal, foi modificado para estar de acordo com o tipo de movimento atmosférico observado (vento nos baixos níveis).

Quanto à estimativa da altura do vetor, um novo método foi totalmente desenvolvido com base na hipótese de que o histograma das temperaturas de brilho do canal infravermelho janela descrevem os campos de nuvens baixas e de superfície. Considerando esta hipótese, a região entre as duas populações representa a altura da base da nuvem. Foram desenvolvidas rotinas de ajustes de curvas e cálculo do mínimo da função para diferentes janelas de procura. Os resultados provenientes deste método automático foram de ótima qualidade. Um pequeno ajuste foi necessário para corrigir a absorção da radiação pelo vapor d'água acima do topo das nuvens, ser realizado conforme resultados de comparação e as simulações radiométricas.

Espera-se implantar operacionalmente na DSA, em futuro próximo, os modelos desenvolvidos neste trabalho, visto que suprem a necessidade que a Divisão possui em relação à estimativa do vento para os baixos níveis. Por outro lado, a avaliação da precisão dos modelos desenvolvidos precisa ser expandida para uma série temporal

maior que os cinco dias utilizados, para possibilitar uma análise mais detalhada dos modelos. É importante a realização de um estudo que avalie o impacto da utilização dos campos de vento estimados a partir de satélites na inicialização dos modelos de previsão de tempo do CPTEC. Atualmente, os campos de vento utilizados na assimilação dos modelos de previsão de tempo do CPTEC são fornecidos pelo NCEP. Os campos estimados localmente contam com ajustes regionais, maior resolução espacial, temporal e menor tempo de latência. Logo, é fundamental analisar esse impacto, uma vez que a DSA já é capaz de estimar o vento em todas as camadas (altas, médias e baixas).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAS, O.; TOMASSINI, M.; HOLMLUND, K.; SCHMETZ, J. Low-level cloud motion winds from METEOSAT high-resolution visible imagery. **Weather and Forecasting**, v.12, p.175-184, 1997.

BAUM B. A.; TOVINKERE, V.; WELCH, R.M. Automated cloud classification of global AVHRR data using a fuzzy logic approach. **Journal of Applied Meteorology**, v.36, p.1519-1540, 1997.

Bottino, M.J. **Um modelo de estimativa de radiação solar por satélite: análise e aprimoramentos**. 2000. 105p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

BOTTINO, M.J., Ceballos, J. C., 2004: Classification of scenes in multispectral GOES-8 imagery. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** 2003. 1 CD-ROM.

CHEN D. W.; SENGUPTA, S.K.; WELCH, R.M. Cloud field classification based upon high spatial resolution textural features: simplified vector approaches. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.12, p.14749-14765, 1989.

DESBOIS M.; SÈZE, G.; SZEJWACH, G. Automatic classification of clouds on METEOSAT imagery: application to high-level clouds. **Journal of Applied Meteorology**, v.21, p.401-412, 1982.

DUNION, J. P.; VELDEN, C. S. Application of surface-Adjust GOES Low-Level Cloud-Drift Winds in the Environment of Atlantic Tropical Cyclones. Part I: Methodology and Validation. **Monthly Weather Review**, v.130, p.1333-1346, 2002.

DUNION, J. P.; HOUSTON, S. H.; VELDEN, C. S.; POWELL, M. D. Application of surface-adjust GOES low-level cloud-drift winds in the environment of Atlantic tropical cyclones: integration into surface wind analyses. **Monthly Weather Review**, v.130, p.1347-1355, 2002.

EIGENWILLIN, N.; FISCHER, H. Determination of midtropospheric wind vectors by tracking pure water vapor structures in METEOSAT water vapor image sequences. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v.63, p.44-58, 1982.

FRITZ, S.; WISTON, J.S. Synoptic use of radiation measurements from satellite Tiros-II. **Monthly Weather Review**, v.90, p.1-9, 1962.

FOMIN, B.A. BENCHMARK. Computation for solar fluxes and influxes in aerosol and cloudy atmosphere. **Izvetyia Atmospheric Oceanic Physics**, v. 30, n.3, p. 283-290, 1994.

FUJITA, T. T.; WATANABE, K.; IZAWA, T. Formation and structure of equatorial anticyclones caused by large-scale cross-equatorial flows, derived by Ats-1 photographs. **Journal of Applied Meteorology**, v.8, p.649-667, 1969.

HAMADA, T. Representative heights of Gms satellite winds. **Meteorological Satellite CENTER TECHNICAL NOTE**, N.6, P.35-47, 1982.

HASLER, A. F.; SKILLMAN, W.C.; SHENK, W.E. Wind estimates from cloud motions: phase 1 of an in situ verification experiment. **Journal of Applied Meteorology**, v.15, p.10-15, 1976.

HASLER, A. F.; SKILLMAN, W.C.; SHENK, W.E. In situ aircraft verification of the quality of satellite cloud winds over oceanic regions. **Journal of Applied Meteorology**, v.18, p.1481-1489, 1979.

Hasler, A. F. Stereographic observations from geosynchronous satellites: an important new tool for the atmospheric sciences. **Bulletin of American Meteorological Society**, v.62, p.194-212, 1981.

HOLMLUND, K. Operational water vapour wind vectors from METEOSAT imagery data. In: International Wind Workshop 2., 1993, Tokyo, Japan. **Anais...** Tokyo: [S.n.], 1993. p.77-84.

Holmlund, K.; Velden, C. S.; Rohn, M. Enhanced automated quality control applied to high-density satellite-derived winds. **Monthly Weather Review**, v.129, p.517-529, 2001.

HUBERT, L. F. E.; Whitney, L. F. Jr. Wind geostationary-satellite pictures. **Monthly Weather Review**, v.99, n.9, p.665-671, 1971.

HUNT, G. E. Radiative properties of terrestrial clouds as visible and infrared thermal window wavelengths. **Quarter Journal Royal Meteorological Society**, v.99, p.346-359, 1973.

KALLBERG, P.; UPPALA, S.; GUSTAFSSON, N.; PAILEUX, J. The impact of clouds track wind data on global analyses and medium range forecast. **ECMWF Technical Report**. v.34, p.60, 1982.

KÄSTNER, M.; FISCHER, H.; BOLLE, H.J. Wind determination from Nimbus-5 observation on 6.3  $\mu\text{m}$  water vapor band. **Journal of Applied Meteorology**. v.19, p.409-418, 1980.

LAURENT, H. Wind extraction from multiple METEOSAT channels. In: Workshop on Wind Extraction from Operational Meteorological Satellite Data 1., 1991, Washington, D. C., EUA. **Anais...** 1991. p.71-76.

- LAURENT, H. Wind extraction from METEOSAT water vapor channel image data. **Journal of Applied Meteorology**, v.32, p.1124-1133, 1993.
- LAURENT, H.; MACHADO, L.A.T. Extração do vento utilizando imagens de satélite meteorológico. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13., 1994, Belo Horizonte, MG, 1994. **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1994.
- LAURENT, H.; ARAI, N.; FOMIN, B.; MACHADO, L. A. T.; GONDIN, M. A. Extração do vento utilizando imagens de satélite no CPTEC: nova versão e avaliação com dados do WETAMC/LBA e dados operacionais da DSA/CPTEC. In: International Winds Workshop 6., 2002. Madison, USA **Anais...** 2002. 1 CD-ROM
- LEESE, J. A.; NOVAK, C. S.; CLARK, B. B. An automatic technique for obtaining cloud motion from geostationary satellite data using cross correlation. **Journal of Applied Meteorology**, v.10, p.144-152, 1971.
- LUBIN D.; WEBER, P. The use of cloud reflectance functions with satélite data for surface radiation budget estimation. **Journal of Applied Meteorology**, v.34, p.1333-1347, 1995.
- MARSHALL, J. L.; PESCOD, N.; SEAMAN, B.; MILLS, G.; STEWART, P. An operational system for generating drift winds in the Australian region and their impact on numerical weather prediction. **Weather and Forecasting**, v.9, p.361-370, 1994.
- MERRILL, R. T. Advances in the automated production of wind estimates from geostationary satellite imaging. In: Conference on Satellite Meteorology, 4., 16-19 May 1989, San Diego. **American Meteorological Society**, p.246-249, 1989.
- MOSHER, F. R. Cloud height determination cospar: their contribution to the first garp global experiment, NCAR. In: Symposium of Meteorological Observations from Space, 1976, Boulder. **Proceedings...** Boulder: [S.n.], 1976. p.201-204.
- MENZEL, W. P. **Prelaunch study report of vas-D performance**: report on Nasa contract Nas5-21695. Madison: Space Science and Engineering Center; University of Wisconsin, 1980. 65p.
- NIEMAN, S. A.; SCHMETZ, J.; MENZEL, W.P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers. **Journal of Applied Meteorology**, v.32, n.9, p.1559-1568, 1992.
- RADFORD, A. Monitoring of cloud-motion winds at ECMWF. Proc. ECMWF/EUMETSAT workshop: the use of satellite data in operational numerical. **Weather Prediction**, v.2, p.249-262, 1989.

- REYNOLDS, D.; VONDER HAAR, T. A bi-spectral method for cloud parameter determination. **Monthly Weather Review**, v.105, p.446-457, 1977.
- RICHARD, D. HUDSON Jr. **Infrared system engineering**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1969.
- RODGERS, E.; GENTRY, R.C.; SHENK, W.; OLIVER, V. The benefits of using short interval satellite images to derive winds for tropical cyclones. **Monthly Weather Review**, v.107, p.575-584, 1979.
- SAKAMOTO M.; LAURENT, H. Wind estimation: the studies made at funceme. In: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 Sept.-03 Oct. 2003, Weimar, Germany. **Proceedings...** [S.l.]: EUMETSAT, 2003. p.3-15. In Press.
- SÈZE, G.; DESBOIS, M. Cloud cover analysis from satellite imagery using spatial and temporal characteristics of the data. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.26, p.287-303, 1987.
- SCHMETZ, J. An atmospheric-correction scheme for operational application to METEOSAT infrared measurements. **European Space Agency**, v.10, p.145-159, 1986.
- SCHMETZ, J.; HOLMLUND, K.; HOFFMAN, J.; STRAUSS, B.; MASON, B.; GAERTNER, V.; KOCH, A.; VAN DE BERG, L. Operational cloud-motion winds from METEOSAT infrared images. **Journal of Applied. Meteorology**, v.32, p.1206-1225, 1993.
- SCHMETZ, J.; HOLMLUND, K.; OTTENBACHER, A. Low-level winds from high-resolution visible imagery. In: International Winds Workshop 3, 1996, Ascona, Switzerland. **Proceedings...** 1996. p.71-79.
- SILVA DIAS, M.A.F. Experimento de grande escala da interação biosfera atmosfera na Amazônia: resultados preliminares. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.7-14, 2001.
- SILVA DIAS M.A.F.; Rutledge, S.; Kabat, P.; Silva Dias, P.; Nobre, C.; Fisch, G.; Dolman, H.; Zipser, E.; Garstang, M.; Manzi, A.; Fuentes, J.; Rocha, H.; Marengo, J.; Plana-Fattori, A.; Sá, L.; Alavalá, R.; Andreae, M.; Artaxo, P. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon region. **Journal of Geophysical. Research**, 2001. In press.
- SHENK, W.E. Suggestions for improving the derivation of winds from geosynchronous satellites: operational satellites: sentinels for the monitoring of climate and global change. **Global Planet Change**, v.4, p.165-171, 1991.

SMITH, W.L.; PLATT, C.M.R. Intercomparison of radiosonde, ground based laser, and satellite deduced cloud heights. **Journal of Applied Meteorology**, v.17, p.1796-1802, 1978.

SMITH, W.L.; WOOLF, H.M.; JACOB, W.J. A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus-3 sirs observations. **Monthly Weather Review**, v.98, p.604-611, 1970.

SMITH C.L.; HASLER, A.F. A comparison of low-cloud satellite wind estimates with analyses based on aircraft observations in a disturbed tropical regime. **Monthly Weather Review**, v.104, p.702-708, 1976.

STANLEY, Q. K. **Cirrus detection and characterization using GOES 3.9 $\mu$ m albedo**. Colorado: Cira/Colorado State University, 2004.

THOSS, A. Cloud motion winds, validation and impact in numerical weather forecast. In: Workshop on Wind Extraction from Operational Meteorological Satellite Data, 1992 Washington, DC. **Proceedings...** Washington: EUMETSAT, 1992. p.105-112.

TOKUNO, M. Operational system for extracting cloud motion and water vapour motion winds from Gms-5 image data. In: International Winds Workshop, 3., 1996, Ascona, Switzerland. **Proceedings...** Ascona: [S.n.], 1996. p.21-30.

THOMAS, F.L.; JOSEPH T.; RICHARDSON, K. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9- $\mu$ m data. **Weather and Forecasting**, v.12, p.664-667, 1997.

XU JIANMIN, Z.Q.; FRANG, X. Height assignment of cloud motion winds with infrared and water vapour channels. **Acta Meteorológica Sinica**, v.55, p.408-417, 1997.

WELCH R.M.; NAVAR, M.S.; SENGUPTA, S.K. The effect of spatial resolution upon texture-based cloud field classification. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.12, p.14767-14781, 1989.

YAMANOUCHI, T.; KAWAGUCHI, S. Cloud distribution in the Antarctic from AVHRR data and radiation measurements at the surface. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, p.111-127, 1992.