



**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O COMPORTAMENTO
DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Ariane Campani Matos (UFRJ, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: ariane.campani@gmail.com

Dra. Chou Sin Chan (DMD/CPTEC/INPE, Orientadora)

E-mail: chou@cptec.inpe.br

COLABORADORA

Dra. Claudine Pereira Dereczynski (IGEO/UFRJ)

E-mail: claudine@acd.ufrj.br

Junho de 2010

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

CAPÍTULO 3 – DADOS E METODOLOGIA

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

BIBLIOGRAFIA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Grandes esforços são empreendidos na compreensão dos fenômenos atmosféricos extremos, que atingem milhões de pessoas em todo planeta. Dentre esses fenômenos de maior impacto sobre a população, os processos ciclogênicos recebem atenção especial devido à possibilidade de formação de intensos vórtices acompanhados de fortes chuvas e ventos intensos. Esses sistemas podem interferir de modo significativo nas condições do mar, aumentando de forma perigosa as ondas junto à costa de diversos países ao redor do mundo. A navegação também fica prejudicada durante a passagem de ciclones, que geralmente possuem grande trajetória marítima.

Em particular, as regiões Sul e Sudeste do Brasil são freqüentemente atingidas por fortes ventos originados por ciclones extratropicais, e as suas áreas costeiras são afetadas pelo fenômeno de ressaca. A agitação marítima desta região deve-se à persistência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que impõe a condição mais freqüente, porém menos energética; por sua vez, os ciclones extratropicais e as altas polares associadas estão ligados aos eventos extremos. Os ciclones apresentam o gatilho para a formação das maiores ondulações enquanto as altas polares funcionam no sentido de manter a persistência e a extensão da pista de vento, permitindo que as ondas cresçam e se propaguem por grandes distâncias.

De acordo com o Quarto Relatório de Avaliação (Fourth Assessment Report – AR4) do Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC), publicado em 2007 (IPCC, 2007), um significativo aumento no número e na intensidade de ciclones extratropicais tem sido documentado em vários estudos (Lambert, 1996; Gustafsson, 1997; McCabe et al., 2001; Wang et al., 2006), com mudanças associadas em suas trajetórias preferenciais. Para o Atlântico Sul existem poucos trabalhos sobre o assunto.

Neste trabalho, as saídas das integrações do modelo regional Eta

(versão climática) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) serão utilizadas para avaliar se o modelo é capaz de reproduzir o clima presente (1960-1990) no que diz respeito a formação dos ciclones. O modelo regional Eta do CPTEC/INPE foi adaptado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de mudanças climáticas. Nesta versão do modelo cenários na resolução de 40 km foram produzidos para a América do Sul para o clima presente, período de 1961-1990 e clima futuro 2010-2100, utilizando-se o cenário A1B do IPCC.

O objetivo do trabalho é, através de comparações das saídas do Modelo Eta com a Reanálise do NCEP/NCAR, verificar o potencial do modelo Eta para reproduzir a frequência de ocorrência dos ciclones, suas trajetórias e as tendências de aumento e/ou redução da frequência de ocorrência dos eventos no clima presente, na região do Atlântico Sul. Caso o modelo Eta consiga reproduzir as mesmas tendências verificadas nas Reanálises com relação ao clima presente, ou seja, tendências de aumento ou diminuição na frequência de ocorrência dos ciclones, bem como o aumento ou diminuição da intensidade dos mesmos, a próxima etapa será investigar tais tendências nas integrações para o clima futuro (2010-2100).

O esquema numérico para detecção dos ciclones a ser utilizado neste trabalho, denomina-se CYCLOC (Murray e Simmonds, 1991). Tal esquema, totalmente automatizado, tem a função de procurar por mínimos e máximos num conjunto qualquer de dados, mas foi originalmente desenvolvido para localizar baixas e altas meteorológicas, em médias e altas latitudes por todo globo terrestre.

Neste relatório parcial apresenta-se uma revisão da literatura sobre o desenvolvimento de ciclones no Atlântico Sul no capítulo II, a descrição dos dados e da metodologia do trabalho no capítulo III, os resultados da climatologia sazonal dos ciclones utilizando-se como dados de entrada a Reanálise 1 do NCEP/NCAR no capítulo IV e finalmente as considerações finais e etapas futuras no capítulo V.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os ciclones que surgem dentro da circulação geral da atmosfera são exemplos de sumidouros de energia térmica, e são agentes da atmosfera na homogeneização de suas características, como temperatura, umidade e densidade. Apesar deles surgirem e se desenvolverem dentro de fortes condições de instabilidade e geralmente se apresentarem com violentos ventos, seus ciclos de vida se desenrolam com o objetivo de estabilizar e homogeneizar a atmosfera. Os vórtices ciclônicos podem se formar nas regiões extratropicais, subtropicais e tropicais, tanto nos baixos, médios e altos níveis da atmosfera. Desta forma, existe uma variedade de sistemas ciclônicos na atmosfera, com distintas características. Os sistemas observados no Atlântico Sul são listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características de alguns tipos de vórtices ciclônicos observados no Atlântico Sul

Vórtice	Nível de formação	Centro do vórtice	Região de formação	Época do ano com maior frequência de ocorrência
Ciclone Extratropical	Baixos níveis	frio	extratropicos	Outono/inverno
Ciclone Tropical	Baixos níveis	quente	tropicos	Verão (no Atlântico Norte)
Sistema tipo Nuvem Vírgula Invertida	Baixos e médios níveis	frio	Extratropicos/Paraguai, norte da Argentina, Uruguai e Sul do Brasil	inverno
Vórtice tipo Pálmen	Altos níveis	frio	Subtropicos/Regiões Sul e Sudeste do Brasil	inverno
Vórtice tipo Palmer	Altos níveis	frio	Trópicos/ex: Vórtice Ciclônico do Nordeste	Primavera, verão e outono

Além dos itens listados na Tabela 2.1, outras características diferenciam um vórtice de outro, tais como escala horizontal e vertical, tempo de duração, velocidade de deslocamento, e principalmente os processos de formação. Um ciclone tropical, por exemplo obtém sua energia da água quente e do calor latente de condensação, enquanto um ciclone extratropical retira sua energia dos contrastes horizontais de temperatura (AHRENS, 2000), que estão associados à grande energia potencial. Ciclones extratropicais, são mais freqüentes, e atingem grande intensidade nas áreas e durante as estações que apresentam grandes gradientes horizontais de temperatura (BJERKNES, 1918).

A seguir abordada-se a teoria que explica a evolução e decaimento dos ciclones extratropicais.

2.1 Ciclo de Vida dos Ciclones Extratropicais

Segundo Fedorova (2001), o ciclo de vida de um ciclone extratropical pode ser dividido, basicamente, em quatro etapas, que são meteorologicamente importantes, pois delas resulta a formação de nuvens, precipitação e ventos intensos:

- Estágio de onda:

Neste estágio ocorre a formação de ondas frontais à superfície com o surgimento de dois ramos principais: a frente fria e a frente quente. Na parte dianteira da onda intensifica-se a advecção de ar quente e na parte posterior, de ar frio. Próximo da superfície forma-se a primeira isóbara fechada. O escoamento do ar superior é mais linear e assume a forma de onda com uma crista na parte dianteira do ciclone (região de ar quente) e um cavado à retaguarda (região de ar frio). Do ponto de vista térmico, a pressão diminui na parte dianteira da onda, que é a região de máxima advecção de ar quente, e a pressão aumenta na região de máxima advecção de ar frio. Portanto, a redução máxima de pressão ocorre na vanguarda da frente quente e o aumento máximo ocorre na retaguarda da frente fria.

Nesta etapa a onda intensifica-se próximo à superfície e há um desenvolvimento do cavado em níveis médios.

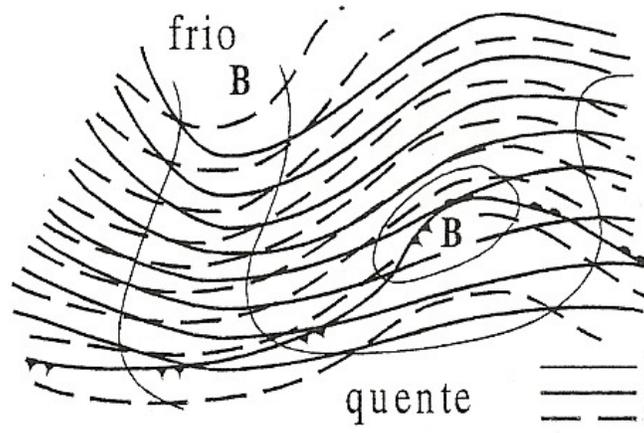


Figura 2.1 - Primeiro estágio de desenvolvimento do ciclone ou estágio de onda no HN. 1 - isóbaras; 2 - isoípsas no nível de 700 hPa; 3 - isoípsas entre os níveis de 500 e 1000 hPa (MANUAL, 1964 *apud* FEDOROVA, 2001).

- Estágio de ciclone jovem:

As amplitudes das ondas nos campos térmico e bórico aumentam. No campo de pressão à superfície são observadas algumas isóbaras fechadas, a pressão no centro do ciclone cai e os gradientes bóricos aumentam. A curvatura ondulatória cresce, as partes fria e quente da zona frontal aproximam-se e o setor quente aparece nítido. A distribuição horizontal da advecção de temperatura é a mesma que no estágio de onda, mas os valores são maiores e, portanto, há maior queda de pressão atmosférica.

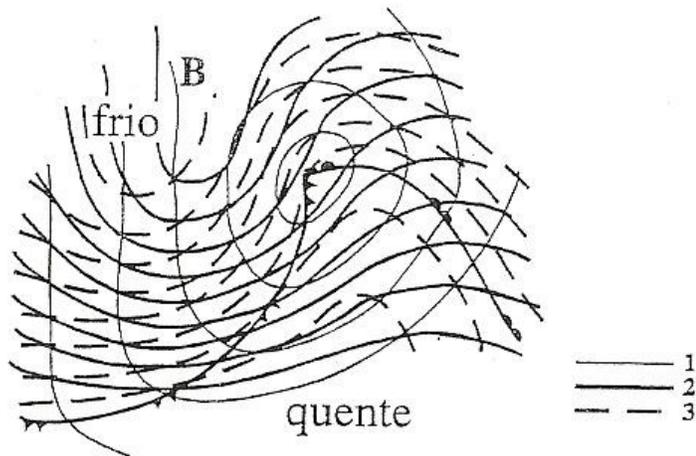


Figura 2.2 - Estágio de ciclone jovem no HN. 1 - isóbaras; 2 - isoípsas no nível de 700 hPa; 3 - isoípsas entre os níveis de 500 e 1000 hPa (MANUAL, 1964, *apud* FEDOROVA, 2001).

- Estágio de desenvolvimento máximo do ciclone:

Caracteriza-se pela maior profundidade do ciclone próximo da superfície; depois desse estágio de desenvolvimento, o ciclone começa a encher. São observadas muitas isóbaras fechadas e grandes gradientes béricos. As frentes fria e quente juntam-se e ocorre a oclusão do ciclone com a formação da frente oclusa. A distribuição da temperatura na parte central do ciclone é mais simétrica.

Nesse estágio são observadas isóbaras fechadas nos níveis de 700 e 500 hPa e o centro do ciclone nestes níveis fica no lado do ar frio. Em níveis mais altos o centro fechado pode não existir.

Os centros béricos à superfície e em outros níveis aproximam-se e o eixo do ciclone fica mais vertical e na parte central do ciclone ocorre um aumento de pressão devido à diminuição da temperatura. Por causa da intensificação da circulação ciclônica, aumenta a convergência na camada de atrito e, conseqüentemente, a pressão aumenta.

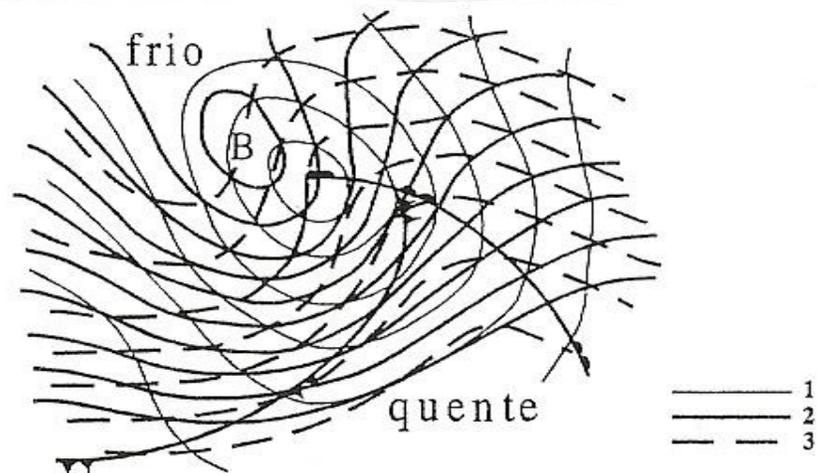


Figura 2.3 - Estágio de desenvolvimento máximo do ciclone no HN. 1 - isóbaras; 2 - isoípsas no nível de 700 hPa; 3 - isoípsas relativa entre os níveis de 500 e 1000 hPa (MANUAL, 1964 *apud* FEDOROVA, 2001).

- Estágio de dissipação:

Nesta etapa o ciclone enche-se próximo da superfície e nos altos níveis desenvolve-se por mais algum tempo. A massa de ar frio é observada em toda parte central do ciclone. Durante este estágio os centros do ciclone à superfície, em médios e altos níveis coincidem com a parte central da região de ar frio. O ciclone neste estágio é frio e localiza-se desde a superfície até os altos níveis da atmosfera. As isoípsas e as isotermas são quase paralelas; por isso a mudança de pressão e temperatura, devido à advecção, é pequena.

Em altos níveis as isoípsas têm forma circular. O aumento da pressão devido à convergência do vento na camada de atrito não é compensado por outros fatores e o ciclone à superfície enche-se rapidamente.

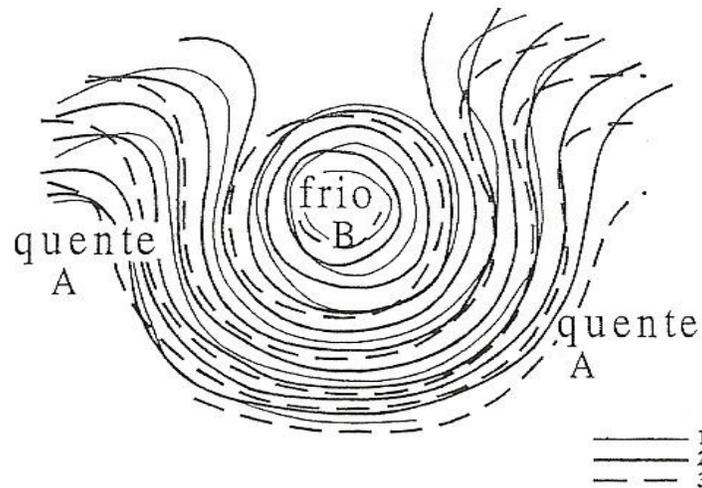


Figura 2.4 - Estágio de dissipação do ciclone ou ciclone velho no HN. 1 - isóbaras; 2 - isoipsas no nível de 700 hPa; 3 - isoipsas relativa entre os níveis de 500 e 1000 hPa (MANUAL, 1964, *apud* FEDOROVA, 2001).

Observa-se durante o ciclo de vida de um ciclone extratropical uma defasagem entre o cavado em médios e altos níveis e o centro de baixa pressão em superfície, ou seja, o centro do ciclone inclina-se para o lado mais frio. A Figura 2.5 mostra a inclinação do eixo do cavado com a altura. Essa defasagem é fruto da advecção de ar quente e frio nos dois ramos ciclônicos, que cria um retraimento das isóbaras no lado frio, e uma conseqüente queda de pressão em níveis altos, e a expansão das isóbaras no lado quente, com um aumento de pressão acima do ciclone em baixos níveis. A diminuição da inclinação deste eixo indica a conversão de energia potencial em energia cinética dentro do sistema frontal, pois sinaliza a intrusão de ar frio no vórtice ciclônico, em baixos níveis, com levantamento do ar quente. Portanto, à medida que o ciclone desenvolve-se, o cavado em médios e altos níveis tende a se aproximar do cavado em baixos níveis, e o eixo torna-se praticamente vertical quando ocorre a oclusão. Neste momento o sistema passa a ter um comportamento predominantemente barotrópico.

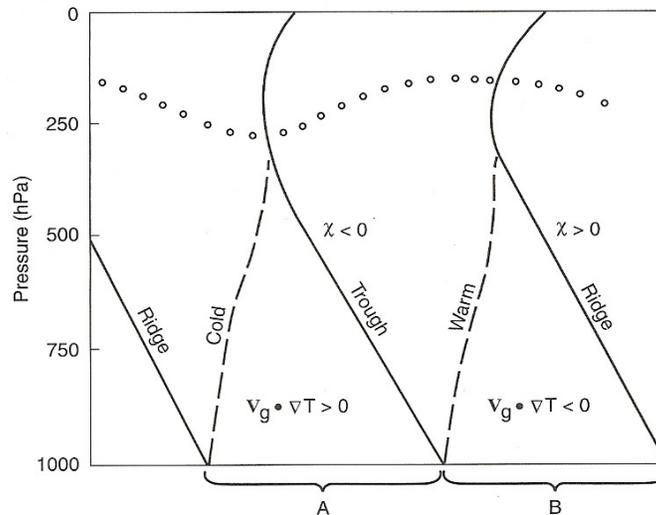


Figura 2.5 - Seção zonal de um distúrbio sinótico em desenvolvimento no HN, mostrando a relação entre a advecção de temperatura e a tendência de pressão em altos níveis. A e B designam, respectivamente, regiões de advecção fria e quente na baixa troposfera (HOLTON, 2004).

2.2 Distribuição espaço-temporal de Ciclones Extratropicais na América do Sul e Oceanos adjacentes.

Estudos relativamente recentes, descritos em Palmeira (2003), tiveram por objetivo verificar aspectos climatológicos associados aos ciclones que se formam no continente sul-americano e oceanos adjacentes. Tal verificação teve foco em determinar regiões e épocas do ano de maior frequência da ocorrência de eventos de ciclogênese na região de estudo e, desta forma, se tentar estabelecer distribuições espaciais e temporais da incidência de ciclones nesta área. Em Palmeira (2003) foram utilizados dados das Reanálises do NCEP/NCAR, que foram tratados devidamente por uma metodologia pioneira, introduzida pelo autor, e que será descrita com mais detalhes no próximo capítulo deste relatório.

Entre muitos outros resultados, Palmeira (2003) aborda aspectos ligados com a distribuição de ciclogêneses por faixa de latitude, como pode ser visto na Tabela 2.2. É possível perceber que este fenômeno torna-se mais freqüente

com o aumento da latitude e com a proximidade dos meses de inverno.

Tabela 2.2 – Média da distribuição latitudinal e mensal das ciclogêneses durante o período 1980-1999. (retirado de Palmeira, 2003)

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
10 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15 - 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 25	0	0	0	2	0	1	0	3	1	3	0	1	11
25 - 30	1	1	5	5	5	15	7	8	6	2	4	4	63
30 - 35	9	5	6	8	14	10	20	14	13	12	14	9	134
35 - 40	15	10	14	18	28	30	26	24	25	22	15	15	242
40 - 45	14	17	30	26	42	43	36	45	26	29	30	31	369
45 - 50	56	33	31	59	44	43	40	38	39	41	21	54	499
50 - 55	66	39	54	40	57	61	77	51	49	50	39	66	649
55 - 60	72	88	77	71	63	76	72	66	64	56	64	42	811
Total	233	193	217	229	253	279	278	249	223	215	187	222	2778

Em termos de distribuição espacial, nos totais anuais (Figura 2.6.a), Palmeira (2003) observa a intensificação dos eventos de ciclogênese (maior quantidade de eventos) conforme o aumento da latitude (cinturões nas latitudes de 60°S e em 50°S), embora apareçam núcleos deste fenômeno em latitudes mais baixas, como o máximo de 50 ciclogêneses no litoral sul do Brasil.

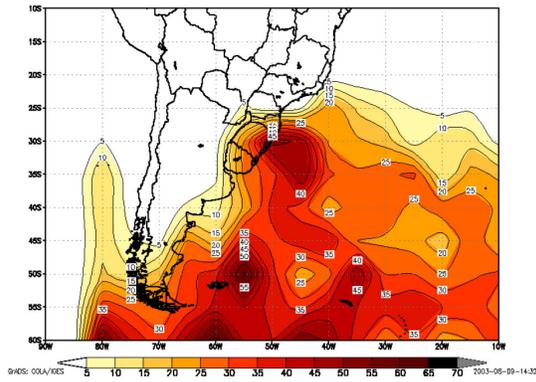
Em termos de distribuição temporal, algumas características tornaram-se marcantes sazonalmente. Durante o verão (Figura 2.6.b), foram notados três núcleos marcantes: dois entre 50°S-55°S, respectivamente nas longitudes de 55°W-35°W, com ocorrências máximas superiores a 17 ciclogêneses e o terceiro núcleo situado em 60°S-80°W com máximo de ocorrência superior a 23 ciclogêneses.

No período do outono (Figura 2.6.c), vários outros núcleos aparecem sobre o oceano Atlântico, com uma nítida migração para norte. Dois deles chamam mais atenção: um núcleo por apresentar maior frequência de ciclogênese, localizado em 50°S/55°W e o outro por estar próximo ao litoral do estado do Rio Grande do Sul (30°S 50°W).

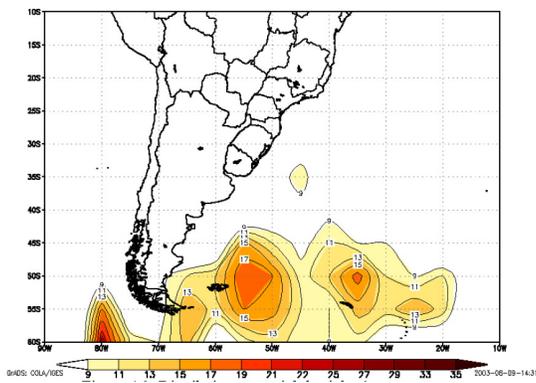
Durante o inverno (Figura 2.6.d), a região sudoeste e extremo sul do oceano Atlântico, mostram-se verdadeiros berçários de ciclones. Um núcleo extremamente intenso no litoral da região Sul do Brasil (32°S-45°W), atingindo

uma frequência máxima de 23 ciclogêneses, também pode ser observado, nas demais regiões do Atlântico, um aumento generalizado da ocorrência deste fenômeno.

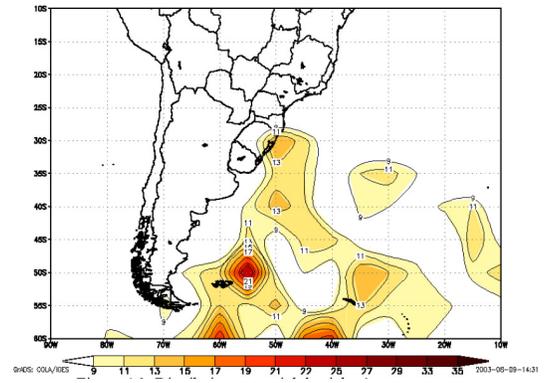
Nos meses de primavera (Figura 2.6.e), nota-se a diminuição da frequência de ciclogênese em toda a área estudada, embora o litoral do Rio Grande do Sul apresente ainda um máximo de ocorrência.



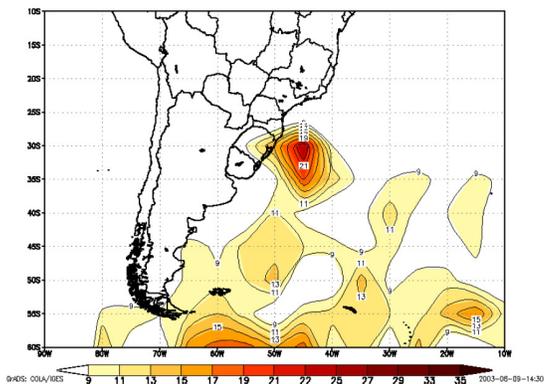
(a)



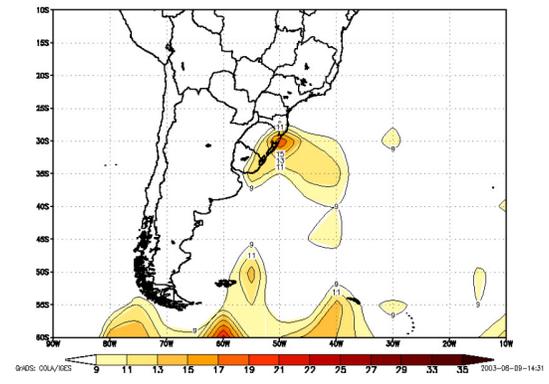
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.6 – Distribuição espacial de ciclogênese para os períodos: (a) anual, (b) verão, (c) outono, (d) inverno e (e) primavera - (Retirado de Palmeira, 2003)

Além disso, o mesmo autor abordou também aspectos relativos à distribuição espacial de eventos de ciclogêneses explosivas (grande intensidade, e evolução muito rápida do gradiente de pressão associado ao ciclone), encontrando também, que este tipo de ciclogênese teve ocorrência preferencial nos meses de inverno, no período estudado. No estudo da distribuição espacial, o autor encontrou que as ciclogêneses explosivas tiveram maior frequência de formação junto ao litoral do Rio Grande do Sul e na região oceânica (Figura 2.7). Diversos outros aspectos foram abordados neste trabalho, como a distribuição média da pressão dos ciclones por faixa de latitude e as trajetórias médias dos sistemas estudados, entre outros. Estes e muitos outros levantamentos realizados no trabalho de Palmeira (2003) são de suma importância para se tentar estabelecer uma climatologia de ciclones para o continente sul-americano e oceanos adjacentes, servindo como base de estudo e como origem de diversas vertentes de pesquisas na mesma linha de estudo a serem desenvolvidas, inclusive no presente projeto.

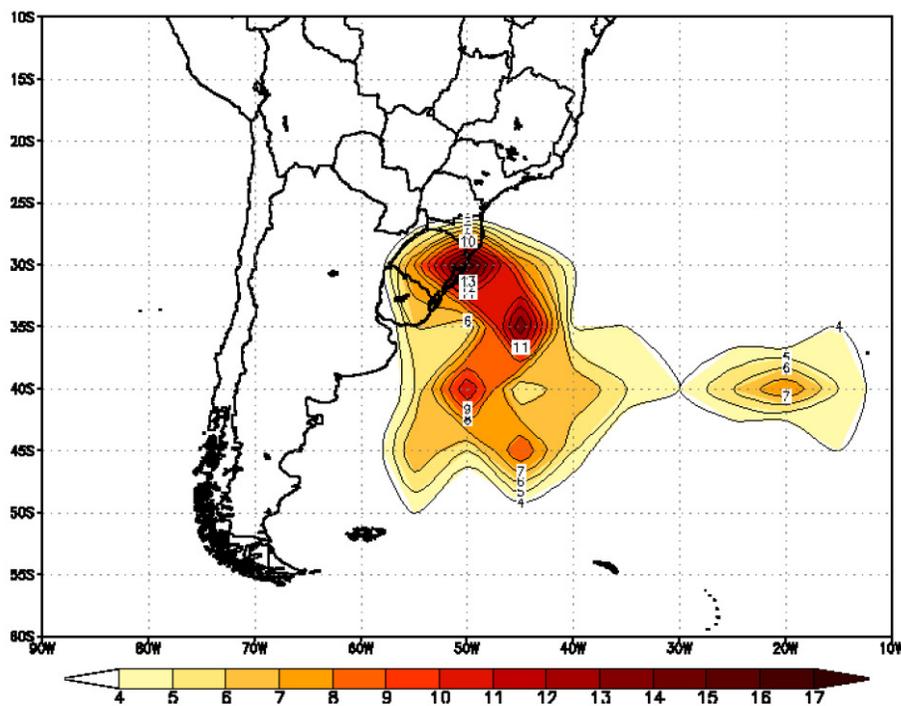


Figura 2.7 – Distribuição espacial das ciclogêneses explosivas no período 1980-1999. (retirado de Palmeira, 2003)

Gan e Rao (1991) utilizaram 10 anos de cartas de superfície do período de janeiro de 1979 a dezembro de 1988 para examinar a variabilidade sazonal e

interanual da ciclogênese na América do Sul. Os pesquisadores encontraram dois núcleos de máxima ciclogênese, um sobre o Uruguai e outro sobre o Golfo de San Mathias na Argentina (Figura 2.7). Na primavera e outono os dois núcleos têm aproximadamente a mesma intensidade, em torno de 15 sistemas a cada estação, ou seja, em torno de 5 sistemas por mês. O núcleo do Uruguai no inverno (verão) a maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogênese, cerca de 25 (15) sistemas. O contrário ocorre no Golfo de San Mathias, que apresenta no verão (inverno) a maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogênese, 20 (15) sistemas. Os dois núcleos deslocam-se para norte do verão para o inverno. Os autores atribuem distintos mecanismos físicos envolvidos nos dois núcleos encontrados, a instabilidade baroclínica local dos oestes no caso do máximo no Golfo de São Mathias e a ciclogênese orográfica devido à presença dos Andes no caso do máximo do Uruguai.

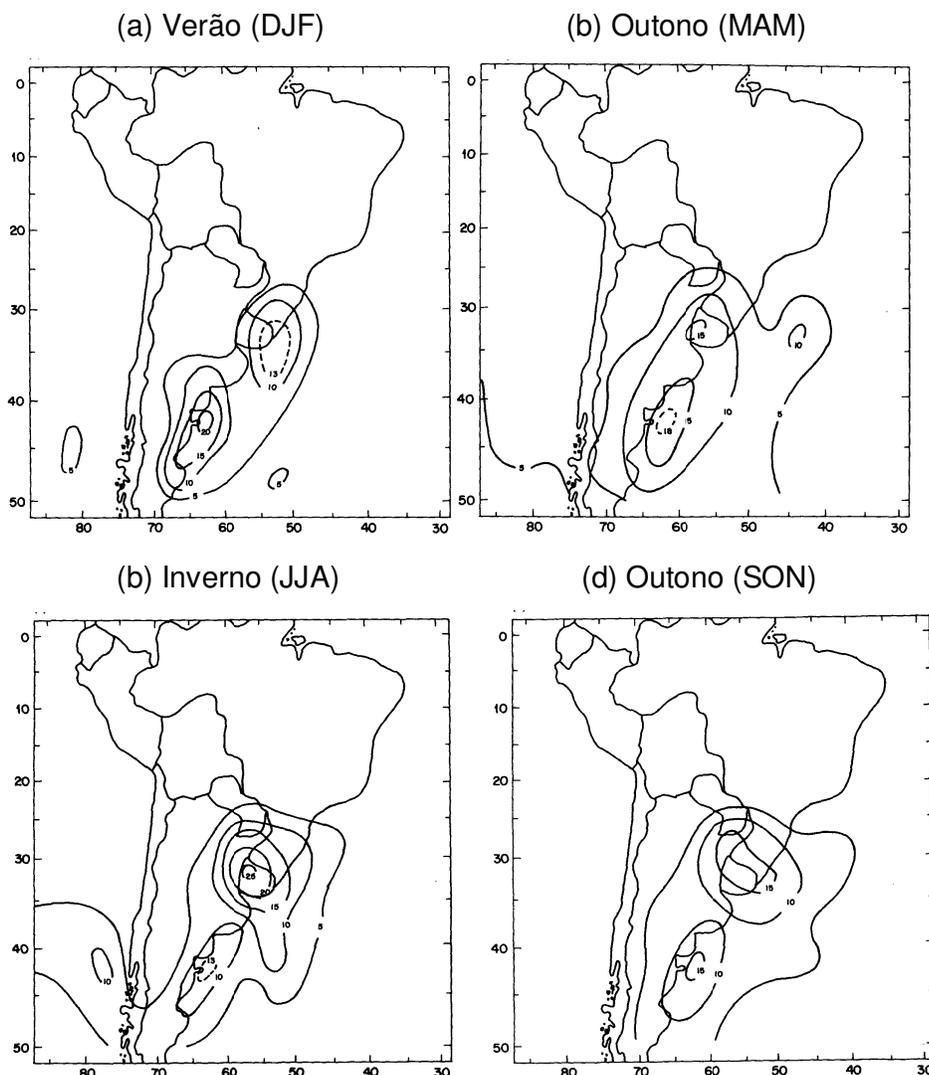


Figura 2.8 – Isolinhas de frequência de ciclogêneses: (a) verão (DJF), (b) outono (MAM), (c) inverno (JJA) e (d) primavera (SON). (retirado de Gan e Rao, 1991)

Com relação à variabilidade interanual, Gan e Rao (1991) mostraram que em anos de El Niño (La Niña) ocorre a maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogênese. Por exemplo, considerando o outono e inverno ocorreram no El Niño de 1983 ao todo 73 casos, enquanto no evento La Niña de 1981 nos mesmos meses ocorreram apenas 45 eventos. Sobre a direção predominante das trajetórias dos ciclones, os pesquisadores encontraram que entre 15 e 40°S a direção predominante é para sudeste, enquanto na faixa entre 40 e 50°S a maior parte das trajetórias é para leste.

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os conjuntos de dados utilizados neste trabalho, a Reanálise 1 do NCEP/NCAR, as características do modelo regional Eta e do programa CYCLOC.

3.1 Reanálise do NCEP/NCAR

O sistema de assimilação de dados da Reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e do National Center for Atmospheric Research (NCAR) descrito com mais detalhes em Kalnay et al. (1996) inclui o modelo global espectral do NCEP operacional em 1995, com 28 níveis sigma na vertical e truncamento triangular de 62 ondas, equivalente a uma resolução horizontal aproximada de 210 km na horizontal ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude e longitude). As observações assimiladas são radiossondagens; sondagens verticais de temperatura operacional do TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS); ventos determinados a partir de satélites geoestacionários; observações de ventos e temperatura de aeronaves, dados de pressão à superfície de estações meteorológicas em terra; e dados oceânicos de pressão à superfície, temperatura, vento horizontal e umidade específica. As observações de precipitação não são assimiladas pelo sistema da Reanálise, portanto, os dados de precipitação gerados são acumulados a cada 6 horas pelo modelo (Janowiak, 1998).

O modelo parametriza os principais processos físicos, como, radiação (incluindo o ciclo diurno e a interação com as nuvens), convecção, precipitação em grande escala, física da camada limite, entre outros. Os detalhes da dinâmica e física do modelo são descritos em NOAA/NMC Development

Division (1988), Kanamitsu (1989) and Kanamitsu et al. (1991). Uma diferença principal no modelo como descrito por Kanamitsu et por al. (1991) é o uso de um esquema simplificado da parametrização da convecção de Arakawa-Schubert desenvolvido por Bandeira e Wu (1994), baseados em Grell (1993). Este esquema resulta numa previsão da precipitação melhor do que o esquema anterior (Kuo; 1965,1974), nos Estados Unidos (calculado pelo equitable threat scores) e apresenta resultados mais realísticos nos Trópicos.

As variáveis em pontos de grade (produto da Reanálise mais usado) são classificadas em quatro categorias (A, B, C e D) dependendo da influência relativa do dado observacional e do modelo sobre a variável (Kalnay et al., 1996). A pressão ao nível médio do mar, utilizada neste trabalho é classificada na categoria A, a classe mais confiável, onde a variável analisada é fortemente influenciada pelos dados observacionais.

Neste trabalho são utilizados dados da Reanalise 1 do NCEP/NCAR disponíveis no site <http://www.cdc.noaa.gov> no formato NetCDF. O período a ser utilizado será de janeiro de 1961 até dezembro de 1990.

3.2 O Modelo Eta do CPTEC/INPE

O modelo de mesoescala Eta foi desenvolvido a partir de uma parceria entre a Universidade de Belgrado, Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e o Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP), localizado nos Estados Unidos. Operacionalmente o modelo Eta foi primeiramente implementado no NCEP (Mesinger et al. 1988; Black 1994). No Brasil o modelo Eta está operacional desde 1996, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (Chou, 1996). O modelo regional se propõe a prever com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisas marítimas, tempestades severas, etc., enfim, sistemas organizados em mesoescala.

O modelo Eta é um modelo em ponto de grade de equações primitivas. A grade horizontal é a grade E de Arakawa e a coordenada vertical é a coordenada Eta. A topografia é representada em forma de degraus. As variáveis prognósticas

do modelo são: temperatura do ar, componente zonal e meridional do vento, umidade específica, hidrometeoros da nuvem, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

3.2.1 A versão Eta Climático

No CPTEC/INPE, Pesquero et al. (2009) adaptaram o modelo regional Eta para realizar integrações climáticas. O modelo utiliza dados observados médios mensais da temperatura da superfície do mar (TSM), interpolados linearmente para produzir campos diários. Além disso, o modelo possui calendário de 360 dias a fim de se ajustar às condições de contorno provenientes do modelo HadAM3P (Gordon et al., 2000) do Hadley Centre. Uma simulação foi elaborada continuamente por 10 anos (1961-1970) usando o HadAM3P como condição de contorno, atualizada a cada 6 horas. O modelo Eta foi configurado com resolução horizontal de 40 km e 38 níveis na vertical. O objetivo do trabalho foi avaliar a capacidade do modelo Eta para representar os padrões espaciais do clima médio sazonal e seu ciclo anual de precipitação e temperatura do ar. Na simulação, o modelo Eta reproduziu muitos dos aspectos climáticos da América do Sul, exibindo melhor performance do que o HadAM3P. O modelo Eta exibiu melhor representação da circulação nos baixos níveis induzida pela topografia. Nos altos níveis o HadAM3P subestima a magnitude da corrente de jato durante o verão e inverno austral sobre a América do Sul, e como esses campos foram usados para integrar o modelo Eta, este também produziu um jato mais fraco. A Alta da Bolívia no Modelo Eta foi superestimada devido às altas temperaturas simuladas durante o verão e devido ao desvio positivo na baixa pressão sobre o norte da Argentina.

Neste trabalho as integrações do modelo Eta na resolução de 40 km e 38 níveis na vertical, aninhado ao modelo global HadCM3 (Pope et al., 2000) do Hadley Center serão avaliadas para as atividades ciclônicas do Atlântico Sul.

3.3 O Programa CYCLOC

O esquema numérico utilizado neste trabalho, denominado CYCLOC, foi desenvolvido por Murray e Simmonds (MS) (1991) do Departamento de Meteorologia da Universidade de Melbourne na Austrália.

O esquema é totalmente automatizado de forma que nenhuma intervenção manual é necessária depois que uma série de parâmetros de procura e rastreio for especificada. Sua função é procurar por mínimos e máximos num conjunto qualquer de dados, mas foi originalmente desenvolvido para localizar baixas e altas meteorológicas, em médias e altas latitudes por todo globo terrestre.

Cedido pelo Dr. Ross J. Murray, o CYCLOC está totalmente em linguagem Fortran e foi originalmente desenvolvido pelos autores em ambiente UNIX/Sun e foi adaptado para ser compilado em LINUX/Intel com o compilador Intel Fortran Compiler 6.0 (ifc) disponível gratuitamente no endereço <http://www.intel.com>.

Existem três estágios principais no esquema: localização, rastreamento e análises estatísticas. Inicialmente há uma série de parâmetros essenciais que devem ser escolhidos de forma definitiva antes de cada rodada, referentes ao tempo (tempo inicial, final e intervalo de tempo entre os campos sucessivos), área de interesse (limites em latitude e longitude), informações relacionadas à projeção (número de pontos de grade, tamanho latitudinal e longitudinal da matriz de dados e hemisfério de interesse), tipo e característica do sistema a ser procurado (altas ou baixas, fechadas e/ou abertas, fortes e/ou fracas), além de informações referentes aos próprios dados (quantidade, unidade, fonte, resolução da grade).

Basicamente, a técnica de procura envolve uma comparação de pressões com pontos vizinhos, ou seja, um ciclone (anticiclone) é pré-definido num ponto no qual a pressão seja menor (maior) do que em qualquer um dos pontos a sua volta. Embora seja possível considerar até 24 pontos nas

redondezas, os autores sugerem que normalmente seja usado um número entre 4 e 8 pontos para esta análise. Após alguns testes com este parâmetro, foi estabelecido o uso de 8 pontos vizinhos para varredura em todas as simulações realizadas neste estudo.

Primeiro, o esquema varre o conjunto de dados à procura dos 'possíveis' sistemas pela comparação com os pontos de grade vizinhos. Contudo, para evitar a inclusão de sistemas mais fracos, é utilizado um critério conhecido como teste de curvatura mínima que requer o cálculo de um valor médio mínimo do Laplaciano da pressão sobre uma pequena área em torno do centro analisado. Isso assegura que cada sistema possua um mínimo de vorticidade ciclônica (ou anticiclônica) geostrófica (dada pela equação 1) que é diretamente proporcional ao Laplaciano da pressão.

$$\zeta_g = \frac{1}{\rho f} \nabla^2 p \quad (1)$$

Este procedimento é aplicado no esquema através dos parâmetros relacionados aos

critérios de intensidade. Dentre esses parâmetros, o principal é o que quantifica o mínimo Laplaciano mediado numa área para sistemas fechados, cujo valor utilizado foi de 0,5 calculado num raio de 3º de latitude. Foram feitos vários testes de sensibilidade para determinar esses valores, bem como aqueles relacionados aos principais parâmetros que comandam o esquema na primeira etapa do programa. No entanto, para a maior parte dos parâmetros foram considerados os valores predeterminados pelos próprios autores do esquema.

Contudo, a técnica ainda não é satisfatória quando o objetivo é identificar sistemas cujas dimensões são da mesma ordem que o espaçamento entre pontos de grade, ou quando o espaçamento não é tão pequeno se comparado ao deslocamento esperado entre os tempos de análises. Com o intuito de amenizar estes problemas, o método usado torna-se um pouco mais complexo do que o descrito, já que envolve o uso de uma rotina diferencial, com pressões

e derivadas da pressão sendo definidas por interpolação bicúbica. Esse esquema ainda permite a possibilidade da inclusão ou não de sistemas fechados (com pelo menos uma isóbara fechada) ou abertos (sem nenhuma isóbara fechada). Os centros de ciclones (anticiclones) fechados são localizados pela minimização (maximização) da pressão, enquanto os ciclones (anticiclones) abertos são identificados através de pontos de inflexão na superfície de pressão interpolada, e localizados minimizando-se (maximizando-se) o valor absoluto do gradiente de pressão. Neste trabalho são consideradas apenas as isóbaras fechadas.

A Figura 3.1, feita para sistemas de baixa pressão, esquematiza de modo mais claro o procedimento de procura em apenas uma dimensão (x). As curvas representam, respectivamente, a função de pressão $p(x)$, o módulo da primeira derivada $p_x(x)$, e a segunda derivada $p_{xx}(x)$ ou Laplaciano da função.

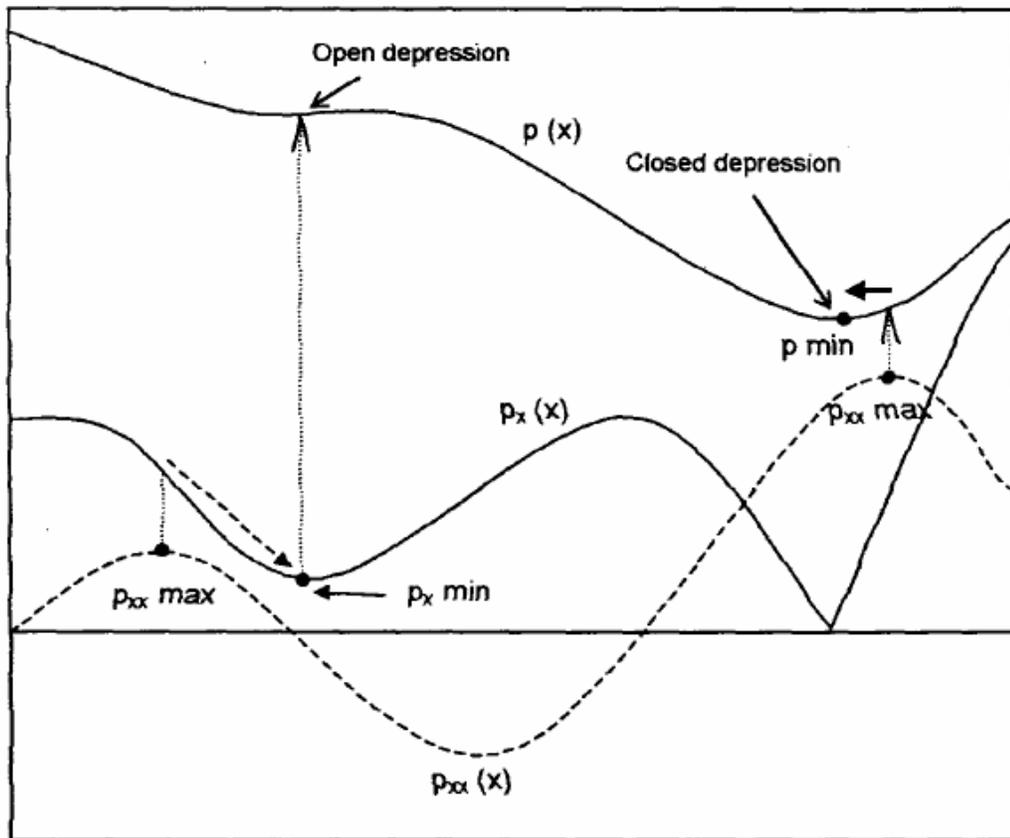


Figura 3.1 – Seção transversal da pressão e suas derivadas mostrando como o máximo de p_{xx} (ou o Laplaciano de p em duas dimensões) pode ser usado

como pontos iniciais na pesquisa por ambas depressões abertas e fechadas. Um centro de baixa ficará normalmente próximo a seu associado máximo do Laplaciano, mas não será necessariamente coincidente com ele, salvo o caso de um sistema exatamente simétrico. Pra mostrar este princípio, o laplaciano aqui é representado como uma função contínua: na prática isto é suficiente para maximizar a partir dos valores dos pontos de grade.

O segundo estágio do MS consiste em traçar a trajetória de cada sistema desde o instante de seu primeiro aparecimento até sua dissipação. No entanto, esse procedimento não é tão simples quanto possa parecer, pois muitas vezes num período de 24 horas os centros de sistemas viajam distâncias cuja ordem é comparável as suas separações, e com isso, não se pode ter total certeza para onde o centro foi durante este período.

Para construir trajetórias, o programa estima a nova posição e a mudança de pressão de cada sistema em cada tempo de análise. O deslocamento é baseado numa ponderação do movimento durante o intervalo de tempo anterior e as velocidades médias climatológicas dos sistemas, ou seja,

$$r_{est}(t + \delta t) = r(t) + w_m \{r(t) - r(t - \delta t)\} + (1 - w_m) v_{av}(\phi(t)) \delta t + r_k \quad (2)$$

onde r é a posição estimada, t é o tempo, δt é o intervalo de tempo, v_{av} é a velocidade média climatológica do sistema, Φ é a latitude e r_k é um termo de pequena magnitude que depende da trajetória do sistema. A Figura 3.2 esquematiza essa ponderação.

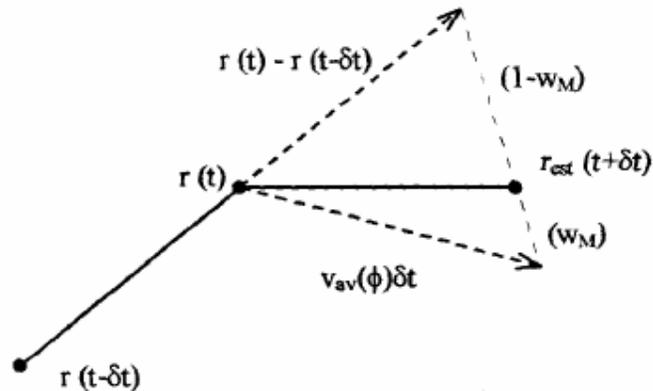


Figura 3.2 - Estimativa de uma nova posição ($r_{est}(t+\delta t)$) baseada nos pesos w_M do deslocamento prévio, $r(t)-r(t-\delta t)$, e $(1-w_M)$ do deslocamento baseado nas velocidades médias dos ciclones $v_{av}(\phi)\delta t$ (Fonte: MS).

A estimativa da mudança de pressão é baseada na ponderação de tendência prévia e persistência, ou seja,

$$p_{est}(t + \delta t) = p(t) + w_p [p(t) - p(t - \delta t)] \quad (3)$$

Os fatores de ponderação (w_M e w_p) quantificam a “memória” do movimento passado e da tendência de pressão incorporadas na estimativa. Em todas as simulações deste trabalho considerou-se $w_p=0,0$ e $w_M=1,0$.

Em seguida, são calculadas as probabilidades de associação entre as posições previstas (m) e as atuais no novo período de análise (n), separadas por uma distância $rmn < rc$ (rc é o raio crítico cujo valor escolhido foi 12°). A probabilidade de cada par baseia-se numa função de decréscimo da separação entre eles e a diferença de pressão central, ou seja, envolve a inclusão de uma componente de diferencial de pressão no raio:

$$r_{mn}' = \sqrt{r_{mn}^2 + \left(\frac{\delta p_{mn}}{k_{rp}}\right)^2} \quad (4)$$

onde k_{rp} é uma constante de ajuste.

Agora basta encontrar a combinação de associações mutuamente exclusivas para a qual o produto das probabilidades seja máximo. Na prática, as combinações mais prováveis de associação são encontradas maximizando-se a soma das funções das probabilidades, isto é,

$$P_{mn} = (P_{\max})_{mn} - \frac{r_{mn}^2}{r_c^2} \quad (5)$$

Essa função é máxima quando os sistemas são coincidentes ($r_{mn} = 0$) e zero quando eles estão deslocados por um raio igual ou maior que o raio crítico. **P_{máx}** assume um valor unitário para a associação envolvendo um sistema fechado, forte e não novo, mas emprega-se um valor menor de **P_{máx}** para associações que incluem sistemas novos (**P_{new}**), abertos (**P_{open}**), ou ambos (**P_{new} x P_{open}**) com a finalidade de minimizar a probabilidade de suas ocorrências nas trajetórias.

Essa maximização é alcançada pela escolha de associações de sistemas previstos/novos em grupos. Um exemplo destas associações é ilustrado na Figura 3.6. Os valores de probabilidade são dados para os possíveis ajustes (setas) de posições previstas e novas. Em cada grupo a combinação de associações com a maior ΣP_{mn} , é selecionada. No Grupo 1 existem apenas dois ajustes possíveis, Ac+Ee ($\Sigma P_{mn} = 0,6+0,5 = 1,1$) e Ec ($\Sigma P_{mn} = 0,8$). A combinação que tiver a mais alta probabilidade é então selecionada (no caso Ac+Ee). A combinação resultante para o Grupo 2 é Ba+Cb+Fd ($\Sigma P_{mn} = 1,9$). Depois de selecionar esses ajustes, conclui-se que os ciclones D e G são extintos e f constitui um novo elemento.

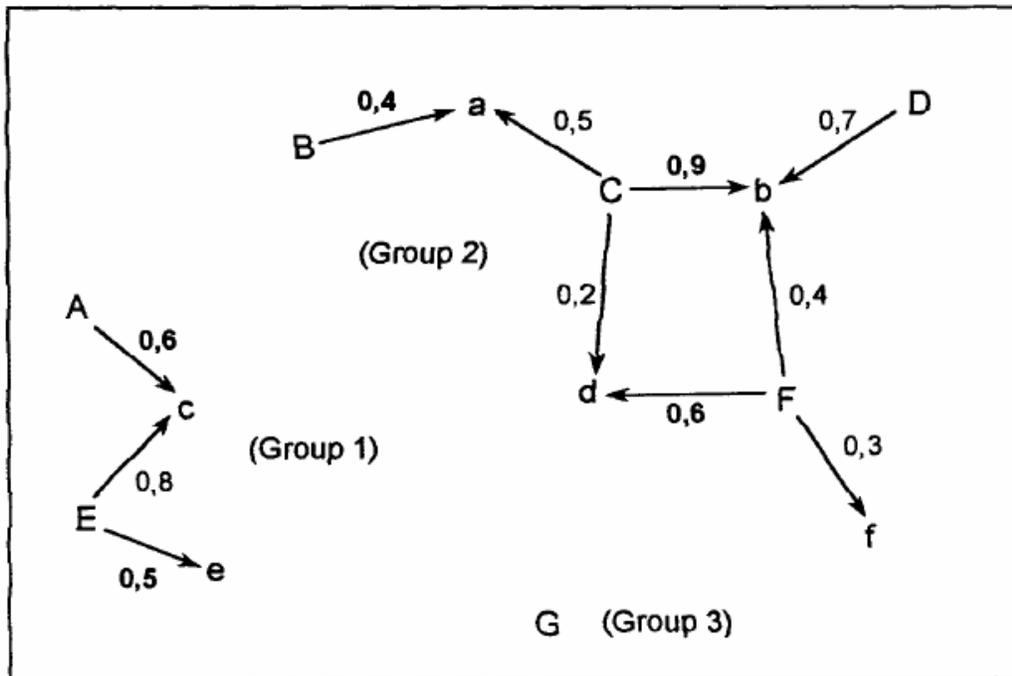


Figura 3.3 – Grupo de posições previstas (maiúsculas) e novas (minúsculas) de ciclones. Os valores entre os pares indicam a probabilidade de associação (Fonte: MSa).

Quanto às análises estatísticas de trajetórias (terceiro estágio), o programa tem ainda a habilidade de calcular médias zonais e regionais da freqüência (i.e., densidade e fluxo), velocidade, pressão central e tendência de pressão dos ciclones, e a freqüência de ciclogêneses. A inclusão de um sistema nas estatísticas foi condicionada a sua sobrevivência para um período de vida mínimo de 24 horas e os cálculos das freqüências foram feitos para faixas de latitude de 5°.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados resultados do programa CYCLOC, utilizando-se como dados de entrada os campos de pressão ao NMM da Reanálise 1 do NCEP/NCAR no período de 1961-1990. Inicialmente foram feitos alguns testes com o programa CYCLOC, a seguir foi elaborada uma climatologia sazonal a partir das trajetórias dos ciclones ao longo dos 30 anos estudados.

4.1 Testes Iniciais com o Programa CYCLOC

Inicialmente o programa CYCLOC foi integrado utilizando-se como dados de entrada os dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR do mês de dezembro de 2009. O objetivo é, através da análise de um curto intervalo de tempo (apenas um mês), compreender e avaliar o esquema de detecção de ciclogêneses e ciclólises e do traçado das trajetórias dos ciclones.

A Figura 4. 1 apresenta as trajetórias dos ciclones extratropicais para o domínio da América do Sul (50.2°S a 12.2°N / 25.8°W a 83°W) durante o mês de dezembro de 2009 (01/12/09 – 00Z a 31/12/09 – 18 Z) elaboradas a partir dos campos de pressão ao nível médio do mar provenientes da Reanálise 1 do NCEP/NCAR a cada 6 Z. Na coluna da esquerda as trajetórias são obtidas manualmente, a partir da análise do campo de pressão ao NMM (isóbaras traçadas a cada 2 hPa) e considerando-se apenas os ciclones fechados que tenham perdurado por mais de 3 horários consecutivos. Na coluna da direita encontra-se a saída do programa CYCLOC. Na análise manual (Fig 4.1 a) foram traçadas apenas 4 trajetórias, contudo existem outras 2 que não foram representadas por localizarem-se no sul do domínio do mapa (aproximadamente 50°S). Na Figura 4.1 b os números em azul representam o

número da trajetória e as informações detalhadas de cada uma são apresentadas em um arquivo de saída do programa CYCLOC (ver Tabela 4.1).

Comparando-se os dois campos da Figura 4.1 nota-se uma excelente concordância entre elas. A trajetória 23 da Figura 4.1 b corresponde a um ciclone que, de acordo com o programa CYCLOC, se formou em 18 Z do dia 3/12. Esta trajetória corresponde a trajetória azul da Figura 4.1 a, que manualmente foi traçada a partir de 00 Z 3/12 no nordeste do Rio Grande do Sul. A trajetória 62 da Figura 4.1 b foi iniciada, de acordo com o esquema CYCLOC, em 06Z do dia 12/12. Na Figura 4.1 a esta trajetória é representada pela cor vermelha, contudo, manualmente foi traçada a partir de 18 Z – 11/12 desde o Paraguai. A trajetória 70 da Figura 4.1 b (12 Z – 14/12), corresponde a trajetória roxa da Figura 4.1 a (06Z – 13/12), iniciada no sudeste da Argentina. Finalmente a trajetória 94 da Figura 1 b (iniciada em 18 Z 19/12) corresponde a trajetória verde da Figura 1 a.

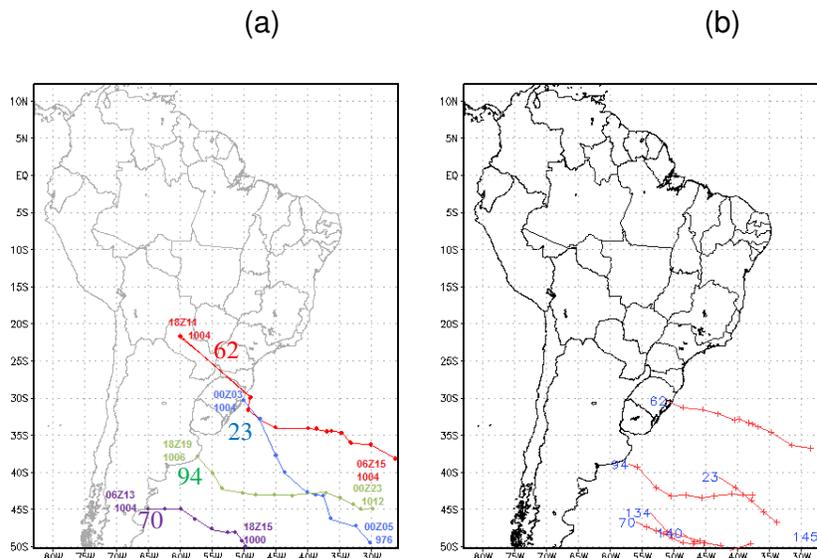


Figura 4.1 – Trajetórias dos ciclones extratropicais no período de 1 a 31 de dezembro de 2009, utilizando-se como dados de entrada a Reanálise 1 do NCEP/NCAR a cada 6 Z. Em a) trajetórias traçadas subjetivamente com o horário e dia (inicial e final) do mês de dezembro de 2009 e o número da trajetória de acordo com o programa CYCLOC e em b) trajetórias traçadas utilizando-se o programa CYCLOC. Os números em azul representam o

número da trajetória. As informações sobre cada uma delas são apresentadas na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Informações sobre as trajetórias no. 23, 62, 70, 94 e 134, extraídas do arquivo trk200912.out.

Trajetoária 23				
Data	Hora	Lat	Lon	Pressão
dd/mm	(Z)	(grau)	(grau)	(hPa)
0312	1800	-40.60	-43.00	994.85
0412	0000	-42.06	-40.42	988.76
0412	0600	-43.76	-37.84	982.62
0412	1200	-45.36	-35.90	978.80
0412	1800	-46.71	-33.90	976.76
0512	0000	-51.30	-30.59	975.91
0512	0600	-55.04	-29.63	969.83
0512	1200	-57.34	-29.08	964.83
0512	1800	-59.31	-29.63	960.15
0612	0000	-60.10	-29.14	959.02
0612	0600	-60.77	-27.84	961.81
0612	1200	-62.29	-23.01	961.92
0612	1800	-63.12	-19.46	966.12
0712	0000	-64.83	-12.70	964.70
0712	0600	-65.20	-12.72	968.56
0712	1200	-66.22	-8.57	967.95
0712	1800	-64.68	-12.56	970.52
0812	0000	-64.53	-10.13	970.78
0812	0600	-65.47	-7.12	971.55
Trajetoária 62				
Data	Hora	Lat	Lon	Pressão
dd/mm	(Z)	(grau)	(grau)	(hPa)
1212	0600	-30.39	-51.16	1002.28
1212	1200	-31.27	-48.60	1000.06
1212	1800	-31.51	-45.47	995.78
1312	0000	-32.11	-43.15	995.93
1312	0600	-32.95	-40.57	994.16
1312	1200	-32.86	-38.83	995.74
1312	1800	-33.31	-38.32	995.11
1412	0000	-33.50	-37.68	996.27
1412	0600	-33.89	-36.78	994.68
1412	1200	-34.55	-34.76	996.75
1412	1800	-36.31	-31.55	998.26
1512	0000	-36.72	-28.54	1002.55
1512	0600	-39.30	-22.53	1001.16
1512	1200	-40.41	-17.38	1000.64
1512	1800	-40.52	-12.44	999.13
1612	0000	-40.78	-7.9	999.52

Trajétória 70				
Data	Hora	Lat	Lon	Pressão
dd/mm	(Z)	(grau)	(grau)	(hPa)
1412	1200	-46.76	-56.02	1001.35
1412	1800	-47.31	-54.33	1000.56
1512	0000	-47.88	-52.78	1000.75
1512	0600	-48.28	-51.65	999.37
1512	1200	-48.81	-50.39	998.89
1512	1800	-49.45	-48.61	998.77
1612	0000	-49.61	-47.03	999.22
1612	0600	-49.52	-45.21	998.46
1612	1200	-49.83	-42.72	1000.69
Trajétória 94				
Data	Hora	Lat	Lon	Pressão
dd/mm	(Z)	(grau)	(grau)	(hPa)
1912	1800	-38.94	-57.17	1005.82
2012	0000	-39.29	-55.78	1004.78
2012	0600	-42.08	-52.81	1002.75
2012	1200	-43.17	-50.47	1001.71
2012	1800	-43.08	-48.12	1001.71
2112	0000	-43.40	-45.66	1001.34
2112	0600	-43.17	-43.72	1001.87
2112	1200	-42.89	-40.88	1004.89
2112	1800	-43.00	-39.11	1005.42
2113	0000	-43.90	-37.77	1006.74
Trajétória 134				
Data	Hora	Lat	Lon	Pressão
dd/mm	(Z)	(grau)	(grau)	(hPa)
2812	1800	-45.44	-53.68	996.41
2912	0000	-48.04	-51.04	994.30
2912	0600	-49.25	-45.88	992.39
2912	1200	-50.72	-41.15	992.51

As Figuras 4.2 a e b apresentam respectivamente o número de ciclogêneses e de ciclólises para o domínio da América do Sul. Na Figura 4.2 a estão evidenciadas as ciclogêneses referentes às seguintes trajetórias: a) no. 23 em aproximadamente 40°S/42.5°W; b) no. 62 em aproximadamente 30°S/50°W; c) no. 94 em torno de 38°S/58°W e d) 70, 134 e 140 ao sul de 45°S. Na Figura 4.2 b apenas duas ciclólises são evidenciadas por posicionarem-se dentro dos limites do mapa da América do Sul, as ciclólises associadas aos ciclones de trajetórias nos. 70 e 94. Como pode ser observado na Tabela 4.1, a trajetória 70 se encerra em -49.83°S/42.72°W e a trajetória 94 em 43.09°S/37.77°W.

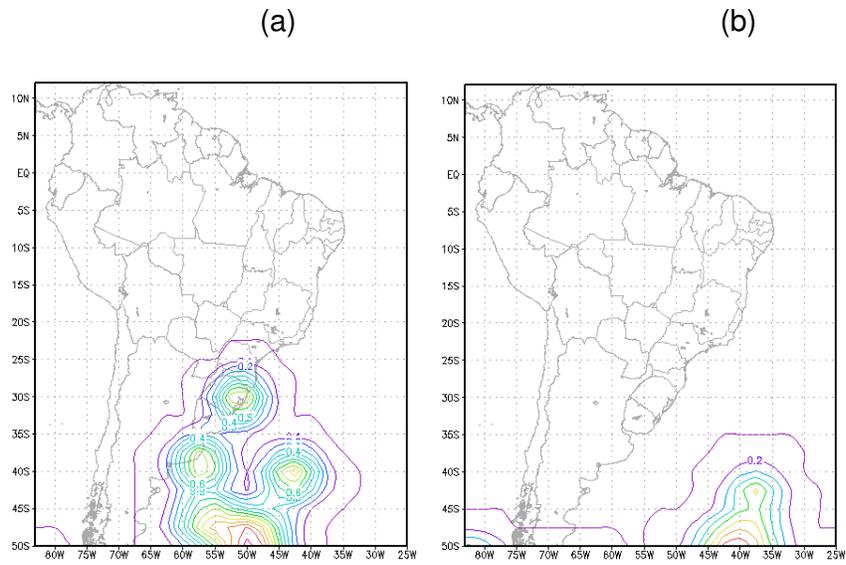


Figura 4.2 – Ciclogêneses (a) e ciclólises (b) detectadas pelo programa CYCLOC no período de 1 a 31 de dezembro de 2009, utilizando-se como dados de entrada a Reanálise 1 do NCEP/NCAR a cada 6 Z.

4.2 Climatologia Sazonal dos Ciclones

Os mapas contendo as trajetórias dos ciclones foram elaborados sazonalmente ano a ano desde 1961 até 1990, totalizando-se 30 mapas para cada estação do ano. Para o período do verão a série se estendeu desde o verão de 1962 (dez/1961, jan e fev/1962) até o verão de 1991 (dez/1990, jan e fev/1991). Para confecção dos mapas foram considerados todos os sistemas, independente do tempo de duração, ou seja, um ciclone que tenha se formado num determinado horário e que tenha desaparecido na horário seguinte (6 horas depois) será considerado nesta análise. Desta forma cada trajetória representa também uma ciclogênese.

Na Figura 4.3 os mapas das trajetórias dos ciclones são apresentados apenas para o período de inverno, a cada ano. As freqüências de ocorrência de ciclogêneses associadas às trajetórias apresentadas na Fig. 4.3 para o período de inverno são mostradas na Tabela 4.2. Nota-se na Figura 4.3 e na Tabela 4.2 uma grande variabilidade interanual, tanto na quantidade quanto na localização das trajetórias dos ciclones. Em determinados anos, como por exemplo em 1962 (Fig. 4.3 b) e 1990 (Fig. 4.3 ad) ocorreram apenas 17 ciclones na área em estudo durante o inverno, enquanto em 1972 (Fig. 4.3 l) foi observado o triplo, ou seja, 51 eventos. Nas demais estações do ano ocorre também grande variabilidade interanual, com mínimos em torno de 11 eventos e máximo em torno de 32 eventos. O menor número de eventos ocorreu na primavera de 1964, com apenas 10 sistemas em toda a área pesquisada. Com relação à localização dos ciclones, nota-se em certos anos, como por exemplo, 1983 (Fig. 4.3 w) um aumento na freqüência de ocorrência em baixas latitudes (entre 25 e 35°S), enquanto em outros anos as trajetórias estão mais concentradas nas altas latitudes (ver exemplo na Fig. 4.3 a, ano de 1961).

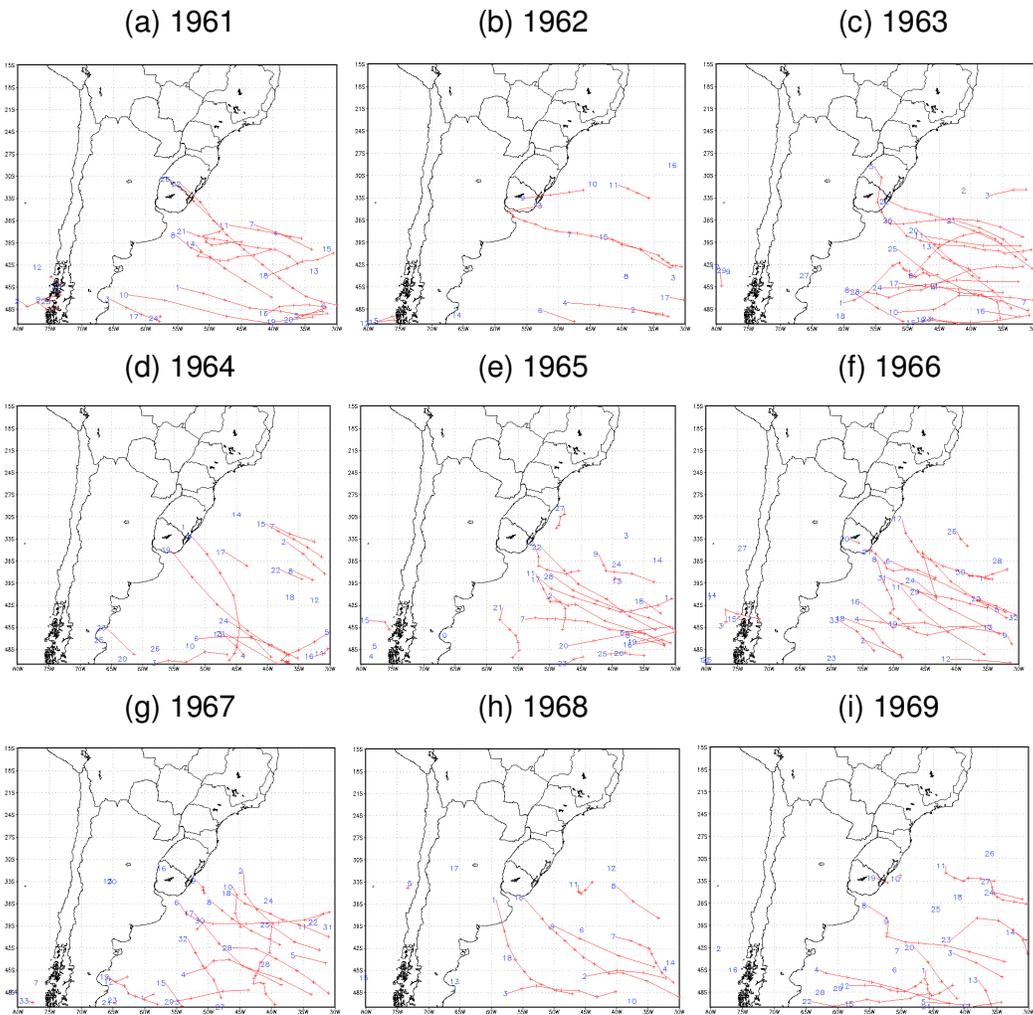


Fig. 4.3 – Trajetórias no período de inverno (JJA) para: (a) 1961; (b) 1962; (c) 1963; (d) 1964; (e) 1965; (f) 1966; (g) 1967; (h) 1968; (i) 1969; (j) 1970; (k) 1971; (l) 1972; (m) 1973; (n) 1974; (o) 1975; (p) 1976; (q) 1977; (r) 1978; (s) 1979; (t) 1980; (u) 1981; (v) 1982; (w) 1983; (x) 1984; (y) 1985; (z) 1986; (aa) 1987; (ab) 1988; (ac) 1989 e (ad) 1990, obtidas a partir dos dados de pressão ao NMM da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

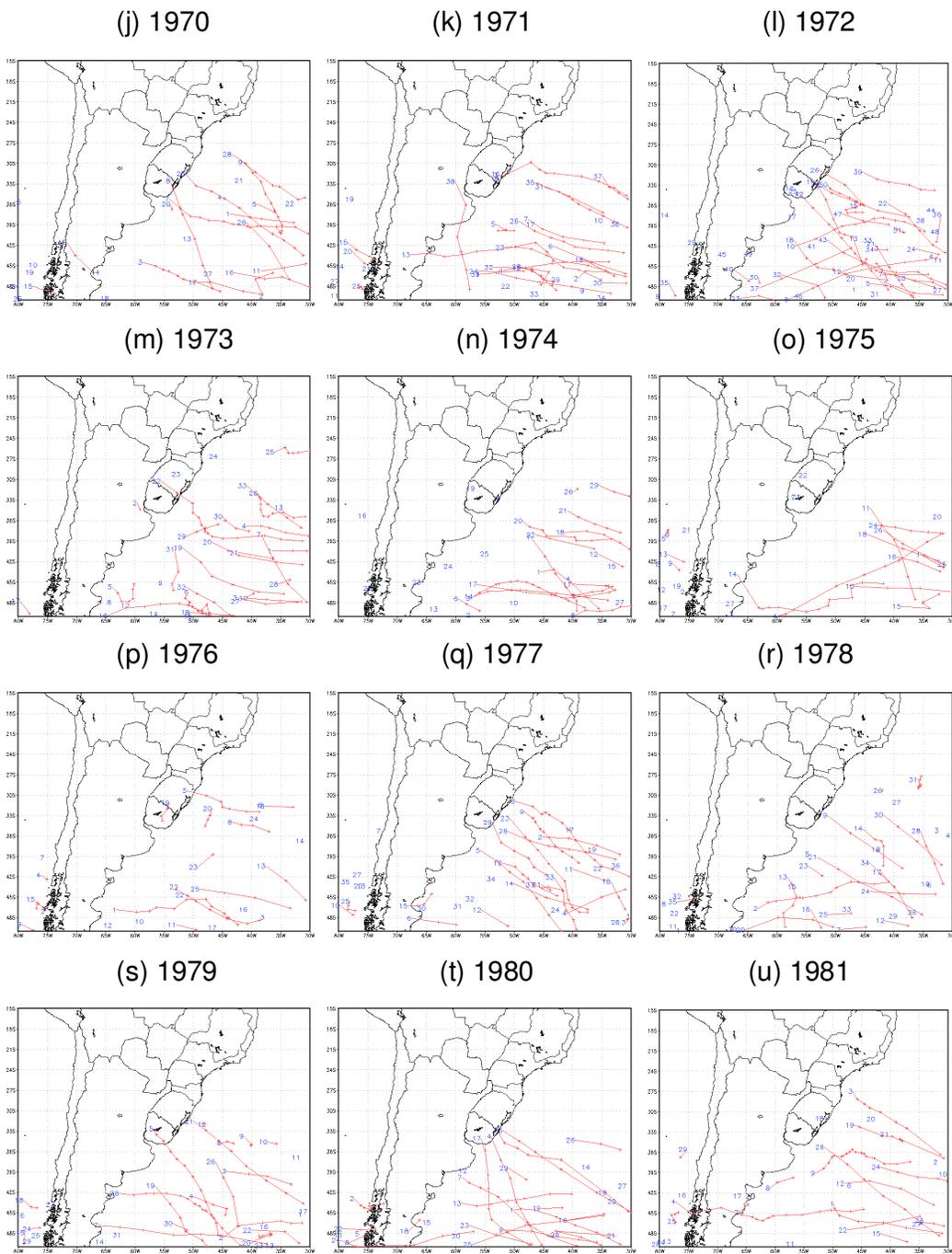


Fig. 4.3 – continuação.

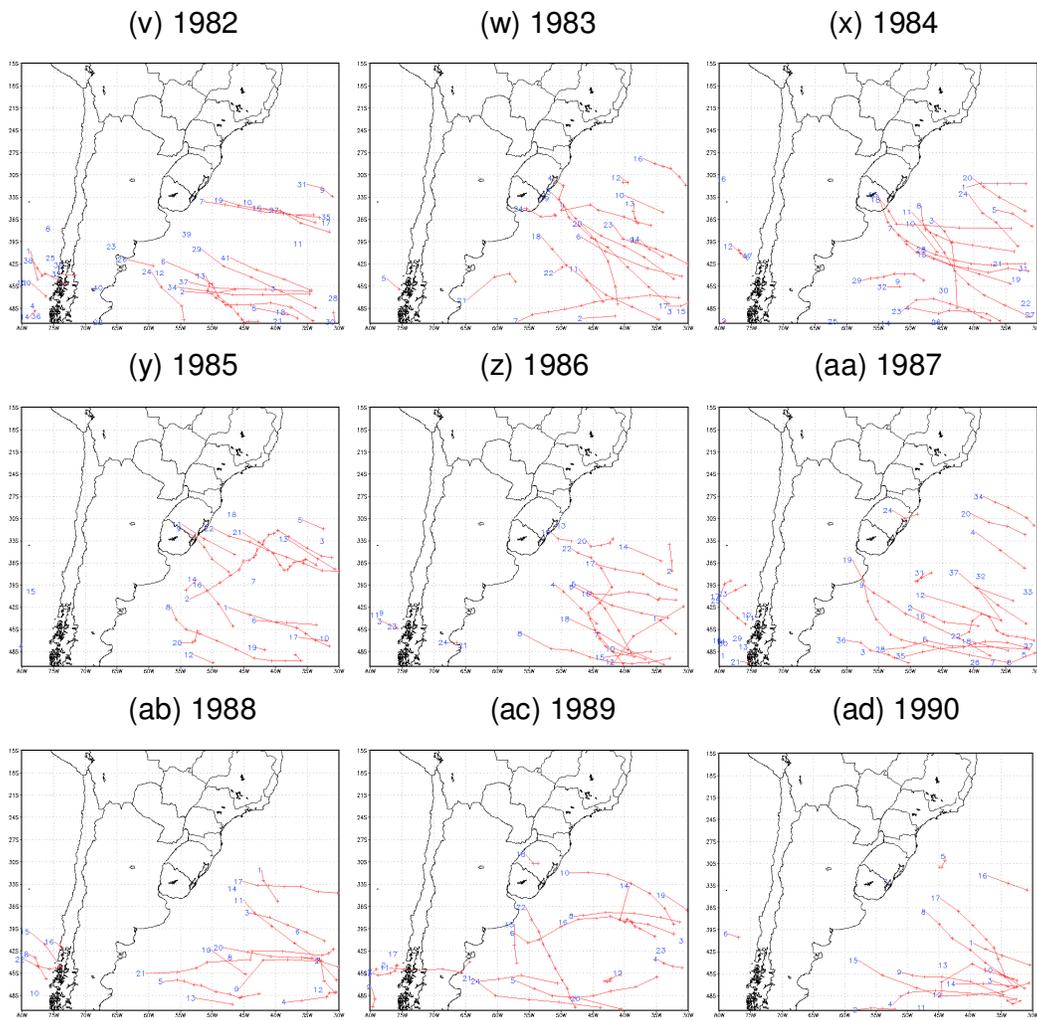


Fig. 4.3 – Final.

Tabela 4.2 – Freqüência de ocorrência de ciclogêneses para o inverno (JJA) no período de 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

Ano/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
1961	0	0	2	7	4	13	26
1962	0	1	4	2	2	8	17
1963	0	1	3	6	7	12	29
1964	0	1	7	2	3	13	26
1965	0	1	3	7	6	11	28
1966	0	0	5	8	13	7	33
1967	0	0	7	9	4	13	33
1968	0	0	5	4	4	5	18
1969	0	1	5	5	7	11	29
1970	0	2	4	7	4	11	28
1971	0	0	7	7	6	19	39
1972	0	0	8	10	15	18	51
1973	0	3	5	6	3	16	33
1974	0	0	5	5	6	13	29
1975	0	1	2	7	7	10	27
1976	0	1	6	2	6	10	25
1977	0	0	4	7	13	13	37
1978	0	2	4	7	8	15	36
1979	0	0	6	3	6	16	31
1980	0	0	5	4	7	14	30
1981	0	1	4	6	8	10	29
1982	0	0	7	6	15	13	41
1983	0	1	8	6	3	6	24
1984	0	0	8	5	9	10	32
1985	0	1	7	4	4	6	22
1986	0	0	5	5	7	7	24
1987	0	3	1	6	8	19	37
1988	0	0	3	4	8	7	22
1989	0	1	3	5	9	6	24
1990	0	1	3	2	5	6	17
Total	0	22	146	164	207	338	877

O total de ciclogêneses por faixa de latitude e por estação do ano no período analisado (1961-1990) é apresentado na Tabela 4.3. A média dos valores apresentados na Tabela 4.3 ao longo dos 30 anos estudados são apresentados na Figura 4.4. Verifica-se na Tabela 4.3 que a maior freqüência de ocorrência de ciclogêneses ocorre no inverno, com total de 877 ciclones no período de 30 anos analisados (1961-1990), seguido da primavera (681 ciclones), depois outono (com 654 sistemas) e finalmente o verão (570

sistemas). A frequência de ocorrência da ciclogênese aumenta em geral com aumento da latitude, sendo que entre 30 e 45°S não se nota forte tendência de aumento, e no caso das estações de transição (primavera e outono) ocorre de fato redução da ciclogênese com aumento da latitude.

Tabela 4.3 – Total de ciclogêneses no período 1961-1990 para as quatro estações do ano no período de 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

Ano/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
Inverno	0	22	146	164	207	338	877
Primavera	1	38	160	157	124	201	681
Verão	1	7	97	106	144	215	570
Outono	0	15	110	96	149	284	654
Total	2	82	513	523	624	1038	2782

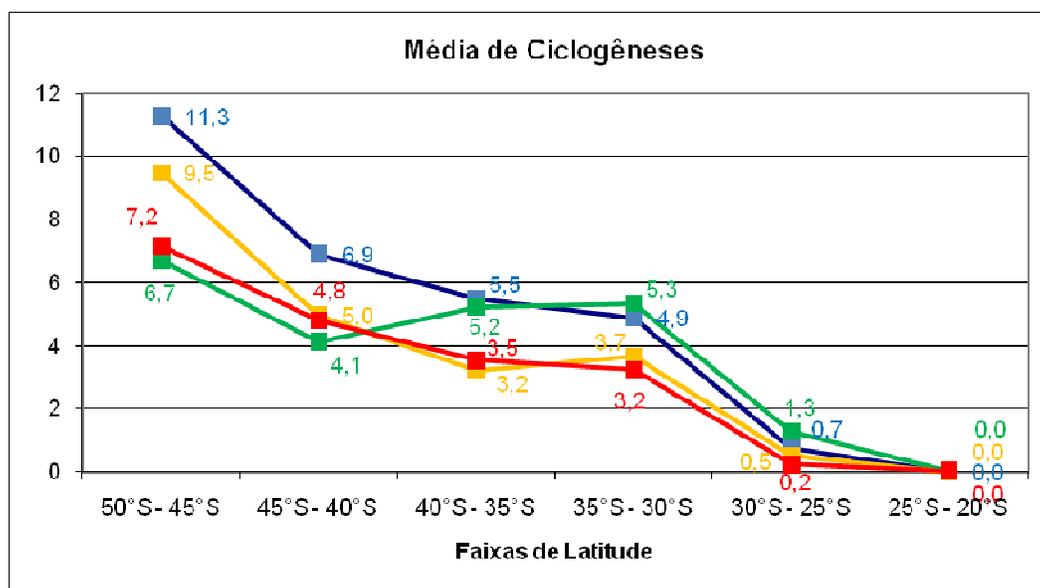


Figura 4.4 – Número médio de ciclogêneses durante o período de 1961-1990 por faixa de latitude para inverno (azul), primavera (verde), verão (vermelho) e outono (amarelo), obtido a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

De acordo com os valores apresentados (Fig. 4.4) a maior frequência de ocorrência de ciclogênese na área estudada foi observada na faixa entre 45 e 50°S, apresentando em média 4 sistemas no inverno, 3 no outono, 2 no verão e 2 na primavera.

Na Tabela 4.3 observa-se que durante os 30 anos estudados (período de 1961-1990) apenas dois ciclones foram observados na faixa de latitude entre 20 e 25°S.

O primeiro sistema foi observado no período de 20/10/1981 – 00 Z a 22/10/1981 – 06 Z, conforme apresentado na sequência de cartas de pressão ao nível médio do mar da Figura 4.5.

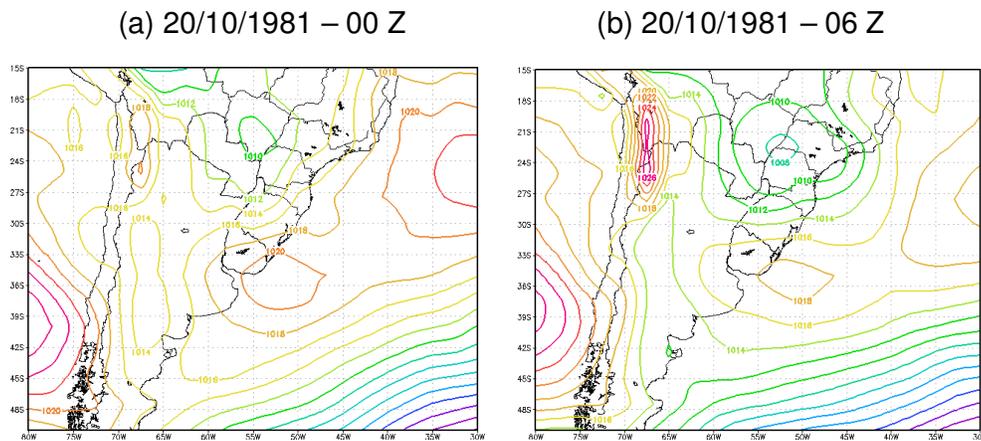
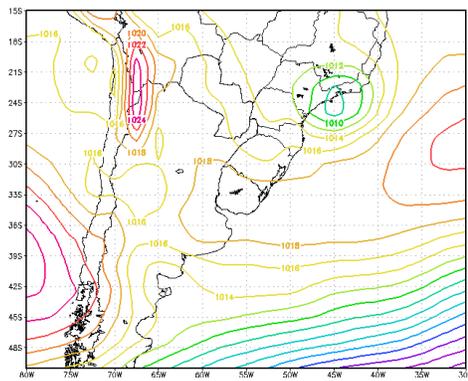
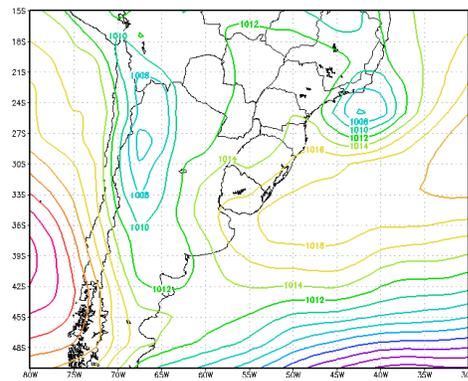


Figura 4.5 – Mapas de pressão ao nível médio do mar (a cada 4 hPa) para: (a) 20/10/1981 – 00 Z; (b) 20/10/1981 – 06 Z; (c) 20/10/1981 – 12 Z; (d) 20/10/1981 – 18 Z; (e) 21/10/1981 – 00 Z; (f) 21/10/1981 – 06 Z; (g) 21/10/1981 – 12 Z e (h) 21/10/1981 – 18 Z, elaboradas a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

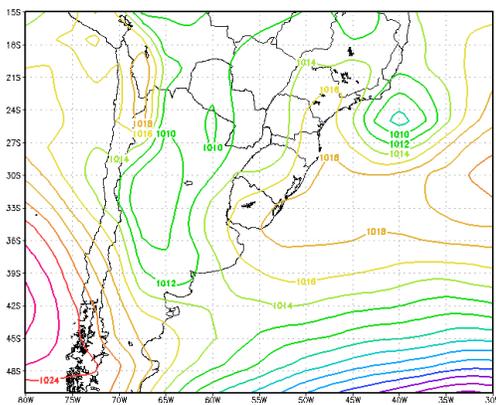
(c) 20/10/1981 – 12 Z



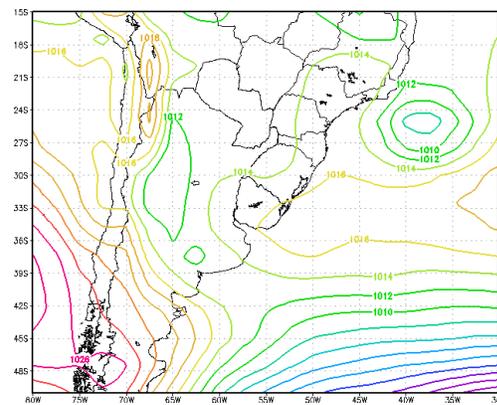
(d) 20/10/1981 – 18 Z



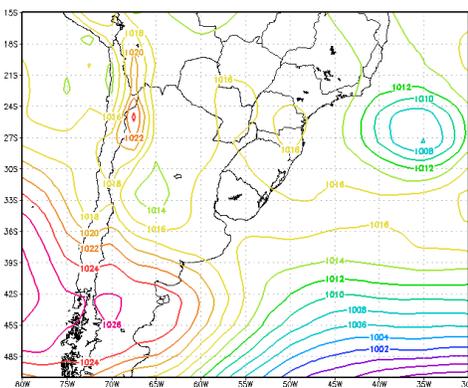
(e) 21/10/1981 – 00 Z



(f) 21/10/1981 – 06 Z



(g) 21/10/1981 – 12 Z



(h) 21/10/1981 – 18 Z

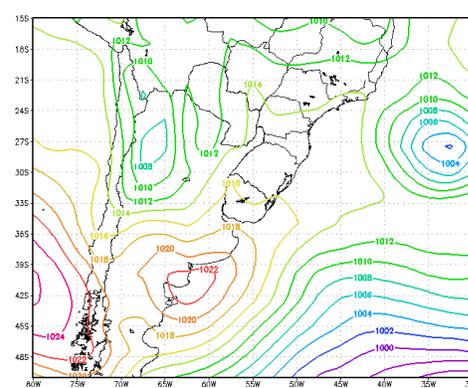


Figura 4.5 – Final.

O segundo sistema, apresentado na Fig. 4.6, foi observado no período de 02/12/1989 – 12 Z a 04/12/1989 – 06 Z.

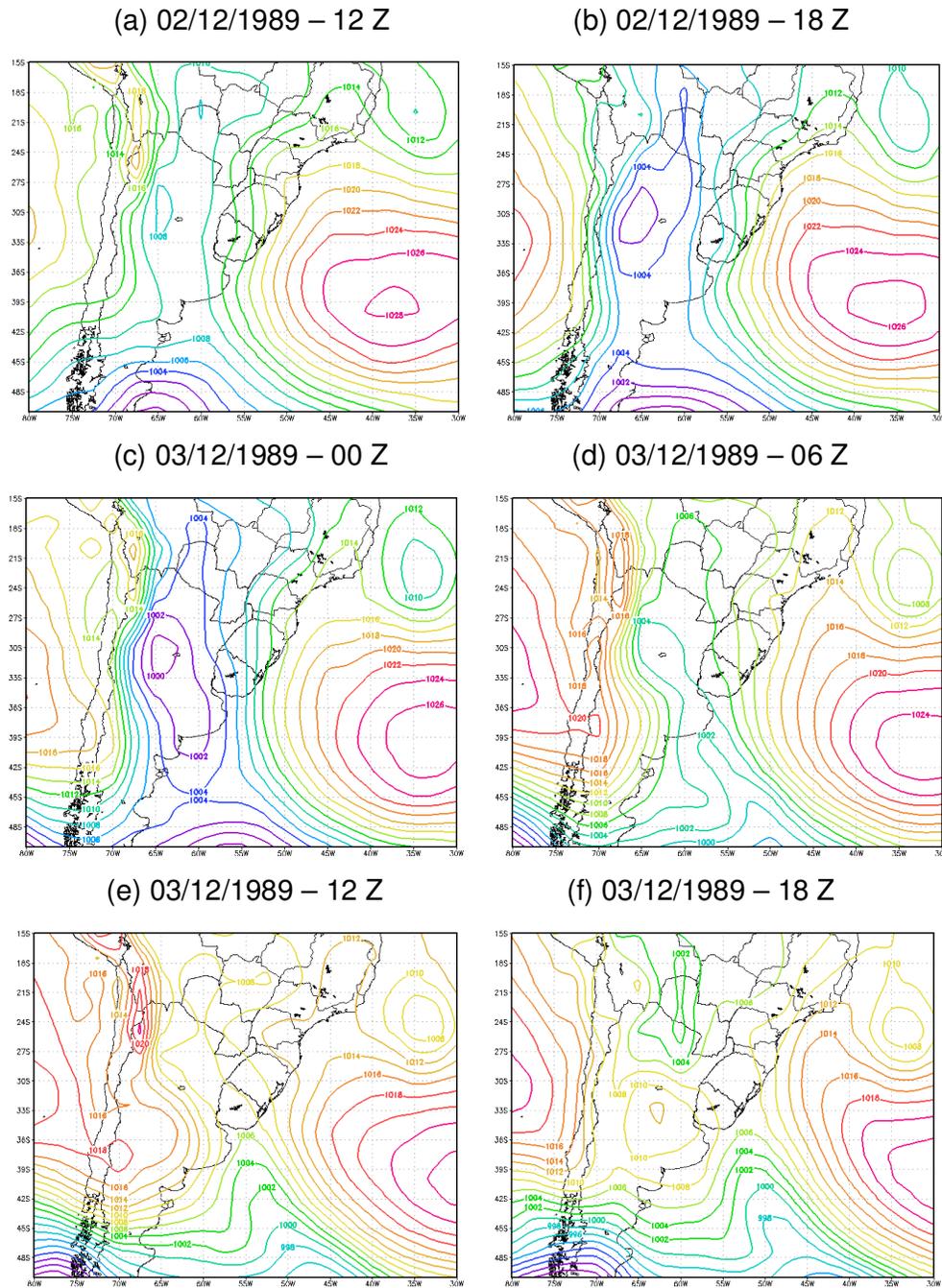
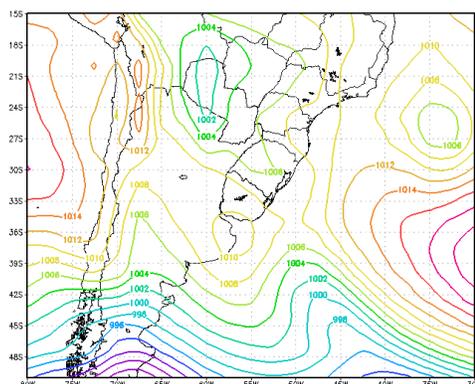


Figura 4.6 – Mapas de pressão ao nível médio do mar (a cada 4 hPa) para: (a) 02/12/1989 – 12 Z; (b) 02/12/1989 – 18 Z; (c) 03/12/1989 – 00 Z; (d) 03/12/1989 – 06 Z; (e) 03/12/1989 – 12 Z; (f) 03/12/1989 – 18 Z; (g) 04/12/1989 – 00 Z e (h) 04/12/1989 – 06 Z, elaboradas a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

(g) 04/12/1989 – 00 Z



(h) 04/12/1989 – 06 Z

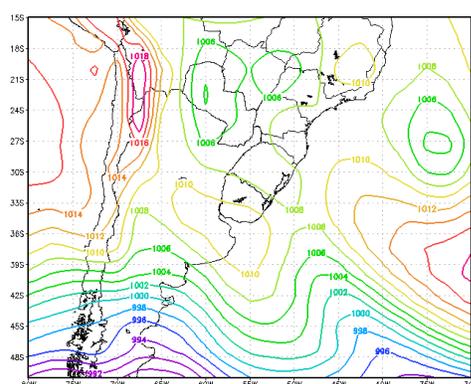


Figura 4.6 – Final.

Tais sistemas serão estudados em detalhe futuramente.

As direções das trajetórias, consideradas a partir da posição inicial e final do ciclone, e portanto levando-se em conta apenas os sistemas que duram no mínimo 6 horas, foram avaliadas por faixas de latitude para o inverno (Tabela 4.3), primavera (Tabela 4.4), verão (Tabela 4.5) e outono (Tabela 4.6).

Tabela 4.3 – Número total de trajetórias dos ciclones por direção e por faixa de latitude para o inverno (JJA) no período de 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

Dir/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
N	0	0	1	1	0	2	4
NE	0	2	1	1	6	11	21
E	0	5	45	51	67	142	310
SE	0	6	56	48	44	26	180
S	0	0	5	4	6	3	18
SW	0	2	3	3	1	3	12
W	0	0	1	2	0	2	5
NW	0	0	0	1	1	1	3
Total	0	15	112	111	125	190	553

Tabela 4.4 – Ídem Tabela 4.3, exceto para a primavera (SON).

Dir/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
N	0	0	2	1	0	0	3
NE	0	0	2	1	6	9	18
E	0	5	32	47	35	82	201
SE	0	14	58	63	33	13	181
S	0	4	2	8	4	5	23
SW	0	1	1	1	0	1	4
W	0	0	0	0	1	2	3
NW	0	0	0	0	1	1	2
Total	0	24	97	121	80	113	435

Tabela 4.5 – Ídem Tabela 4.3, exceto para o verão (DJF).

Dir/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
N	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	2	1	1	10	14
E	0	1	12	21	58	100	192
SE	0	3	29	33	29	8	102
S	1	1	4	3	0	0	9
SW	0	0	1	2	0	0	3
W	0	0	0	0	0	0	0
NW	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	5	48	60	88	118	320

Tabela 4.6 – Ídem Tabela 4.3, exceto para o outono (MAM).

Dir/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
N	0	0	1	1	1	2	5
NE	0	0	0	2	5	15	22
E	0	5	26	26	62	111	230
SE	0	6	39	33	30	21	129
S	0	0	2	0	2	2	6
SW	0	0	0	1	0	0	1
W	0	0	2	0	3	2	7
NW	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	11	70	63	103	153	400

Nota-se a partir das Tabelas 4.3 a 4.6 que não existe grande variação na direção das trajetórias dos ciclones por faixa de latitude, sazonalmente. A Tabela 4.7 apresenta os valores médios em porcentagem da frequência de ocorrência de trajetórias de ciclones por faixa de latitude e por direção para as quatro estações do ano. Nota-se que a direção predominante para todas as estações, considerando-se todas as faixas de latitude, é de leste (E), ou seja, os ciclones dirigem-se para leste, e em segundo lugar para sudeste (SE). Quase 90% das trajetórias dos ciclones estão concentradas em tais direções (E e SE). Entre 25 e 40°S os ciclones em geral movem-se para SE e nas latitudes mais altas (entre 40 e 50°S) a direção predominante é E. Nota-se baixíssima frequência de ocorrência de ciclones dirigindo-se para noroeste (NW), norte (N), oeste (W) e sudoeste (SW). O total de trajetórias nas quatro direções NW, N, W e SW fica em torno de 3%. As demais trajetórias, cerca de 7%, apresentam direções NE e S.

Tabela 4.7 – Porcentagem de trajetórias dos ciclones por direção e por faixa de latitude para a média do inverno (JJA), primavera (SON), verão (DJF) e outono (MAM) no período de 1961 a 1990, a partir dos dados da Reanálise 1 do NCEP/NCAR.

Dir/Lat	20-25°S	25-30°S	30-35°S	35-40°S	40-45°S	45-50°S	Total
N	0,00	0,00	0,22	0,17	0,06	0,22	0,67
NE	0,00	0,09	0,32	0,31	1,01	2,73	4,45
E	0,00	0,90	6,44	8,27	13,45	25,88	54,94
SE	0,00	1,69	10,57	10,43	8,03	3,86	34,57
S	0,08	0,31	0,78	0,87	0,63	0,55	3,21
SW	0,00	0,15	0,27	0,41	0,05	0,19	1,07
W	0,00	0,00	0,17	0,09	0,24	0,33	0,84
NW	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,10	0,25
Total	0,08	3,14	18,76	20,60	23,56	33,87	100,00

4.3 Evolução Temporal das Ciclogêneses

A análise da evolução temporal das ciclogêneses foi realizada sazonalmente, considerando-se o período de 1961-1990.

A Figura 4.7 apresenta a evolução temporal do número total de ciclogêneses ao longo dos 30 anos analisados (1961-1990) para as quatro estações do ano por faixa de latitude. Nota-se através das equações de tendência que nos períodos de outono e inverno nas faixas de latitude entre 40 e 45°S e entre 45 e 50°S ocorre um aumento da frequência de ocorrência de ciclogênese, que apesar de não ser muito pronunciado é maior do que nas demais faixas de latitude. O coeficiente angular de tais retas, obtidas para o outono e inverno nas regiões entre 40 e 45°S e 45 e 50°S varia entre 0,06 e 0,10 e o coeficiente de determinação (R^2) oscila entre 0,02 e 0,16. O valor de R^2 sendo próximo de zero indica que a reta não está bem ajustada à distribuição dos dados. Também no período da primavera na faixa de latitude

entre 25 e 30°S ocorre tendência de aumento da ciclogênese, com coeficiente angular de 0,07 e $R^2=0,29$. As tendências de redução da ciclogênese mais acentuadas ocorrem no período do verão para faixa de latitude entre 30 e 35°S, com coeficiente angular de -0,13 e $R^2 = 0,10$ e para o período da primavera entre 45 e 50°S, com coeficiente angular de -0,10 e $R^2 = 0,07$. Para as demais latitudes e nas demais estações do ano a tendência é muito próxima de zero, ou seja, sem tendência de aumento ou redução do número de trajetórias ao longo do período de 30 anos.

(a)

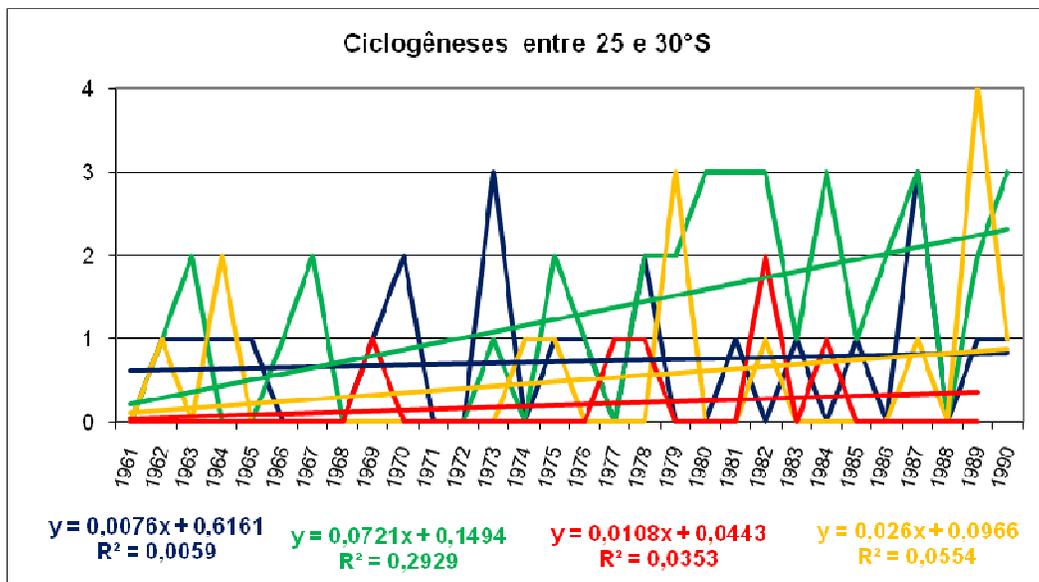
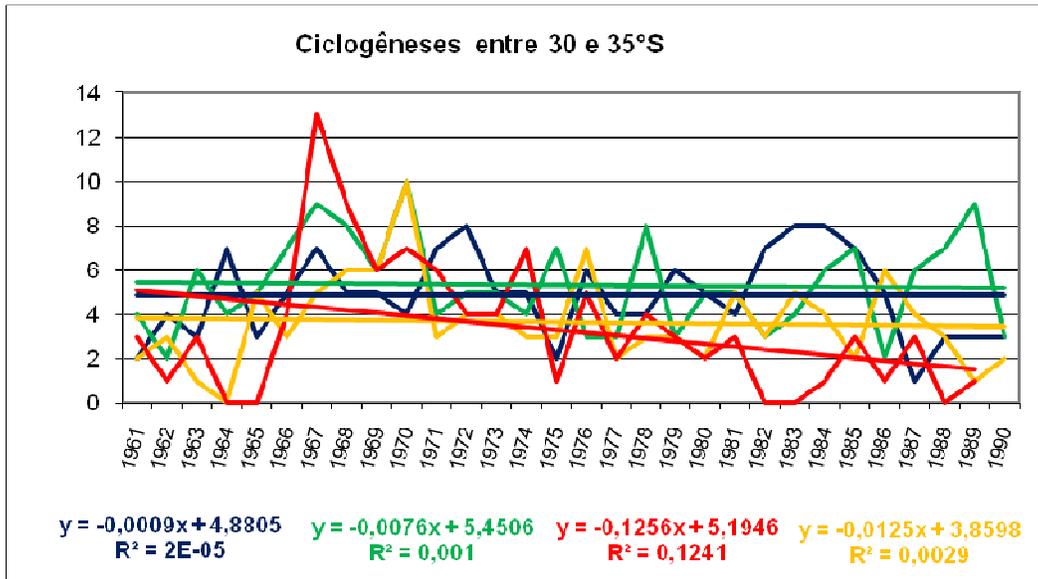


Fig. 4.7 – Número total de ciclogêneses nos períodos de inverno (azul); primavera (verde); verão (vermelho) e outono (amarelo) por ano, obtidas a partir da Reanálise do NCEP/NCAR, para as faixas de latitude entre: (a) 25-30°S; (b) 30-35°S; (c) 35-40°S; (d) 40-45°S e (e) 45-50°S. As linhas de tendência e suas equações, assim como o coeficiente de determinação (R^2) são incluídos na figura utilizando-se os mesmos padrões de cor: azul para inverno, verde para primavera, vermelho para verão e amarelo para outono.

(b)



(c)

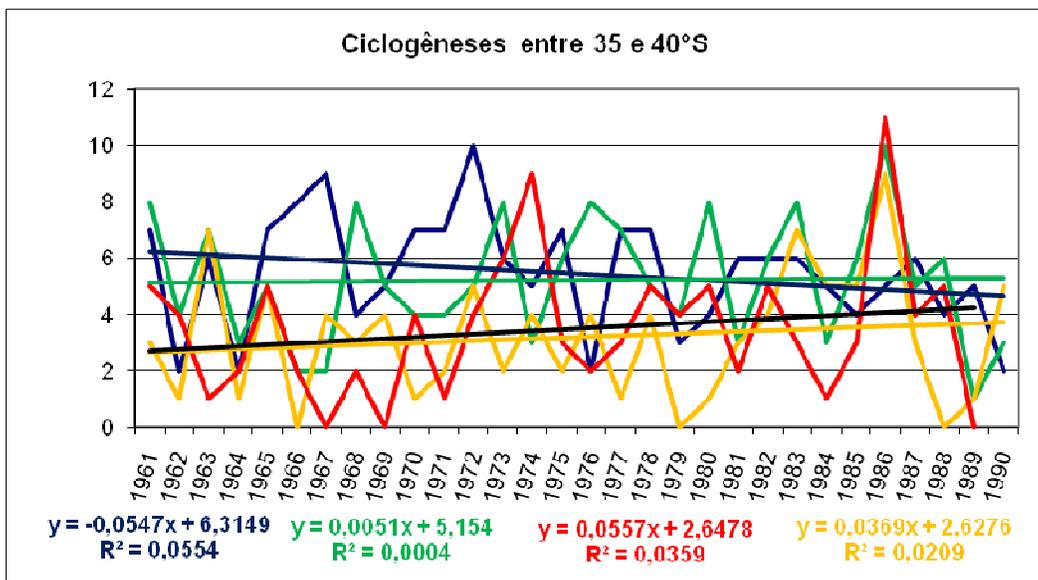
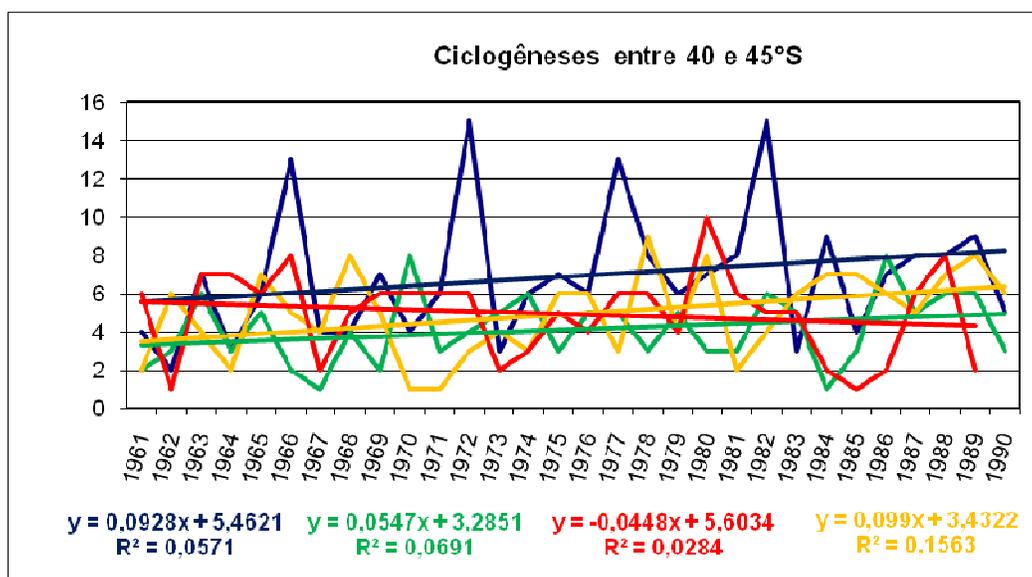


Figura 4.7 - continuação

(d)



(e)

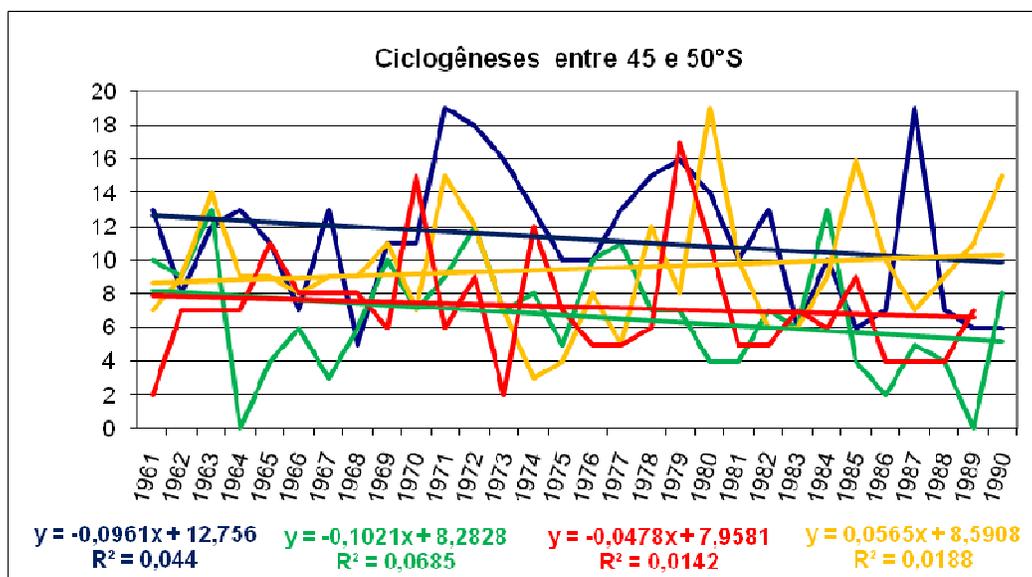


Figura 4.7 – Final.

Considerando-se o total anual de ciclogêneses para todas as faixas de latitude, nota-se na região entre 40 e 45°S uma nítida tendência de aumento da ciclogênese, como mostra a Figura 4.8.

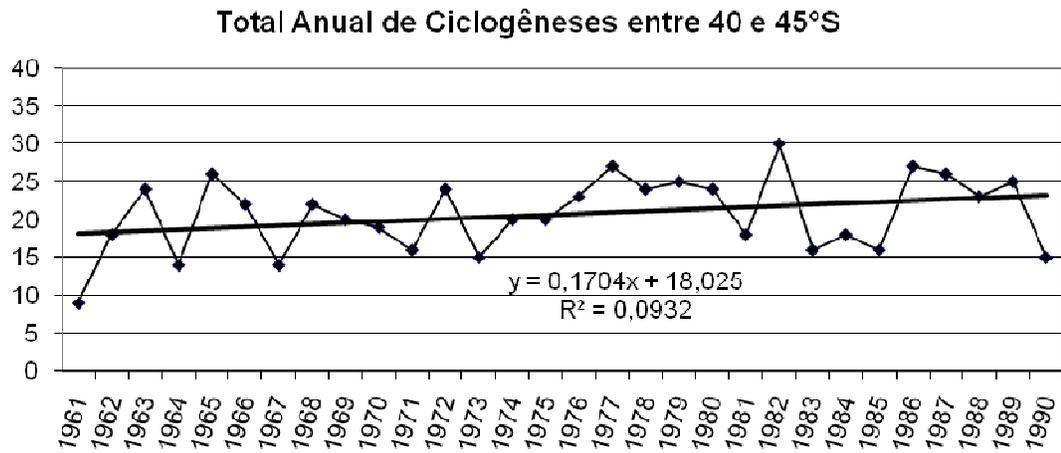


Fig. 4.8 – Número total de ciclogêneses por ano obtido a partir da Reanálise do NCEP/NCAR, para a faixa de latitude entre 40 e 45°S. A linha de tendência e sua equações, assim como o coeficiente de determinação (R^2) são incluídos na figura.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi elaborada uma avaliação da frequência de ocorrência de ciclogêneses e das direções das trajetórias dos ciclones na região do Atlântico Sul, utilizando como dados de entrada os dados gerados pela Reanálise do NCEP/NCAR para o período de 1961-1990.

Os resultados mostraram que existe uma grande variabilidade interanual na frequência de ocorrência de ciclogêneses na área estudada. O número de ciclones, considerando toda a área em estudo, variou de 10 sistemas na primavera de 1964 a 51 eventos no inverno de 1972.

A maior frequência de ocorrência de ciclogêneses ocorre no inverno, seguido da primavera, depois outono e finalmente o verão, com cerca de 29, 23, 22 e 19 sistemas por mês, respectivamente. A frequência de ocorrência da ciclogênese aumenta em geral com aumento da latitude, exceto entre 30 e 45°S onde não se nota forte tendência de aumento, e no caso das estações de transição (primavera e outono) onde ocorre de fato redução da ciclogênese com aumento da latitude. A maior frequência de ocorrência de ciclogênese na área estudada foi observada na faixa entre 45 e 50°S, apresentando em média 4 sistemas no inverno, 3 no outono, 2 no verão e 2 na primavera.

Com relação a direção das trajetórias dos ciclones verifica-se que a direção predominante para todas as estações, considerando-se todas as faixas de latitude, é de leste (E), ou seja, os ciclones dirigem-se para leste, e em segundo lugar para sudeste (SE). Essas 2 direções representam aproximadamente 90% das ocorrências. Entre 25 e 40°S os ciclones em geral movem-se para SE e nas latitudes mais altas (entre 40 e 50°S) a direção

predominante é E. Nota-se baixíssima freqüência (cerca de 3%) de ocorrência de ciclones dirigindo-se para noroeste (NW), norte (N), oeste (W) e sudoeste (SW). As demais trajetórias, cerca de 7%, apresentam direções NE e S.

A análise da quantidade de ciclogêneses ao longo dos anos analisados (1961 a 1990) indica tendência de aumento entre 40 e 45°S e entre 45 e 50°S nos períodos de outono e inverno e entre 25 e 30°S na primavera. As tendências de redução da ciclogênese mais acentuadas ocorrem no período do verão para faixa de latitude entre 30 e 35°S e para o período da primavera entre 45 e 50°S. Para as demais latitudes e nas demais estações do ano a tendência é muito próxima de zero, ou seja, sem tendência de aumento ou redução do número de trajetórias ao longo do período de 30 anos. Analisando-se os totais anuais encontra-se tendência de aumento de ciclogênese na faixa entre 40 e 45°S.

Nas etapas futuras deste trabalho o programa CYCLOC será integrado, utilizando-se como dados de entrada os campos de pressão ao nível médio do mar gerados pelo modelo Eta (versão climática) para o o clima presente (1961-1990). Tais análises serão confrontadas com os resultados obtidos para a Reanálise do NCEP/NCAR. Caso os resultados indiquem boa concordância, como por exemplo o aumento da ciclogênese na faixa de latitude entre 40 e 45°S, será feita uma avaliação dos ciclones no clima futuro (2010-2100) a partir das saídas do modelo Eta.

BIBLIOGRAFIA

AHRENS , C.D., 2000: Meteorology Today.

ARAKAWA, A. LAMB, V. R., 1977: Computational design of the basic dynamical process of the UCLA generation circulation model. *Methods in Computational Physics*, v. 17, p. 173-265.

BJERKNES, J., 1918: On the structure of moving cyclones. *Geofys. Publ.*

BLACK, T. L., 1994: The new NMC mesoscale Eta model. Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 265-278.

CHOU, S. C., 1986: Modelo regional Eta. *Climanálise Especial Edição Comemorativa de 10 anos. São José dos Campos.*

FEDOROVA, N., 2001: *Meteorologia Sinótica II. UFPel.*

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C.A.; BANKS, H., GREGORY, H.M.; JOHNS, T.C.; MITCHELL, J.F.B.; WOOD, R.A., 2000: The simulation of SST, sea ice extent and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16:147– 168, doi:10.1007/s003820050010.

GRELL, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764-787.

GUSTAFSSON, M.E.R., 1997: Raised levels of marine aerosol deposition owing to increased storm frequency: A cause of forest decline in southern Sweden? *Agric. For. Meteorol.*, 84, 169-177.

HOLTON, J., R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology. Ed. 4.*

IPCC, 2007: CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GADIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JONAWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWISK, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLD, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D., 1996: The NCEP/NCAR 40- Year Reanalysis Project. Bulletin of the Meteorological Society, v.77, p. 437-471.

KANAMITSU, M., J.C. ALPERT, K. A. CAMPANA, P. M. CAPLAN, D. G. DEAVEN, M. IREDELL, B. KATZ, H. L. PAN, J. SELA E G.H. WHITE, 1991: Recent changes implemented into the global forecast system at NCEP. Weather and Forecasting, 6, 1-12.

LAMBERT, S. J., 1996: Intense extratropical Northern Hemisphere winter cyclone events: 1989-1991. Journal of Geophysical Research, 101, 21319-21325.

MCCABE, G. J., M. P. CLARK, M. C. SERREZE, 2001: Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity. J. Clim., 14, 2763-2768.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G., 1988: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. Monthly Weather Review, v. 116, p. 1493-1518.

PALMEIRA, R. M. J., 2003: Climatologia de Ciclones Extratropicais na Região da América do Sul. Monografia de Graduação. Departamento de Meteorologia, UFRJ.

PESQUERO, F. J.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A. N.; MARENGO, J.A., 2009. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theor. Appl. Climatol.*, published on line 11 March 2009. Doi: 10.1007/s00704-009-0123-z.

POPE, V.D.; GALLANI, M.L.; ROWNTREE, P.R.; STRATTON, R.A., 2000: The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics*, 16:123–146, doi:10.1007/s003820050009.

WANG, X. L., V. R. SWAIL, F. W. ZWIERS, 2006: Climatology and changes of extratropical storm tracks and cyclone activity: Comparison of ERA-40 with NCEP/NCAR Reanalysis for 1958-2001. *J. Clim.*, 19, 3145-3166.