

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

**CLIMATOLOGIA DOS CICLONES
EXTRATROPICAIS NA REGIÃO DO ATLÂNTICO
SUL UTILIZANDO O MODELO ETA-HADCM3:
CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS**

ARIANE CAMPANI MATOS

ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª Claudine Pereira Dereczynski

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ
Maio, 2013

ARIANE CAMPANI MATOS

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Aprovada por:

Prof^a. Dr^a. Claudine Pereira Dereczynski
Departamento de Meteorologia – IGEO - UFRJ

D.Sc. Chou Sin Chan
CPTEC - INPE

Prof^o. Alfredo Silveira da Silva
Departamento de Meteorologia – IGEO - UFRJ

M. Sc. Ronaldo Maia de Jesus Palmeira
COPPE - UFRJ

Rio de Janeiro, RJ
Maio, 2013

Ficha Catalográfica:

Campani, Ariane

**“CLIMATOLOGIA DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NA REGIÃO DO
ATLÂNTICO SUL UTILIZANDO O MODELO ETA-HADCM3: CLIMA
PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS”**

Rio de Janeiro, 2013, pp 62. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Dissertação para a obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela minha vida, minha saúde e por me guiar por caminhos onde pude obter glórias que me fizeram sorrir e fracassos que me fizeram aprender.

Aos meus pais que me ensinaram a ser quem eu sou hoje, que estiveram sempre ao meu lado e me deram todo o apoio na busca pelos meus sonhos. Agradeço a eles que acreditaram em mim, quando ninguém mais acreditou.

Agradeço a minha família que esteve presente na minha vida, me dando amor, carinho e o suporte que precisei quando decidi a profissão que eu queria exercer. Agradeço principalmente ao meu avô, que sempre acreditou em mim e no meu potencial como pessoa. Infelizmente ele não pode estar presente na conclusão dessa etapa da minha vida, mas sei que está feliz por mim.

Ao meu namorado Guilherme pelo amor e carinho, além de toda ajuda que precisei nos momentos em que pensei que não conseguiria seguir em frente. Por estar ao meu lado nesta caminhada e me aconselhar a não desistir dos meus objetivos, assim como por todo auxílio na realização e conclusão deste trabalho.

A minha orientadora Claudine, que sempre acreditou em mim e que me ensinou muito, tanto academicamente, quanto profissionalmente. Agradeço por ter me dado à oportunidade de trabalhar ao seu lado e ser minha mentora nesta jornada durante todo o curso de Meteorologia.

A Dra. Chou e ao CNPQ que me deram a oportunidade de realizar este trabalho que foi de suma importância na minha formação acadêmica.

Ao INPE que possibilitou a aquisição dos dados do modelo Eta-HadCM3, sendo representado pela Dra. Chou.

Ao Ronaldo pela grande ajuda com o esquema numérico CYCLOC, além de ter sido bastante solícito em todos os momentos da realização deste trabalho.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram nesta jornada e que proporcionaram momentos inesquecíveis durante estes anos. Que entenderam as minhas ausências nos momentos em que tive que me dedicar ao trabalho e que me apoiaram nas minhas escolhas profissionais e pessoais. Agradeço especialmente as minhas amigas Camila, Jéssica e Alice e ao meu amigo Fellipe.

A todos os professores do departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro que contribuíram para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Estes se mostraram educadores acadêmicos e também amigos e colegas de trabalho. Um agradecimento especial aos professores Wallace, Justi e Edilson.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos ciclones sobre América do Sul no clima futuro (2011-2099) utilizando o modelo regional Eta-HadCM3, com 40 km de resolução horizontal e quatro simulações. Inicialmente foi feita uma avaliação do modelo Eta-HadCM3 no clima presente (1961-1990), a partir da climatologia de ciclones gerada com a Reanálise ERA-Interim (1979-2009). A detecção dos ciclones é elaborada utilizando-se o esquema numérico CYCLOC (Murray e Simmonds, 1991). Os resultados da avaliação do clima presente indicam que as simulações do modelo Eta-HadCM3 estão subestimando a quantidade total de ciclogêneses nas altas latitudes, o que pode estar relacionado com o fato do domínio do modelo está limitado a latitude de 50,2°S. De acordo com o ERA-Interim (Eta-HadCM3) ocorrem em média 106 (40) ciclogêneses por ano, ou seja, o Eta-HadCM3 configura apenas 40% dos ciclones. A maior ocorrência de ciclogêneses no inverno (29,2 sistemas) e menor no verão (23,5) obtidos com o ERA-Interim é simulada corretamente pelo Eta-HadCM3, apesar da forte subestimativa. Ainda de acordo com o ERA-Interim, dos ciclones que se formam nas altas latitudes (35°-50°S), cerca de 60% (40%) movem-se para leste (sudeste). E nas baixas latitudes (20°-35°S), os ciclones movem-se preferencialmente para sudeste e leste (cerca de 80%). Este mesmo padrão foi representado pelas integrações do Eta-HadCM3. Da análise espacial observa-se que o ERA-Interim configura um centro de máxima ocorrência de ciclogêneses próximo ao Uruguai, nas quatro estações do ano, e o Eta-HadCM3, apesar da menor quantidade de ciclones, apresenta também este núcleo na mesma posição nos meses de outono, inverno e primavera. Já nos meses de verão, o Eta-HadCM3 desloca este núcleo mais para norte, posicionando-o próximo ao litoral do Sul do Brasil. Para o clima presente o ERA-Interim mostra uma tendência de redução de ciclogêneses entre 20 e 50°S, o que em geral, foi representado pelas integrações do modelo Eta-HadCM3, exceto na integração MID que apresentou um ligeiro aumento na faixa entre 20-35°S. As projeções do modelo Eta-HadCM3 para o futuro apresentaram-se similares às suas tendências encontradas para o clima presente, indicando que, de acordo com este modelo, não ocorrerão mudanças significativas no comportamento dos ciclones para o futuro.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the behavior of cyclones over South America in future climate (2011-2099) using Eta-HadCM3 model with 40km of horizontal resolution and four members. Initially, it was performed an evaluation of Eta-HadCM3 model in the present climate (1961-1990), using ERA-Interim Reanalysis's climatology (1979-2009). The detection of cyclones was performed using the CYCLOC scheme (Murray and Simmonds, 1991). The results indicates that the total amount of cyclogenesis simulated by Eta-HadCM3 in the high latitudes is underestimated, which may be related to the fact that the model domains is limited to a latitude of 50.2°S. According to ERA-Interim (Eta-HadCM3) an average of 106 (40) cyclogenesis occurs each year, meaning that Eta-HadCM3 represents only 40% of cyclones. The larger occurrence of cyclogenesis in winter (29.2 systems) and lower in summer (23.5) obtained with ERA-Interim is well simulated by Eta-HadCM3, despite the strong underestimation. Also, in accordance with ERA-Interim, the cyclones formed at high latitudes (35°-50°S), about 60% (40%) move eastward (southeastward). At low latitudes (20°-35°S), cyclones preferentially move to the southeastward and eastward (about 80%). This same pattern was represented by Eta-HadCM3. From spatial analysis it is noted that ERA-Interim and Eta-HadCM3 configure a center of maximum occurrence of cyclogenesis near Uruguay (during the four seasons at ERA-Interim and in autumn, winter and spring at Eta-HadCM3). For Eta-HadCM3, during summer, this core moves northward, near the coast of southern Brazil. For the present climate, ERA-Interim shows a reduction of cyclogenesis's trends between 20 and 50°S, which in general was represented by Eta-HadCM3 integrations, except in the MID simulation, which showed a slight increase in 20-35°S. The Eta-HadCM3's projections for the future show similar tendencies which is found for the present climate, indicating that, according to this model, there will be no significant changes in the behavior of cyclones for the future.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Distribuição espaço-temporal de Ciclones na América do Sul e Oceanos adjacentes	03
2.2 Projeções Climáticas de Ciclones Extratropicais na América do Sul	14
CAPÍTULO III – DADOS E METODOLOGIA	19
3.1 A Reanálise ERA-Interim	19
3.2 O Modelo Eta do CPTEC/INPE.....	20
3.2.1 A versão Eta-HadCM3	20
3.3 O Programa CYCLOC	21
CAPÍTULO IV – AVALIAÇÃO DO MODELO ETA-HADCM3 NO CLIMA PRESENTE	28
4.1 Testes iniciais com o Programa CYCLOC	28
4.2 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima presente com ERA-Interim	32
4.3 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima presente com Eta-HadCM3	36
4.4 Comparação entre a climatologia do clima presente representada pelo modelo Eta-HadCM3 e pela reanálise ERA-Interim	43
CAPÍTULO V - PROJEÇÕES FUTURAS DO COMPORTAMENTO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS	47
5.1 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima futuro com Eta-HadCM3	47
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Fenômenos atmosféricos extremos, principalmente os que afetam milhares de pessoas anualmente, têm sido estudados por diversos pesquisadores. O estabelecimento de suas climatologias é útil para prevenção e mitigação de desastres naturais deflagrados por tais sistemas. Os processos ciclogênicos, dentre muitos desses fenômenos, podem causar grandes impactos à população devido à possibilidade de ocorrência de ventos intensos e grandes acumulados de precipitação. Além disso, os ciclones podem interferir significativamente nas condições do mar, aumentando de forma perigosa as ondas próximas à costa de diversos países. A navegação marítima também fica prejudicada durante a passagem de ciclones, que geralmente possuem grande trajetória sobre os oceanos.

As regiões Sul e Sudeste do Brasil são frequentemente atingidas por fortes ventos originados por ciclones extratropicais, e suas áreas costeiras são afetadas pelo fenômeno de ressaca. A persistência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) influencia também na agitação das ondas na região da costa, de um modo mais frequente, porém, com menor energia. No entanto, os ciclones extratropicais estão ligados a eventos extremos apresentando-se como gatilho para a formação das maiores ondulações.

De acordo com o Quarto Relatório de Avaliação (Fourth Assessment Report – AR4) do Intergovernmental 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 (Krüger, 2009; Krüger et al., 2009).

No presente trabalho as integrações do modelo regional Eta-HadCM3 do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o clima presente (1961-1990) e projeções futuras (2011-2099) são analisadas a fim de investigar o comportamento dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Inicialmente a performance do modelo em representar a climatologia dos ciclones no clima presente é avaliada como passo prévio para utilização de suas projeções futuras. O objetivo

principal do trabalho é investigar se existem tendências de aumento ou redução do número de ciclogêneses no futuro e se haverá mudanças nas regiões preferenciais de formação dos ciclones no Atlântico Sul.

NO CPTEC/INPE o modelo Eta-HadCM3 (Chou et al., 2010 e Marengo et al., 2010), com resolução horizontal de 40 km e 38 níveis na vertical, foi integrado no clima presente com concentração do CO₂ igual a 330 ppm e no clima futuro utilizando-se o cenário A1B de emissões de CO₂ do Special Report on Emissions Scenarios (SRES) - Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (Nakicenovic et al. 2000).

Para realizar a detecção dos ciclones foi utilizado um método automático desenvolvido por Murray e Simmonds em 1991, na Universidade de Melbourne. Este esquema numérico possibilita de uma forma totalmente automatizada a obtenção de mínimos ou máximos em um conjunto qualquer de dados. Neste caso ele foi utilizado para indicar os mínimos valores de PNMM que estão relacionados com os ciclones.

No capítulo II apresenta-se uma revisão da literatura sobre a distribuição espaço-temporal de ciclones na América do Sul e Oceanos adjacentes e também sobre projeções climáticas de ciclones extratropicais na América do Sul. As descrições dos dados utilizados e da metodologia do trabalho estão no capítulo III. No capítulo IV elabora-se a avaliação do modelo Eta-HadCM3 para o clima presente e no Capítulo V apresentam-se as projeções futuras do comportamento dos ciclones extratropicais. Finalmente no capítulo VI encontram-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão da literatura sobre a distribuição espaço-temporal dos ciclones da América do Sul e oceanos adjacentes e também sobre as projeções climáticas de ciclones extratropicais na América do Sul.

2.1 Distribuição espaço-temporal de ciclones na América do Sul e oceanos adjacentes.

Um trabalho pioneiro sobre a climatologia de ciclones na América do Sul foi desenvolvido por Gan e Rao (1991). Nesta pesquisa, os autores utilizaram quatro cartas de superfície diárias (0, 6, 12 e 18 Z) no período de janeiro de 1979 a dezembro de 1988 (10 anos) do Instituto de Atividades Espaciais (IAE). As ciclogêneses foram consideradas quando o ciclone, definido por pelo menos uma isóbara fechada numa análise do campo de pressão ao nível médio do mar com intervalo de 2 hPa, permanecesse configurado por no mínimo 4 cartas consecutivas.

Gan e Rao (1991) encontraram dois núcleos de máxima ciclogênese, um sobre o Uruguai e outro sobre o Golfo de San Mathias (Argentina), apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2. 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) apresenta a maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogênese, cerca de 25 (15) sistemas por estação. O contrário ocorre no Golfo de San Mathias, que apresenta no verão (inverno) a maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogênese, 20 (15) sistemas por estação. 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 do escoamento de oeste no caso do máximo no Golfo de São Mathias e a ciclogênese orográfica devido à presença dos Andes no caso do máximo do Uruguai. A Figura 2.2 apresenta o número total de ciclogênese por ano, onde mais uma vez os dois núcleos (do Uruguai e do Golfo de São Mathias) de máxima frequência de ocorrência de ciclogênese aparecem em destaque, com 60 eventos por ano.

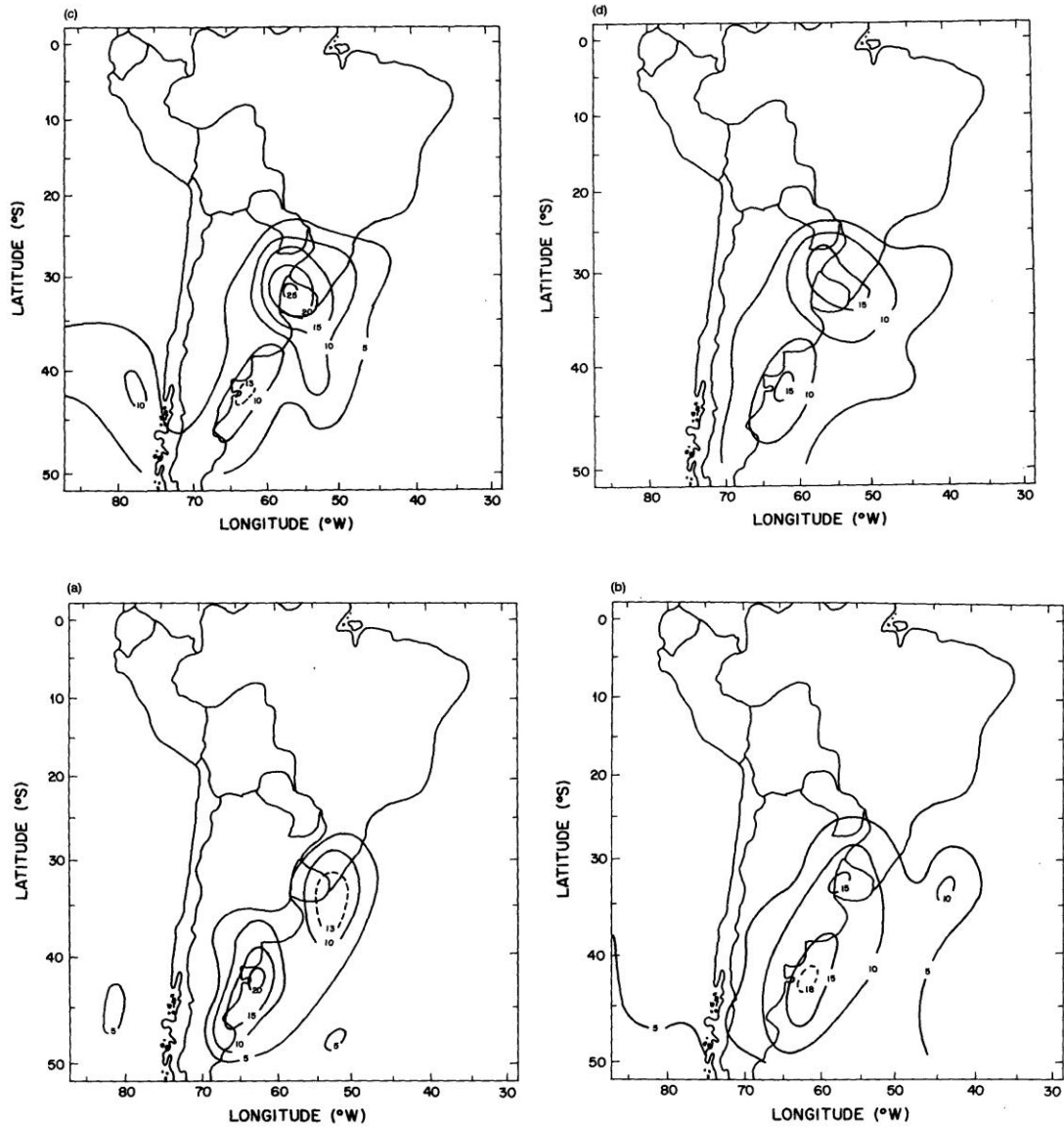


Figura 2.1 – Isolinhas de Frequência de ciclogêneses: (a) verão (dez/jan/fev); (b) outono (mar/abr/mai); (c) inverno (jun/jul/ago) e (d) primavera (set/out/nov). Fonte: Gan e Rao, 1991.

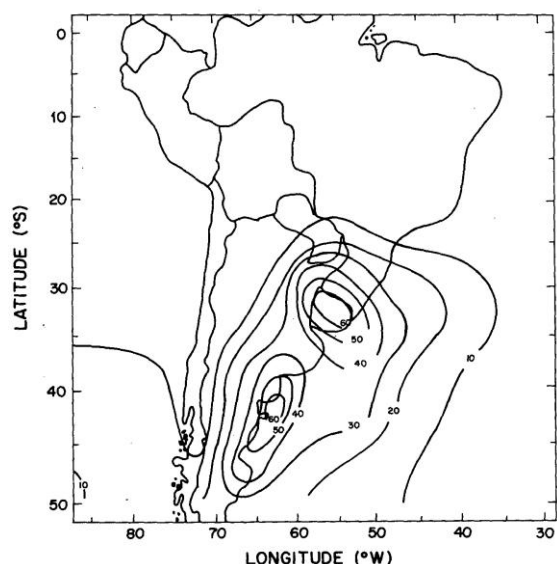


Figura 2.2 – Distribuição anual de isolinhas de frequência de ocorrência de ciclôgeneses. Fonte: Gan e Rao, 1991.

De acordo com Gan e Rao (1991) a máxima frequência de ocorrência de ciclôgeneses ocorre no mês de maio (em média 13,4 sistemas) e o mínimo em dezembro (7,1 sistemas), como apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Frequência de ciclôgenese por mês (totais observados no período de 10 anos – 1979-1987). Fonte: Gan e Rao, 1991.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1979	4	9	7	4	18	3	9	11	4	9	9	6	93
1980	8	11	5	9	7	10	12	11	9	8	12	9	111
1981	7	7	8	13	4	5	8	6	6	6	9	7	86
1982	7	7	8	5	13	12	10	3	11	11	2	8	97
1983	8	4	12	9	14	14	14	13	12	15	11	9	135
1984	7	7	7	6	20	15	13	4	12	12	8	8	119
1985	11	10	7	11	15	11	10	6	10	15	4	4	114
1986	8	6	10	11	20	11	7	14	6	7	5	4	109
1987	3	6	7	9	7	11	17	19	13	12	6	7	117
1988	10	5	9	11	16	9	7	10	7	10	7	9	110
Total	73	72	80	88	134	101	107	97	90	105	73	71	1091

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 ciclôgenese. 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, ocorreu apenas 45 eventos.

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 ciclôgenese na região de estudo e, desta

forma, tentar estabelecer distribuições espaciais e temporais da incidência de ciclones nesta área.

Em Palmeira (2003) foram utilizados dados da Reanálise 1 do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (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 a distribuição de ciclogêneses por faixa de latitude, como pode ser visto na Tabela 2.2. O autor considerou apenas os ciclones que sobrevivessem por um período de no mínimo 24 horas. É possível perceber que este fenômeno torna-se mais frequente 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. (Fonte: 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	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

A climatologia sazonal encontrada por Palmeira (Figura 2.3) mostra que o inverno é a estação do ano com maior frequência de ocorrência de ciclogêneses, com média de 40 sistemas no trimestre jun-jul-ago, seguida pelo outono, primavera e verão.

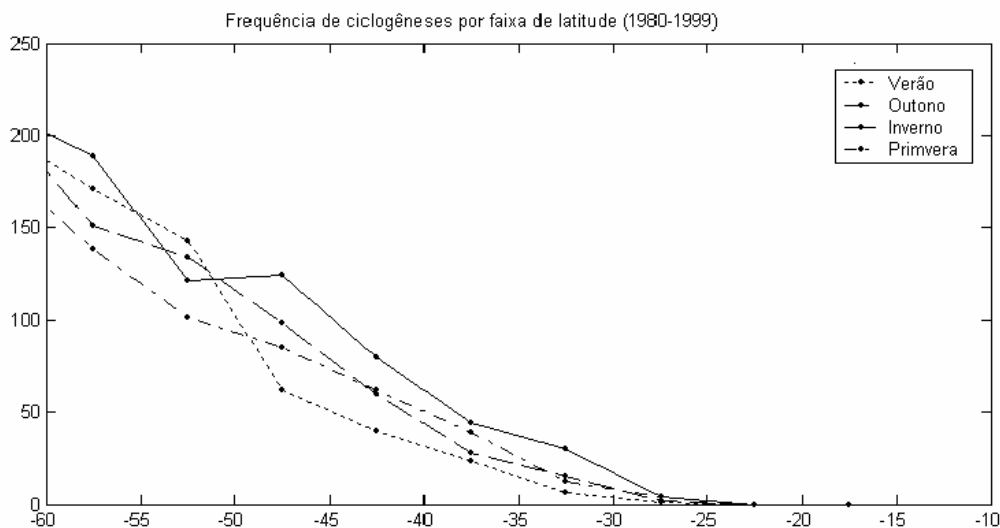


Figura 2.3 – Distribuição sazonal da frequência de ciclogênese por faixa de latitude (Fonte: Palmeira, 2003).

Em termos de distribuição espacial, nos totais anuais (Figura 2.4a), 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 2.4.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 2.4.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 2.4.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 2.4.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.

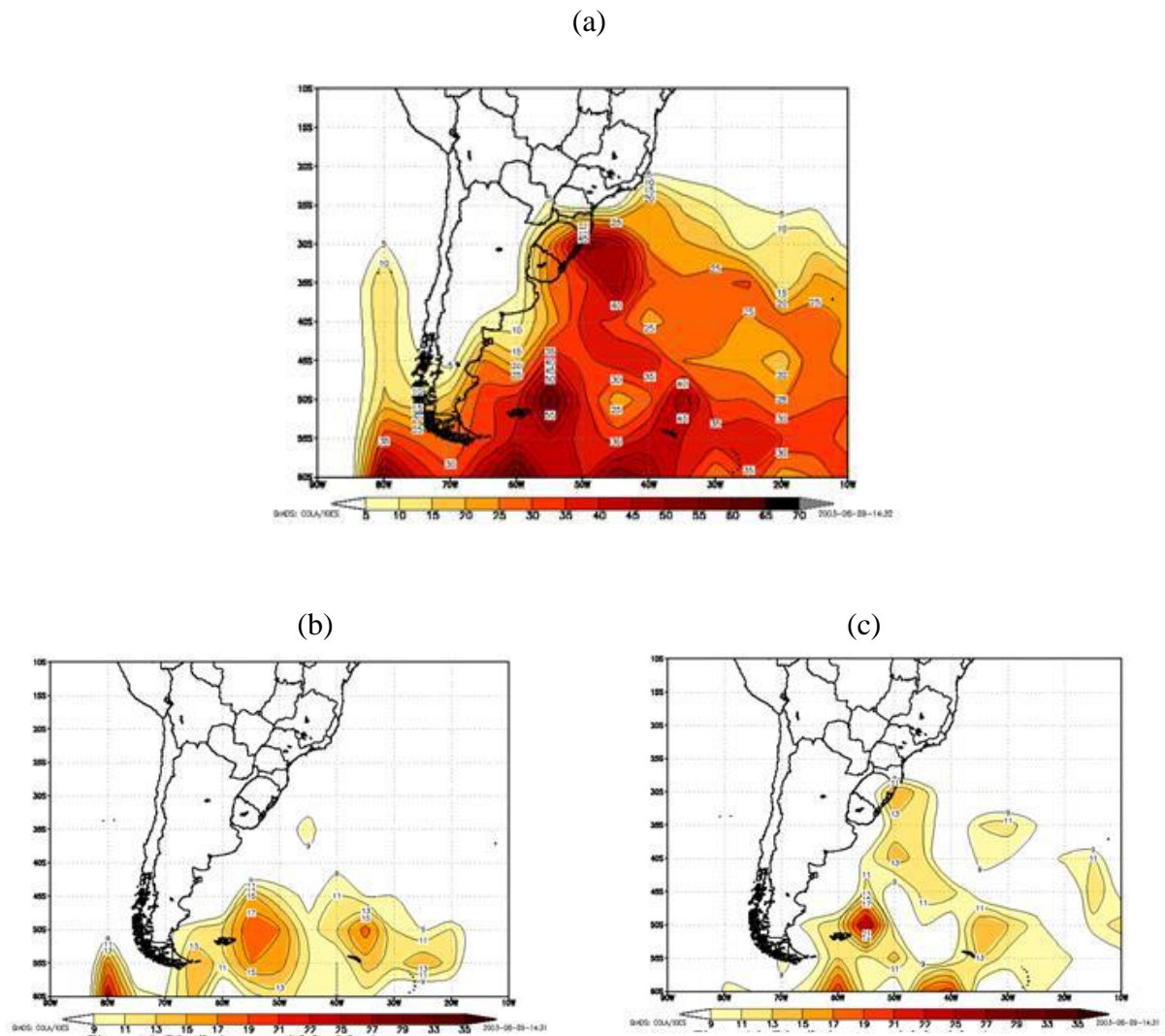


Figura 2.4 – Distribuição espacial de ciclogênese para os períodos: (a) anual, (b) verão, (c) outono, (d) inverno e (e) primavera - (Fonte: Palmeira, 2003).

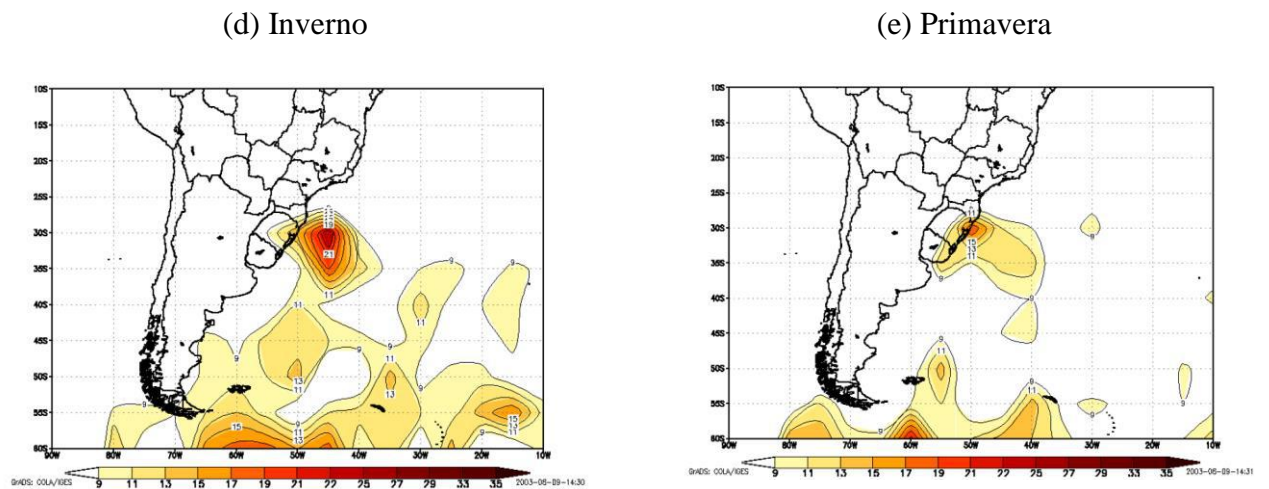


Figura 2.4 – Final.

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 2.5). 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.

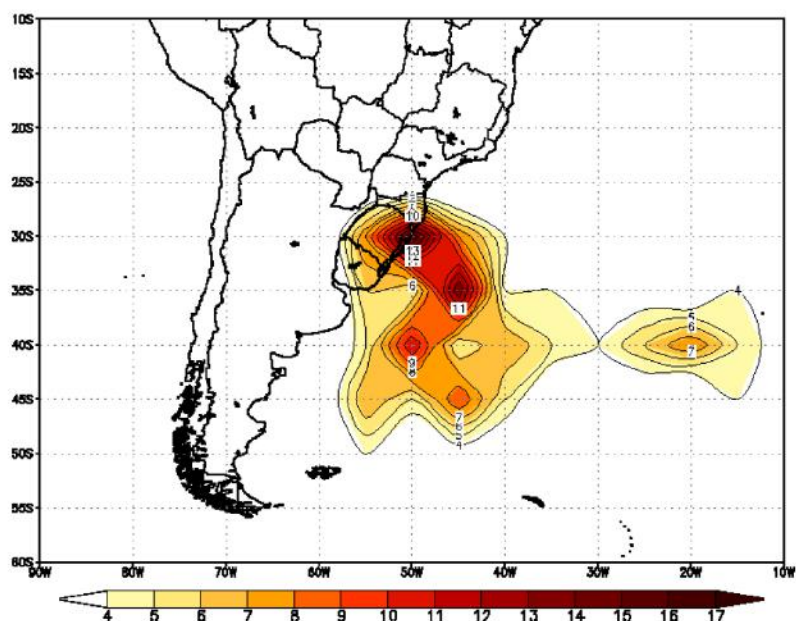


Figura 2.5 – Distribuição espacial das ciclogêneses explosivas no período 1980-1999. (Fonte: Palmeira, 2003)

Em um estudo ainda mais recente, Reboita (2008) avaliou-se a habilidade do Regional Climate Model – versão 3 (RegCM3) em simular a climatologia de ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul no período de 1990 a 1999. Essa avaliação foi obtida comparando-se a simulação com a reanálise do NCEP. Em seu trabalho, Reboita (2008) mostrou inicialmente que RegCM3 simula satisfatoriamente as características regionais da circulação atmosférica sobre o Atlântico Sul e a América do Sul. A seguir a climatologia de ciclones foi realizada através de um esquema automático, que identifica mínimos de vorticidade relativa no vento a 10 m de altura (ζ_{10}), e incluiu todos os sistemas inicialmente com $\zeta_{10} \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e tempo de vida igual ou superior a 24 horas.

A ocorrência de ciclogêneses na reanálise do NCEP e RegCM3 foi investigada por Reboita (2008) através de médias anuais, sazonais e mensais no domínio de análise como pode ser vista na Figura 2.6, onde destacam-se três subdomínios: RG1, que corresponde a costa das regiões sul e sudeste do Brasil; RG2 na desembocadura do rio da Prata no Uruguai e RG3 na costa sul da Argentina. Estes subdomínios foram escolhidos porque vários autores (Necco, 1982 a e b; Sinclair, 1996; Hoskins e Hodges; 2005, Reboita et al., 2005) já os havia identificado como mais favoráveis à gênese de ciclones na costa leste da América do Sul.

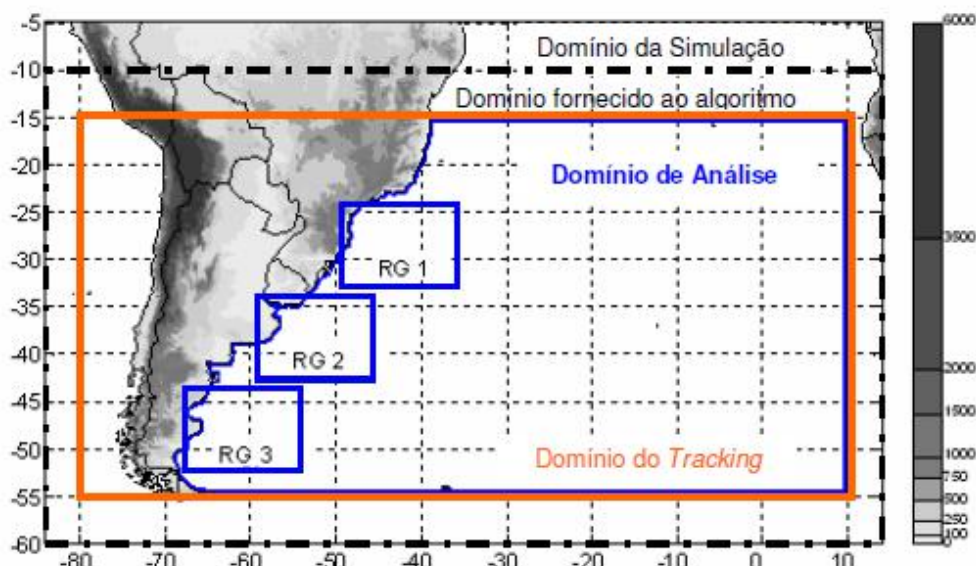


Figura 2.6 - Identificação do domínio da simulação com o RegCM3 (grade mais externa), da área de dados fornecida ao algoritmo de identificação e tracking dos ciclones (grade limitada por tracejado) da região para determinação das trajetórias dos sistemas (grade com cor laranja) e do domínio e subdomínios usados para a determinação da climatologia de ciclones (grade com cor azul). (Fonte: Reboita, 2008)

A climatologia de ciclones apresentada por Reboita (2008) considerou dois conjuntos: um formado por sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (que incluiu sistemas inicialmente fracos e fortes) e outro por sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (que incluiu somente os sistemas inicialmente fortes); daqui em diante estes conjuntos serão denominados de $\zeta_{-1.5}$, ou sistemas inicialmente fracos, e de $\zeta_{-2.5}$, ou sistemas inicialmente intensos.

O ciclo anual das ciclogêneses que se iniciaram com $\zeta_{-1.5}$ e $\zeta_{-2.5}$ é apresentado nas Figuras 2.7 a-b, respectivamente. Para os sistemas com $\zeta_{-1.5}$, o RegCM3 simula a variabilidade mensal muito próxima à do NCEP (Figura 2.7a), onde o ciclo anual não é bem definido, ou seja, não há uma estação com maior frequência de ciclogêneses considerando todo o Atlântico Sul, como também foi observado por Sinclair (1996). Nota-se na Figura 2.7 que a maior frequência mensal de ciclogêneses no NCEP ocorre em maio (média de 27,6 eventos), mês em que o RegCM3 também mostra um grande número destes sistemas (25,5), porém a maior frequência média é simulada em dezembro (26,3). Gan e Rao (1991) também observaram maior frequência de ciclogêneses no mês de maio. Já Sinclair (1996) e Sugahara (2000), embora tenham observado grande frequência de sistemas neste mês, identificaram como mês de máxima atividade novembro e julho, respectivamente. Fevereiro, abril e novembro são os

meses com menor ocorrência de ciclogêneses no NCEP e também na simulação, que inclui ainda outubro (Figura 2.7a).

Com relação às ciclogêneses que se iniciaram com $\zeta_{-2.5}$, observa-se na Figura 2.7 b um ciclo anual bastante definido com maior número de sistemas nos meses de inverno e menor nos de primavera e verão. Ambos, NCEP e RegCM3, mostram maior frequência de ciclogêneses em junho e menor em fevereiro/novembro, embora com diferenças no número absoluto de sistemas. Este resultado comparado ao da Figura 2.7a indica que em tal figura, o maior número de sistemas observados no verão deve-se aos sistemas que se iniciam com menor intensidade, isto é, sistemas mais fracos. Na maioria dos meses (Figura 2.7 b), o RegCM3 subestima cerca de uma ciclogênese por mês quando comparado ao NCEP, mas nos meses de junho e outubro a subestimativa chega a dois sistemas.

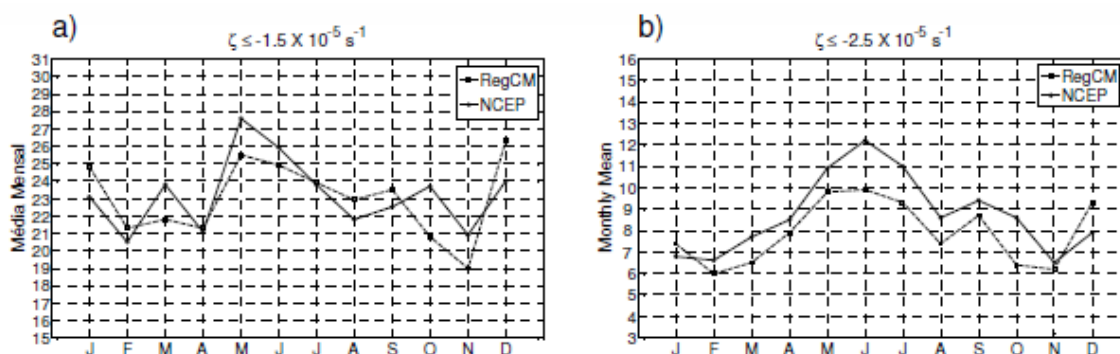


Figura 2.7 Média mensal de ciclogêneses no Atlântico Sul, entre 1990 e 1999, na simulação (linha tracejada) e no NCEP (linha contínua), que se iniciaram com: (a) $\zeta_{-1.5}$ e (b) $\zeta_{-2.5}$. Os resultados mostraram que em 10 anos o RegCM3 simulou praticamente o mesmo número total de sistemas do NCEP, embora mais fracos e lentos. Fonte: Reboita, 2008.

A comparação sazonal realizada no trabalho de Reboita (2008) indicou que a reanálise do NCEP mostra maior atividade ciclogênética no outono seguido pelo inverno, o que está de acordo com o trabalho de Gan e Rao (1991), enquanto no RegCM3 isto ocorre no verão seguido pelo inverno. Já a menor atividade ciclogênética é encontrada na primavera em ambos, RegCM3 e NCEP. No verão, o número de ciclogêneses no RegCM3 está superestimada (em relação ao NCEP). A diferença entre a estação de maior frequência de sistemas é decorrente das maiores médias mensais simuladas em janeiro e dezembro, devido à superestimativas no número de sistemas nestes meses no ano de 1990, quando comparada simulação e reanálise.

Na Figura 2.8, retirada do trabalho de Reboita (2008), observa-se que no Atlântico Sul, considerando-se os sistemas com $\zeta_{-1.5}$ no NCEP, foram identificadas três regiões preferenciais de desenvolvimento de ciclogêneses próximas à costa leste da América do Sul: na costa sul da Argentina próxima a 48°S, com maior frequência no verão; no Uruguai, na região da desembocadura do rio da Prata (35°S), com maior densidade de sistemas na primavera; e na costa das regiões sul e sudeste do Brasil, entre 25° e 30°S, com maior densidade de sistemas no verão. Esses três núcleos ciclogenéticos também são evidentes nos estudos realizados por Necco (1982 a,b), Sinclair (1996), Hoskins e Hodges (2005) e Reboita et al. (2005). No mesmo estudo, também foi observada uma grande densidade ciclogenética próxima à fronteira sul do domínio, devido aos sistemas que se desenvolvem nesta região ou adentram este setor. O RegCM3 foi capaz de simular as três regiões ciclogenéticas, embora com menor densidade e, em algumas estações, com posição do núcleo ciclogenético deslocado em relação ao do NCEP. A subestimativa de sistemas próxima à costa foi compensada por uma superestimativa no sentido da parte mais central do oceano.

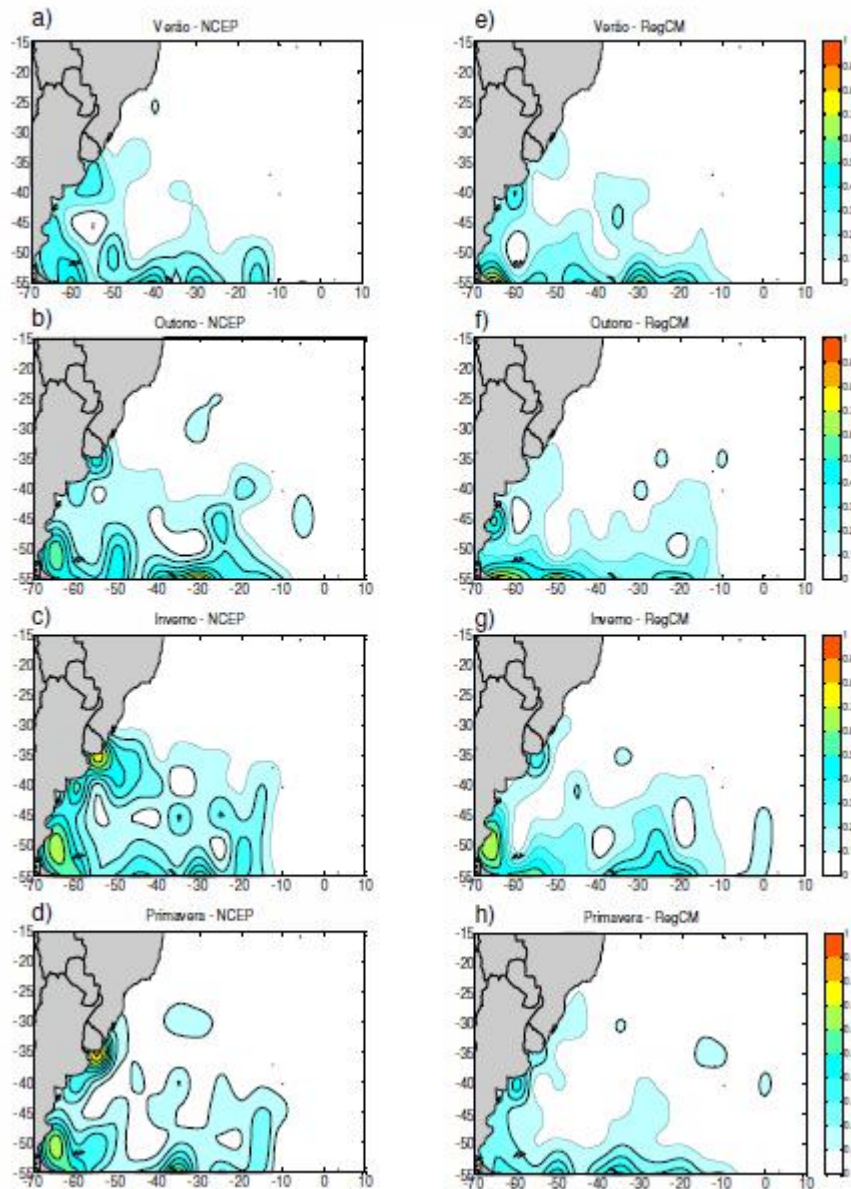


Figura 2.8 - Densidade do total de ciclogêneses (10^{-4} km^{-2}) por estação do ano, no período de 1990 a 1999, que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na reanálise do NCEP (coluna esquerda) e na simulação com o RegCM3 (coluna direita). Nas escalas de cores das figuras o valor 0,5 corresponde a aproximadamente 12,5 sistemas. (Fonte: Reboita, 2008).

2.2 Projeções Climáticas sobre Ciclones Extratropicais na América do Sul.

Como ressaltado por Krüger et al (2009), vários estudos são dedicados a entender a climatologia (Gan e Rao, 1991; Sinclair, 1996; Sugahara, 2000; Reboita, 2008) bem como a dinâmica de formação das ciclogêneses na América do Sul (Gan e Rao, 1994; Piva, 2001; Vera et al., 2002; Reboita, 2008; Reboita et al., 2009) porém, são escassos os estudos que avaliam suas características no clima futuro. Krüger (2009) e Krüger et al. (2009), com a finalidade de

obter respostas sobre as tendências futuras da distribuição espacial e das características dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul, realizaram uma análise de possíveis impactos dos cenários de mudanças climáticas na climatologia de ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Para este estudo o RegCM3 foi aninhado ao Modelo Global do Hadley Centre (HadAM3) no clima presente (1975 – 1989) e no futuro (2071 – 2085 – cenários A2 e B2).

De acordo com Krüger (2009), o modelo global HadAM3 foi utilizado para realizar projeções climáticas para cenários de concentração dos gases do efeito estufa (A2 e B2) proposto pelo IPCC (2001). As integrações do HadAM3 se iniciaram no período pré-industrial (1860) e seguiram até o futuro (até 2100). O cenário A2 projeta uma alta concentração de gases de efeito estufa e o B2 considera baixa concentração destes gases a partir da hipótese de que todos os países ratificariam o protocolo de Kyoto (IPCC, 2001).

Para os estudos de Krüger (2009) e Krüger et al. (2009), foi utilizado um esquema automático de rastreamento de ciclones que utiliza a vorticidade relativa do vento a 10 metros de altura, com objetivo de obter as climatologias de ciclones simuladas pelos modelos RegCM3 e HadAM3 e também pela reanálise do NCEP. O processo de identificação e rastreamento dos ciclones envolve basicamente três etapas: 1) identificação do mínimo de vorticidade, 2) localização da posição após o primeiro deslocamento e 3) busca pelas posições seguintes (Reboita, 2008).

Krüger (2009) realizou a validação do RegCM3 e do HadAM3 comparando a climatologia dos ciclones simulados com a obtida do NCEP, contabilizando todos os sistemas ciclônicos com duração mínima de 24 horas e $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Os resultados apresentados por Krüger (2009) para o clima presente mostram que o NCEP fornece um total de 3654 ciclones, com duração igual ou superior a 24 horas e vorticidade inicial $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, enquanto que no HadAM3 obtém-se 3204 ciclones e o RegCM3, aninhado ao HadAM3, fornece um total de 4035 ciclones, como pode ser visto na Figura 1.9.

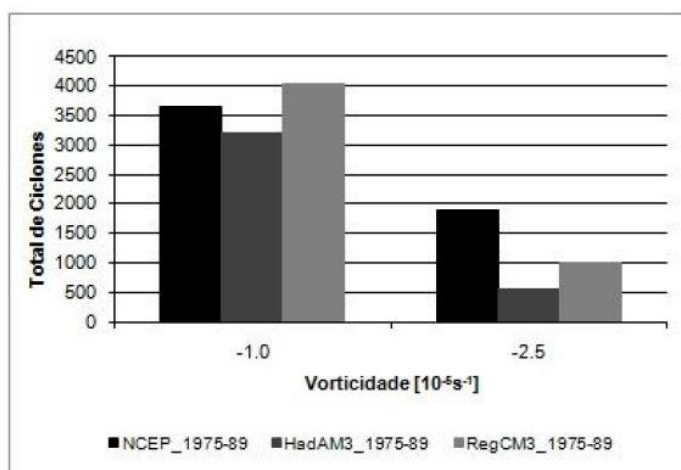


Figura 2.9 – Total de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para os limiares de $\zeta_{10} \leq 1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ e $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$, no período 1975 – 1989. (Fonte: Krüger, 2009).

Considerando todos os ciclones sobre o Atlântico Sul que se iniciaram com $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$, Krüger (2009) mostrou que a distribuição sazonal do NCEP foi de $60,9 \pm 2,9$ ciclones por trimestre, com número semelhante de ciclones no inverno e primavera (Figura 2.10a). No HadAM3 o ciclo sazonal foi bastante suavizado, com $53,4 \pm 0,8$ ciclones/trimestre, e além de subestimar o número de eventos do NCEP mostra a frequência de ciclones diminuindo do verão para o inverno, contrapondo-se também ao NCEP (Figura 2.10a). Para o total de ciclones no período de 15 anos, o RegCM3 superestimou o número de ciclones do NCEP em todas as estações do ano, fornecendo $67,3 \pm 2,0$ ciclones/trimestre. No NCEP, o trimestre JJA (inverno) e SON (primavera) são mais ciclogênicos, com menos ciclogêneses no outono e verão, concordando com Sugahara (2000). Este resultado foi encontrado como oposto ao de Reboita (2008) que obteve o outono como estação mais ciclogênica quando se considera todo o Atlântico Sul. Esta diferença pode resultar do limiar de vorticidade utilizado por Reboita (2008) que desconsiderou ciclones com $\zeta_{10} > -1,5 \times 10^{-5} s^{-1}$, do período de análise (1990 – 1999) e também pelo fato de Reboita (2008) ter utilizado a reanálise NCEP/DOE (Kanamitsu, 2002) enquanto o estudo de Krüger (2009) considerou os ciclones com $\zeta_{10} > -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ (mesmo limiar utilizado em Sugahara (2000) nos dados do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) para o período 1985-1992 e da reanálise NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) para o período 1975-1989. O RegCM3 simulou a distribuição sazonal média de todos os ciclones similar ao NCEP, embora mais suavizada, e indica também o outono com menor número de ciclones, com o inverno e primavera como estações mais ciclogênicas, assim como no NCEP.

Considerando somente os ciclones inicialmente mais intensos (Figura 2.10b) de Krüger (2009), tem-se para o NCEP $31,5 \pm 2,1$ ciclones/trimestre, número que decresce para $9,5 \pm 1,7$, enquanto o RegCM3 simulou $16,7 \pm 4,6$ ciclones/trimestre. No NCEP o número de ciclogêneses foi muito próximo na primavera – verão – outono, com um pico de ciclogêneses no inverno, concordando com Taljaard (1967), Gan (1992), Simmonds e Keay (2000) e Reboita (2008). Os ciclos sazonais do HadAM3 e do RegCM3 também apresentaram maior número de ciclogêneses inicialmente intensas no inverno seguido do outono, como também simulou o RegCM3 para o período de 1990 – 1999 (Reboita, 2008).

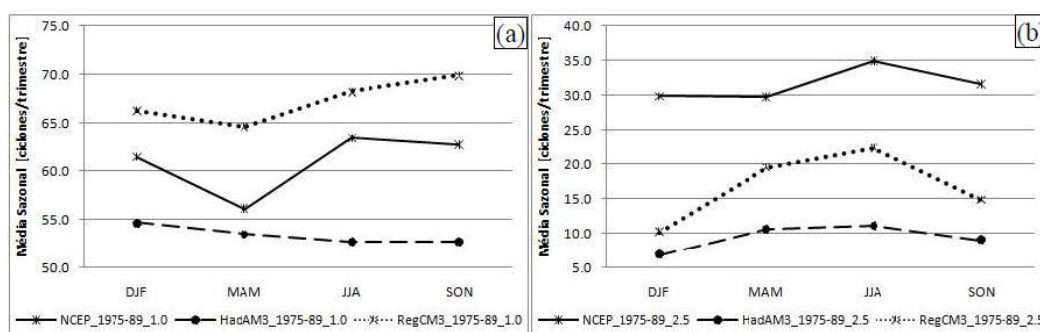


Figura 2.10 – Número médio trimestral de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a) $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ e (b) $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$. (Fonte: de Krüger, 2009).

Já as tendências apresentadas por Krüger (2009) e Krüger et al. (2009) para os cenários B2 e A2, mostram uma redução no número total de ciclogêneses, como pode ser visto na Figura 2.11. Este resultado concorda com os de Zhang e Wang (1997), Sinclair e Watterson (1999), Watterson (2006), Fyfe (2003) e Lambert e Fyfe (2006) que obtiveram redução no número de ciclones para cenários de aquecimento. Nos resultados do RegCM3, as reduções são maiores para o cenário de maior concentração de gases de efeito estufa (A2) e para os ciclones inicialmente mais intensos. De acordo com Fyfe (2003) a redução de ciclogêneses na faixa $40^{\circ}S - 60^{\circ}S$ está relacionada ao deslocamento para o pólo da área ciclogênica, associada com o deslocamento da zona baroclínica em direção ao pólo. Zhang e Wang (1997) apontam ainda a redução do contraste térmico terra-mar no leste das regiões costeiras dos continentes e o aumento dos fluxos de calor latente como possíveis causas da redução dos ciclones em cenários de aquecimento global.

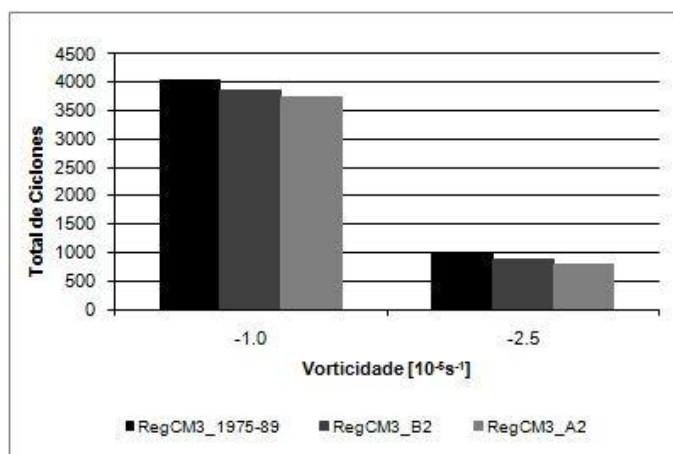


Figura 2.11 – Total de ciclones do RegCM3 para os limiares de $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, no período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 - 2085. (Fonte: Krüger, 2009).

Além de redução no número total de ciclogêneses, a Figura 2.12a extraída de Krüger (2009) indica também mudanças na distribuição sazonal de ciclogêneses nos cenários B2 e A2. Enquanto no cenário B2 a maior redução no número de ciclogêneses é projetada para a primavera (de 70 para 64) no A2 é no inverno (redução de 68 para 59). As menores diferenças entre o clima presente e futuro são projetadas para o verão e outono (Figura 2.12a). Apenas no outono o cenário B2 projeta maior quantidade de ciclones comparada ao clima presente. Contudo, na Figura 2.12b que considera somente ciclones inicialmente intensos, nota-se apenas redução no número de sistemas, sem modificar seu ciclo anual em relação ao clima presente. Os ciclones intensos dos dois cenários (B2 e A2) apresentam maior frequência de eventos no inverno seguido do outono e menor frequência no verão e primavera, como no clima presente. Assim como para o total de ciclones (Figura 2.12a), a maior redução na frequência de ciclones intensos é projetada para o cenário A2 (Figura 2.12b).

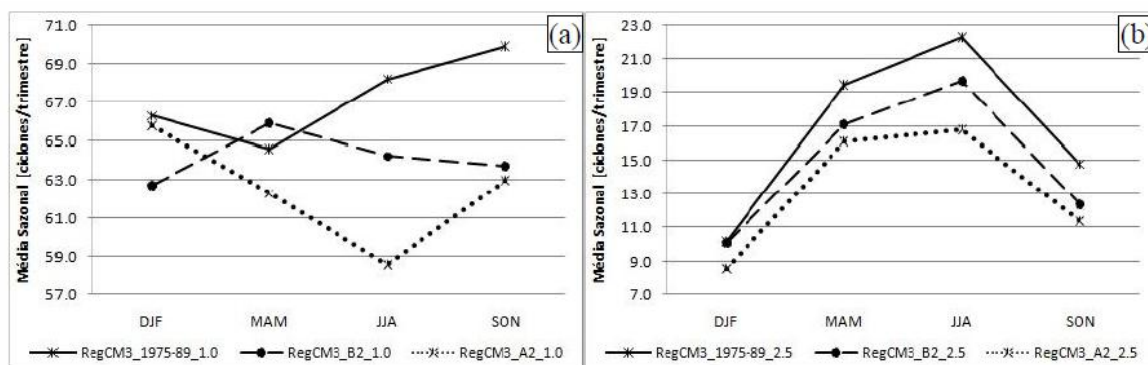


Figura 2.12 – Número médio trimestral de ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a) $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e (b) $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. (Fonte: Krüger, 2009).

CAPÍTULO III

DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os conjuntos de dados utilizados: a Reanálise ERA-Interim e o modelo Eta-HadCM3. O esquema numérico CYCLOC utilizado para busca automática por ciclones também encontra-se descrito.

O esquema numérico CYCLOC foi integrado utilizando dados 0, 6, 12 e 18 UTC de PNMM da Reanálise do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) denominada ERA-INTERIM (Dee et al., 2011) e das quatro integrações do modelo Eta-HadCM3 como dados de entrada.. Assim como sugerido por Giorgi e Mearns (1999) foram excluídos da análise os primeiros meses de integração para permitir um ajuste entre a dinâmica interna do modelo e fatores regionais no domínio de simulação. Então, as análises foram feitas para o clima presente com os dados do ERA-Interim para o período de 1979 a 2009 e das quatro simulações do modelo Eta-HadCM3 (CNTRL, LOW, MID e HIGH), para o período de 1961 a 1990 e para o clima futuro, com as projeções do modelo Eta-HadCM3, também para os quatro membros (CNTRL, LOW, MID e HIGH) para o período de 2011 a 2099.

Somente foram contabilizados os ciclones que permaneceram por no mínimo 4 horários consecutivos para todas as análises realizadas no presente trabalho. Nas análises sazonais considerou-se: verão (dez-jan-fev), outono (mar-abr-mai), inverno (jun-jul-ago) e primavera (set-out-nov).

A seguir são descritos os conjuntos de dados utilizados neste trabalho (a Reanálise ERA-Interim e o modelo Eta-HadCM3) e as características do programa CYCLOC.

3.1 A Reanálise ERA-Interim

A Reanálise ERA-Interim são uma extensão do projeto Era-40 (Uppala et al. 2005) com alguns avanços na assimilação de dados, no uso de observações e na física do modelo. Os dados estão disponíveis no sítio http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/ a cada 1,5° x 1,5° de latitude e longitude, para o período de 1 de janeiro de 1979 até os dias atuais. A resolução espacial horizontal do modelo atmosférico corresponde a aproximadamente 79 km (resolução espectral horizontal T255). Com relação à resolução vertical, o modelo tem 60 camadas com o topo localizado a 0,1 hPa. Diversas variáveis de superfície são disponibilizadas

a cada 3 Z, sendo que nos horários de 0, 6, 12 e 18 Z estão disponíveis os campos analisados e para os demais horários (3, 9, 15 e 21 Z) estão os campos previstos a partir de 0 e 12 Z.

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 National Centers for Environmental Prediction (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-HadCM3

O “ensemble de perturbações físicas” (EPF) do modelo HadCM3 com a forçante do efeito estufa atmosférico do cenário SRES-A1B é composto pelo modelo padrão mais 16 membros do mesmo, cada um com uma diferente sensibilidade climática. Espera-se que a grande variação na resposta da temperatura global no final do século XXI produza alguma grande variação também na resposta da temperatura do clima regional através de uma regionalização dinâmica (downscaling). Três membros mais o controle foram selecionados para rodar o modelo regional Eta do CPTEC para medir o grau de incerteza no modelo global, uma vez que os mesmos simulam razoavelmente bem o clima sobre a América do Sul. Desta forma, uma maior gama possível de simulações de modelos regionais de plausíveis climas futuros pode ser gerada.

Os conjuntos das condições de contorno do modelo HadCM3 passados ao modelo Eta do CPTEC são os seguintes: aenwh/aenwl; aexso/aejjo; aexsj/aejjj e aexsb/aejyb. Os pares de

experimentos se referem às partes histórica (presente) e futura das rodadas. O primeiro par é o membro não perturbado (controle, “CNTRL”), o segundo é um membro com alta sensibilidade (“HIGH”), o terceiro é um membro com média sensibilidade (“MID”) e o quarto é um membro com baixa sensibilidade (“LOW”). O membro não perturbado está entre os membros de baixa e média sensibilidade. Apesar de somente um cenário de emissões (SRES-A1B) estar disponível, as diferenças na sensibilidade dos modelos podem fornecer a ideia representativa de climas futuros plausíveis através de diferentes caminhos de emissões. O modelo de alta sensibilidade (HIGH) provê mudanças possíveis diante dos cenários SRES-A2 ou SRES-A1FI. Da mesma maneira, as alterações vistas no modelo de baixa sensibilidade (LOW) podem fornecer uma ilustração qualitativa de um cenário de baixas emissões, como o SRES-B1 (Marengo et al., 2011).

O modelo Eta do CPTEC aninhado às condições de fronteira do modelo HadCM3 (modelo climático regional Eta-HadCM3) foi rodado no INPE para o clima presente (1961 – 1990) e para o clima futuro (2011-2040; 2041-2070 e 2071-2099), forçado pela TSM fornecida pelo modelo HadCM3, como descrito anteriormente.

3.3 O Programa CYCLOC

O esquema numérico utilizado neste trabalho, denominado CYCLOC, foi desenvolvido por Murray e Simmonds (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 rastreamento 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 3° 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.

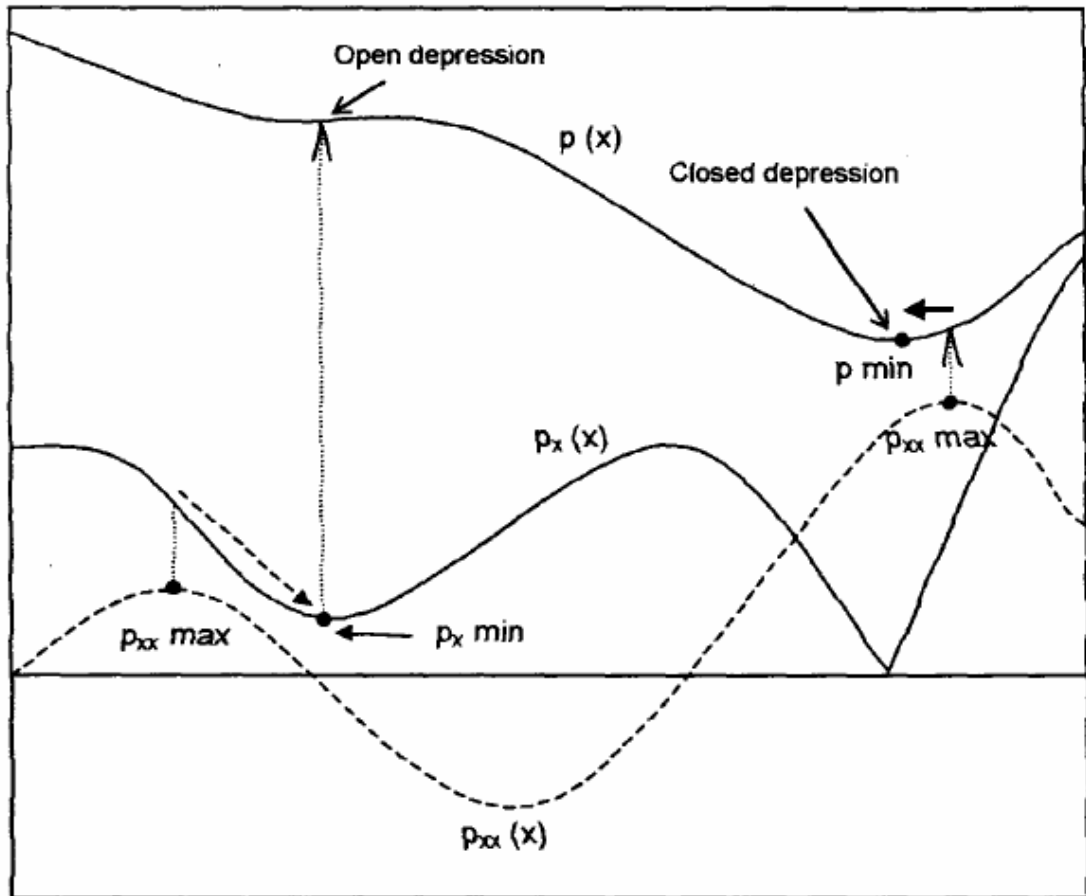


Figura 3.1 – Seção transversal da pressão e suas derivadas mostrando como o máximo de p_{xx} (ou o Laplaciano de p em duas dimensões) pode ser usado como pontos iniciais na pesquisa por ambas depressões abertas e fechadas. Um centro de baixa ficará normalmente próximo a seu associado máximo do Laplaciano, 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. (Retirada de Palmeira, 2003).

O segundo estágio do CYCLOC 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.

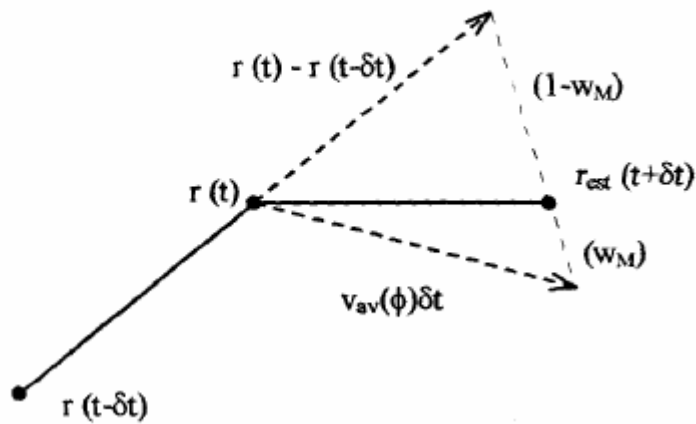


Figura 3.2 - Estimativa de uma nova posição ($r_{est}(t+\delta t)$) baseada nos pesos w_m do deslocamento prévio, $r(t)-r(t-\delta t)$, e $(1-w_m)$ do deslocamento baseado nas velocidades médias dos ciclones $v_{av}(\Phi)\delta t$. Fonte: Palmeira, 2003.

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 $r_{mn} < r_c$ (r_c 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_{\max} assume um valor unitário para a associação envolvendo um sistema fechado, forte e não novo, mas emprega-se um valor menor de P_{\max} para associações que incluem sistemas novos (P_{new}), abertos (P_{open}), ou ambos ($P_{\text{new}} \times P_{\text{open}}$) 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 3.3. 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, $A_c + E_e$ ($\Sigma P_{mn} = 0,6 + 0,5 = 1,1$) e E_c ($\Sigma P_{mn} = 0,8$). A combinação que tiver a mais alta probabilidade é então selecionada (no caso $A_c + E_e$). A combinação resultante para o Grupo 2 é $B_a + C_b + F_d$ ($\Sigma P_{mn} = 1,9$). Depois de selecionar esses ajustes, conclui-se que os ciclones D e G são extintos e f constitui um novo elemento.

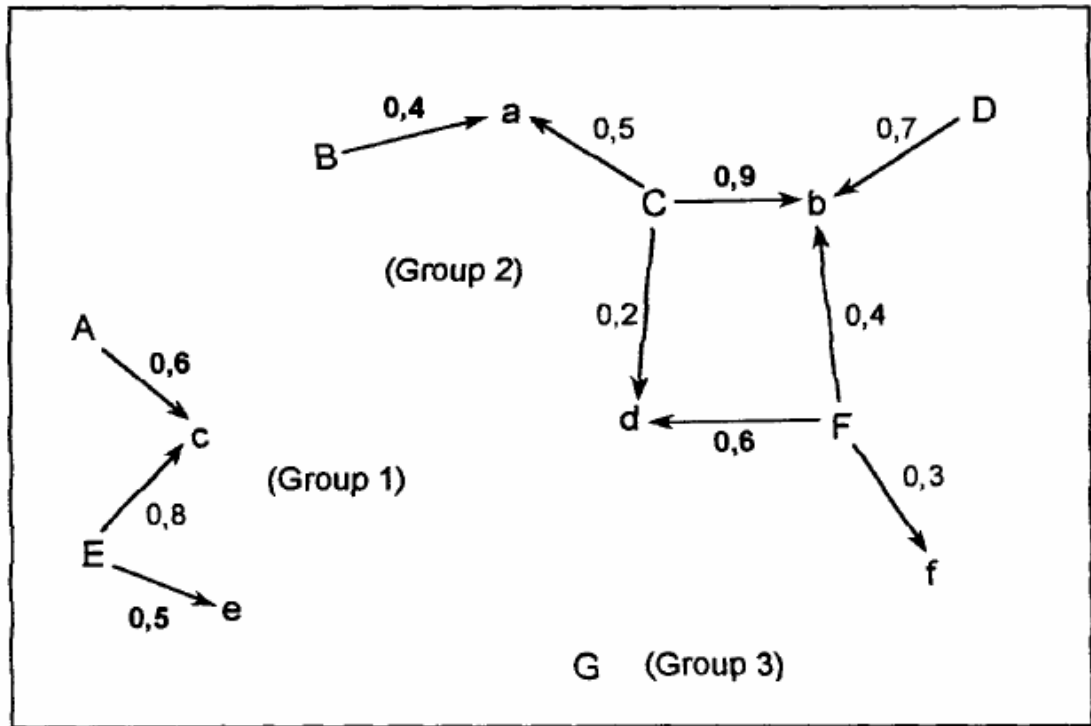


Figura 3.3 – Grupo de posições previstas (maiúsculas) e novas (minúsculas) de ciclones. Os valores entre os pares indicam a probabilidade de associação (Fonte: MSa).

Quanto às análises estatísticas de trajetórias (terceiro estágio), o programa tem ainda a habilidade de calcular médias zonais e regionais da frequência (i.e., densidade e fluxo), velocidade, pressão central e tendência de pressão dos ciclones e a frequência 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 frequências foram feitos para faixas de latitude de 5°.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO DO MODELO ETA-HADCM3 NO CLIMA PRESENTE

Neste capítulo apresenta-se a avaliação do comportamento dos ciclones extratropicais representados pelo modelo Eta-HadCM3 no clima presente (1961-1990) sobre o Atlântico Sul. Os campos de PNMM da Reanálise ERA-Interim no período de 1979 à 2009 (31 anos) são utilizados para representar o clima atual. Inicialmente foram realizados testes com o programa CYCLOC usando os dados do ERA-Interim. A seguir a climatologia do Eta-HadCM3 é confrontada com a climatologia do ERA-Interim.

4.1 Testes iniciais com o esquema numérico CYCLOC

Com o objetivo de verificar a potencialidade do esquema numérico CYCLOC, foram realizados testes com os dados de PNMM da reanálise ERA-Interim. O esquema numérico foi integrado para o mês dezembro de 2009 e tais resultados foram comparados com análise subjetiva, visual, acompanhando-se a posição dos ciclones ao longo do mês. Assim, foi possível avaliar a destreza do esquema de detecção e de 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 ERA-Interim a cada 6 horas. Na Figura 4.1 a as trajetórias são obtidas manualmente, a partir da análise do campo de PNMM (isóbaras traçadas a cada 2 hPa) e considerando-se apenas os ciclones fechados que tenham perdurado por no mínimo 4 horários consecutivos. Na Figura 4.1 b 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 valores 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 as Figuras 4.1 a e b nota-se que existe uma razoável concordância entre as trajetórias geradas com o programa CYCLOC a partir dos dados do ERA-Interim e as trajetórias obtidas manualmente.

A trajetória 33 corresponde a um ciclone que, de acordo com o programa CYCLOC, se formou em 06 Z do dia 3/12. Esta trajetória corresponde à trajetória azul da Figura 4.1 a, que manualmente foi traçada a partir de 00 Z do dia 3/12 no nordeste do Rio Grande do Sul.

No caso da trajetória 102, gerada pelo esquema CYCLOC, ela foi iniciada em 00Z do dia 12/12, num ponto dentro do continente a oeste do estado do RS. Na Figura 4.1 a esta trajetória é representada pela cor vermelha, e foi obtida manualmente a partir de 18 Z – 11/12 desde o Paraguai.

A trajetória 115 do CYCLOC (Figura 4.1 b) foi iniciada as 00 Z do dia 14/12, e corresponde a trajetória roxa da Figura 4.1 a. (06 Z – 13/12), iniciada no sudeste da Argentina. Finalmente, a trajetória 156 do CYCLOC (iniciada em 00 Z de 20/12 na Figura 4.1 b. corresponde à trajetória verde da Figura 4.1 a. Outro fato a se chamar atenção foi a trajetória 1, gerada aqui pelo CYCLOC (Figura 4.1 b), que não foi encontrada nas trajetórias obtidas manualmente.

Em suma, de uma forma geral, as trajetórias geradas pelo programa CYCLOC foram bem representadas em relação às obtidas manualmente.

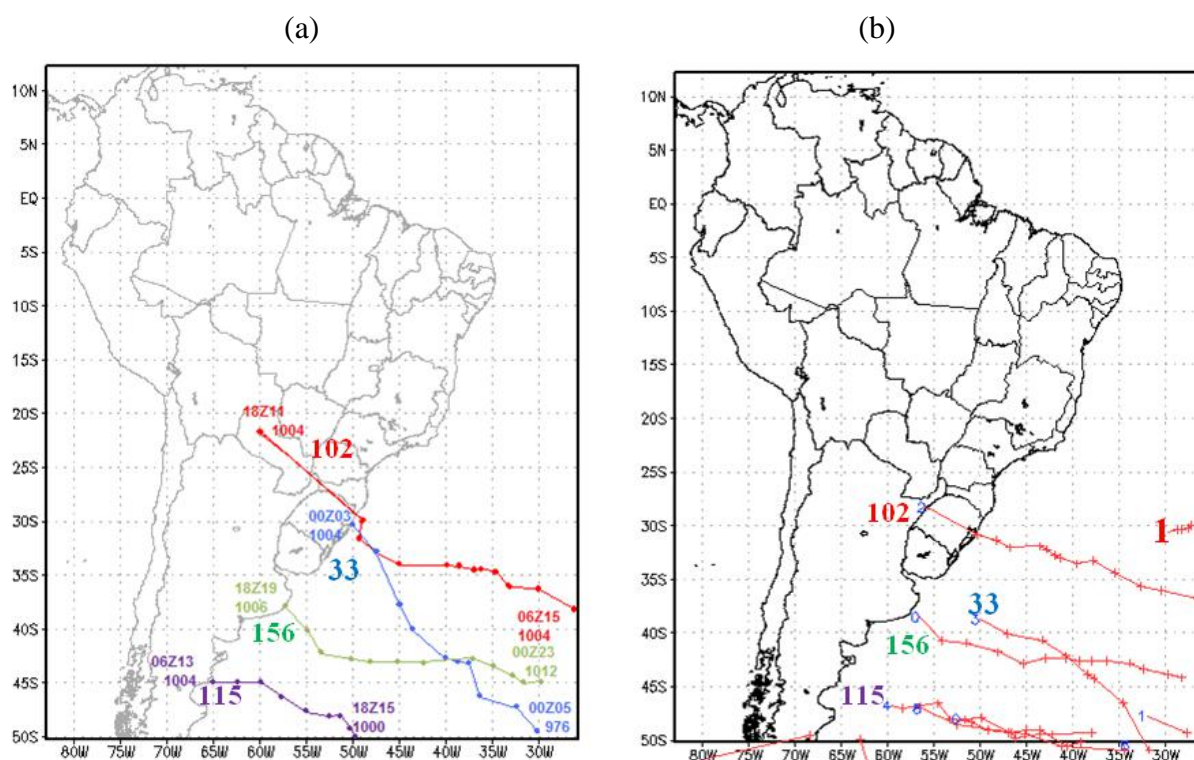


Figura 4.1 – Trajetórias dos ciclones extratropicais no período de 1 a 31 de dezembro de 2009, utilizando-se como dados de entrada a Reanálise do ERA-Interim a cada 6 horas. Em a) trajetórias traçadas subjetivamente com o horário e dia (inicial e final) do mês de dezembro de 2009 e o número da trajetória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

utilizando-se o programa CYCLOC. Os números representam o número da trajetória. As informações sobre cada uma delas são apresentadas na Tabela 4.1.

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. 102 em aproximadamente $27.5^{\circ}\text{S}/57.5^{\circ}\text{W}$ (caixa vermelha); b) a trajetória no. 115 ao sul de 45°S (caixa na cor preta), c) trajetórias no. 156 e 33 em torno de $38^{\circ}\text{S}/55^{\circ}\text{W}$ (dentro da caixa na cor azul), e d) trajetória no 1 em $32^{\circ}\text{S}/28^{\circ}\text{W}$.

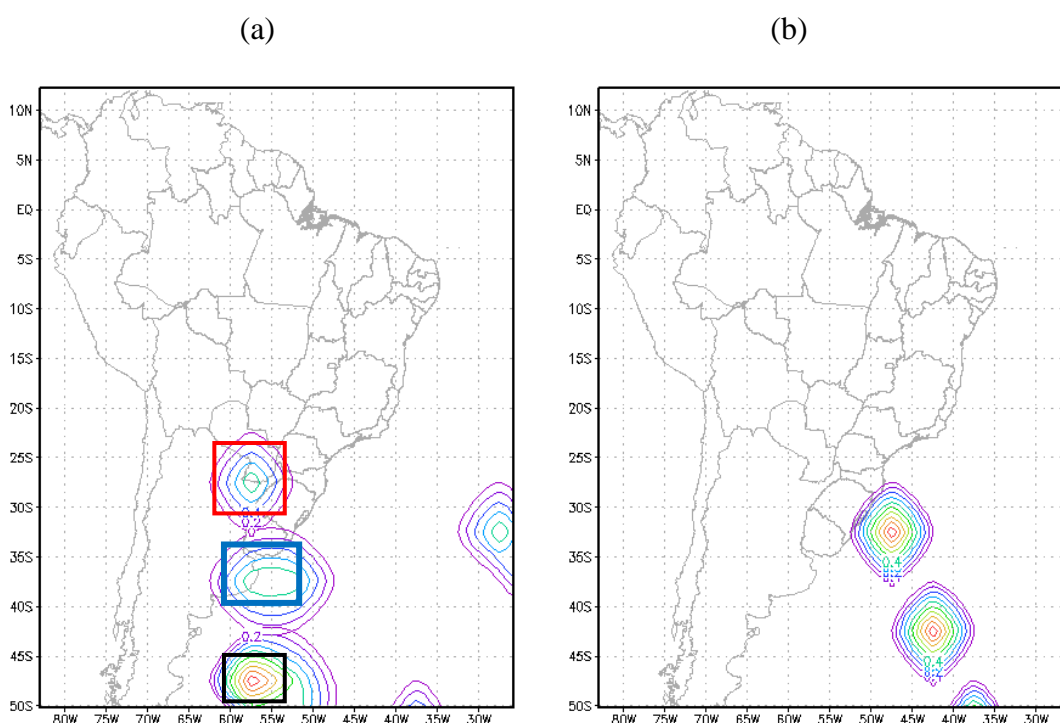


Figura 4.2 – Ciclogêneses (a) e ciclólises (b) detectadas pelo programa CYCLOC no período de 1 a 31 de dezembro de 2009, utilizando-se como dados de entrada a Reanálise do ERA-Interim a cada 6 horas.

Tabela 4.1 – Informações sobre as trajetórias no. 33, 102, 115 e 156, extraídas do arquivo trk200912.out.

Trajetória 33				
Data (dd/mm)	Hora (Z)	Lat (grau)	Lon (grau)	Pressão Central hPa
3/12	06	-38,70	-50,06	1.002,1
3/12	12	-40,07	-47,09	1000,0
3/12	18	-40,64	-43,25	993,0
4/12	00	-42,15	-40,79	986,2
4/12	06	-43,88	-38,41	979,3
4/12	12	-44,21	-37,78	974,5
4/12	18	-46,48	-34,61	973,0
5/12	00	-50,88	-31,75	972,5
5/12	06	-54,41	-30,37	964,7
5/12	12	-56,87	-29,52	962,6
5/12	18	-58,84	-28,93	955,6
6/12	00	-59,82	-28,42	954,6
6/12	06	-60,89	-24,75	953,7
6/12	12	-61,72	-21,60	955,7
6/12	18	-63,22	-15,70	957,0
7/12	00	-64,17	-9,44	956,6
7/12	06	-64,96	-6,30	961,4
7/12	12	-66,21	-1,56	963,0
7/12	18	-66,70	-0,73	966,7
8/12	00	-66,77	-1,07	968,2
8/12	06	-66,04	-2,04	967,4
8/12	12	-65,86	-359,32	966,8
8/12	18	-66,42	-356,85	967,9
9/12	00	-67,04	-356,14	969,1
9/12	06	-67,44	-356,23	971,9
9/12	12	-67,61	-358,57	974,5

Trajetória 102				
Data (dd/mm)	Hora (Z)	Lat (grau)	Lon (grau)	Pressão Central hPa
12/12	00	-28,26	-55,89	1.005,4
12/12	06	-30,84	-50,30	1.000,7
12/12	12	-31,39	-48,35	996,9
12/12	18	-32,04	-46,84	992,9
13/12	00	-31,93	-43,64	991,3
13/12	06	-32,18	-42,89	989,7
13/12	12	-32,77	-42,02	988,2
13/12	18	-32,97	-41,46	987,5
14/12	00	-33,57	-39,55	991,2
14/12	06	-33,24	-37,88	989,9
14/12	12	-34,37	-35,48	994,0
14/12	18	-35,66	-32,73	995,8
15/12	00	-36,02	-30,44	999,5
15/12	06	-36,73	-26,59	999,7
15/12	12	-36,71	-22,87	1.003,2

Tabela 4.1 – Final

Trajetória 115				
Data (dd/mm)	Hora (Z)	Lat (grau)	Lon (grau)	Pressão Central hPa
14/12	00	-46,75	-59,63	998,0
14/12	06	-46,99	-58,38	998,7
14/12	12	-46,81	-56,59	1.000,4
14/12	18	-46,55	-54,57	999,5
15/12	00	-48,09	-53,27	999,1
15/12	06	-48,10	-51,71	997,0
15/12	12	-48,33	-51,01	997,1
15/12	18	-49,08	-49,24	996,6
16/12	00	-49,32	-46,95	997,8
16/12	06	-49,08	-45,02	998,0
16/12	12	-49,06	-43,64	999,2
16/12	18	-50,58	-40,72	999,7
17/12	00	-50,14	-39,23	1.001,9

Trajetória 156				
Data (dd/mm)	Hora (Z)	Lat (grau)	Lon (grau)	Pressão Central hPa
20/12	00	-38,53	-56,54	1.004,2
20/12	06	-40,71	-54,12	1.002,6
20/12	12	-40,90	-51,51	1.004,3
20/12	18	-41,78	-48,14	999,3
21/12	00	-42,89	-45,42	1.001,7
21/12	06	-42,35	-42,97	1.000,8
21/12	12	-42,36	-40,77	1.002,4
21/12	18	-42,61	-39,29	1.003,3
22/12	00	-42,61	-37,96	1.006,1
22/12	06	-42,60	-36,31	1.006,7
22/12	12	-42,80	-33,94	1.009,3
22/12	18	-43,33	-32,41	1.009,4
23/12	00	-43,84	-29,75	1.011,2
23/12	06	-44,16	-28,27	1.010,9

4.2 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima presente com ERA-Interim

Gráficos e tabelas da frequência de ocorrência das ciclogêneses por estação do ano, assim como da direção preferencial das trajetórias, foram construídos para a grade de 20-50°S e 25,8-83°W utilizando-se como dados de entrada a PNMM do ERA-Interim no período de 1979 à 2009. Optou-se por incluir nas estatísticas apenas os ciclones que se mantém configurados por no mínimo 4 horários consecutivos, a cada 6 horas, assim como adotado por Gan e Rao (1991). Tal critério evita a contabilização de sistemas de escala temporal inferior à escala sinótica.

Considerando-se verão como dez-jan-fev; outono como mar-abr-mai; inverno como jun-jul-ago e primavera como set-out-nov, foi gerada uma estatística sazonal de ciclogêneses apresentada na Tabela 1. Nota-se na Tabela 4.2 e Figura 4.3 que a frequência de ocorrência de ciclogêneses é maior no inverno, com um total de 29,2 sistemas no trimestre jun-jul-ago, ou seja, aproximadamente 10 sistemas por mês. Em seguida, o período da primavera (set-out-nov), com uma média de 27,0 sistemas por ano (o que totaliza uma média em torno de 9 ciclogêneses por mês). Nas demais estações do ano, outono (verão) ocorrem em média 26,4 (23,5) sistemas na área estudada, em torno de 9 (8) sistemas por mês. Totalizando uma média de cerca de 106 ciclogêneses por ano.

Tabela 4.2 – Número de ciclones que duram no mínimo quatro horários consecutivos. Totais sazonais médios considerando-se o verão: dez-jan-fev; outono: mar-abr-mai; inverno: jun-jul-ago e primavera: set-out-nov. As médias foram calculadas para o período do outono de 1979 até a primavera de 2009, ou seja, 30 verões e 31 outonos, invernos e primaveras para o conjunto de dados da Reanálise do ERA-Interim.

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	7,1	4,8	4,8	7,4	2,8	0,2	27,0
Verão	7,2	5,0	4,6	4,9	1,8	0,1	23,5
Outono	7,7	5,2	6,2	5,1	2,0	0,2	26,4
Inverno	7,6	6,2	6,3	7,0	2,0	0,0	29,2

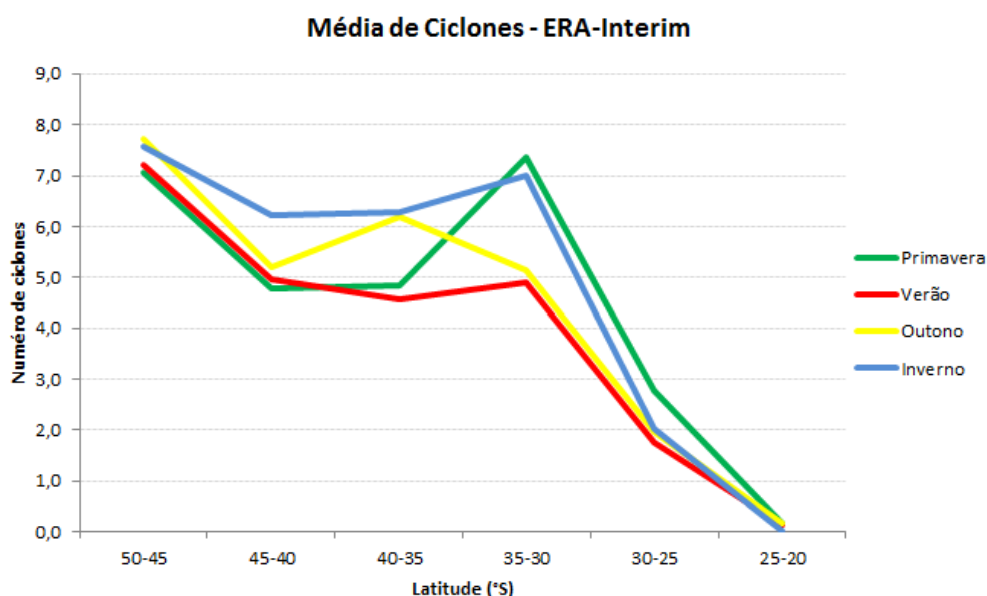


Figura 4.3 – Média de ciclones com duração mínima em 4 horários consecutivos, por faixa de latitude, para o período de 1979 até 2009. Os valores representam o número total de ciclones formados em cada faixa de latitude e por estação do ano.

Comparando-se os resultados acima obtidos com ERA-Interim com aqueles obtidos por Gan e Rao (1991) de forma subjetiva, nota-se que há uma boa concordância. Gan e Rao (1991) encontraram um número médio de 30 ciclones para os meses de inverno (jun-jul-ago) e outono (mar-abr-mai), e uma menor frequência de ocorrência de ciclones no meses de primavera (set-out-nov) e verão (dez-jan-fev), com respectivamente 26 e 21 ciclones. Então, a partir da coerência entre os resultados deste trabalho e o de Gan e Rao, pode-se assim, obter uma confiança maior na utilização da Reanálise ERA-Interim para a representação da climatologia.

Como pode ser visto também na Figura 4.4, a quantidade de ciclogêneses é maior nas latitudes mais altas, cerca de 8 ciclogêneses em todas as estações do ano na faixa de 50 a 45°S, e vai diminuindo em direção às latitudes mais baixas. Observa-se um pico secundário na faixa de latitude entre 30 e 35°S que está presente em quase todos os meses do ano, exceto no outono, quando este pico ocorre na faixa entre 35 e 40°S.

Analisando-se as trajetórias dos ciclones por faixas de latitude, verifica-se nos resultados obtidos com o ERA-Interim que os ciclones que se formam nas altas latitudes, entre 35° e 50°S, deslocam-se preferencialmente para leste (aproximadamente 60% dos ciclones) e os ciclones das baixas latitudes, entre 20° e 35°S, movem-se em geral para sudeste (cerca de 40%) (Tabela 4.3 e Figura 4.4). Este resultado está de acordo com obtido por Gan e Rao (1991), onde cerca de 59% (58%) dos ciclones na faixa de latitude de 15 a 40°S (40 a 50°S) se deslocavam para Leste (Sudeste).

Tabela 4.3 – Média de trajetórias dos ciclones por direção e por faixa de latitude, a partir dos dados da Reanálise do ERA-Interim.

Lat./Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
50°S - 35°S	29	78	1444	415	53	18	190	7	2234
35°S - 20°S	6	14	420	425	43	15	101	5	1029

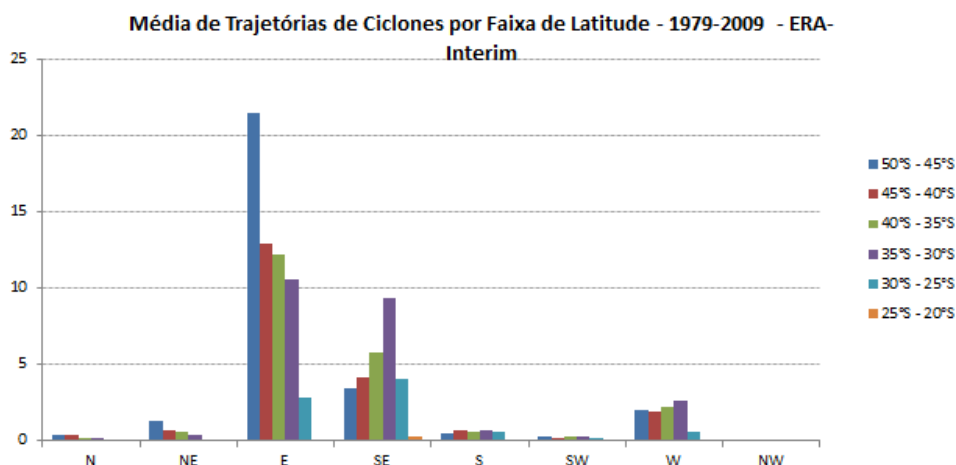


Figura 4.4 – Média de trajetórias dos ciclones por direção e por faixa de latitude, a partir dos dados da Reanálise do ERA-Interim para o período de 1979 a 2009.

Os mapas sazonais de ciclogêneses (apresentados na Figura 4.5) foram construídos considerando-se o total sazonal. Como esperado o inverno é a estação com maior número de ciclogêneses na região entre Uruguai e Rio Grande do Sul, com uma média de 75 sistemas durante os 3 meses em todo o período de 50 anos. A concentração de ciclogêneses nesta área atinge um máximo no inverno, diminui da primavera até o verão e volta a se elevar no outono. Tal resultado também está de acordo com os resultados de Gan e Rao (1991) e Palmeira (2003), que apresentaram um núcleo ciclogênico próximo ao Uruguai,. No entanto, o outro núcleo, encontrado por Gan e Rao (1991) próximo à região do Golfo de San Matias, é representado pelo Era-Interim ligeiramente mais ao sul (em torno de 50°S).

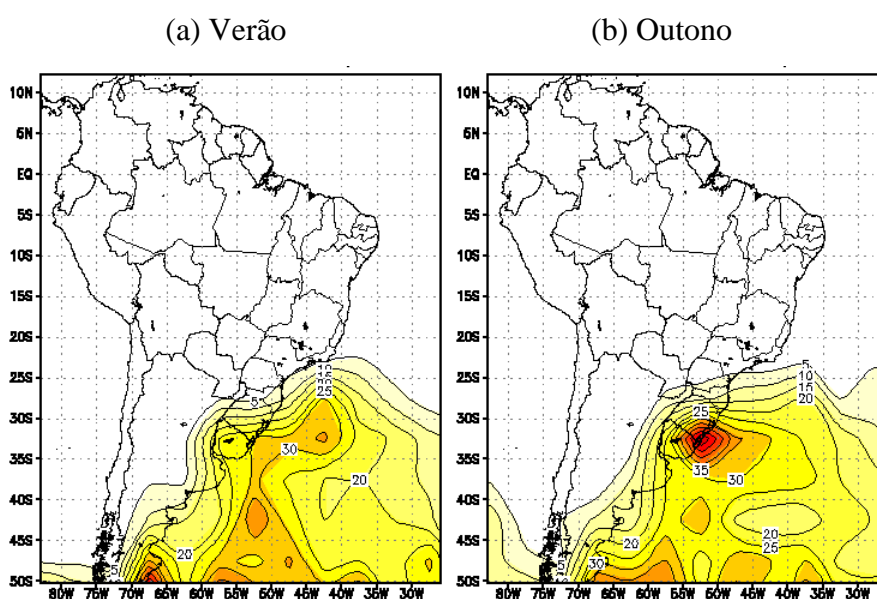


Figura 4.5 – Ciclogêneses sazonais para o período de 1979 a 2009 do ERA-Interim, média para as estações: (a) Verão, (b) Outono, (c) Inverno e (d) Primavera.

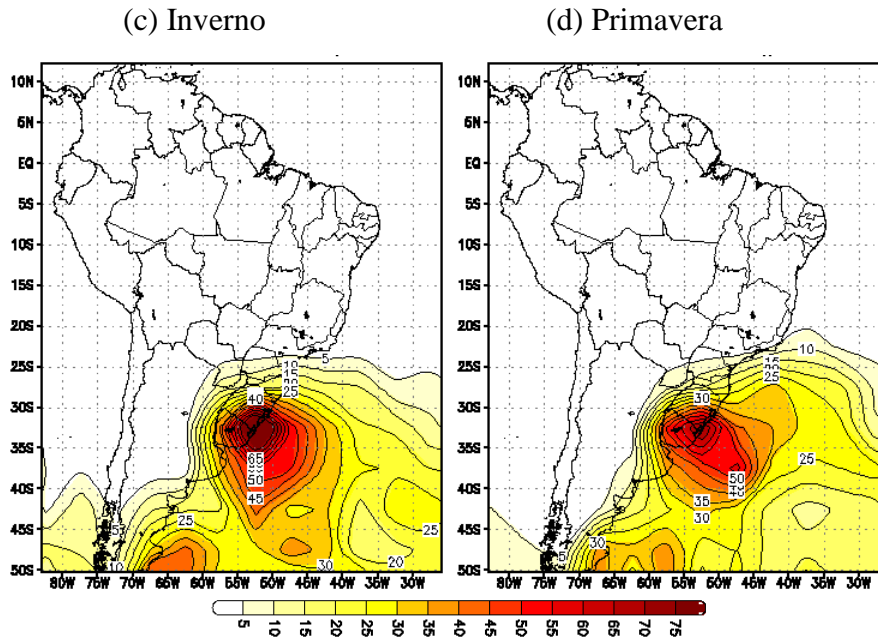


Figura 4.5 – Final.

4.3 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima presente com Eta-HadCM3

As mesmas análises apresentadas no item anterior para o ERA-Interim foram elaboradas para as integrações do modelo Eta-HadCM3 no período de 1961 a 1990. Assim, é possível verificar o desempenho do modelo em representar a climatologia de ciclogêneses no Atlântico Sul.

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.6 apresentam-se os resultados do número de ciclogêneses representado pelas quatro integrações do modelo Eta-HadCM3: LOW, MID, HIGH e CNTRL. Quando comparados com os resultados do ERA-Interim a quantidade média de ciclogêneses é bem inferior às observadas com o modelo Eta-HadCM3. Enquanto o valor total médio de ciclogêneses para todas as estações com os dados do ERA-Interim é cerca de 100, o modelo Eta-HadCM3 indica cerca de 40 ciclogêneses em cada integração. Isto mostra que o modelo Eta-HadCM3 representa 60% menos ciclogêneses que o ERA-Interim. A integração LOW apresenta o total médio de ciclogêneses por ano (45,7) maior do que as demais integrações: HIGH (37,6), CNTRL (39,6), MID (36,8). A maior quantidade média de ciclogêneses pode ser vista nos meses de inverno, assim como foi observado com o ERA-Interim. No entanto, a segunda maior frequência ocorre nos meses de outono, seguido da primavera e por último os

meses de verão. Este padrão é similar nas outras integrações: MID, HIGH e CNTRL (Tabela 4.4 b. c. d. e Figura 4.6 b. c. d.).

Tabela 4.4 – Número de ciclones que duram no mínimo quatro horários consecutivos. Totais sazonais médios para o período do outono de 1961 até a primavera de 1990, ou seja, 29 verões e 30 outonos, invernos e primaveras, para o conjunto de dados: a) LOW, b) MID, c) HIGH e d) CNTRL do modelo Eta-HadCM3.

a) LOW

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,5	2,0	3,1	3,6	1,9	0,3	11,4
Verão	0,2	1,5	2,2	2,7	2,9	0,8	10,2
Outono	0,4	2,3	2,9	3,7	1,4	0,7	11,4
Inverno	0,7	3,7	3,5	3,4	1,2	0,2	12,7

b) MID

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,4	1,5	2,3	2,9	1,2	0,3	8,7
Verão	0,2	0,8	1,1	2,5	1,6	0,3	6,6
Outono	0,3	2,4	3,1	2,4	1,4	0,2	9,8
Inverno	0,8	2,4	3,2	3,8	1,4	0,0	11,7

c) HIGH

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,2	1,2	1,9	3,4	1,1	0,5	8,3
Verão	0,3	0,9	1,4	2,2	2,2	0,2	7,3
Outono	0,3	1,9	2,8	3,4	1,1	0,2	9,6
Inverno	0,5	2,7	4,0	4,3	0,8	0,1	12,4

d) CNTRL

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,5	1,3	2,5	2,9	1,4	0,2	8,7
Verão	0,1	0,9	1,9	2,5	2,2	0,3	7,9
Outono	0,4	1,9	3,3	3,4	0,9	0,4	10,4
Inverno	0,8	2,8	3,4	4,2	1,3	0,1	12,6

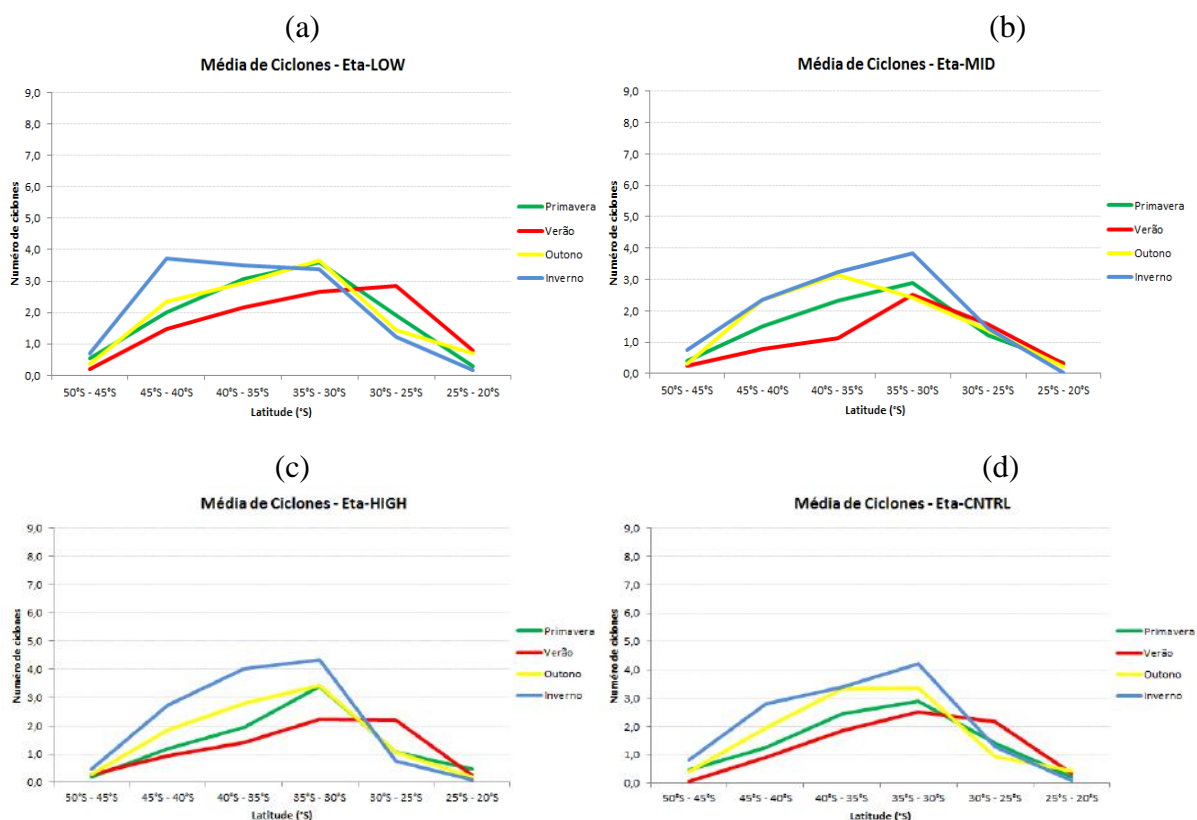


Figura 4.6 – Média de ciclones com duração mínima em 4 horários consecutivos, por faixa de latitude, para o período de 1961 até 1990. Os valores representam o número total de ciclones formados em cada faixa de latitude e por estação do ano para as integrações do modelo Eta-HadCM3: (a) LOW, (b) MID, (c) HIGH, (d) CNTRL.

Na Figura 4.6 verifica-se que a quantidade de ciclones atinge um máximo entre 30 e 35°S e diminui em direção as latitudes mais altas, contrário à climatologia observada apresentado na revisão da literatura. Uma possível explicação para este problema seria o fato do domínio do modelo Eta-HadCM3 estar limitado ao sul em 50,2°S, impedindo a formação de ciclones em sua borda sul.

De forma geral não existe muita discrepância entre os membros do modelo Eta-HadCM3, exceto na integração LOW, que apresenta um pico na faixa de 40 a 45°S (25 e 30°S) no inverno (verão), o que não é observado nos demais membros.

As direções (em octantes) das trajetórias dos ciclones foram analisadas por faixa de latitude. A Figura 4.7 apresenta o número médio de ciclones por faixa de latitude e por direção de suas trajetórias. Verifica-se no geral que em todos os conjuntos de dados a direção predominante (média de 60% entre as integrações) de deslocamento é a direção leste (E) para as faixas de latitude mais altas (50°S a 30°S). A faixa de 30°S a 25°S de acordo com os

resultados das integrações do modelo Eta-HadCM3 indicam uma mudança na trajetória preferencial (média de 35% entre as integrações), mostrando que para esta faixa a direção predominante passa a ser para sudeste (SE). Ambos os resultados estão de acordo com aqueles apresentados pelo ERA-Interim. Destaca-se também na Figura 4.7 que na faixa latitudinal de 35 a 50°S, apesar da baixa frequência de ocorrência, verificam-se alguns sistemas deslocando-se para oeste (W) e para nordeste (NE).

Tabela 4.5 – Média de trajetórias dos ciclones por direção e por faixa de latitude, a partir dos dados das integrações: a) LOW, b) MID, c) HIGH e d) CNTRL do modelo Eta-HadCM3.

a) LOW

Lat./Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
50°S - 35°S	12	39	433	149	16	13	18	6	686
35°S - 20°S	4	13	192	349	71	32	8	4	673

b) MID

Lat./Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
50°S - 35°S	6	42	316	144	19	11	11	5	554
35°S - 20°S	3	12	167	271	57	19	8	4	541

c) HIGH

Lat./Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
50°S - 35°S	5	39	317	132	19	12	8	9	541
35°S - 20°S	2	10	168	274	83	32	9	3	581

d) CNTRL

Lat./Direção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
50°S - 35°S	4	23	354	155	19	11	15	6	587
35°S - 20°S	4	14	197	281	53	34	5	4	592

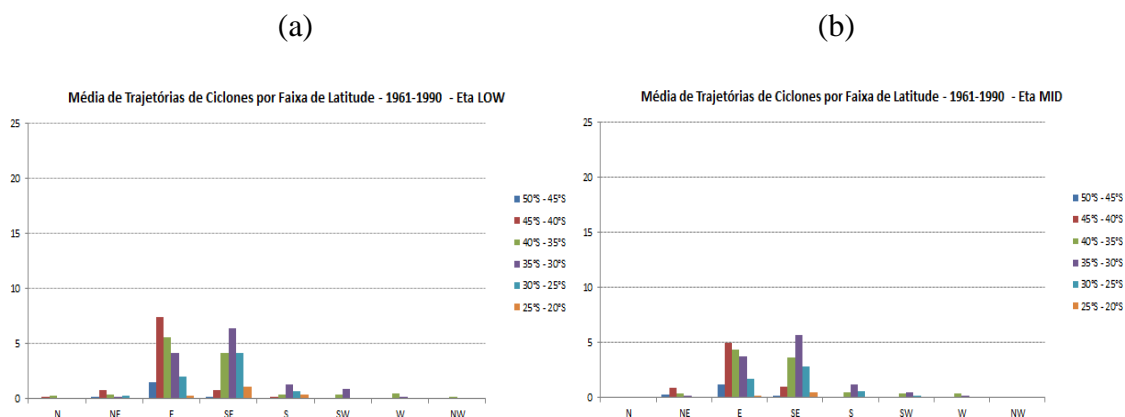


Figura 4.7 – Média de trajetórias dos ciclones por direção, a partir dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: (a) LOW, (b) MID, (c) HIGH e (d) CNTRL.

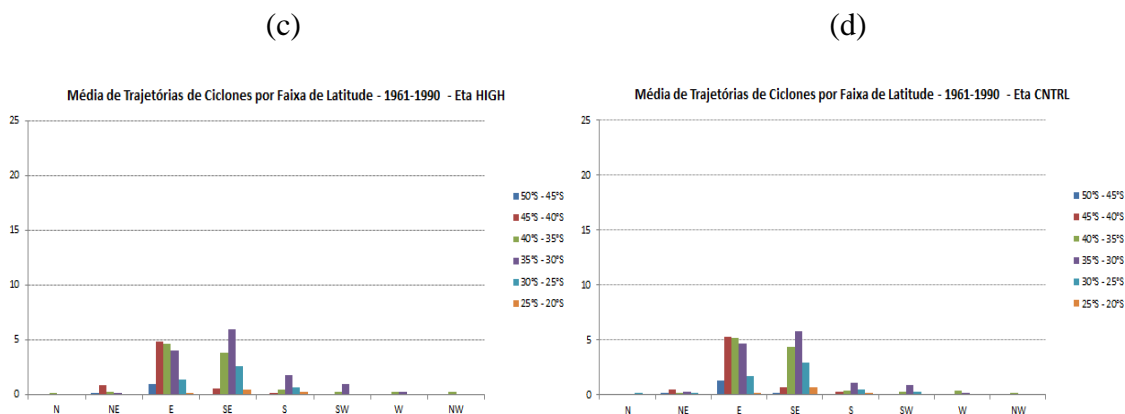


Figura 4.7 – Final.

Assim como foi realizado com o ERA-Interim, mapas sazonais de ciclogêneses foram construídos para as quatro integrações do modelo Eta-HadCM3. Como os resultados foram bem similares entre as integrações, optou-se por apresentar somente a distribuição sazonal do membro CNTRL (Figura 4.8).

Como tem sido mostrado, o Eta-HadCM3 subestima bastante a quantidade de ciclones em relação ao ERA-Interim. Desta forma ao construir a figura do número médio de ciclogêneses por estação do ano para o Eta-HadCM3, utilizando escala idêntica à utilizada na Figura 3.2.3, para efeito de comparação, verifica-se que os valores ficam entre 0 e 5 ciclogêneses, o que impede uma análise adequada da região preferencial de ocorrência da ciclogênese (ver Figura 3.3.2). Desta forma decidiu-se elaborar tal mapa utilizando o número total de ciclogêneses por estação do ano para todo o período analisado (1979-2009). Tais resultados são apresentados na Figura 4.9 que mostra a distribuição espacial do total de ciclogêneses para cada estação do ano dada pela integração CNTRL do modelo Eta-HadCM3.

Analisando a Figura 4.9, verifica-se que o modelo Eta-HadCM3 indica um núcleo preferencial de formação de ciclones no oceano Atlântico próximo ao Uruguai (35°S/47°W) nos meses de outono, inverno e primavera, com cerca de 20 ciclogêneses. Já nos meses de verão, este núcleo encontra-se deslocado um pouco para norte (30°S/43°W), indicando um máximo de 35 ciclogêneses. Este resultado mostra que o modelo Eta-HadCM3 consegue posicionar (nos meses de outono, inverno e primavera) um máximo de ocorrência de ciclogêneses próximo ao Uruguai como foi apresentado por Gan e Rao (1991). No entanto, como mostrado anteriormente, o modelo Eta-HadCM3 não representa adequadamente a

quantidade de maior de ciclogêneses nas latitudes mais altas, como foi indicado por Gan e Rao (1991), Palmeira (2003) e Reboita (2008).

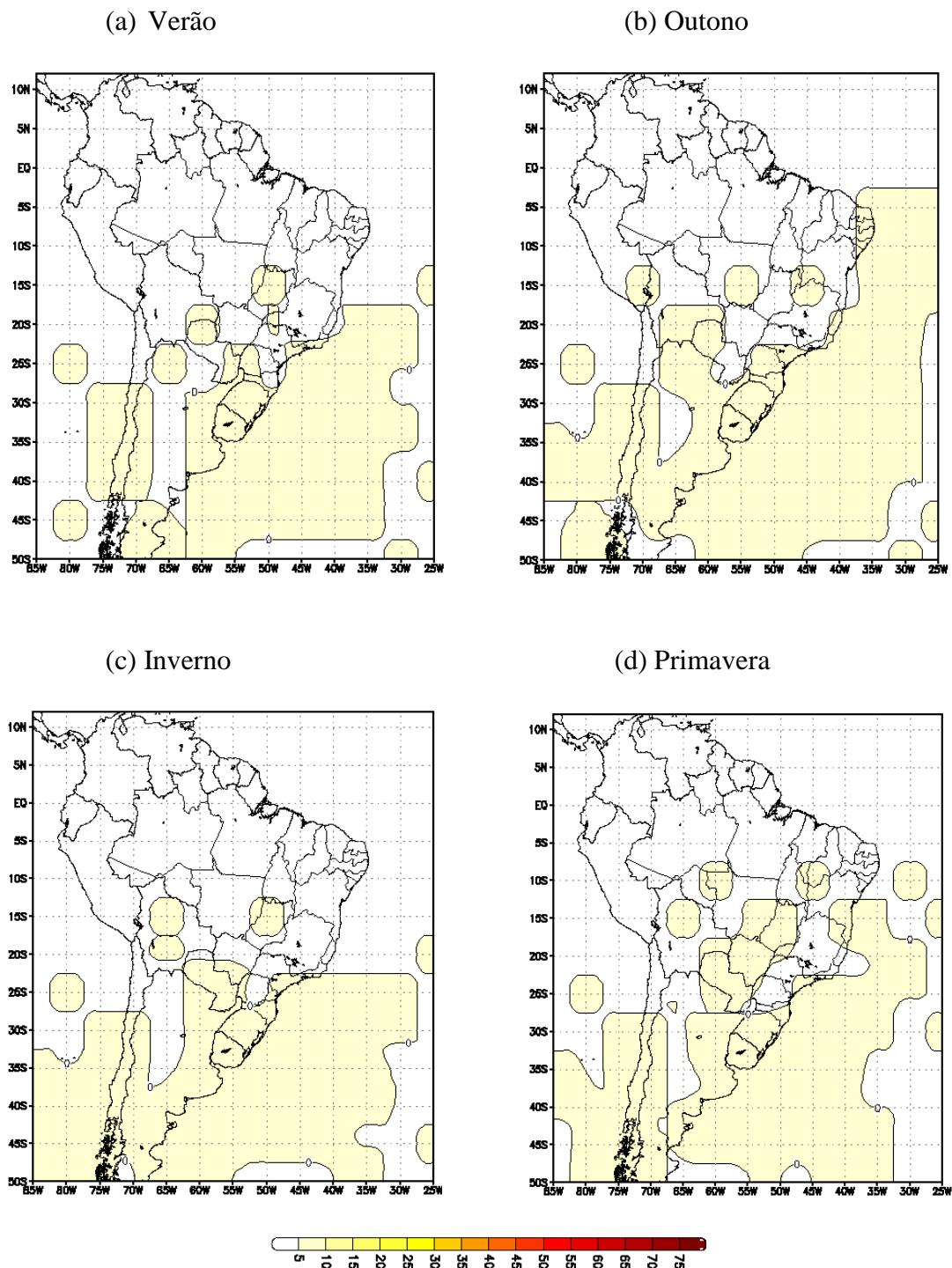


Figura 4.8 – Ciclogêneses (valores médios sazonais) para o período de 1961 a 1990 da integração CNTRL do Eta-HadCM3, média para as estações: (a) Verão, (b) Outono, (c) Inverno e (d) Primavera.

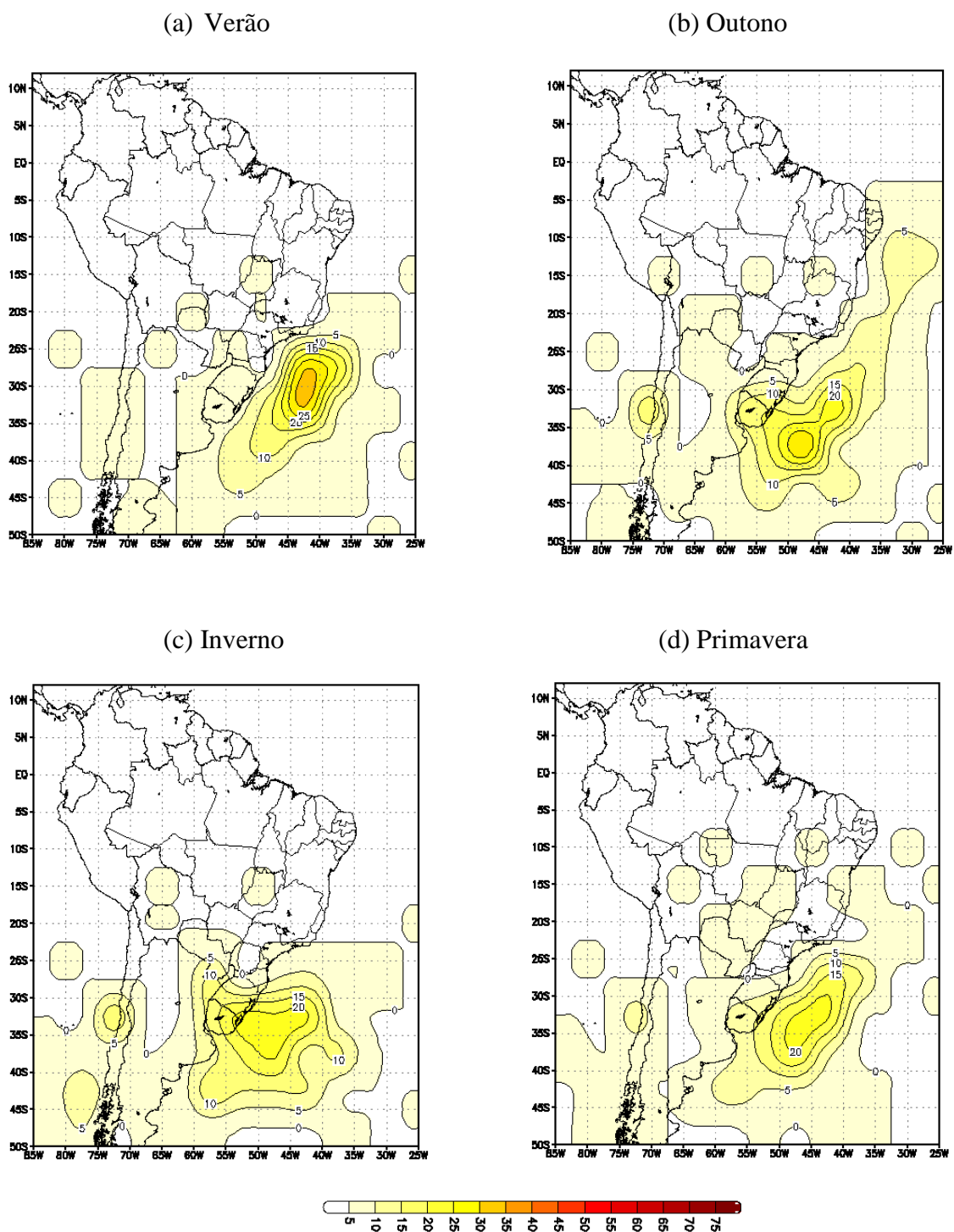


Figura 4.9 – Ciclogêneses sazonais (número total para o período de 1961 a 1990) da integração CNTRL do Eta-HadCM3, total para as estações: (a) Verão, (b) Outono, (c) Inverno e (d) Primavera.

4.4 Comparação entre a climatologia do clima presente representada pelo modelo Eta-HadCM3 e pela reanálise ERA-Interim

A quantidade média por ano de ciclogêneses foi analisada sazonalmente, somando todas as faixas de latitude e comparando os resultado do ERA-Interim com as quatro integrações do modelo Eta-HadCM3 (Figura 3.4.1). Observa-se como já havia sido comentado que o modelo Eta-HadCM3 está subestimando a quantidade de ciclones, representando apenas cerca de 40% do número total observado no ERA-Interim e na climatologia de Gan e Rao (1991). Com relação à distribuição sazonal, o Eta-HadCM3 representa corretamente a maior quantidade de ciclogêneses no inverno e menor no verão. Os resultados a partir dos dados da Reanálise ERA-Interim mostram que a segunda maior ocorrência de ciclogêneses ocorre nos meses da primavera, no entanto, com o modelo Eta-HadCM3, este padrão não foi observado, representando uma segunda maior ocorrência nos meses do outono. Pode ser observado também na Figura 4.10 que não há variação significativa entre os valores de ciclogêneses apresentados pelas quatro integrações do modelo Eta-HadCM3.

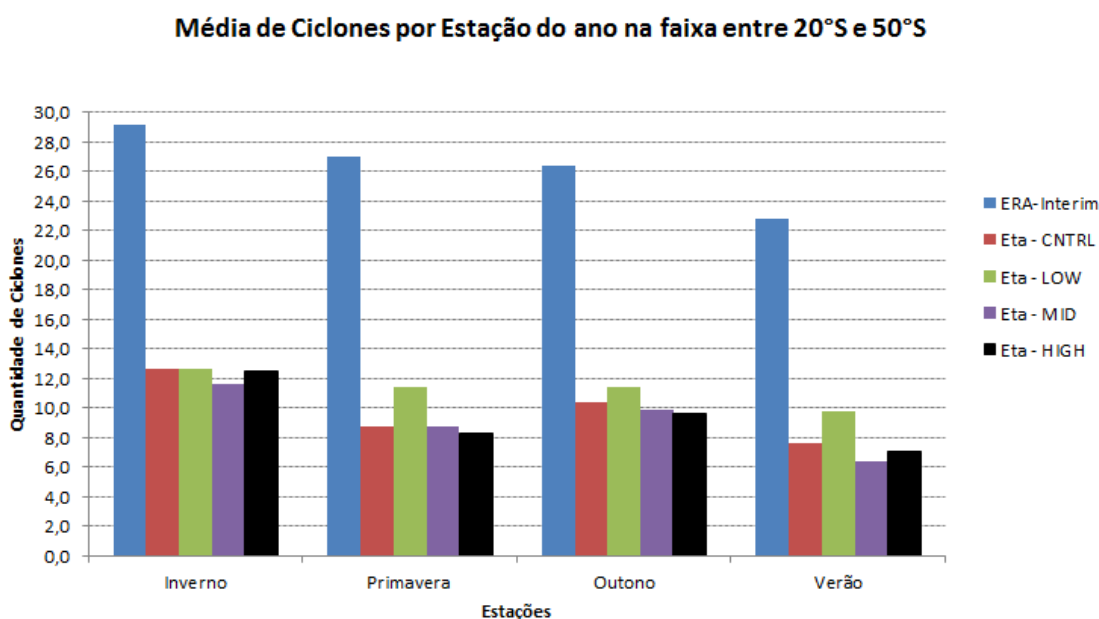


Figura 4.10 – Média de ciclones por estação do ano para a faixa de 20° a 50°S, a partir de dos dados da reanálises ERA-Interim (azul) e das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros CNTRL (vermelho), LOW (verde), MID (roxo) e HIGH (preto).

Foi realizada também uma análise da quantidade média de ciclogêneses por ano durante o período de 1961 à 1990 (para as integrações do modelo Eta-HadCM3) e 1979 à 2009 (reanálise ERA-Interim) separadamente por faixas de 5° de latitude (Figura 4.11).

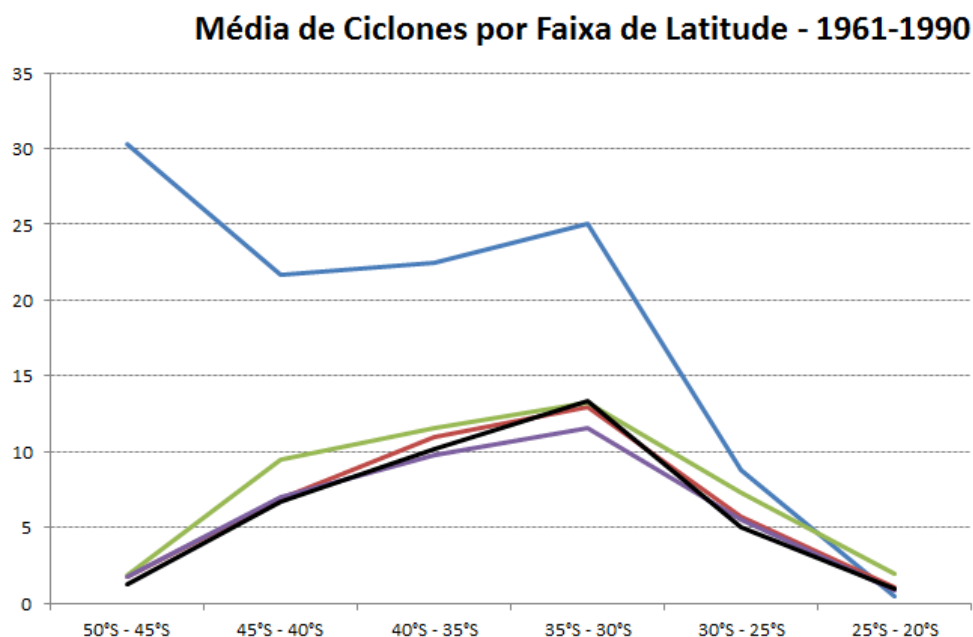


Figura 4.11 – Número médio de ciclogêneses por faixa de latitude para os dados da reanálise ERA-Interim no período de 1979 a 2009 (azul) e das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros CNTRL (vermelho), LOW (verde), MID (roxo) e HIGH (preto), para o período de 1961 a 1990.

A partir da Figura 4.11 fica aparente o aumento na frequência de ocorrência de ciclogêneses das baixas para as altas latitudes nos dados do ERA-Interim (linha azul). Este aspecto não é representado adequadamente pelo modelo Eta-HadCM3 (demais linhas), que apresentam um máximo de ciclogênese entre 30 e 35°S. Como ressaltado anteriormente, isto pode estar relacionado com o fato do limite inferior do modelo ocorrer na latitude de 50,2°S, o que poderia impedir o desenvolvimento de ciclones próximo às suas fronteiras.

A análise da evolução temporal das ciclogêneses de toda a grade (20° a 50° de latitude) foi realizada utilizando-se o total de ciclogêneses por ano para o período total considerado de 1961-2009 para as integrações do modelo Eta-HadCM3 e para a Reanálise ERA-Interim (Figura 4.12).

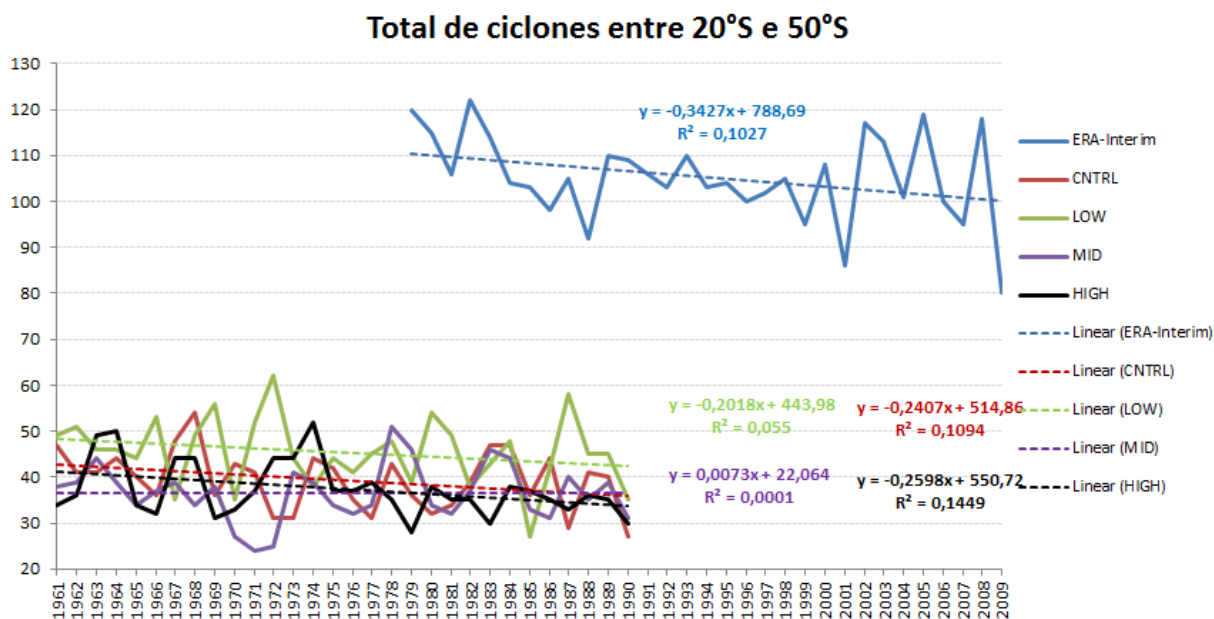
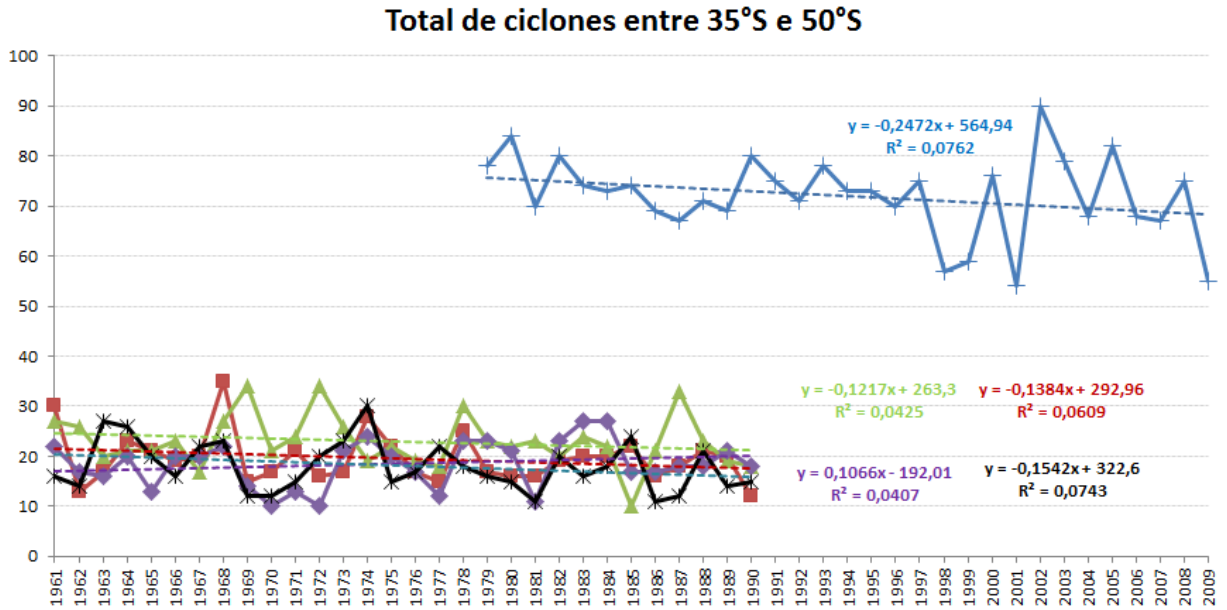


Figura 4.12 – Total de ciclones entre 20 e 50°S, a partir dos dados da Reanálise ERA-Interim (linha azul) para o período de 1979 a 2009 e dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros CNTRL (linha vermelha), LOW (linha verde), MID (linha roxa) e HIGH (linha preta) para o período de 1961 a 1990. Linhas tracejadas representam o ajuste linear para as curvas apresentadas.

Nota-se na Figura 4.12 que há um ligeiro decréscimo representado pelo coeficiente linear negativo ajustado à curva dos dados da Reanálise ERA-Interim, representado também pelas integrações do modelo Eta-HadCM3, exceto a integração MID que apresenta praticamente tendência nula.

Após alguns testes, decidiu-se fazer a mesma análise temporal citada acima, porém separando em duas faixas de latitude de 35 a 50°S e de 20 a 35°S, como mostra a Figura 4.13. Através da Figura 3.4.4 é possível observar uma tendência negativa representada pelos dados da Reanálise ERA-Interim para a faixa de latitude entre 35 e 50°S, o que é novamente acompanhada pelos dados do modelo Eta-HadCM3, exceto pela integração MID, que apresenta uma tendência leve de aumento no número de ocorrência de ciclones. Na faixa de latitude entre 20 e 35°S, uma tendência negativa também é observada pelos dados da Reanálise ERA-Interim, apontando uma ligeira tendência de queda que é acompanhada pelas integrações do modelo Eta-HadCM3.

(a)



(b)

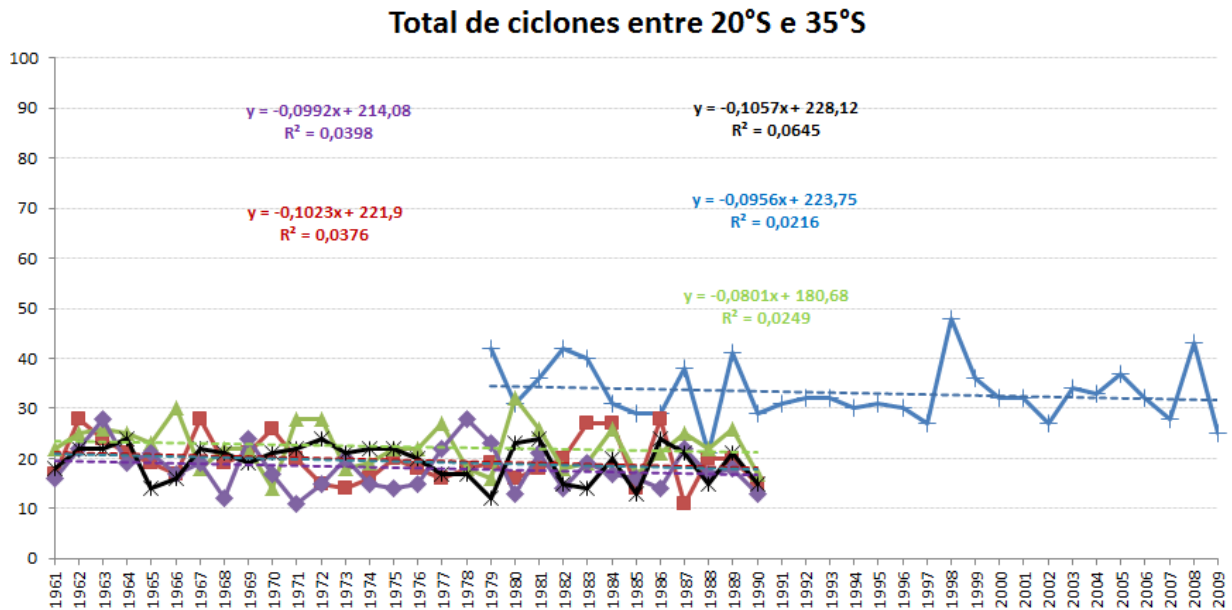


Figura 4.13 – Total de ciclones, a partir dos dados da Reanálise ERA-Interim (linha azul) e dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3, para os membros CNTRL (linha vermelha), LOW (linha verde), MID (linha roxa) e HIGH (linha preta) para as faixas de latitude: (a) 35 a 50°S e (b) 20 a 35°S.

CAPÍTULO V

PROJEÇÕES FUTURAS DO COMPORTAMENTO DOS CICLONES EXTRATROPICAIS

Neste item são apresentados os resultados das projeções do Modelo Eta-HadCM3 para o clima futuro, onde foram utilizados como dados de entrada as quatro integrações do modelo Eta-HadCM3 para o período de 2011 a 2099.

Os resultados foram gerados do mesmo modo que no item anterior, para o clima presente, obtendo assim, uma climatologia futura da frequência de ocorrência de ciclogêneses e de suas trajetórias predominantes. Primeiramente foram feitas análises sazonais e depois foram obtidas as análises de todo o período (2011 a 2099), para todas as integrações do modelo Had-CM3 (LOW, MID, HIG e CNTRL). Os resultados aqui apresentados devem ser interpretados levando-se em conta os problemas apontados no item anterior, ou seja, deve-se considerar apenas as tendências das projeções futuras dos parâmetros analisados, e não seus valores absolutos.

5.1 Climatologia das Ciclogêneses e das Trajetórias dos Ciclones para o clima futuro com Eta-HadCM3

Os resultados gerados sazonalmente, por faixa de latitude, da quantidade média de ciclones que permaneceram por pelo menos quatro horários consecutivos, foram obtidos como na análise para o clima presente (Figura 5.1 e Tabela 5.1).

Observando o total médio de ciclones que se formam em cada estação do ano na Tabela 5.1 e na Figura 5.1, percebe-se que todas as integrações permanecem indicando os mesmos resultados do clima presente: maior quantidade de ciclones nos meses do inverno, seguido pelos meses de outono, primavera e por último verão. Similarmente ao clima presente, também é possível observar uma quantidade reduzida de ciclone nas latitudes mais altas. Nota-se que o total médio por ano para todas as integrações (35,7) foi ligeiramente menor do que o do clima presente (40). No entanto, a integração LOW permaneceu indicando a maior quantidade (41,5), seguida pela integração CNTRL (35,1), MID (33,8) e HIGH (32,4). O pico máximo da quantidade de ciclogêneses permanece sendo observado em todas as integrações entre as faixas de latitude de 30 a 35°S.

Tabela 5.1 – Número de ciclones que duram no mínimo quatro horários consecutivos. Totais sazonais médios considerando-se o verão, outono, inverno e primavera. As médias foram

calculadas para a projeção futura de 2011 a 2099 para o conjunto de dados do modelo Eta-HadCM3: a) LOW, b) MID, c) HIGH e d) CNTRL do modelo Eta-HadCM3.

a) LOW

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,2	1,5	2,4	3,4	1,7	0,3	9,6
Verão	0,2	1,2	2,2	2,9	2,1	0,3	8,8
Outono	0,2	1,7	3,4	3,5	1,2	0,2	10,3
Inverno	0,8	2,8	3,4	4,4	1,2	0,2	12,8

b) MID

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,1	1,1	2,1	3,1	1,1	0,2	7,7
Verão	0,1	0,8	1,9	2,0	0,8	0,1	5,7
Outono	0,1	1,5	3,2	3,5	0,8	0,1	9,3
Inverno	0,5	2,0	3,2	4,3	1,0	0,1	11,1

c) HIGH

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,2	0,9	1,9	2,7	1,1	0,2	7,0
Verão	0,1	0,8	1,5	1,9	1,1	0,0	5,5
Outono	0,2	1,5	2,9	4,0	1,0	0,1	9,6
Inverno	0,4	1,9	2,9	4,0	1,0	0,2	10,3

d) CNTRL

Estação/Lat.	50-45°S	45-40°S	40-35°S	35-30°S	30-25°S	25-20°S	TOTAL
Primavera	0,3	1,1	1,9	2,8	1,0	0,2	7,2
Verão	0,1	0,8	1,8	2,4	1,1	0,2	6,4
Outono	0,3	1,7	3,3	3,7	1,0	0,2	10,2
Inverno	0,6	2,4	2,9	4,2	1,1	0,1	11,3

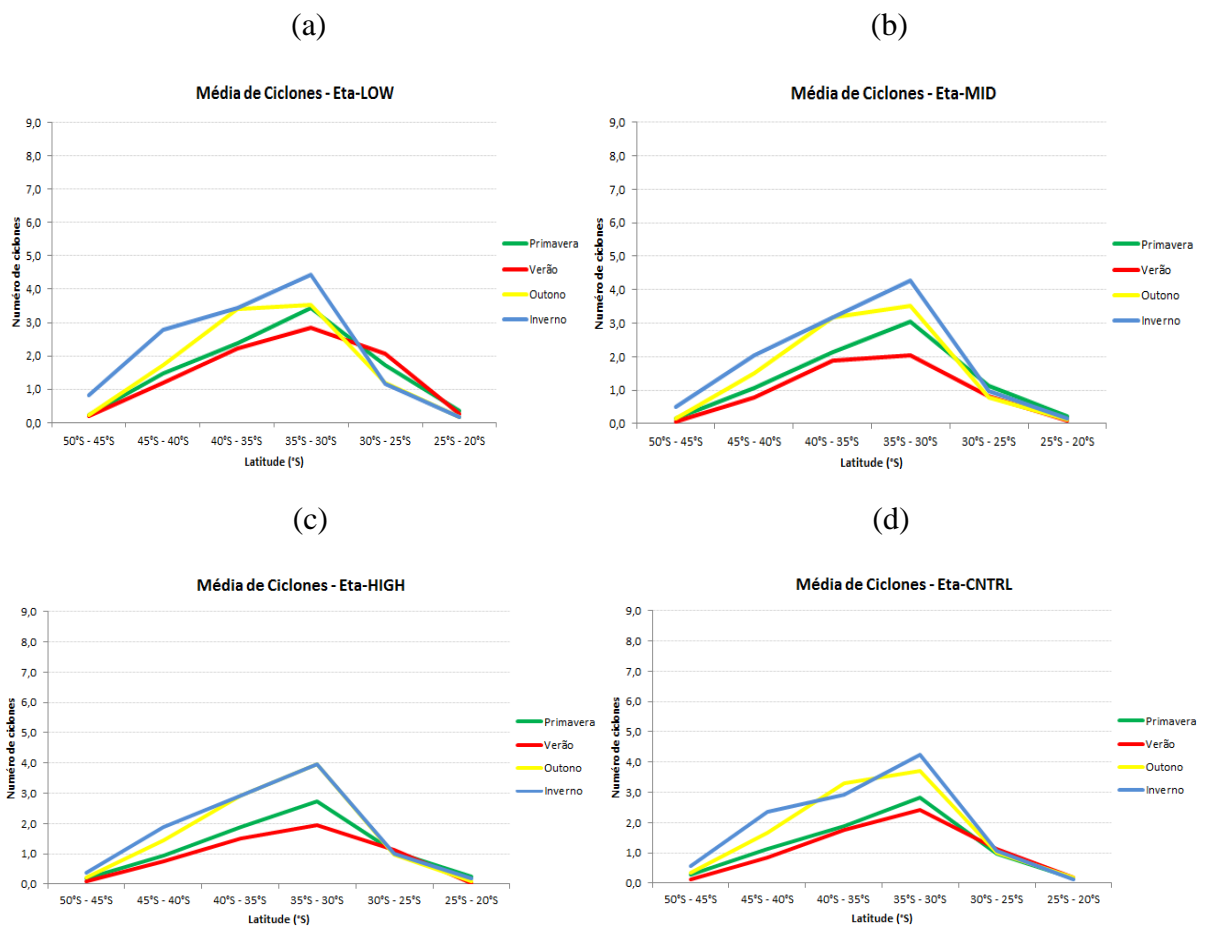


Figura 5.1 – Média de ciclones com duração mínima em 4 horários consecutivos, por faixa de latitude, para o período de 2011 até 2099. Os valores representam o número total de ciclones formados em cada faixa de latitude e por estação do ano para as integrações do modelo Eta-HadCM3: (a) LOW, (b) MID, (c) HIGH, (d) CNTRL.

Assim como na Figura 4.7 a Figura 5.2 representa a trajetória predominante dos ciclones por faixa de latitude, a cada 5° de latitude. Nota-se na Figura 5.2 a mesma tendência na direção das trajetórias dos ciclones encontrada para o tempo presente (1961 a 1990): para Leste nas latitudes mais altas, entre 35 e 50°S e para Sudeste nas latitudes mais baixas, entre 20 e 35°S.

No geral a integração LOW indica valores ligeiramente maiores do que as outras integrações tanto para ciclones em que o predomínio de sua trajetória é para Leste quanto os que possuem trajetória para Sudeste.

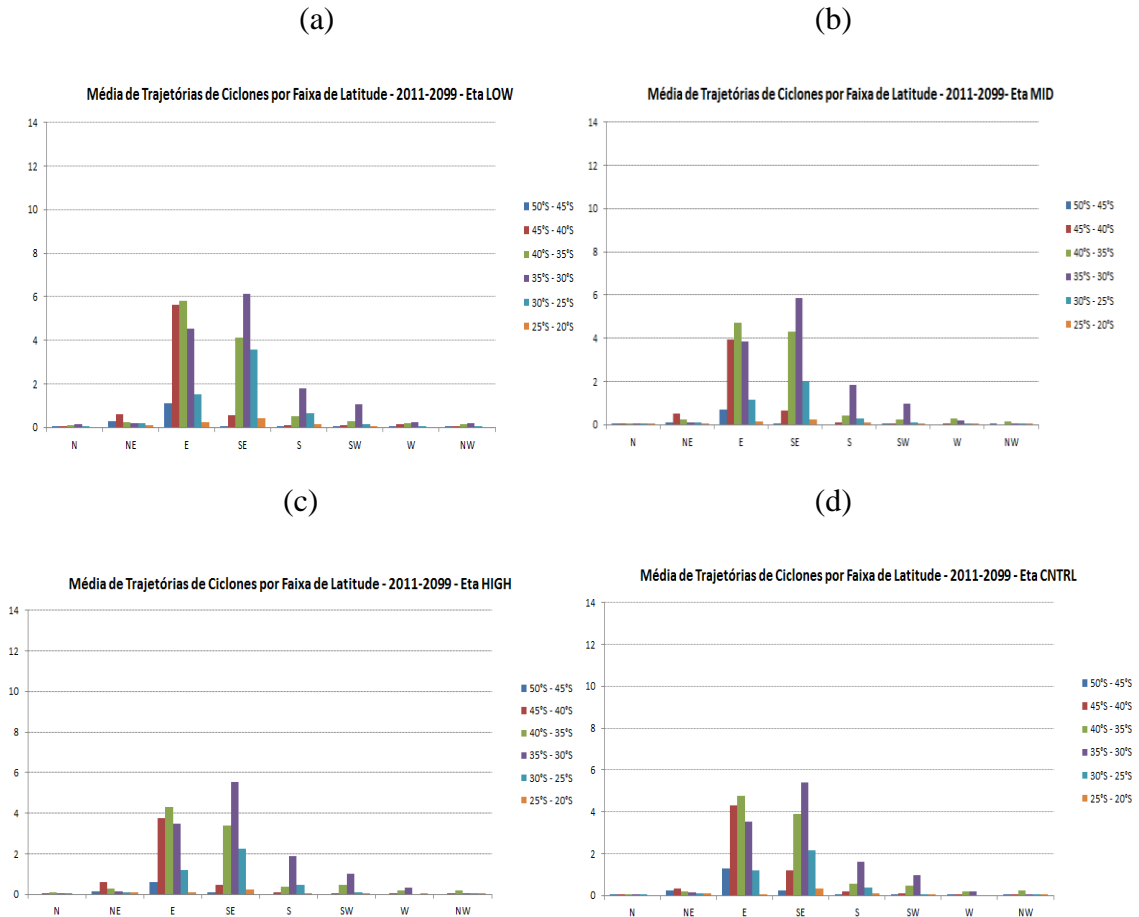


Figura 5.2 – Média de trajetórias dos ciclones por direção, a partir dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: (a) “LOW”, (b) “MID”, (c) “HIGH” e (d) “CNTRL”.

Realizando, uma análise para toda a grade, como pode ser visto na Figura 5.3, é possível perceber que para todas as integrações, o mesmo padrão do clima presente é mantido. Do mesmo modo que foi observado nas figuras sazonais e por faixa de latitude, o inverno se permanece sendo a estação que mais tem ocorrência de ciclones e o verão sendo o que possui menor frequência.

Média de Ciclones por Estação do ano na faixa entre 20°S e 50°S - 2011-2099

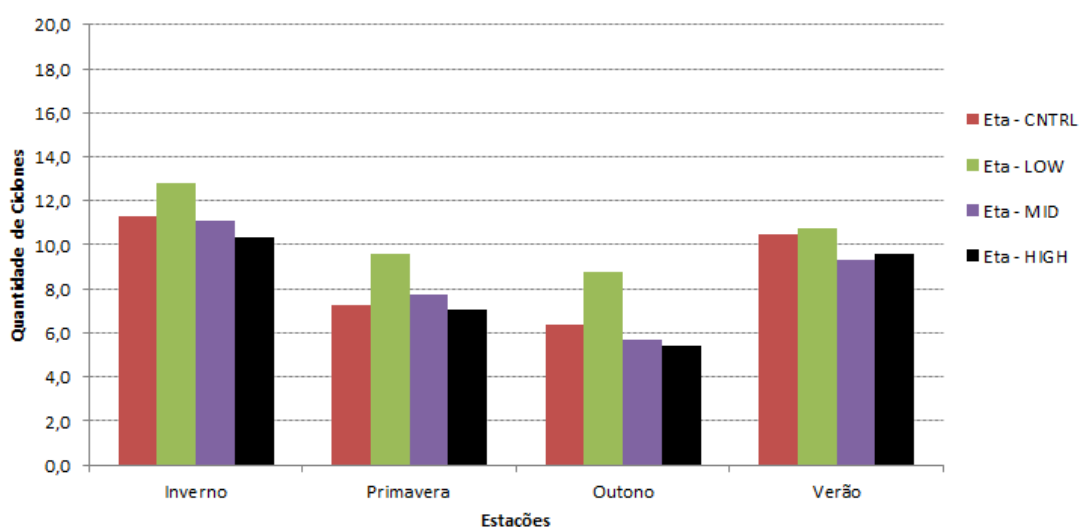


Figura 5.3 – Média de ciclones por estação do ano para a faixa de 20° a 50°S, a partir de dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros “CNTRL” (vermelho), “LOW” (verde), “MID” (roxo) e “HIGH” (preto).

Ao fazer uma comparação sazonal entre as quatro integrações do modelo Eta-HadCM3, observa-se que a integração LOW possui as maiores quantidades médias de ciclones para todas as estações, enquanto que a integração HIGH possui a menor frequência de ciclones, exceto para os meses de outono, onde a integração MID é que possui estes valores. Em quase todos os meses do ano, a integração CNTRL, indica a segunda maior frequência de ciclones quando comparada com as outras integrações, porém, nos meses da primavera, a integração MID indica essa segunda maior frequência.

O mesmo padrão encontrado no clima presente pode ser visto na Figura 5.4. As integrações do modelo Eta-HadCM3 não representam uma maior quantidade de ciclogêneses nas latitudes mais altas. Nota-se que para todas as faixas, a integração LOW apresenta as maiores quantidades médias de ocorrência de ciclones. Para as faixas de latitude mais baixas (35°S a 20°S) as curvas das integrações MID, HIGH e CNTRL estão bem próximas, indicando uma mesma quantidade de ciclones nessa região.

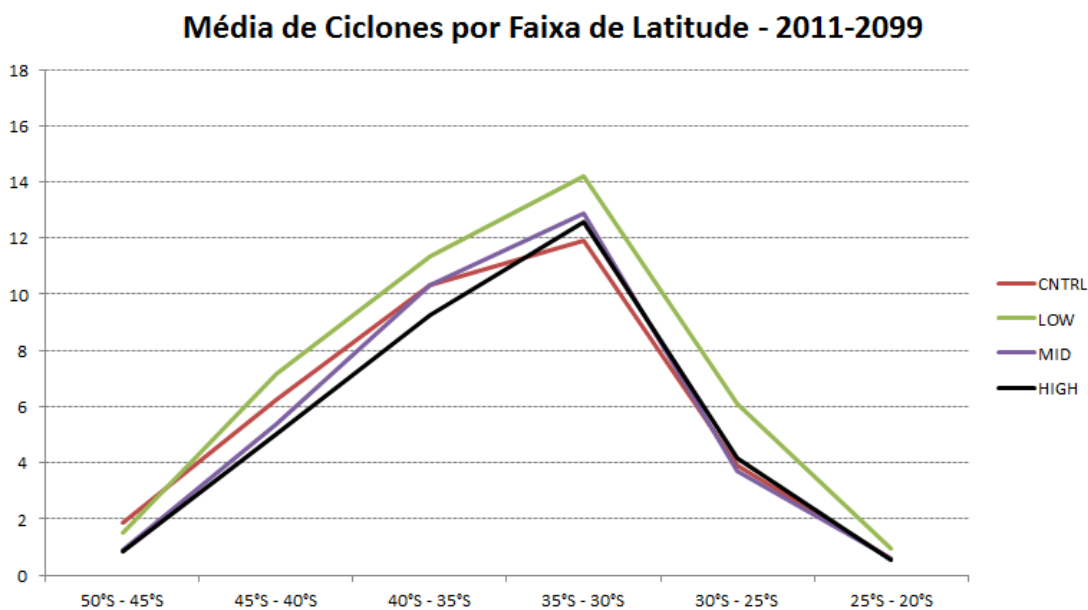


Figura 5.4 – Número médio de ciclogêneses durante o período de 2011-2099 por faixa de latitude para os dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros CNTRL (vermelho), LOW (verde), MID (roxo) e HIGH (preto).

A Figura 5.5 mostra a evolução temporal da quantidade de ciclones por ano para a faixa entre 20-50°S, para as integrações do modelo Eta-HadCM3 no clima futuro (2011 a 2099). Observa-se na Figura 5.5, para todas as séries, uma tendência de redução na ocorrência de ciclones. Esta mesma tendência foi notada, anteriormente nos resultados para o clima presente, pelas Reanálises e pelas integrações LOW, HIGH e CNTRL.

Contudo na Figura 5.6 (b), um suave aumento é indicado pelos resultados da integração “CNTRL” na faixa de latitude entre 20 e 35°S.

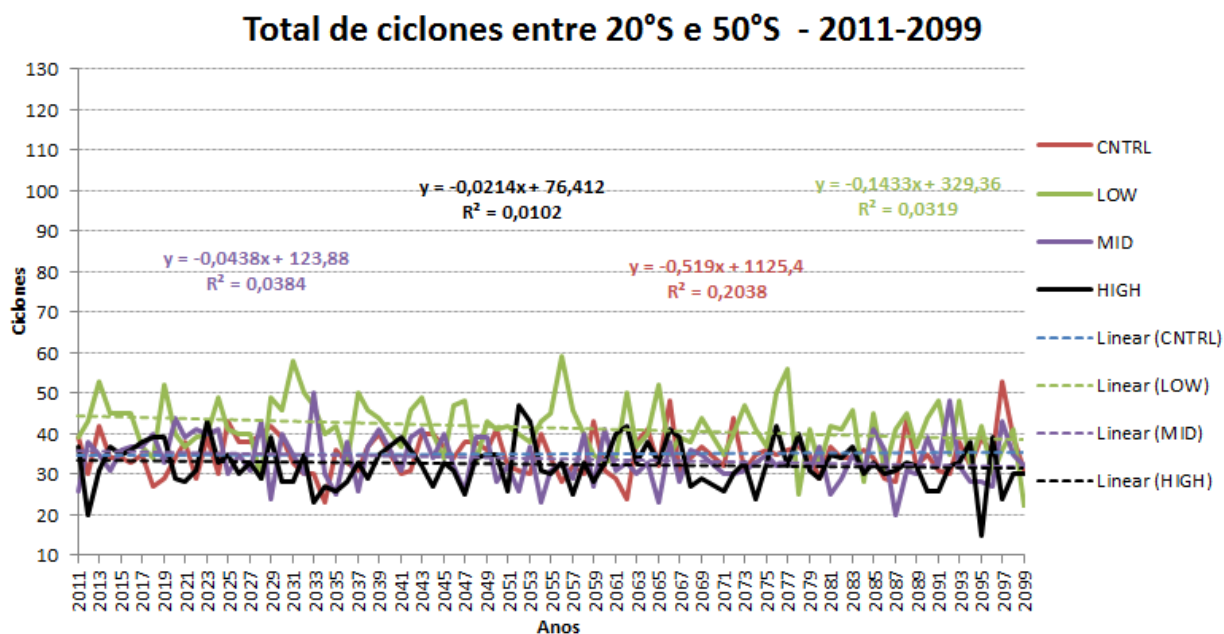


Figura 5.5 – Total de ciclones entre 20 e 50°S, a partir dos dados das integrações do modelo Eta-HadCM3: membros CNTRL (linha vermelha), LOW (linha verde), MID (linha roxa) e HIGH (linha preta).

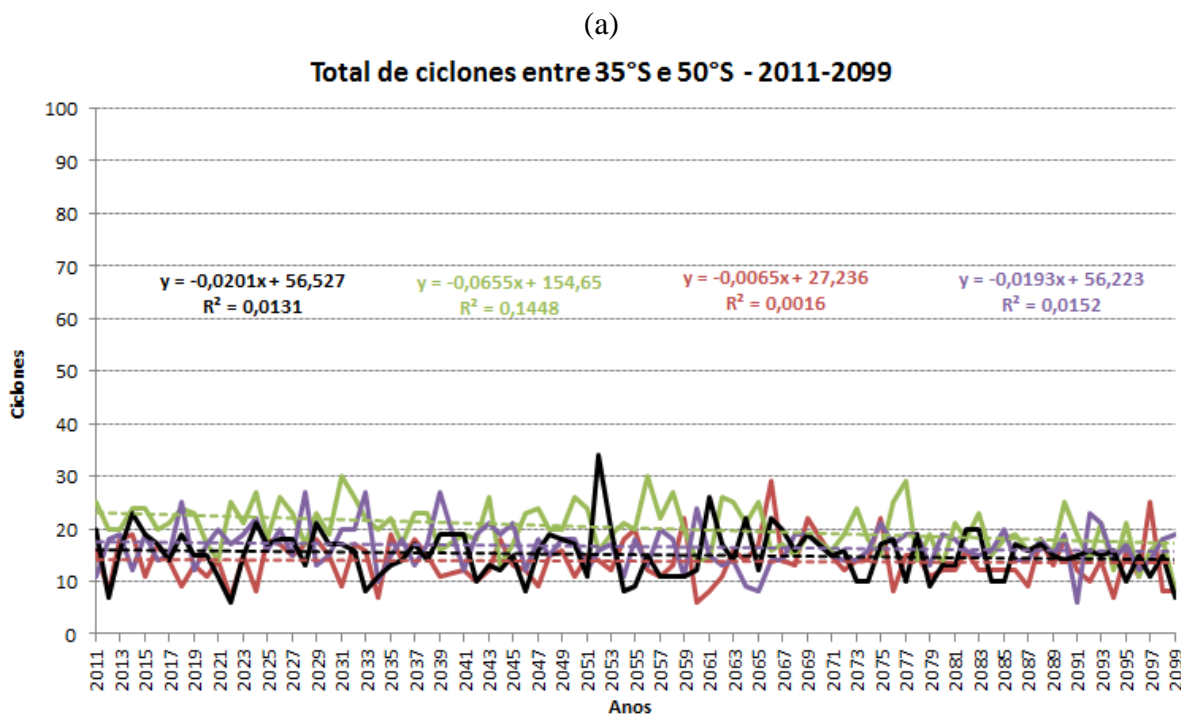


Figura 5.6 – Total de ciclones, a partir das integrações do modelo Eta-HadCM3, para os membros “CNTRL” (linha vermelha), “LOW” (linha verde), “MID” (linha roxa) e “HIGH” (linha preta) para as faixas de latitude: (a) 35 a 50°S e (b) 20 a 35°S.

(b)

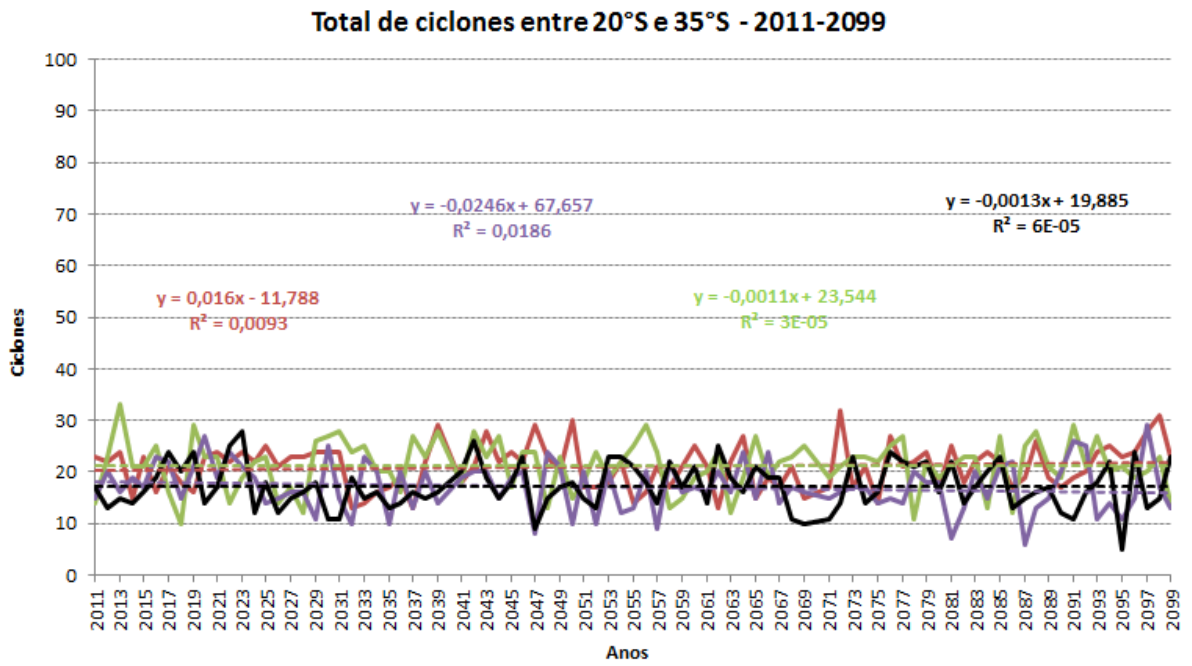


Figura 5.6 – Final.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA 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 produzidas pelo modelo Eta-HadCM3 no clima presente (1961-1990) a partir de suas integrações LOW, MID, HIGH e CTRL. A avaliação foi feita considerando a climatologia de 31 anos do ERA-Interim no período de 1979 a 2009 (31 anos). As projeções futuras (2011-2099) do comportamento dos ciclones representados pelo modelo Eta-HadCM3 em suas quatro integrações também foram analisadas.

A maior (menor) frequência de ocorrência de ciclogêneses, indicada pelo ERA-Interim ocorre no inverno (verão) e tal aspecto é corretamente representado pelo modelo Eta-HadCM3. A quantidade média total de ciclogêneses por ano foi bastante subestimada pelo modelo Eta-HadCM3, que representou somente 40 ciclogêneses por ano (média entre as 4 integrações), enquanto que no ERA-Interim a média é de 106 ciclogêneses. Os resultados a partir do ERA-Interim indicam que a frequência de ocorrência da ciclogênese aumenta em geral com aumento da latitude, porém nas integrações do modelo Eta-HadCM3 nota-se forte subestimativa da quantidade de ciclogêneses nas altas latitudes. No modelo Eta-HadCM3 ocorre um máximo de ciclogênese entre 35-30°S e um decaimento em direção à borda sul. Este problema pode estar relacionado com o fato do domínio do modelo estender-se até apenas a latitude 50,2°S. Por outro lado, o modelo Eta-HadCM3 superestima levemente o número de ciclogêneses nas baixas latitudes e esta superestimativa é mais pronunciada no verão e outono do que no inverno e primavera.

Com relação à direção das trajetórias dos ciclones, tanto o modelo Eta-HadCM3 quanto o ERA-Interim indicaram que a direção predominante para todas as estações do ano, considerando-se todas as faixas de latitude, é para leste (E), ou seja, os ciclones dirigem-se para leste, e em segundo lugar para sudeste (SE). Entre 20 e 35°S os ciclones em geral movem-se para sudeste e nas latitudes mais altas (entre 35 e 50°S) a direção predominante é leste. Verificou-se que para o ERA-Interim (Eta-HadCM3) 60% (60%) de ciclones movem-se para leste e 40% (35%) movem-se para sudeste. Nota-se baixíssima frequência de ocorrência de

ciclones dirigindo-se para noroeste (NW), norte (N), oeste (W) e sudoeste (SW) tanto no ERA-Interim quanto no Eta-HadCM3.

Da análise espacial observa-se que o ERA-Interim configura um centro de máxima ocorrência de ciclogêneses próximo ao Uruguai em todas as estações do ano como foi obtido também por Gan e Rao (1991). Sazonalmente nota-se no ERA-Interim maior quantidade de ciclogêneses nos meses de inverno, como o era o esperado, cerca de 75 sistemas durante os 3 meses em todo o período de 31 anos. Com o Eta-HadCM3, apesar da menor quantidade de ciclones, verifica-se também um núcleo de máxima ciclogênese próximo ao Uruguai nos meses de outono, inverno e primavera, e nos meses de verão este núcleo se desloca mais para norte, ficando próximo ao litoral do Sul do Brasil.

A análise da tendência de ciclogêneses na série de totais anuais ao longo do período de 1979 a 2009 para o ERA-Interim e para o período de 1961 a 1990 com Eta-HadCM3, indica valores negativos (redução de ciclogêneses) entre 20 e 35°S e entre 45 e 50°S. Em geral, as integrações do modelo Eta-HadCM3 conseguem representar essa tendência, exceto a integração MID, que apresenta um ligeiro aumento na faixa entre 20 e 35°S.

Sobre o clima futuro, nota-se que há uma tendência para a trajetória predominante dos ciclones continuar sendo para leste entre 35-50°S e para sudeste entre 20-35°S.

Com relação à tendência nas frequências de ocorrências das ciclogêneses do modelo Eta-HadCM3 para o futuro nota-se a mesma tendência observada no clima presente, de redução tanto para baixas quanto para altas latitudes, exceto a integração CNTRL que apresenta um ligeiro aumento na faixa de latitude mais baixa.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma investigação preliminar do comportamento dos ciclones no modelo de circulação geral da atmosfera utilizado para o aninhamento com o modelo regional. Caso o modelo de circulação geral subestime o número de ciclogêneses na área em estudo, provavelmente o modelo regional acompanhará tal tendência. Além disso, seria importante integrar o modelo regional com domínio estendido mais a sul a fim de que os ciclones que normalmente ocorrem nesta área possam ser representados.

Como etapa prévia da comparação do comportamento de ciclones representados por modelos regionais e por reanálises, é importante, degradar os modelos de mais alta resolução para a grade de menor resolução, a fim de que todos estejam com a mesma resolução espacial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CHOU, S. C. et al. 2011: Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8.

DEE, D.P., S.M. UPPALA, A.J. SIMMONS, P. BERRISFORD, P. POLI, S. KOBAYASHI, U. ANDRAE, M.A. BALMASEDA, G. BALSAMO, P. BAUER, P. BECHTOLD, A.C.M. BELJAARS, L. VAN DE BERG, J. BIDLOT, N. BORMANN, C. DELSOL, R. DRAGANI, M. FUENTES, A.J. GEER, L. HAIMBERGER, S./B. HEALY, H. HERSBACH, E.V. HÓLM, L. ISAKSEN, P. KÅLLBERG, M. KÖHLER, M. MATRICARDI, A.P. MCNALLY, B.M. MONGE-SANZ, J.-J. MORCRETTE, B.-K. PARK, C. PEUBEY, P. DE ROSNAY, C. TAVOLATO, J.-N. THÉPAUT AND F. VITART, 2011: “The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, pp. 553-597.

FYFE, J. C., 2003: Extratropical Southern Hemisphere Cyclone: Harbingers of Climate Change: *J. Climate*, 16, 2802-2805.

GAN, M. A. G. e V. B. RAO, 1991: Notes and Correspondences. Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, vol. 119, May, 1991, p. 1293-1302.

GIORGI, F.; L. O. MEARN, 1999: Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 104, D6, 6335-6352.

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.

HODGES, K. I., R. W. LEE E L. BENGTSSON, 2011: A comparison of extratropical cyclones in recent reanalysis ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *J. Climate*, 24, 4888-4906.

HOSKINS, B. J.; K. I. HODGES, 2005: A New on Southern Hemisphere Storm Tracks. *J. Climate*, 18, 4108-4129.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis IPCC WG*. Cambridge Univ. Press, 881pp.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Scientific Basis*, IPCC, Geneva.

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.

KRÜGER, L. F.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T., 2009: Ciclones no Atlântico Sul simulados pelo RegCM3 aninhado ao HadAM3: Clima Futuro (2071-2085). In: III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009, Canela – RS, 2009. [International]

KRÜGER, L. F., 2009: *Projeções Climáticas das Ciclogêneses no Atlântico Sul Utilizando os Modelos HadAM3 e RegCM3*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, IAG/USP, 105p.

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

LAMBERT SJ, FYFE JC, 2006: Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dyn* 26:713.

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

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY G.; ALVES, L.; PESQUERO, J. F SOARES, W.R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and and the Parana River Basins. *Climate Dynamics*. 2011. Aceito

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.

MESINGER F., et al., "An upgraded version of the eta model", *meteorology and atmospheric physics*, vol. 116, 2012, pp. 63-79, doi: 10.1007/s00703-012-0182-z.

MURRAY, R. J. E I. SIMMONDS, 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operational of the scheme. *Aust. Meteor. Mag.*, 39, 167-180.

NECCO, G. V., 1982a: Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Ciclogenegis. *Meteorologica*, 13 (1), 7-19.

NECCO, G. V., 1982b: Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Trayectorias y Desarrollos. *Meteorologica*, 13 (1), 21-34.

PALMEIRA, A. C. P. A., 2002: Modelagem numérica de eventos extremos de altura significativa de ondas na região oeste do atlântico sul. Dissertação de Mestrado. IAG/USP.

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.

PIVA, E., 2001: Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-8498-TDI/781, 162 pg.

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.

REBOITA, M. S.; R. P. da ROCHA; T. AMBRIZZI, 2005a: Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In: IX CONGREGMET, Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, AR, Outubro 3-7, 2005.

REBOITA, M. S., 2008: Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. Tese de Doutorado em Meteorologia, IAG/USP, 359 p.

SIMMONDS, I., AND K. KEAY, 2000: Mean Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEP–NCAR Reanalysis. , 13, 873–885.

SINCLAIR, M. R., 1996: Reply. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2615-2618.

SUGAHARA, S., 2000: Variação Anual da Freqüência de Ciclones no Atlântico Sul. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, RJ, 16 a 20 de outubro de 2000.

UPPALA, S. M. ET AL., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n.612, v.131, p.2961-3012.

VERA, C. S.; P. K. VIGLIAROLO; E. H. BERBERY, 2002: Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 684-699.

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.

WATTERSON, I. G., 2006: The intensity of precipitation during extratropical cyclones in global warming simulations: a link of cyclone intensity? *Tellus*, 58A, 82-97.

ZHANG, Y., AND W.-C. WANG, 1997: Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *J. Climate*, 10, 1616–1634.