



**CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL:  
CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS**

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

Ana Carolina Rosas Reis (UFRJ, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: [acarol.meteoro@gmail.com](mailto:acarol.meteoro@gmail.com)

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

E-mail: [chou@cptec.inpe.br](mailto:chou@cptec.inpe.br)

COLABORADORA

Dra. Claudine Pereira Dereczynski (IGEO/UFRJ)

E-mail: [claudine@acd.ufrj.br](mailto:claudine@acd.ufrj.br)

Julho de 2017

O presente relatório descreve as atividades realizadas do projeto de Iniciação Científica do PIBIC/CNPq no período de agosto de 2016 a julho de 2017.

## SUMÁRIO

<b>1. RESUMO DO PLANO INICIAL .....</b>	<b>3</b>
<b>2. RESUMO DO QUE FOI REALIZADO NO PERÍODO A QUE SE REFERE O RELATÓRIO .....</b>	<b>4</b>
<b>3. DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>4</b>
3.1 DADOS .....	5
3.2 A REANÁLISE CFSR.....	5
3.3 OS MODELOS GLOBAIS .....	6
3.3.1 O Modelo MIROC5.....	6
3.3.2 O Modelo HadGEM2-ES.....	6
3.4 O MODELO ETA .....	7
3.5 O ANINHAMENTO DO MODELO REGIONAL ETA COM OS MODELOS GLOBAIS	8
3.6 CENÁRIOS UTILIZADOS DO IPCC AR5.....	8
3.7 O PROGRAMA CYCLOC .....	10
3.8 AS ANÁLISES .....	10
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>11</b>
4.1 CLIMATOLOGIA DE CICLOGÊNESES NO CLIMA PRESENTE (1986-2005).....	11
4.1.1 Avaliação da Climatologia dos Modelos MIROC5 e Eta-MIROC.....	11
4.1.2 Avaliação da Climatologia dos Modelos HadGEM2-ES e Eta-HadGEM2-ES...	14
4.2 PROJEÇÕES DO COMPORTAMENTO DE CICLOGÊNESES COM OS MODELOS	
ETA-MIROC E ETA-HADGEM2-ES .....	16
4.2.1 RCP 4.5 do IPCC AR5.....	16
4.2.2 RCP 8.5 do IPCC AR5.....	19
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>20</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>22</b>

## **1. RESUMO DO PLANO INICIAL**

O plano inicial do trabalho previa o aprendizado do esquema CYCLOC, um programa de detecção automática de ciclones, e também do programa Grid Analysis and Display System (GrADS) para visualização de campos meteorológicos. A seguir a próxima etapa envolvia a elaboração de climatologias de ciclones obtidas a partir dos campos de pressão ao nível médio do mar do modelo global acoplado denominado Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5 (MIROC5) e também do modelo regional Eta do CPTEC/INPE aninhado ao MIROC5, para a América do Sul no clima presente (1961-1990). Tais climatologias seriam comparadas à climatologia do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) para o mesmo período. Nessa etapa ficou evidente que o modelo MIROC5 superestima a quantidade de ciclones e que o modelo Eta-MIROC5 apresenta melhor desempenho que o MIROC5 para representar as ciclogêneses na América do Sul. A aluna pôde avaliar a forma como os resultados do modelo global influencia os resultados do modelo regional (Eta). Foram investigadas as projeções futuras (2007-2040; 2041-2070 e 2071-2099) do modelo Eta-MIROC5, confrontando as tendências futuras com o clima presente do mesmo modelo, utilizando os Representative Concentration Pathways (RCPs 4.5 e 8.5). Os resultados mostraram que nas projeções utilizando o cenário RCP4.5 é notado um claro aumento, para os três períodos analisados, no número de ciclogêneses, em relação ao clima presente. Apesar do aumento no número total de ciclogêneses para o clima futuro, de uma forma geral, a análise mostra uma redução no número de ciclogêneses no decorrer dos três períodos supracitados, ao longo da costa sudeste da América do Sul até 2100. Para as projeções utilizando o cenário RCP8.5, também observa-se um sinal de aumento no número de ciclogêneses para o clima futuro. Destaca-se que na terceira região preferencialmente ciclogênica observada por Reboita (2008), próxima à região sudeste do Brasil, há uma proeminente intensificação, com relação ao clima presente, nas estações do verão e primavera. Nas próximas etapas do projeto foram desenvolvidos os resultados das climatologias do tempo presente e projeções futuras obtidas com o modelo do UK Met Office denominado Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2) com as chamadas componentes do sistema terrestre, em inglês Earth System – ES, (HadGEM2-ES) e Eta-HadGEM2-ES, com a expectativa de que o aumento do número de membros (total de 4) pudesse aumentar a confiabilidade dos resultados aqui encontrados.

## **2. RESUMO DO QUE FOI REALIZADO NO PERÍODO A QUE SE REFERE O RELATÓRIO**

Durante o período de agosto de 2016 a junho de 2017 foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- a) Continuação da etapa de familiarização com o sistema operacional Linux, com o software GrADS e com o esquema CYCLOC;

- b) Avaliação da climatologia de ciclogêneses do Modelo MIROC5 e Eta-MIROC5 em Comparação com a Reanálise CFSR, para o tempo presente 1986-2005, elaboradas utilizando o esquema CYCLOC;
- c) Avaliação da climatologia de ciclogêneses do Modelo HadGEM2-ES e Eta-HadGEM2-ES em Comparação com a Reanálise CFSR, para o tempo presente 1986-2005, elaboradas utilizando o esquema CYCLOC;
- d) Elaboração dos campos de ciclogêneses utilizando o esquema CYCLOC para o clima futuro no cenário RCP 4.5 do IPCC (projeções) que foi dividido em três intervalos: 2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099 a partir dos dados de PNMM dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES;
- e) Elaboração dos campos de ciclogêneses utilizando o esquema CYCLOC para o clima futuro no cenário RCP 8.5 do IPCC (projeções) que foi dividido em três intervalos: 2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099 a partir dos dados de PNMM do modelo Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES;
- f) Investigação da climatologia de ciclogêneses das projeções futuras do Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES (RCP4.5 e RCP8.5) em comparação o tempo presente (1986-2005).

### 3. DADOS E METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os modelos numéricos utilizados no trabalho, a Reanálise CFSR, as características do esquema CYCLOC e os cenários de emissão RCP's 4.5 e 8.5.

#### 3.1 DADOS

Para elaboração das climatologias de ciclones utilizando o esquema CYCLOC, são utilizados dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM) dos modelos MIROC5, HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES e também da reanálise CFSR no domínio de 0° a 45°S e 30° a 90°W com intervalo de amostragem a cada 6 horas. As características dos modelos e da reanálise são apresentadas na tabela abaixo.

	CFSR	MIROC5	HADGEM2-ES	Eta
RESOLUÇÃO HORIZONTAL	0,5° ~56 km	1,3° 150 km	1,9° lon x 1,3° lat 211 km lon x 144 km lat	0,18° 20 km
RESOLUÇÃO VERTICAL	37 NÍVEIS	40 NÍVEIS	38 NÍVEIS	38 NÍVEIS

Tabela 3.1.1 – Características da reanálise CFSR e modelos MIROC5, HadGEM2-ES e Eta.

#### 3.2 A REANÁLISE CFSR

A Reanálise Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) é consideravelmente mais acurada que a reanálise anterior elaborada pelo National Centers for Environmental Prediction

(NCEP) na década de 1990 (Saha *et al.*, 2011) . Isso se deve à inclusão de análises oceânicas e do gelo marinho em alta resolução temporal e espacial. Além disso, segundo os autores, essa acurácia é maior especialmente no Hemisfério Sul, devido ao uso de dados de satélite, nesse hemisfério. O modelo tem resolução horizontal de 38 km e 64 níveis na vertical. O conjunto de dados da Reanálise CFSR foi disponibilizada inicialmente para o período de 1979 a 2009 e posteriormente, estendida até os dias atuais. Existem cinco resoluções horizontais distintas, sendo que a usada no presente trabalho é a de 0,5° de latitude x 0,5° longitude e os dados são inicializados quatro vezes ao dia, às 00, 06, 12 e 18 UTC.

### 3.3 OS MODELOS GLOBAIS

Os modelos globais acoplados utilizados para regionalização, MIROC5 e HadGEM2-ES, foram selecionados por apresentarem desempenho satisfatório na América do Sul em termos de circulação atmosférica (Flato *et al.*, 2013). A rápida disponibilização do conjunto completo das simulações do MIROC5 pela instituição japonesa National Institute for Environmental Studies e do HadGEM2-ES, pelo Centro Inglês British Atmospheric Data Centre, foi também um fator decisivo para a utilização de tais modelos

#### 3.3.1 O MODELO MIROC5

O MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010) é um modelo japonês desenvolvido cooperativamente conhecido como Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), versão 5. Possui componente espectral atmosférica com uma resolução T85, que é de aproximadamente 150 km na horizontal, e tem 40 níveis atmosféricos verticais. Ele é acoplado a COCO 4,5, um modelo oceânico com 50 níveis de profundidade e 1° de resolução horizontal. Os fluxos radiativos são calculados pelo regime de k-distribuição. O modelo de aerossol, o SPRINTARS, é acoplado ao esquema de microfísica de nuvens, juntamente com o esquema de radiação, que usa o esquema de superfície terrestre MATSIRO com 6 camadas de solo. Cada “grid box” é formado por três peças de vegetação potencial, terras cultiváveis e lago. O esquema também contém roteamento de rio e os efeitos da neve no albedo. A termodinâmica e dinâmicas do gelo do mar são representadas.

#### 3.3.2 O MODELO HADGEM2-ES

O modelo UK Met Office Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2) com as chamadas componentes do sistema terrestre, em inglês Earth System – ES, (HadGEM2-ES) é composto de um modelo de circulação geral da atmosfera acoplado a um modelo oceânico. A componente atmosférica utiliza a resolução horizontal N96, que corresponde a aproximadamente 1,250° em latitude e 1,875° em longitude, e 38 níveis verticais, enquanto que a componente oceânica utiliza a resolução horizontal de 1 grau, aumentando para 1/3 de grau no equador, e 40 níveis verticais (Collins *et al.* 2011). O passo de tempo do modelo HadGEM2-ES é de 30 minutos para as componentes da atmosfera e superfície e de 1 hora para a componente oceânica. As componentes do sistema terrestre incluem o ciclo do carbono terrestre e oceânico, e a química da troposfera. A vegetação e o ciclo do carbono terrestre são representados pelo modelo de vegetação dinâmica global, TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics; Cox, 2001), que simula a cobertura e balanço do

carbono de cinco tipos de vegetação: árvores de folhas largas, coníferas, gramínea C3, gramínea C4 e vegetação arbustiva. A biologia e química do oceano são representadas pelo modelo Diat-HadOCC que inclui a limitação de crescimento do plâncton por macro e micronutrientes, e também simula a emissão de Dimetil Sulfeto (DMS) para a atmosfera. A química da troposfera é representada pelo modelo UKCA (United Kingdom Chemistry and Aerosol model) que inclui novas espécies de aerossóis (carbono orgânico e poeira). O UKCA afeta a forçante radiativa através das alterações simuladas do metano e ozônio, bem como as taxas em que o dióxido de enxofre e as emissões de DMS são convertidos em aerossol de sulfato.

### 3.4 O MODELO ETA

O Eta é um modelo regional que utiliza a coordenada vertical eta (Mesinger, 1984), a qual permanece aproximadamente horizontal em regiões de topografia íngreme. Essa versão utiliza um refinamento que permite parar fluxos no entorno de topos de montanhas. A dinâmica do modelo é em volumes finitos (Janjić, 1984) (Mesinger et al., 2012). Convecções profundas e rasas são parametrizadas pelo esquema Betts-Miller (Betts e Miller, 1986) modificado (Janjić, 1984). A microfísica de nuvens segue o esquema Zhao (Zhao et al., 1997). Os processos da superfície terrestre são representados pelo esquema NOAH (Ek et al., 2003) com ciclo anual de vegetação verde. São distinguidos 12 tipos de vegetação e 9 tipos de solo. Fluxos radiativos são tratados pelo esquema de Lacis-Hansen (Lacis e Hansen, 1984), para ondas curtas, e esquema Fels-Schwarzkopf (Felz e Schwarzkopf, 1985) para ondas longas. O nível de CO<sub>2</sub> é constante em 330 ppm.

A versão Eta-20km utilizada neste estudo foi adaptada (Mesinger *et al.*, 2012) para estudos de mudanças climáticas. A Temperatura da Superfície do Mar é extraída dos modelos oceânicos globais acoplados (HadGEM2-ES e MIROC5) e atualizada diariamente. A umidade do solo inicial e temperatura do solo são derivadas dos modelos globais. Fronteiras laterais são atualizadas a cada 6 horas. O primeiro ano de integração é descartado da análise. O modelo foi configurado para resolução horizontal de 20 km e 38 níveis verticais. O topo do modelo está em 25 hPa. Seu domínio cobre a maior parte da América do Sul e América Central. Detalhes do aninhamento do modelo Eta com os modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, assim como a avaliação do clima presente do modelo estão descritos em Chou *et al.* (2014).

### 3.5 O ANINHAMENTO DO MODELO REGIONAL ETA COM OS MODELOS GLOBAIS

As simulações do modelo Eta foram geradas em resolução de aproximadamente 20 km na latitude e longitude, e 38 níveis na vertical, cobrindo toda América do Sul, América Central e Caribe. As condições iniciais e as de contorno lateral são provenientes dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5. A temperatura, umidade, vento e pressão à superfície dos modelos globais são atualizadas a cada 6 horas nos contornos laterais do modelo Eta. A temperatura da superfície do mar, simulada pelos modelos globais, é atualizada diariamente, enquanto que a concentração de CO<sub>2</sub> equivalente é atualizada a cada 3 anos.

A umidade do solo da reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) é utilizada como condições iniciais de superfície nas quatro camadas de solo. O modelo HadGEM2-ES utiliza um calendário hipotético no qual, cada ano tem exatos 360 dias, portanto, todos os meses têm 30 dias. Por outro lado, o modelo MIROC5 possui calendário de 365 dias, sem ano bissexto. O

calendário do modelo Eta foi alterado com o objetivo de sincronizar as simulações do modelo regional com as simulações dos modelos globais.

As integrações iniciam no dia 1 de janeiro de 1960, e se estendem até 2100. Para facilitar a manipulação dos dados, as integrações são divididas em períodos de 1960-2005, 2006-2040, 2040-2070, e 2070 a 2100. Os resultados são apresentados para os períodos de 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Detalhes adicionais dessas simulações podem ser encontrados em Chou *et al.* (2014).

### 3.6 CENÁRIOS UTILIZADOS DO IPCC AR5

As emissões futuras de gases de efeito estufa são resultantes de sistemas dinâmicos complexos, determinados por forçantes como crescimento demográfico, desenvolvimento sócio-econômico e mudança tecnológica. As escolhas sociais que definem as forçantes climáticas para o futuro são cercadas por grande incerteza. Os cenários de emissão representam várias trajetórias de desenvolvimento do futuro. Esses cenários auxiliam nas análises de mudanças climáticas, seus impactos, e subsidiam medidas de adaptação e mitigação. Os relatórios do IPCC se apoiaram em diversos cenários de mudanças climáticas. A família de cenários de emissão dos gases de efeito estufa do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2000) foi utilizada como a principal forma de explorar a incerteza da contribuição antrópica no clima futuro.

Os novos cenários conhecidos como RCPs (Representative Concentration Pathways) representam diferentes trajetórias de concentração dos gases de efeito estufa no clima futuro (Van Vuuren et al., 2011a, 2011b). Esses novos cenários não foram gerados a partir de uma evolução socioeconômica prescrita, como nos cenários do AR4, mas gerados a partir da prescrição da forçante radiativa nos valores de 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5  $W/m^2$  no final do século 21. A forçante radiativa representa a mudança no balanço radiativo no topo da atmosfera resultante da mudança na composição da atmosfera ou das mudanças no uso do solo. Os quatro cenários são identificados por RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. As simulações com o modelo Eta utilizaram os RCP4.5 e RCP8.5, o primeiro cenário é otimista enquanto que o segundo é o cenário mais pessimista. Apesar de apresentarem diferentes valores de forçante radiativa ao longo dos anos do século 21, o cenário RCP4.5 se assemelha ao cenário B1 e o RCP8.5 se assemelha ao cenário A2 do IPCC AR4 no final do século 21. A forçante radiativa no RCP8.5 continua aumentando após 2100, enquanto que nos cenários RCP4.5 e 6.0 a forçante estabiliza, e no cenário RCP2.6, a forçante continua em declínio após o final do século 21. Em relação a concentração dos gases, o cenário RCP4.5 atinge cerca de 650 ppm de CO2 equivalente no final do século enquanto que no cenário RCP8.5 o CO2 equivalente excede 1000 ppm.

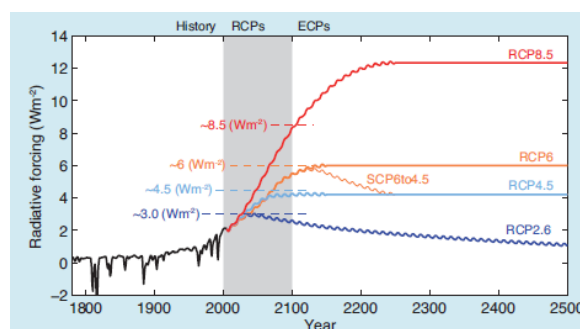


Figura 3.7.1 – Forçante radiativa total (antropogênica e natural) para RCPs e vias de concentração estendida (ECP) - para RCP2.6, RCP4.5 e RCP6, RCP8.5. (Fonte: IPCC AR5, 2013).

### 3.7 O PROGRAMA CYCLOC

O esquema CYCLOC foi desenvolvido por Dr. Ross J. Murray e Dr. Ian Simmonds, da Universidade de Melbourne (Austrália) para identificar e rastrear centros de alta e baixa pressão numa esfera. Seu fundamento principal é de que um centro de um ciclone (anticiclone) fechado é identificado pelo seu ponto de mínima (máxima) pressão. É normalmente encontrado em um espaço de grade do Laplaciano máximo (mínimo) da pressão, dependendo do grau de simetria do sistema. A existência de um ciclone (anticiclone) é considerada em qualquer ponto onde a pressão é mais baixa (alta) que em qualquer ponto de um pequeno número de pontos de grade (quatro ou oito) ao seu redor.

A matriz é primeiro copiada para os locais de possíveis baixas (altas) pressões comparando os valores dos pontos de grade da vizinhança. Um procedimento menos restritivo foi implementado para detectar depressões (cristas) rasas, pois estas podem não ser detectadas em uma minimização (maximização) dos valores dos pontos de grade locais. Este procedimento procura pontos de grade onde o Laplaciano da pressão deve ser maior (ou menor no caso das cristas) que em qualquer um dos oito pontos do entorno e maior que um limite específico. No caso de uma depressão (crista) aberta, onde não existe nenhum ponto de mínima (máxima) pressão, foi decidido analogamente que seria o ponto de inflexão da superfície de pressão, ou seja, o ponto de mínimo (máximo) gradiente de pressão. Por fim, as baixas (altas) pressões são checadas para ver se possuem características de latitudes médias. O método encontrado para discriminar requer um valor mínimo médio do Laplaciano da pressão ao longo de um raio específico do ciclone (anticiclone). Em um segundo estágio do esquema, rastreia-se o caminho de cada sistema a partir do momento de seu surgimento até sua dissipação. Um procedimento foi desenvolvido onde primeiro faz-se uma estimativa da posição de cada sistema e então calcula-se a probabilidade das associações entre as posições previstas e ocorridas, e finalmente encontra a correspondência dessas associações com a maior probabilidade global. Maiores detalhes sobre o algoritmo automático estão disponíveis em Murray e Simmonds (1991) e Simmonds et al. (1999).

### 3.8 AS ANÁLISES

Neste trabalho considera-se como clima presente o período 1986-2005. Pelo fato do clima presente ser composto por um período de apenas 20 anos e os intervalos futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) de 30 anos, todos os resultados que comparam o futuro com o presente referem-se a diferenças entre valores médios, ou seja, médias no futuro menos médias no presente. Nas análises sazonais as estações do ano são consideradas como verão (dezembro-janeiro-fevereiro), outono (março-abril-maio), inverno (junho-julho-agosto) e primavera (setembro-outubro-novembro). Os dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM) do CFSR com resolução espacial de 0,5° de latitude x 0,5° de longitude são também utilizados como dados de entrada para o esquema CYCLOC a fim de construir uma climatologia de ciclones do mesmo período (1986-2005) e servir como referência de comparação para os demais modelos.

## 4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentadas as climatologias sazonais de ciclogêneses elaboradas utilizando o esquema numérico CYCLOC, a partir de dados de entrada de PNMM da Reanálise do CFSR e do modelo Eta-MIROC5 no período de 1986-2005 e as climatologias sazonais de ciclogêneses do modelo para clima futuro até 2099 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC.



#### 4.1 CLIMATOLOGIA DE CICLOGÊNESES NO CLIMA PRESENTE (1986-2005)

Nas figuras abaixo são apresentadas as distribuições espaciais das ciclogêneses dos modelos MIROC5, Eta-MIROC5, HadGEM2-ES e Eta-HadGEM2-ES em comparação com a Reanálise do CFSR para o clima presente (1986-2005), utilizando-se o esquema CYCLOC.

##### 4.1.1 Avaliação da Climatologia dos Modelos MIROC5 e Eta-MIROC5

A Figura 4.1.1.1 apresenta as climatologias sazonais de ciclogêneses do MIROC5 e a diferença MIROC5-CFSR no clima presente (1986-2005).

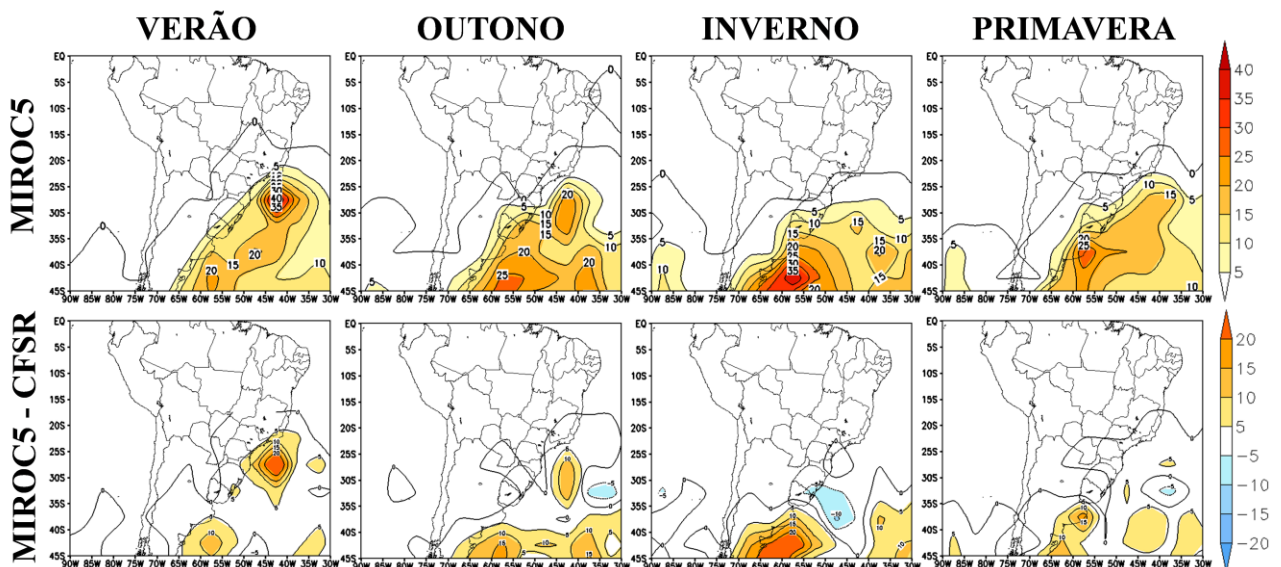


Figura 4.1.1.1 – Climatologia de ciclogêneses (1986-2005): MIROC5 (linha superior), Diferença MIROC5–CFSR (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

Com relação à performance do MIROC5, no verão aparece um máximo de ciclogêneses (entre 40 e 45 sistemas) próximo ao sudeste do Brasil. Esse mesmo máximo é observado na climatologia do CFSR com um valor bem inferior, em torno de 15 a 20 sistemas, o que indica numa superestimativa do MIROC5 com relação a formação de ciclones para essa região. Ainda no verão, no sul da Argentina é observado outro máximo tanto no MIROC5, quanto na reanálise CFSR, ambos indicando de 20 a 25 ciclogêneses para o período analisado. No outono, o MIROC5 continua superestimando o valor de ciclogêneses no sudeste do Brasil, porém em menor número e o máximo no sul da Argentina continua sendo observado. No inverno o CFSR exibe dois máximos, um próximo ao Uruguai e outro próximo ao sul da Argentina e, aparentemente, o MIROC5 une esses dois máximos em um único centro, que se estende a leste da Argentina. Na primavera o modelo representa um máximo próximo ao sul do Uruguai, também superestimado (em torno de 5 a 10 ciclogêneses) quando comparado com a reanálise.

De um modo geral, apesar de superestimar em todas as estações o número de ciclogêneses, o MIROC5 consegue observar as regiões de máximos, quando comparado ao CFSR, assim como comparado com a climatologia obtida em outros trabalhos, como em Gan e Rao (1991) e Reboita (2008).

A Figura 4.1.1.2 apresenta as climatologias sazonais de ciclogêneses do Eta-MIROC5 e a diferença Eta-MIROC5-CFSR no clima presente (1986-2005).

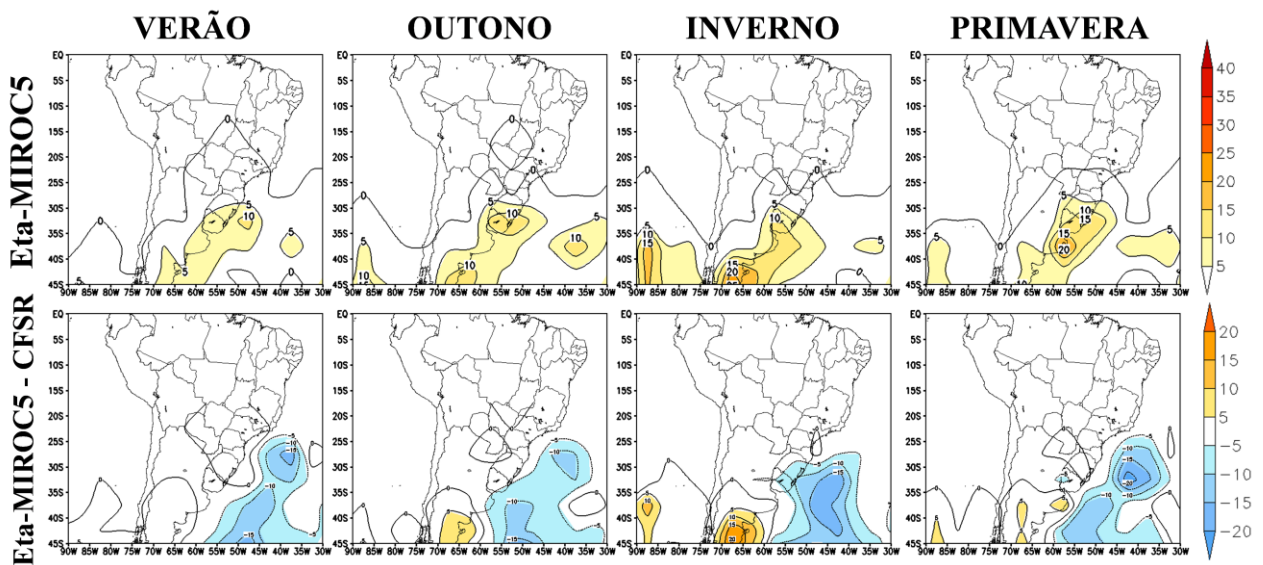


Figura 4.1.1.2 – Climatologia de ciclogêneses (1986-2005): Eta-MIROC5 (linha superior), Diferença Eta-MIROC5–CFSR (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

Analisando-se a Figura 4.1.1.2 observa-se que nas quatro estações do ano analisadas, o modelo Eta-MIROC5 posiciona corretamente as ciclogêneses sobre o Oceano Atlântico nas altas latitudes e ao longo da costa leste da América do Sul, atingindo a Argentina, Uruguai e área sul do Brasil. Nota-se no Eta-MIROC5 uma quantidade inferior de ciclogêneses ao observado no CFSR (cores em tons de azul nos campos de diferença), principalmente sobre o Oceano Atlântico, na região de 40-50°S/30-60°W. O modelo Eta-MIROC5, no verão, representa adequadamente o núcleo de máxima ciclogênese no sul da Argentina e a leste do Uruguai, porém em ambos os núcleos subestima o valor de ciclogêneses, em relação ao observado no CFSR. No inverno, o modelo posiciona bem o máximo de ciclogêneses no sul da Argentina e acerta o valor no centro desse máximo, mas não configura o máximo que aparece a leste do Uruguai. Destaca-se que o modelo consegue acertar o aumento do número de ciclogêneses no inverno e uma diminuição no verão como mostra o CFSR. Acrescenta-se que, apesar do domínio bastante limitado (50°S – 30°N / 30°W – 100°W) em relação a Reanálise, que cobre todo o globo, não se verificam valores muito discrepantes de ciclogêneses, exceto sobre o Atlântico em aproximadamente 40-50°S/30-60°W.

#### 4.1.2 Avaliação da Climatologia dos Modelos HadGEM2-ES e Eta-HadGEM2-ES

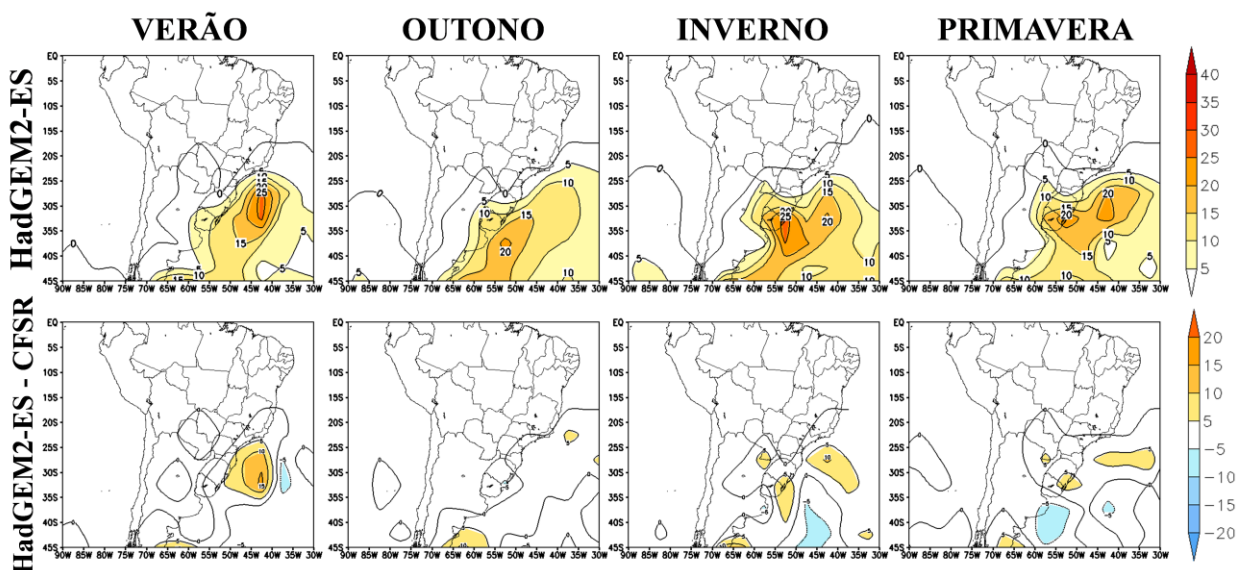


Figura 4.1.2.1 – Climatologia de ciclogêneses (1986-2005): HadGEM2-ES (linha superior), Diferença HadGEM2-ES–CFSR (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

Analisando a Figura 4.1.2.1 nota-se que o HadGEM2-ES consegue representar satisfatoriamente os núcleos de máxima ciclogêneses ao longo do leste do continente sul americano. Destaca-se na figura: Um máximo proeminente próximo ao S/SE do Brasil no verão e outro próximo do Uruguai no inverno com intensidade, em ambos, de 25 a 30 ciclogêneses.

Nos campos de diferença há um resultado satisfatório, visto que o HadGEM2-ES configura aproximadamente a mesma quantidade de ciclogêneses da reanálise, superestimando apenas nos núcleos próximos ao SE brasileiro e no Uruguai no verão e apenas levemente no inverno (5 a 10 ciclogêneses).

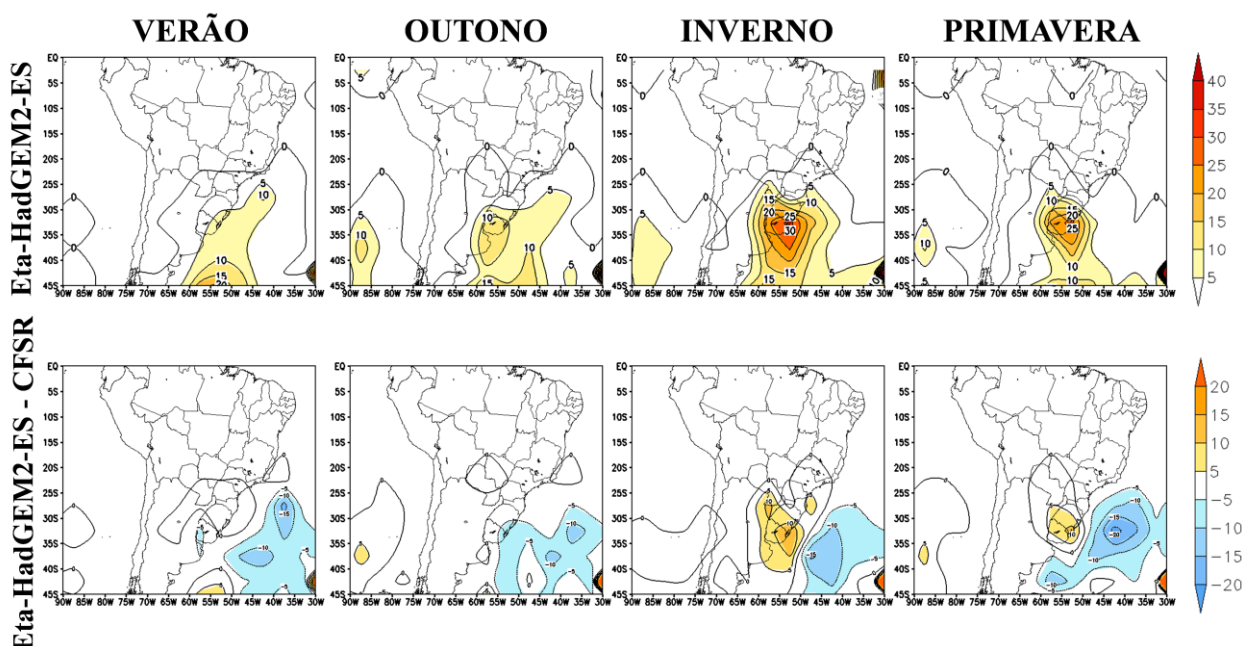


Figura 4.1.2.2 – Climatologia de ciclogêneses (1986-2005): Eta-HadGEM2-ES (linha superior), Diferença Eta-HadGEM2-ES – CFSR (linha inferior).

Analisando-se a Figura 4.1.2.2 observa-se que ao longo das quatro estações do ano, o modelo Eta-HadGEM2-ES posiciona corretamente as ciclogêneses sobre o Oceano Atlântico nas altas latitudes e ao longo da costa leste da América do Sul, atingindo a Argentina, Uruguai e área sul do Brasil. Neste modelo, o número de ciclogêneses ao norte de 20°S é bastante reduzida (inferior a 5 sistemas), o que também está de acordo com o CFSR. Nota-se no Eta-HadGEM2-ES uma quantidade inferior de ciclogêneses ao observado no CFSR, principalmente sobre o Oceano Atlântico na região 40-50°S/30-60°W. Desse modo, o modelo apresenta, ao longo das quatro estações, número inferior de ciclogêneses quando comparado a reanálise CFSR.

Assim como no Eta-MIROC, no modelo Eta-HadGEM2-ES apesar do domínio bastante limitado (50°S – 30°N / 30°W – 100°W) em relação a Reanálise, que cobre todo o globo, não se verificam valores muito discrepantes de ciclogêneses, exceto sobre o Atlântico em aproximadamente 40-50°S/30-60°W.

#### 4.2 PROJEÇÕES DE CICLOGÊNESES COM OS MODELOS ETA-MIROC5 E ETA-HADGEM2-ES

Nesta seção são apresentadas as distribuições espaciais das projeções de climatologia de ciclogêneses do Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC, utilizando-se o esquema CYCLOC.



#### 4.2.1 Cenário RCP 4.5 do IPCC AR5

Na figura 4.2.1.1 são apresentadas as distribuições espaciais das projeções de climatologia de ciclogêneses do Eta-MIROC5 no cenário RCP4.5 do IPCC em comparação com a climatologia de ciclogêneses do Eta-MIROC5 para o clima presente (1986-2005), utilizando-se o esquema CYCLOC.

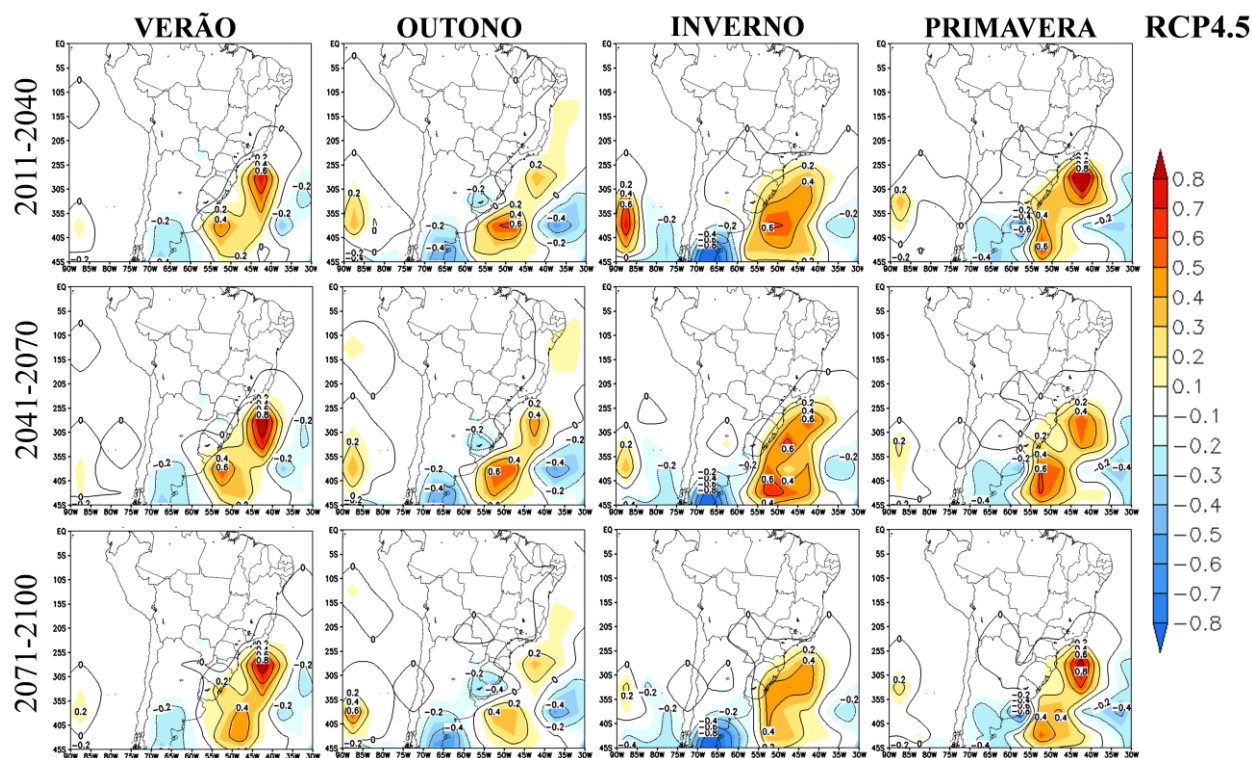


Figura 4.2.1.1 - Diferença entre as projeções da climatologia de ciclogêneses do modelo Eta-MIROC5 no cenário RCP4.5 do IPCC e a climatologia do tempo presente (1986-2005): 2011-2040 - presente (linha superior), 2041-2070 - presente (linha intermediária), 2071-2100 – presente (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

A análise dos campos de diferença da climatologia de ciclogêneses para o verão ao longo dos três períodos das projeções (2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099) mostra um mesmo padrão na localização dos máximos de ciclogêneses. São notados dois máximos: um a leste do Uruguai e outro a leste da Região Sudeste (SE) do Brasil. Quando os máximos desses três períodos são comparados com o clima presente (1986-2005) fica evidente um aumento no número de ciclogêneses no Oceano Atlântico Sul. Para o primeiro período (2007-2040), um aumento de 15 a 20 ciclogêneses é mostrado, para o segundo período (2041-2070) observa-se um aumento de 20 a 25 ciclogêneses e para o terceiro período (2071-2099), o aumento é de 15 a 20 casos.

Apesar dos máximos evidenciados nos campos das projeções estarem de acordo com as regiões preferencialmente ciclogenéticas, observadas por Gan e Rao (1991) e Reboita (2008), eles localizam-se em pontos diferentes ao longo do SE da América do Sul.

Para o inverno, é notada a persistência de um máximo ciclogênético a leste do Uruguai ao longo dos três períodos. O máximo a leste do SE do Brasil não fica evidenciado no inverno e há, conseqüentemente, uma redução no número de ciclogêneses nessa região.

Quando comparados os três períodos das projeções no inverno com o clima presente, o máximo que aparece persistentemente a leste do Uruguai não é notado no presente. No clima presente esse máximo aparece no Sul da Argentina. Além disso, nota-se um aumento no número de ciclogêneses ao

longo do SE da América do Sul quando comparados o primeiro e o segundo período das projeções (de 10 a 20 e de 5 a 10 ciclogêneses, respectivamente) ao clima presente, com exceção do último período, no qual o número de ciclogêneses nessa região aparece da mesma ordem do clima presente (de 25 a 30 ciclogêneses). Assim, como no verão, há uma mudança nas localizações dos máximos no clima futuro em comparação ao clima presente.

A figura 4.2.1.2 apresenta as distribuições espaciais das projeções de climatologia de ciclogêneses do Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5 do IPCC em comparação com a climatologia de ciclogêneses do Eta-HadGEM2-ES para o clima presente (1986-2005), utilizando-se o esquema CYCLOC.

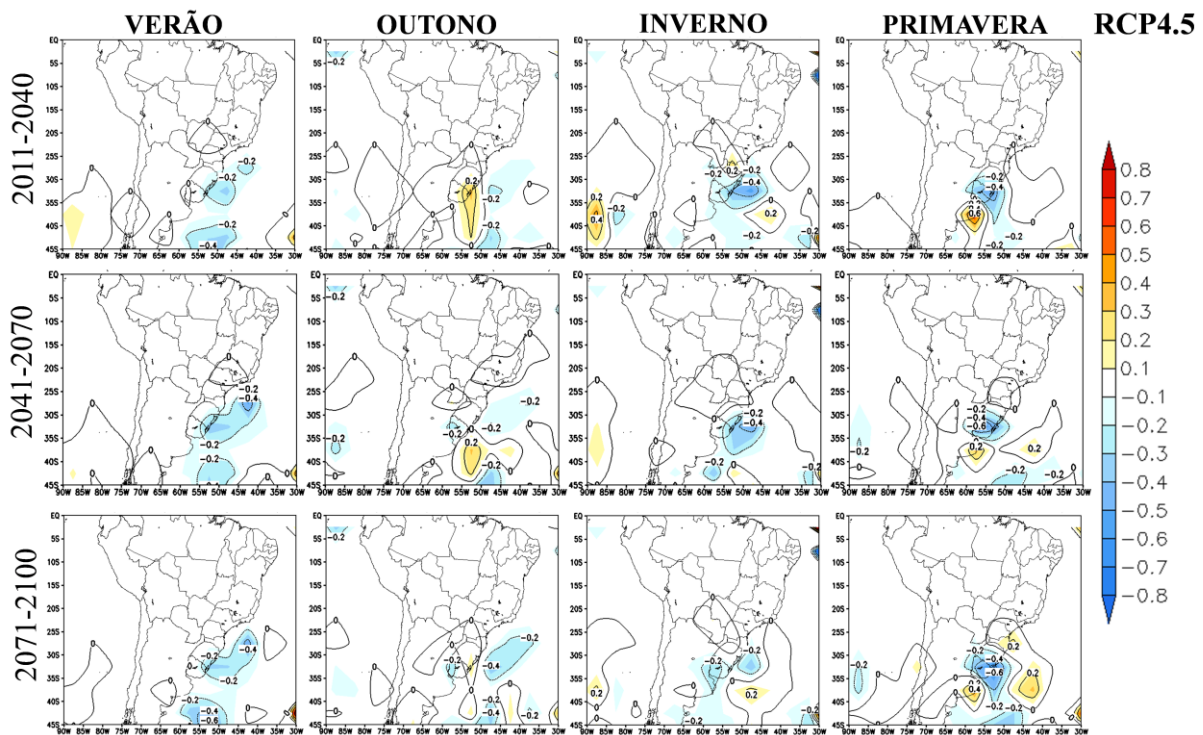


Figura 4.2.1.2 - Diferença entre as projeções de climatologia de ciclogêneses do modelo Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5 do IPCC e a climatologia do tempo presente (1986-2005): 2011-2040 - presente (linha superior), 2041-2070 - presente (linha intermediária), 2071-2100 – presente (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

As projeções para o cenário RCP 4.5 do IPCC AR5 (Figura 4.2.1.2) mostram que nas regiões preferencialmente ciclogênicas, há uma tendência de redução no número de ciclogêneses, e não de aumento como aparece no Eta-MIROC5, para os três períodos no futuro com relação ao presente do mesmo. Essa tendência de redução é observada ao longo das quatro estações do ano.

#### 4.2.2 RCP 8.5 do IPCC AR5

Na figura 4.2.2.1 são apresentadas as distribuições espaciais das projeções de climatologia de ciclogêneses do Eta-MIROC5 no cenário RCP8.5 do IPCC em comparação com a climatologia de ciclogêneses do Eta-MIROC5 para o clima presente (1986-2005), utilizando-se o esquema CYCLOC.

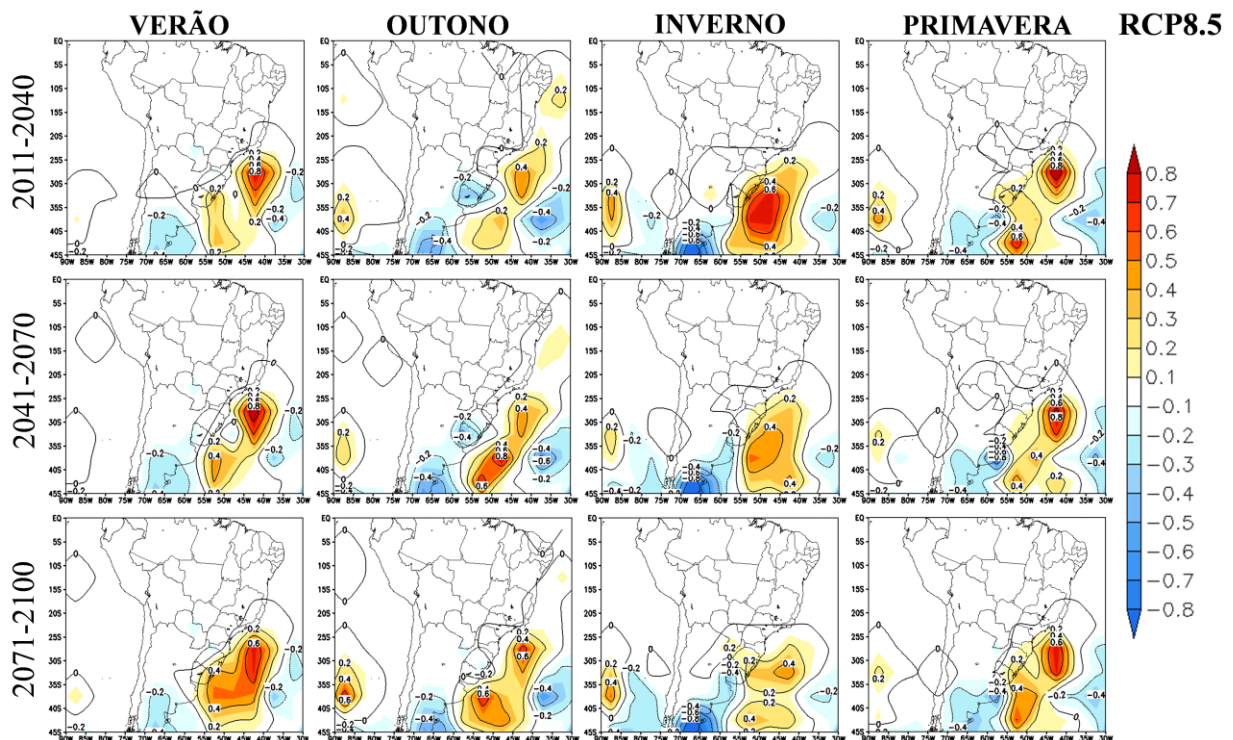


Figura 4.2.2.1 - Diferença entre as projeções da climatologia de ciclogêneses do modelo Eta-MIROC5 no cenário RCP8.5 do IPCC e a climatologia do tempo presente (1986-2005): 2011-2040 - presente (linha superior), 2041-2070 - presente (linha intermediária), 2071-2100 – presente (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

Para as projeções utilizando o cenário RCP8.5, também observa-se um sinal de aumento, assim como no RCP4.5, no número de ciclogêneses para o clima futuro. Destaca-se que na terceira região preferencialmente ciclogênica observada por Reboita (2008), próxima à região sudeste do Brasil, há uma proeminente intensificação, com relação ao clima presente, nas estações do verão e primavera.

As projeções para o cenário RCP 8.5 do IPCC AR5 (Figura 4.2.2.2) mostram que, mesmo que haja um incremento na forçante radiativa, ainda é observado, de forma geral, no modelo Eta-HadGEM2-ES uma tendência de redução no número de ciclogêneses para os três períodos no futuro ao longo das quatro estações do ano com relação ao presente do mesmo. Destaca-se uma forte tendência de redução na região a leste do Uruguai observada por Gan e Rao (1991).



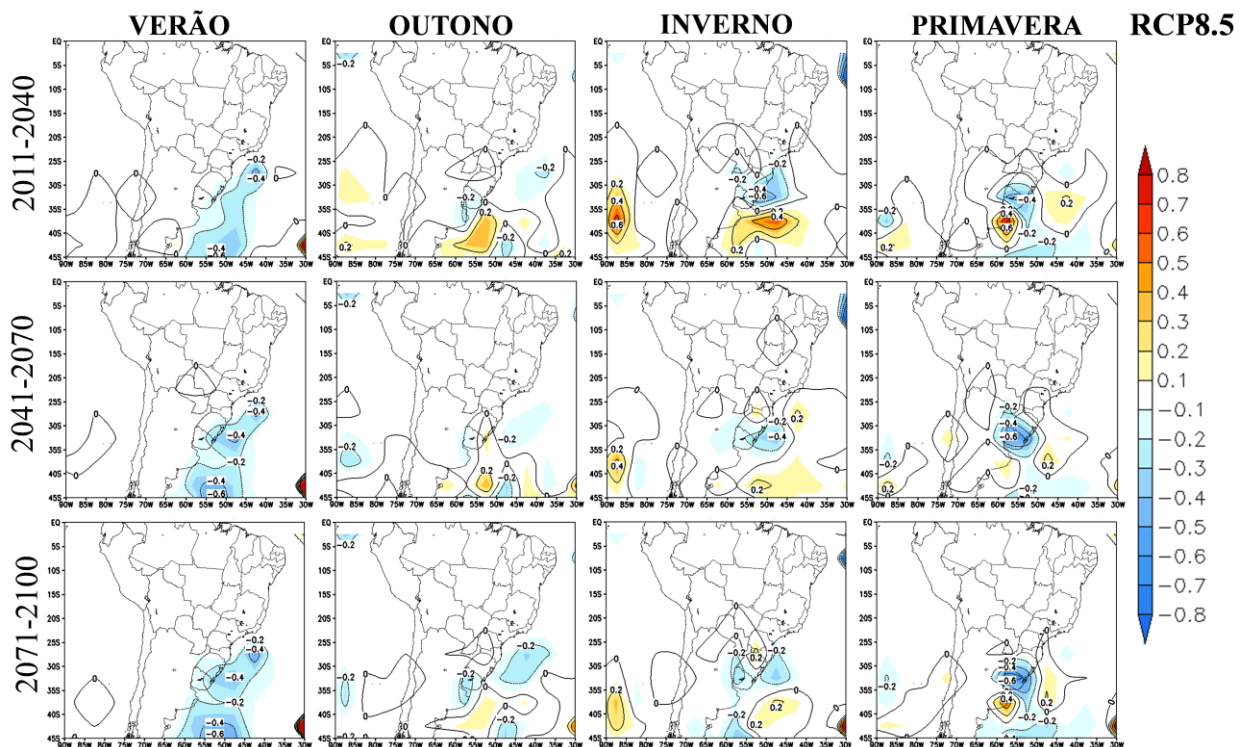


Figura 4.2.2.2 - Diferença entre as projeções de climatologia de ciclogêneses do modelo Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP8.5 do IPCC e a climatologia do tempo presente (1986-2005): 2011-2040 - presente (linha superior), 2041-2070 - presente (linha intermediária), 2071-2100 – presente (linha inferior) para o verão, outono, inverno e primavera.

## 5. CONCLUSÕES

A avaliação dos modelos MIROC5 e Eta-MIROC5 e HadGEM2-ES e Eta-HadGEM2-ES para configurar ciclogêneses no Oceano Atlântico Sul no clima presente em comparação a Reanálise CFSR, mostrou que os modelos posicionam corretamente as ciclogêneses sobre o Oceano Atlântico nas altas latitudes e ao longo da costa leste da América do Sul, atingindo a Argentina, Uruguai e área sul do Brasil. Ademais, em todos os modelos fica evidente o aumento de ciclogêneses com o aumento da latitude.

O MIROC5 e o HadGEM2-ES (globais) superestimam a quantidade de ciclogêneses na área em estudo entre 30 e 60°S e durante todos os meses do ano, em relação a reanálise.

No modelo regional (Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES), há concordância com o CFSR no número de ciclogênese ao norte de 20°S, que é bastante reduzida (inferior a 5 sistemas). Além disso, em ambos, há uma quantidade inferior de ciclogêneses ao observado no CFSR, principalmente sobre o Oceano Atlântico na região que compreende a faixa 40-50°S/30-60°W. Destaca-se que o modelo consegue acertar o aumento do número de ciclogêneses no inverno e uma diminuição no verão como mostra o CFSR e apesar do domínio bastante limitado (50°S – 30°N / 30°W – 100°W) em relação à Reanálise, não se verificam valores muito discrepantes de ciclogêneses.

Nota-se que o desempenho do Eta-MIROC5 para configurar ciclogêneses na região em estudo é superior ao modelo global MIROC5, assim como o Eta-HadGEM2-ES é superior ao HadGEM2-ES, já que apresentam frequência de ocorrência de ciclogêneses mais próximas aos valores observados na Reanálise.

Os resultados das projeções dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, divergem nos cenários futuros. No Eta-MIROC5, ambos os cenários do IPCC utilizados neste trabalho (RCP4.5 e 8.5) apresentam sinal de aumento das ciclogêneses para os três períodos até 2100. Entretanto, no Eta-HadGEM2-ES observa-se um sinal de redução das ciclogêneses para ambos os cenários até 2010.

No cenário RCP4.5 do Eta-MIROC5, nota-se um claro aumento no número de ciclogêneses ao longo dos três períodos que compreendem as projeções para as quatro estações do ano analisadas. Além disso, há uma diferença na localização dos núcleos de máxima ciclogêneses entre o clima presente e o clima futuro. Verificam-se, nas projeções, dois núcleos persistentes ao longo dos três períodos no verão, um a leste do Uruguai e outro no SE do Brasil e no inverno verifica-se um núcleo a leste do Uruguai.

Para o cenário RCP8.5 do Eta-MIROC5 também é notado um claro sinal de aumento no número de ciclogêneses para o clima futuro. Para os resultados desse cenário, destaca-se a intensificação do núcleo preferencialmente ciclogênético do sudeste do Brasil observado por Reboita (2008).

Para o clima futuro do Eta-HadGEM2-ES nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC, nota-se uma clara tendência de redução no número de ciclogêneses ao longo dos três períodos que compreendem as projeções para as quatro estações do ano analisadas, mesmo na mudança de cenário com incremento da forçante radiativa.

Essa divergência nos resultados das projeções, reforçam a importância de se aumentar o número de membros das projeções, para que se possa alcançar uma maior confiabilidade no comportamento futuro das ciclogêneses no litoral da América do Sul.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Betts, A.K. and Miller, M.J. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests Using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-Mass Data Sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 693-709; 1986.

Chou, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, v.3, n.5, p.438-454, <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>, 2014a.

Chou, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v.3, n.5, p.512-527, <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>, 2014b.

Collins, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2, *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051-1075, <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>; 2011.

Cox, P. M.: Description of the “TRIFFID” Dynamic Global Vegetation Model. Hadley Centre Technical Note 24, Met Office, UK. Disponível em: [http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/9/h/HCTN\\_24.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/9/h/HCTN_24.pdf), 2001.

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, I. Haimberger, S./B. Healy, H. Hersbach, E.V. Hólm, L. Isaksen, P. Kállberg, M. Köhler, M. Matricardi, A.P. McNally, B.M. Monge-sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. De rosney, C. Tavolato, J.-N. Thépaut and F. Vitart: “The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, pp. 553-597; 2011.

Ek, M., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G. and Tarpley, J.D. Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8851. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD003296>; 2003

Fels, S.B. and Schwarzkopf, M.D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32, 1475-1488. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<1475:TSEAAN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<1475:TSEAAN>2.0.CO;2); 1975.

Flato, G.; Marotzke, J.; Abiodun, B.; Braconnot, P.; Chou, S. C.; Collins, W.; Cox, P.; Driouech, F.; Emori, S.; Eyring, V.; Forest, C.; Gleckler, P.; Guilyardi, E.; Jakob, C.; Kattsov, V.; Reason, C.; Rummukainen, M., 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A.



- Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 741–866, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>; 2013.
- Gan, M. A.; Rao, V. B: Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, v. 119, p. 1293-1303, 1991.
- IPCC: IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 377; 2000.
- IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>; 2013.
- Janjić, Z.I. Nonlinear Advection Schemes and Energy Cascade on Semi-Staggered Grids. *Monthly Weather Review*, 112, 1234-1245. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1234:NASAEC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1234:NASAEC>2.0.CO;2); 1984.
- Lacis, A.A. and Hansen, J. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 118-133. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2); 1974.
- Mesinger, F. et al. An upgraded version of the Eta model. *Meteorol Atmos Phys* 116:63–79; 2012.
- Mesinger, F. A Blocking Technique for Representation of Mountains in Atmospheric Models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 44, 195-202; 1984.
- Murray, R. J., I. Simmonds, A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Aust. Meteorol. Mag.*, 39, 155-166; 1991.
- Reboita, M. S. Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. Tese de Doutorado em Meteorologia, IAG/USP, 359 p. [http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d\\_michelle\\_s\\_reboita\\_0.pdf](http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_michelle_s_reboita_0.pdf); 2008.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Delst, P. V., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., Goldberg, M.: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057. doi <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>; 2010.
- Simmonds, I., R.J. Murray and R. M. Leighton, 1999: A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Aust. Met. Mag.*, special edition, 35-49.
- Van Vuuren, D. P.; Stehfest, E.; den Elzen, M. G. J. et al., 2011a: RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Clim. Change*, v.109, p.95–116, doi 10.1007/s10584-011-0152-3, 2011a.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J.; Kainuma, M. et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim. Change*, v.109, p.5–31, DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z, 2011b.
- Watanabe, M. *et al.* Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312– 6335; 2010.
- Zhao, Q., Black, T.L. and Baldwin, M.E. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. *Weather and Forecasting*, 12, 697-712. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2); 1997.