

UM ESTUDO DE CASO DE INVASÃO DE AR POLAR EM LATITUDES MÉDIAS ASSOCIADO A UMA CICLOGENESIS INTENSA NO RIO DA PRATA

Giovanni Dolif Neto

e-mail: giovanni@model.iag.usp.br

Tércio Ambrizzi

e-mail: ambrizzi@model.iag.usp.br

Departamento de Ciências Atmosféricas
Instituto Astronômico e Geofísico – IAG/USP

ABSTRACT

This work intends to improve extratropical cyclones forecasts. We studied the case of September 27th 1998 when were observed record values of precipitation in Argentina. Satellite data from September 27th to October 2nd were analyzed and CPTEC model analyses were studied to describe the processes involved into the formation of the system and its contribution for the polar outbreak. It was also calculated the terms of Sutcliffe equation. The results were compared with the observation and a good agreement was found. It is concluded that intense gradients of humidity and temperature in low levels and gradients of vorticity in high levels favored the cyclone formation and development.

1. INTRODUÇÃO

Ondas de frio que atingem latitudes médias e às vezes até regiões equatoriais possuem uma importância social muito grande, uma vez que podem estar associadas a geadas atingindo regiões agrícolas (Marengo et al,1997B) com perdas econômicas significativas e influenciar setores como a saúde pública, o vestuário, os transportes, o turismo e outros. Essas ondas atingem o Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil causando geadas. Elas vêm sendo estudadas desde a década de 70. O caso de julho de 1972 causou sério impacto às culturas de café e foi estudado por Hamilton e Tarifa (1978) indicando que o evento foi precedido por uma rápida ciclogênese na região do Chaco associada a uma trajetória marcadamente meridional do anticiclone polar. Um outro caso de forte geada ocorrida nos trópicos em julho de 1975 foi estudado por Parmenter (1976) que mostrou que a onda de frio cruzou o Equador. Esse mesmo caso foi também estudado por Girardi (1983) concluindo que um ciclone extratropical situado próximo às ilhas Malvinas teve grande importância para o evento. As geadas mais intensas desde 1979 até 1981 foram associadas a mecanismos semelhantes por Fortune e Kousky (1983). Bonatti e Rao (1987) mostraram que a instabilidade baroclínica através da advecção de ar quente a leste do ciclone e frio a oeste do mesmo pode favorecer ciclogênese intensas.

A década de 90 teve maiores contribuições. Calbete (1996) mostrou que entre 1988 e 1996 houve 27 casos de neve e 42 casos de geadas intensas e generalizadas no sul do Brasil. Uma anomalia no escoamento meridional proveniente de um forte gradiente de geopotencial é uma condição presente em todos os casos de geada entre 1980 e 1989 estudado por Algarve e Cavalcanti (1994) e Algarve (1996). A rápida formação de ciclones extratropicais e relativas posições ciclone/anticiclone desde o litoral sul da Argentina até o sul do Brasil têm grande influência na trajetória e intensidade de massas de ar polar que atingem a América do Sul (Hamilton e Tarifa, 1978, Girardi, 1983, Fortune e Kousky, 1983, Selucchi e Nery, 1992, Dapozzo e Silva Dias, 1994, Marengo, 1997B).

As contribuições mais importantes relacionadas a ciclogênese na A.S. vieram na década de 90. Satyamurty et al (1990) determinaram um limiar de $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na vorticidade em 500 hPa para a geração de sistemas intensos. Gan e Rao (1991), confirmaram uma maior frequência ciclogênica em anos de El Niño e ainda identificaram um máximo de ocorrência ao redor do Golfo de San Matias (42.5°S, 62.5°W), na Argentina, com maior intensidade no verão, e um máximo no Uruguai (31.5°S, 55°W) mais intenso no inverno. Em casos de geadas no Paraná verifica-se o rápido deslocamento meridional do centro de alta pressão (Selucchi e Nery, 1992). Dapozzo e Silva Dias (1994) mostraram a importância do fortalecimento do centro de alta pressão, que no caso de julho de 1988 chegou a 1045 hPa na Argentina central, o que impulsionou o ar frio além do Equador. Esses trabalhos vieram a concordar com os anteriores. Mais recentemente, Marengo et al (1997) mostra os danos causados às culturas de café no Sudeste do Brasil.

Todos esses trabalhos evidenciam uma correlação importante entre a trajetória dos ciclones e anticiclones extratropicais e a maneira como uma onda de frio se propaga. Em geral, uma ciclogênese intensa na costa da Argentina, Uruguai ou sul do Brasil pode favorecer o desenvolvimento do evento através da instabilidade baroclínica associada (p.ex. Bonatti e Rao, 1987), ou seja, com advecção de ar quente a leste e de ar frio a oeste do ciclone. Desse modo, melhorar o conhecimento dos mecanismos que determinam trajetórias e intensidades dos ciclones extratropicais é importante para a meteorologia operacional e a sociedade como um todo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados os dados da análise do modelo do CPTEC para os dias 25,26,27,28,29 e 30 de setembro e 01 de outubro de 1998 às 00 e 12 Z, e para o dia 02 de outubro só a das 00 Z. Além disso, foram usadas as imagens do satélite GOES-8, canal infravermelho, para o mesmo período discutido acima, com um total de sete imagens diárias (00,03,09,12,15,18,21Z), sendo que nem todos os dias possuem imagens em todos esses horários.

Complementando essas informações foram analisados dados diários de temperatura máxima e mínima e precipitação acumulada para os mesmos dias das análises em 50 aeroportos argentinos. Foram também utilizados dados de anomalias climáticas mensais para setembro de 1998 na Argentina. Todos os dados da Argentina foram fornecidos pelo Serviço Meteorológico Nacional (SMN) da Argentina.

Para esse estudo foram desenvolvidas as seguintes etapas :

- Identificação do momento e local aproximados da formação do ciclone através dos dados das análises do modelo do CPTEC com o auxílio de imagens de satélite.
- Análise das características dinâmicas do centro de baixa pressão identificado, procurando-se determinar, além de sua intensidade próxima à superfície, qual a extensão vertical aproximada do mesmo, a baroclinia do sistema, o comportamento da temperatura e da umidade ao seu redor através do cálculo das advecções, ao longo da coluna vertical, as características da divergência e dos movimentos verticais associados.
- Determinação das causas dinâmicas que levaram à formação do ciclone através do cálculo e análise dos termos da equação de Sutcliffe:

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = A_Q - \frac{R}{f} \nabla^2 \left(\frac{g}{R} A_T + S + H \right) \quad (1)$$

onde $\frac{\partial Q_0}{\partial t} = \frac{g}{f} \nabla^2 \frac{\partial Z_0}{\partial t}$, Z_0 = altura do nível de 1000 hPa

$$Q_0 = \text{vorticidade absoluta em 1000 mb} = \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} + f$$

$A_Q = (-\vec{v} \cdot \nabla Q)_p$ advecção de vorticidade em 500hPa (vento e vorticidade deste nível)

$A_T = -V \cdot \nabla (\Phi - \Phi_0) \approx (\vec{V} \cdot \nabla T)$ advecção de espessura ou de temperatura entre 1000 mb e 500 mb, onde $(\bar{\quad})$ significa o valor médio entre 1000 mb e 500 mb

$S = \ln(P_0/p) \cdot \overline{w(\Gamma_a - \Gamma)}$, com $w = \frac{dp}{dt}$ (velocidade vertical em coordenada p), $\Gamma = \frac{1}{rg} \frac{\partial T}{\partial p}$ é a taxa vertical da

variação da temperatura e Γ_a é a taxa associada a uma atmosfera com estrutura vertical dada pelo perfil termodinâmico adiabático seco (temperatura potencial constante na vertical). O símbolo $(\bar{\quad})$ indica o valor médio na camada.

H = taxa de aquecimento médio na camada de 1000 hPa - 500 hPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos campos de pressão e das imagens de satélite permitiu identificar no dia 26 a formação de uma região de baixa pressão desde o Rio da Prata até o sul da Bolívia. Às 00Z do dia 27 já é possível identificar um centro de baixa pressão de 1003 hPa em 58° W de longitude e 35.5° S de latitude. Nesse ponto, a pressão é de 1011 hPa às 12Z do dia 26, ou seja, a pressão mostrou uma queda de 8 hPa em 12 horas. Às 12Z do dia 27 o centro de baixa está um pouco

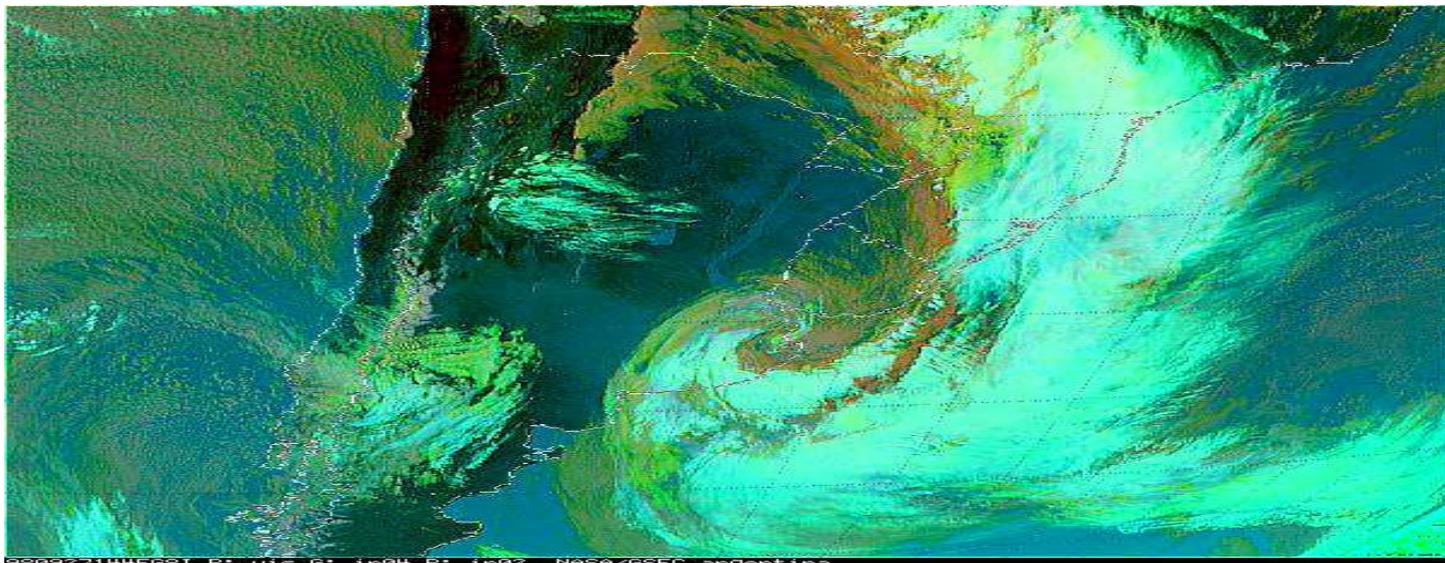


Figura 1: Imagem do satélite GOES-8 para o dia 27/09/98 às 15:00Z.

deslocado para sudeste e sua intensidade muda para 995 hPa. Isso mostra uma queda de 16 hPa em 24 horas. A partir de então, esse ciclone continua sua trajetória para sudeste e ganha intensidade até atingir sua máxima intensidade às 12Z do dia 30 por volta de 53° S de latitude e 36° W de longitude com uma pressão, central, de 981 hPa. Depois desse momento o sistema toma uma trajetória mais zonal e perde intensidade.

Na Argentina, no dia 24, há o aparecimento desse sistema de baixa pressão em níveis médios, o que provoca uma importante advecção de vorticidade ciclônica. Esse sistema de altitude gera o ciclone (figura 1) sobre o sistema frontal que se deslocava sobre o centro-norte de Buenos Aires. Com isso, registra-se precipitações extremamente intensas (tabela 1). No dia 27, a intensificação da depressão gerou fortes ventos (figura 2B) de noroeste sobre o Rio da Prata. Esses ventos produziram uma marcada diminuição no nível das águas prejudicando a navegação.

Tabela 1: Precipitação em algumas localidades da Argentina no mês de setembro comparadas com registros históricos.

Localidade	Total registrado entre 26/09 e 27/09	Valor Médio Mensal Período 1981-1990	Máximo Valor Diário Período 1981-1990
Tandil (Buenos Aires)	101 mm	57 mm	78 mm (1982)
Três Arroyos (Buenos Aires)	94 mm	66 mm	66 mm (1985)
San Luis (San Luis)	90 mm	19 mm	45 mm (1982)

A análise das características dinâmicas do sistema mostra advecção de ar frio e seco a oeste do ciclone e quente e úmido a leste. Na figura 3 tem-se um corte da atmosfera que abrange, verticalmente, toda a troposfera e horizontalmente a América do Sul, Pacífico Sul e Atlântico Sul (incluindo, a topografia da cordilheira dos Andes). É possível observar que a advecção de umidade específica ocorre predominantemente nos níveis mais baixos. Ao longo da banda nebulosa visível na figura 1 os movimentos verticais se estendem até altos níveis, mostrando que o sistema gera convecção profunda. Ainda na figura 3, em verde identifica-se centro de baixa pressão que, se comparado com a figura 2C, revela que a baixa em superfície se encontra a leste do cavado indicando que a circulação em altos níveis dava suporte dinâmico ao desenvolvimento do sistema. O corte vertical (figura 2A) revela uma estrutura com circulação ciclônica até altos níveis e favorecida pela presença do jato subtropical (figura 2D) a norte do sistema.

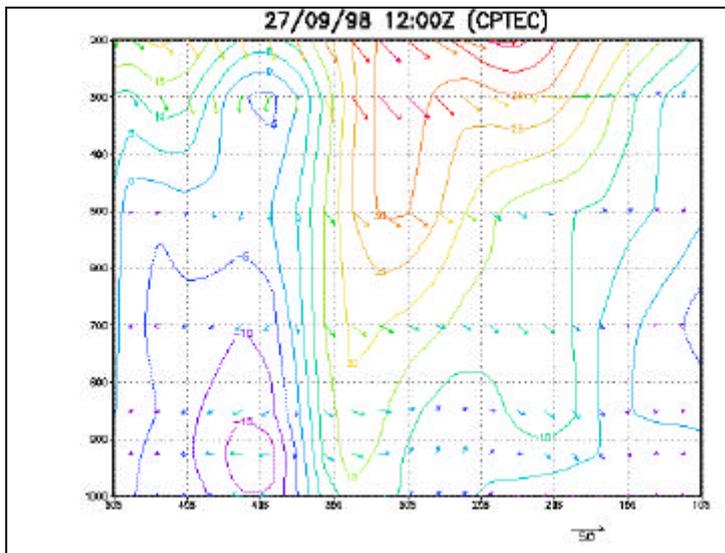


Figura 2A: Perfil vertical do vento em 56° W e isolinhas de vento zonal.

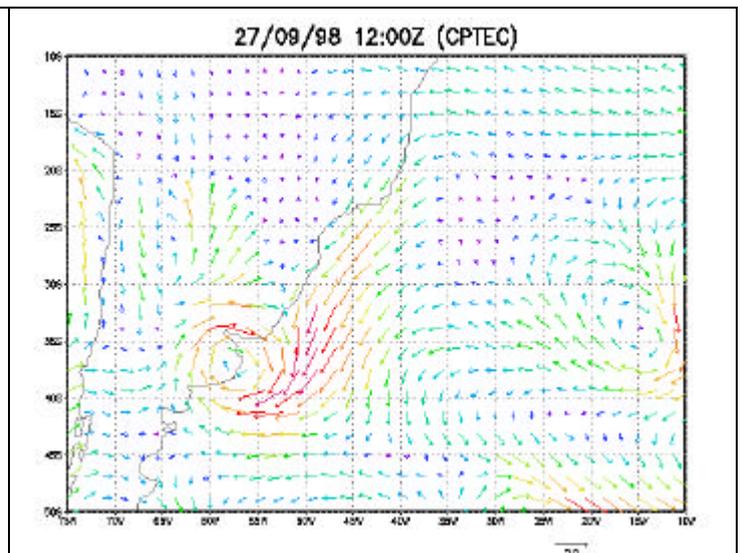


Figura 2B: Vento em 1000 hPa.

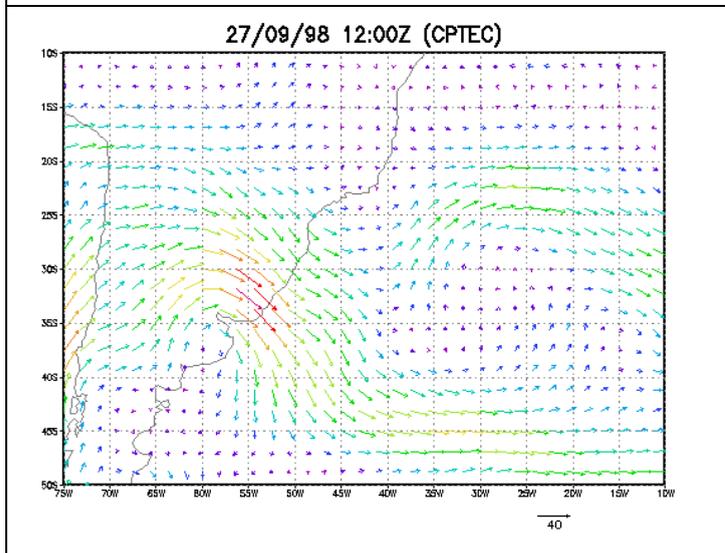


Figura 2C: Vento em 500 hPa.

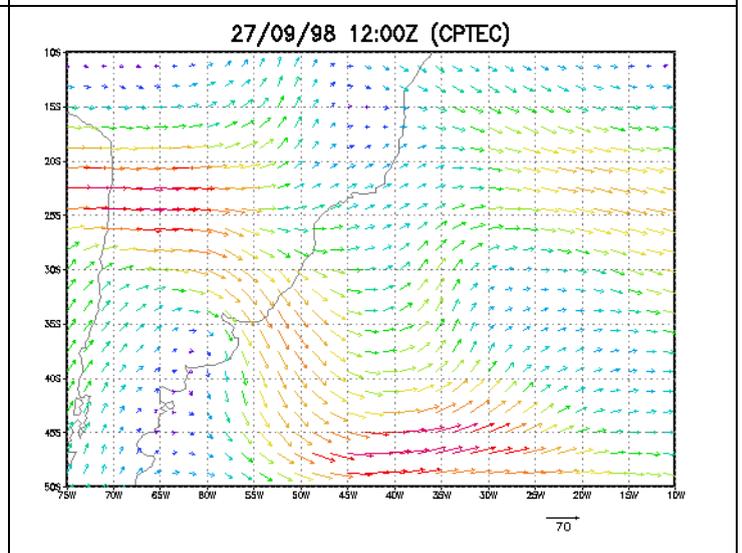


Figura 2D: Vento em 200 hPa.

A análise dos termos da equação de Sutcliffe mostrou que essa ciclogênese é bem descrita pela teoria de desenvolvimento de Sutcliffe.

$$\text{Termo 2} = A_Q = (-\vec{v} \cdot \nabla Q)_p$$

Esse termo (fig. 4A) mostra advecção negativa de vorticidade sobre a região do Rio da Prata onde temos a presença do centro de baixa.

$$\text{Termo 3} = -\frac{g}{f} \nabla^2 A_T, \text{ onde } A_T = -V \cdot \nabla (\Phi - \Phi_0) \propto \overline{(V \cdot \nabla T)}$$

O termo 3 (fig 4B) é negativo a sudeste do centro do ciclone, indicando advecção positiva de espessura, que corresponde a advecção quente e a queda de pressão em superfície. Esse termo indica a tendência de deslocamento do sistema, e nesse caso ele descreve bem o deslocamento observado.

$$\text{Termo 4} = -\frac{R}{f} \nabla^2 S, \text{ onde } S = \ln\left(\frac{P_0}{p}\right) \cdot \overline{w(\Gamma_a - \Gamma)}$$

O termo 4 (fig. 4C) mostra um efeito de retro-alimentação negativa no ciclone. É o termo que fornece ao modelo, a contribuição do aquecimento adiabático. De fato, valores positivos do termo indicam movimento ascendente ($w > 0$), resfriamento adiabático da coluna e conseqüente aumento de pressão na superfície, o que representa uma contribuição oposta às dos outros termos do modelo de Sutcliffe na mesma região.

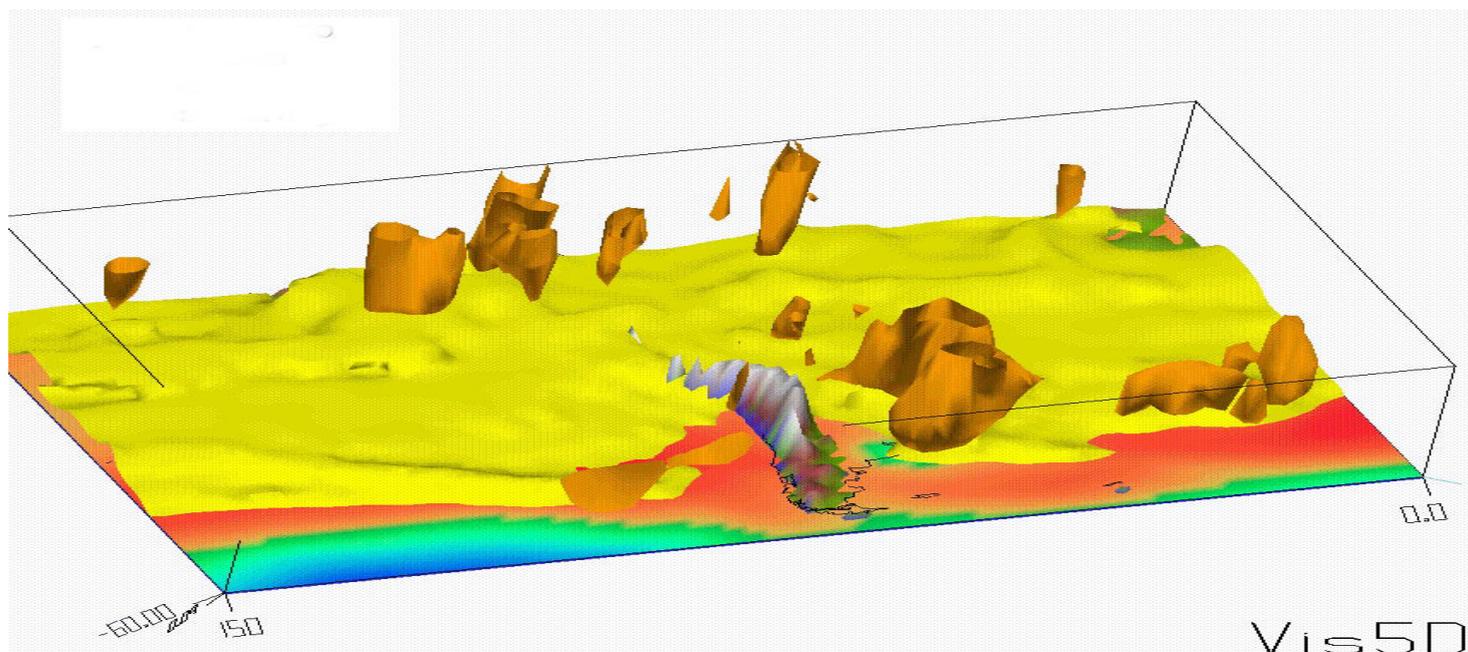


Figura 3: A superfície em amarelo tem valores de umidade específica Q iguais a 7 g/Kg ; as superfícies em laranja têm valores de velocidade vertical W iguais a 4 cm/s. Os dados são do dia 27/09/98 às 12:00Z.

$$\text{Termo 5} = -\frac{g}{f} \nabla^2 H, \text{ onde } H = \nabla \cdot (q \cdot v)$$

Ao considerar os processos físicos médios de trocas de calor numa coluna temos que considerar os processos radiativos e de transporte de calor sensível. Os processos radiativos, no entanto, são mais importantes onde os gradientes de temperatura e umidade são maiores, e isso ocorre em latitudes mais altas. Desse modo é considerado apenas o transporte horizontal de umidade específica. Os valores do termo 5 (fig. 4D) são positivos na região onde se identifica a nebulosidade na imagem do satélite indicando um divergente negativo, e portanto convergência de umidade nessa região. As figuras 5A e 5B mostram o valor da variação da vorticidade absoluta (diretamente relacionado com a variação de pressão) em superfície, no dia 27/09/1998 às 12:00Z considerando 12 horas antes e 12 horas depois, respectivamente, a partir da análise do modelo do CPTEC e a partir da soma dos termos do modelo de Sutcliffe. A tabela abaixo mostra os resultados obtidos com os dois métodos.

Método	Centro de variação de Pressão	Latitude	Longitude	Varição da Vorticidade em 1000hPa(s ⁻²)
Análise (CPTEC)	Abaixamento	-40	-55	-2e-9
Modelo (Sutcliffe)	Abaixamento	-40	-55	-6e-9
Análise (CPTEC)	Aumento	-36	-60	2e-9
Modelo (Sutcliffe)	Aumento	-34	-56	10e-9

Tabela 2 : Tabela de comparação entre variações de vorticidade nos centros de alta e de baixa pressão do ciclone extratropical pelas análise e pelo modelo de Sutcliffe.

Nota-se que o modelo de Sutcliffe colocou o centro de queda de pressão na posição correta, mas o superestima de um fator de três. Com o centro de aumento de pressão, há um pequeno desvio de posição para nordeste por parte do modelo de Sutcliffe, assim como no centro de abaixamento de pressão, ele superestima a variação, mas de um fator de 5.

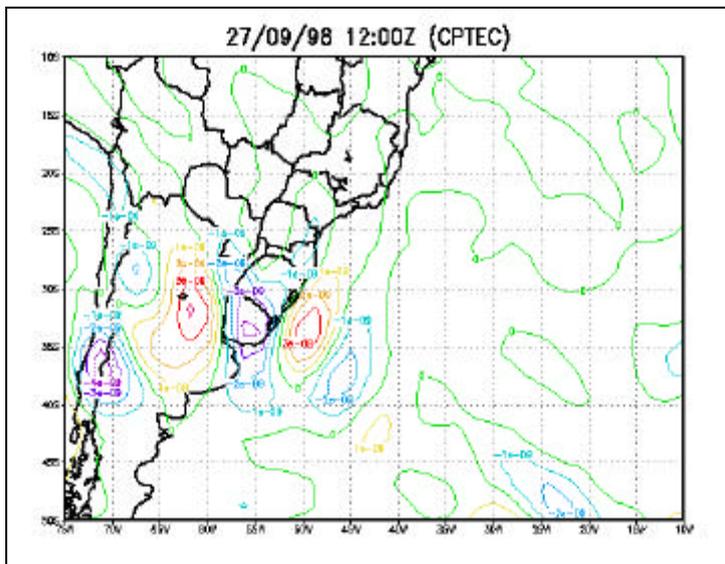


Figura 4A: Termo 2 – Advecção de Vorticidade Absoluta em 500 hPa.

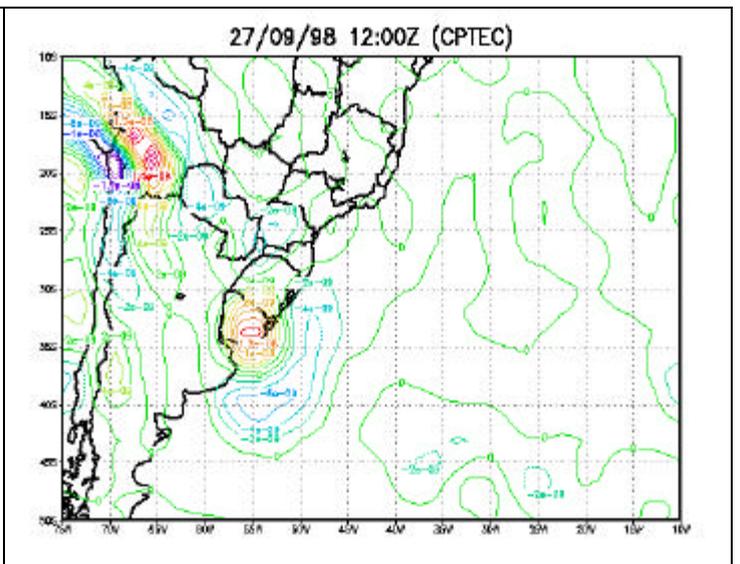


Figura 4B: Termo 3 – Laplaciano da Advecção de Espessura

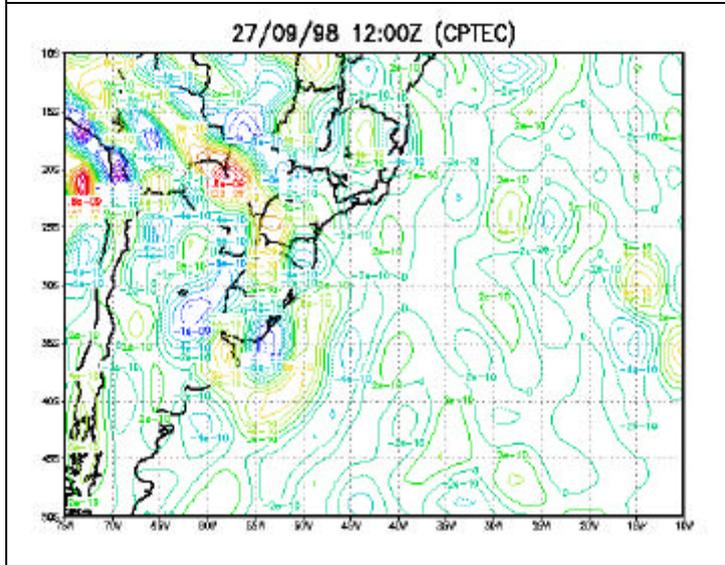


Figura 4C: Termo 4C – Laplaciano do Aquecimento Adiabático

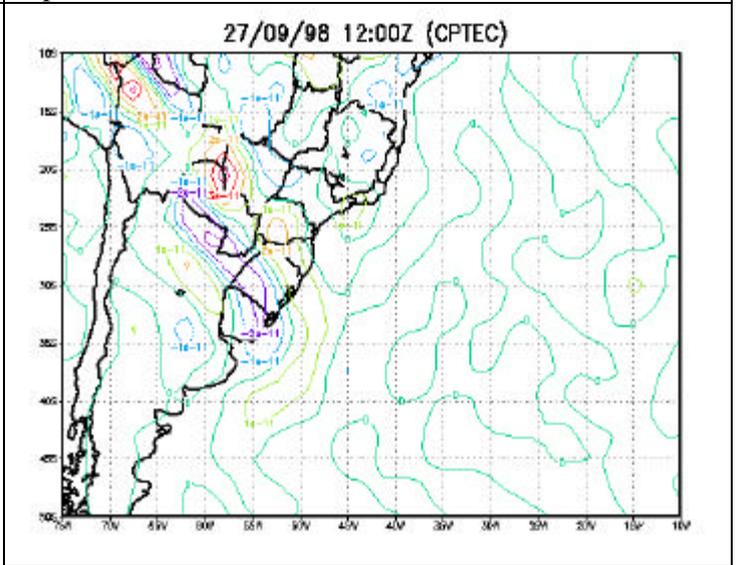


Figura 4D: Termo 5 – Laplaciano do Aquecimento Diabático

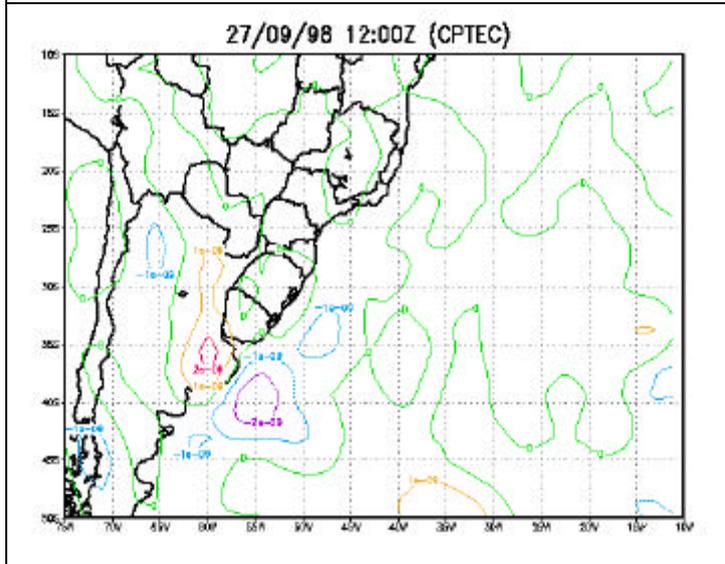
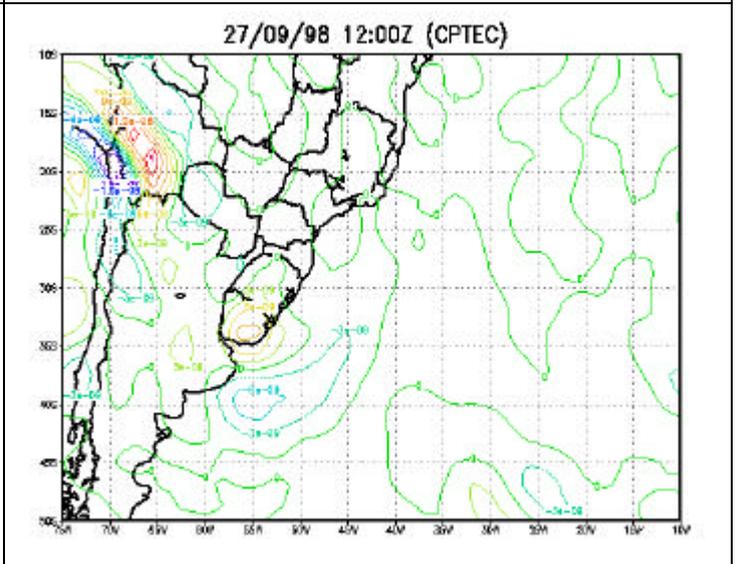


Figura 5A: Termo 1 pela análise do CPTEC.



Figuras 5B: Termo 1 pela soma dos termos da equação de Sutcliffe.

4. CONCLUSÃO

Vemos que gradientes intensos de umidade e temperatura em baixos níveis e de vortacidade em altos níveis favoreceu a formação do ciclone, o qual tem um impacto significativo na precipitação sobre a Argentina. O modelo de desenvolvimento de Sutcliffe, para um horário da fase de crescimento do sistema, superestima as intensidades tanto de abaixamento, quanto de aumento de pressão, posicionando o centro de queda de pressão próximo ao da análise e deslocando o centro de aumento de pressão para nordeste.

Pretende-se continuar o estudo de ciclones extratropicais, porém com o uso de modelos que considerem outros processos físicos aqui desprezados.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq (processo n. 301111/93-6) pelo financiamento deste trabalho, à Fapesp (processo n. 96/01403-4) e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP.

6. REFERÊNCIAS

- ALGARVE, V. R., E I. CAVALCANTI, 1994: Características da circulação atmosférica associadas a ocorrência de geadas no sul do Brasil. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Belo Horizonte, MG, 545-7.
- ALGARVE, V. R., 1996: Geadas no Brasil. **Climanálise Especial**, Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE-CPTEC, 123-8.
- BONNATI, JOSÉ PAULO E V. BRAHMANANDA RAO, 1987: Moist Baroclinic Instability in the development of North Pacific and South American Intermediate-Scale Disturbances. **Journal of Atmospheric Science**, v. 44, 2657-67.
- CALBETE, NURI OYAMBURO de, 1996: Casos de ocorrência de Geadas e Neve sobre a Região Sul do Brasil - Período de 1988 à 1996. **Climanálise Especial**, Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE-CPTEC, 129-130.
- DAPOZZO, J., E M. A. F. SILVA DIAS, 1994: Um estudo de caso da penetração do ar polar em latitudes baixas: Julho de 1988. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belo Horizonte, MG, 601-606.
- FORTUNE, M., E V. E. KOUSKY, 1983: Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Monthly Weather Review**, v. 11, 181-96.
- GAN, A. M. E B. V. RAO, 1991. Surface Cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, 1293-1302.
- GIRARDI, C., 1983: El Pozo de los Andes. Proceedings, First International Congress on Southern Hemisphere Meteorology. São Jose dos Campos, São Paulo, Brazil. **American Meteorological Society**, 226-9.
- HAMILTON, M. E J. TARIFA, 1978: Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July 1972. **Monthly Weather Review**, v. 106, 1545-56.
- MARENGO, JOSÉ A, A. CORNEJO, N. C. OYAMBURO E IRACEMA F. A. CAVALCANTI, 1997(A): Estudo de caso da primeira massa de ar frio em 1996 no sul do Brasil. Observações e resultados do modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 12, 09-24.
- MARENGO, JOSÉ A, A. CORNEJO, P. SATYAMURTY, C. NOBRE E W. SEA, 1997(B): Cold Surges in the Tropical and Extratropical South America. The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, 2759-88.
- PARMENTER, F., 1976: A Southern Hemisphere cold front passage at the Equator. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 57, 1435-40.
- PEZZA, A. B. E T. AMBRIZZI, 1998: Caracterização Climática e Correlações de Temperatura entre a Patagônia e o Sul do Brasil para o Período de Inverno. **Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, DF, 26 à 30 de outubro. Volume único disponível em CD-ROM.
- SATYAMURTY, PRAKKI, FERREIRA, C. C., E MANOEL A. GAN, 1990: Cyclonic Vortices over South America. **Tellus**, v. 42A, 194-201.
- SATYAMURTY, PRAKKI; PAULO C. ETCHICHURY; CAAREM STUDZINSKI; NURI O. C.; ROSANGELA R. LOPES; ICLÉIA A.V. GRAMMELSBACHER E E. A. GLAMMELSBACHER, 1990(B): A primeira friagem de 1990. Uma descrição sinótica. **Climanálise**, v. 5(5), 43-51.

- SELUCHI, M. E., E J. T. NERY, 1992: Condiciones Meteorologicas Asociadas a la ocurrencia de heladas en la region de Maringá. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 7, 171-86.
- SOUZA, R. DE OLIVEIRA, 1998: Condicionantes Meteorológicas e Geográficas para a Ocorrência de Neve no Sul do Brasil. Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, DF, 26 à 30 de outubro. volume único disponível em CD-ROM.