

CARACTERÍSTICAS DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA E PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO O MODELO ACOPLADO MCGA/IBIS

Characteristics of atmospheric circulation and precipitation using coupled model MCGA/IBIS

Guilherme Martins*
Paulo Yoshio Kubota**
Cláudio Moisés Santos e Silva***

***Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST

Av. dos Astronautas, 1758 – Jd. Granja – São José dos Campos, São Paulo, Brasil – CEP: 12227-010
guilherme.martins@inpe.br

****Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC

Av. dos Astronautas, 1758 – Jd. Granja – São José dos Campos, São Paulo, Brasil – CEP: 12227-010
paulo.kubota@cptec.inpe.br

*****Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN**

Depto. de Física Teórica e Experimental – DFTE / Prog. de Pós-Graduação em Ciências Climáticas - PPGCC

R. Joaquim Gregório – Lagoa Nova – Caicó, Rio Grande do Norte, Brasil – CEP: 59078-900 – (084) 3421-4950
claudiomoises@ccet.ufrn.br

RESUMO

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) são empregados para os mais variados tipos de estudos que dependerá da escala a ser avaliada. Esses modelos são capazes de representar as características observadas da circulação atmosférica e aqueles modelos que representam de forma adequada o estado médio da atmosfera apresentam os menores erros sistemáticos e possuem a destreza de simular corretamente as variações interanuais. Para que um modelo simule adequadamente os ciclos sazonais e a variabilidade interanual das variáveis atmosféricas é necessário comparar suas simulações com os campos observados, sejam eles dados observados ou produtos de reanálise. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar o padrão de circulação atmosférica e a precipitação utilizando o modelo de superfície conhecido como Integrated Biosphere Simulator (IBIS) acoplado ao MCGA. Para tal, são utilizados dados de reanálises do National Centers for Environmental Prediction/Reanalysis 2 (NCEP/R2) e precipitação do Global Precipitation Climatology Project (GPCP) para avaliar a destreza do modelo em simular o clima presente (1986-2005) para as quatro estações do ano. Foram calculados campos sazonais médios zonais, campos sazonais espaciais e diagramas de seção vertical. Os resultados mostraram que o MCGA foi capaz de simular de forma satisfatória os principais padrões de circulação atmosférica em baixos e altos níveis tais como a Alta Bolívia, as correntes de jato, os centros de alta e de baixa pressão nos hemisférios Norte e Sul bem como os sistemas produtores de precipitação como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os padrões de monção observados. Sendo assim, esse modelo pode ser empregado para estudos tanto de tempo quanto de clima, dada a representação adequada das escalas temporais avaliadas.

Palavras chave: Modelo numérico. Climatologia. GPCP. NCEP.

ABSTRACT

The General Circulation Models of the Atmosphere (AGCM) are used for various types of studies that will depend on the scale to be evaluated. These models are able to represent the observed features of the atmospheric circulation and those models that adequately represent the average state of the atmosphere have the lowest systematic errors and have

the skill to correctly simulate the interannual variations. For a model adequately simulates the seasonal cycles and the interannual variability of atmospheric variables is necessary to compare their simulations with the observed fields, whether observed data or reanalysis products. Thus, this study aims to evaluate the pattern of atmospheric circulation and precipitation using the surface model known as Integrated Biosphere Simulator (IBIS) coupled to the AGCM. For that, we used reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction/Reanalysis 2 (NCEP/R2) and precipitation of the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) to evaluate the model's ability to simulate the present climate (1986-2005) for the four seasons. Were calculated zonal average seasonal fields, seasonal spatial fields, and vertical section diagrams. The results showed that the MCGA was able to simulate satisfactorily the main patterns of atmospheric circulation at lower and higher levels such as the High Bolivia, the jet streams, high and low pressure centers in the Northern and Southern Hemispheres and producers precipitation systems as the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), South Pacific Convergence Zone (SPCZ), Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the observed monsoon patterns. Thus, this model can be used to study both time and climate given the adequate representation of the evaluated time scales.

Keywords: Numerical model. Climatology. GPCP. NCEP.

1 INTRODUÇÃO

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) são empregados nos estudos de tempo e do clima para verificar a variabilidade climática, as mudanças climáticas e a previsão sazonal e para isso, é necessário avaliar sua destreza em representar as principais características da atmosfera (CAVALCANTI et al., 2002), como por exemplo, a circulação atmosférica em baixos e altos níveis bem como os sistemas produtores de precipitação ao redor do globo. Nos dias atuais, com o aumento do poder computacional devido à evolução dos supercomputadores, é possível realizar simulações usando o MCGA em domínios mais refinados. A grande vantagem na utilização dos modelos globais para a previsão climática é a ausência de condição de contorno lateral, possibilitando a existência de propriedades conservativas de massa, energia e água, muito importante em simulações climáticas de longo período (KUBOTA, 2012).

Os MCGA consistem em formulações matemáticas dos processos atmosféricos e das superfícies terrestre e oceânica e são capazes de representar as características observadas da circulação atmosférica. Os modelos que representam de forma adequada o estado médio da atmosfera apresentam os menores erros sistemáticos e possuem a destreza de simular corretamente as variações interanuais. Para que um modelo simule adequadamente os ciclos sazonais e a variabilidade interanual das variáveis atmosféricas é necessário comparar suas simulações com os campos observados, sejam eles dados observados ou produtos de re-análise (CHAVES, 2005). Simulações de longo período realizadas com o MCGA devem ser capazes de representar de forma confiável o clima observado como também sua variabilidade (CAVALCANTI et al. 2002), pois dessa forma, o modelo se mostrará confiável para realizar estudos sobre variabilidade e mudança climática, dentre outros.

Cavalcanti et al., (2002) mostraram o desempenho do MCGA utilizado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (MCGA/CPTEC) em representar as características associadas a circulação atmosférica e a precipitação. De uma forma geral, o modelo mostrou-se capaz de representar os anticiclones nos Oceanos Pacífico e Atlântico em ambos os hemisférios. Como também, simulou de forma satisfatória a circulação atmosférica em níveis inferiores e superiores da atmosfera. Com relação a precipitação, esse modelo foi capaz de simular bem os principais sistemas produtores de precipitação apesar de apresentar subestimativas, por exemplo, sobre a Amazônia e centro-sul da América do Sul e superestimativa sobre o Nordeste do Brasil, como também na região da Zona de Convergência Intertropical.

O MCGA/CPTEC tem sido utilizado na América do Sul para os mais variados fins, como por exemplo, simular as características associadas ao clima (SILVA et al., 2005), a variabilidade intrassazonal (CARNEIRO e CAVALCANTI, 2010) e comparando diferentes esquemas de convecção (PEZZI et al., 2008).

Uma das parametrizações importantes em um modelo climático trata dos processos de troca de calor, massa e momentum próximo à superfície. Essas parametrizações são chamadas, de uma maneira geral, de modelos de interação “solo-vegetação-atmosfera” ou SVAT (*Soil vegetation atmosphere transfer models*). Um exemplo de SVAT é o IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) que foi acoplado ao MCGA do CPTEC. Com isso surgiu a oportunidade de verificar os impactos desse acoplamento nos aspectos dinâmicos do MCGA/CPTEC.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as características associadas à circulação atmosférica e a precipitação utilizando o modelo de superfície IBIS acoplado ao MCGA para o clima do presente que corresponde aos anos de 1986 a 2005.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 O Modelo acoplado vegetação-atmosfera

O MCGA teve sua origem no *National Centers for Enviromental Prediction* (NCEP) sendo posteriormente transferido para o *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA; BONATTI, 1996). As equações que compõem o modelo são discretizadas na forma espectral e as equações do movimento horizontal são transformadas nas equações de vorticidade e de divergência que por sua vez, facilitam o tratamento espectral e a implementação do método semi-implícito de integração no tempo (KUBOTA, 2012).

Com relação ao esquema de convecção profunda e rasa, utiliza-se a parametrização de Grell (GRELL, 1993; GRELL E DEVENYI, 2002) e Tiedke (TIEDTKE, 1983), respectivamente. A parametrização de radiação de onda curta e de onda longa empregadas são CliRAD (CHOU E SUAREZ, 1996 modificado por Tarasova e Fomin 2000) e Harshvardhan et al. (1987), respectivamente. O esquema de fechamento de Mellor-Yamada 2.0 é utilizado para representar a turbulência na camada limite planetária (MELLOR E YAMADA, 1982). O modelo é simulado na resolução T62L28, com 28 níveis na vertical e truncamento triangular na onda zonal de número 62. Sendo de aproximadamente 210 km × 210 km no Equador.

Os processos de fotossíntese, de respiração, de fluxos de energia da superfície, de alocação de carbono e nutrientes no interior das plantas em diferentes módulos do MCGA são do modelo de superfície *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS, FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000) que está acoplado ao MCGA. Os modelos de superfície são desenvolvidos com o propósito de monitorar simultaneamente modificações na vegetação ocasionadas pela variabilidade do clima, juntamente com as trocas de energia, carbono, nutrientes e água. A principal aplicação do modelo de superfície é capturar e simular mudanças na cobertura da vegetação e fluxos de carbono, e posteriormente, fornecer estas informações ao MCGA (FOLEY et al., 2000).

O IBIS é um modelo global dos processos da superfície e dos ecossistemas terrestres que representam os processos físicos, fisiológicos e ecológicos que ocorrem na vegetação e nos solos. A estrutura do IBIS é composta por vários submodelos que trabalham em diferentes escalas de tempo. Esta versão apresenta quatro módulos distintos, a saber: processos da superfície terrestre (trocas de energia, água e momentum entre o solo, a vegetação e a atmosfera), fenologia do dossel e da vegetação (fotossíntese e condutância do dossel), produção de folhas e senescência, dinâmica da vegetação (distribuição, reciclagem e competição entre os tipos de vegetação) e balanço de carbono terrestre (produção primária líquida, reciclagem do tecido vegetal, carbono no solo e decomposição da matéria orgânica). Estes processos são organizados em uma estrutura hierárquica e operam em diferentes passos de tempo, que vão desde 60 minutos até um ano. Desta maneira, uma aproximação possibilita um acoplamento explícito entre os processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em diferentes escalas de tempo. O IBIS calcula estes processos na escala espacial e temporal similar aquela do MCGA. Nesse trabalho, utiliza-se o esquema de vegetação estática. Nesse esquema, para que a vegetação entre em equilíbrio são necessárias apenas algumas décadas,

diferentemente da vegetação dinâmica, que necessita de milhares de anos. E a concentração de CO₂ utilizada para realizar as simulações é de 370 ppm.

2.2 Condições de contorno e atmosférica e *spin-up* do modelo

Para realizar a simulação do clima presente (1986-2005) é utilizada a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) Climatológica como condição de contorno para o MCGA. Essa TSM faz parte do *Atmospheric Model Intercomparison Project* (AMIP; GATES, 1992; GATES et al. 1999) que consiste da compilação de vários conjuntos de dados observados que estão disponíveis gratuitamente no endereço eletrônico <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/AMIP2EXPDSN/BCS/amipobs_dwnld.php>. O espaçamento de grade horizontal dos dados de TSM é de 1°×1° e a amostragem temporal são mensais. Os dados são disponibilizados para o período de 1870 até o presente. Maiores informações podem ser obtidas em Hurrell et al. (2008).

A condição atmosférica para inicializar o MCGA é oriunda do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP; KALNAY et al., 1996) e as variáveis utilizadas são: pressão ao nível médio do mar, vorticidade, divergência, umidade específica e temperatura virtual. A coordenada vertical é a sigma e a condição inicial utilizada corresponde ao dia 01/01/1961, finalizando em 31/12/2005; portanto, 45 anos simulação.

Utiliza-se a variável umidade do solo (uzds) do MCGA para verificar o tempo necessário para que o modelo estabilize ou encontre a condição de equilíbrio, também conhecida como tempo de *spin-up*. Nesse trabalho, utilizam os vinte primeiros anos, isto é, de 1961 a 1980 e para análise dos resultados, são avaliados os anos de 1986 a 2005. O tempo longo para o MCGA alcançar o equilíbrio deve-se a troca lenta de umidade entre as camadas profundas e as superficiais do modelo de superfície (XUE et al., 1996).

2.3 Dados e validação das simulações para o clima do presente

Para verificar a habilidade das simulações do MCGA em representar o clima do presente (1986-2005), utilizam-se os dados do *National Centers for Environmental Prediction/Reanalysis 2* (NCEP/R2, KANAMITSU et al., 2002). Esses dados estão disponíveis desde 1979 até o presente e apresentam espaçamento horizontal e amostragem de 2.5° × 2.5° e mensal, respectivamente. Estão disponíveis para *baixar* no endereço eletrônico <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>>. São utilizadas as seguintes variáveis: componente zonal e meridional do vento (m s⁻¹), temperatura do ar (°C) e radiação de onda longa (ROL, W m⁻²).

Os dados de precipitação (mm dia⁻¹) são do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP, ADLER et al., 2003) *Version-2 Monthly Precipitation Analysis*. Esses dados estão disponíveis desde 1979 até o presente e apresentam espaçamento horizontal e amostragem temporal de 2.5° × 2.5° e mensal, respectivamente. Podem obtidos via o endereço eletrônico <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data/gpcp.html>>.

2.4 Variáveis utilizadas e visualização dos resultados

Como mencionado anteriormente, as análises se referem aos anos de 1986 a 2005 e consistem de gráficos sazonais de média zonal de precipitação e vento zonal em 200 hPa, estrutura vertical de temperatura e vento zonal, campos espaciais de precipitação, linhas de corrente e magnitude do vento em 850 e 200 hPa e radiação de onda longa.

A visualização e a manipulação dos dados, é feita por meio do programa *The NCAR Command Language* (NCAR/NCL, 2013) que é uma ferramenta robusta capaz de processar saídas

de modelos meteorológicos e esta disponível gratuitamente na internet para baixar no seguinte endereço eletrônico <<http://www.ncl.ucar.edu>>.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

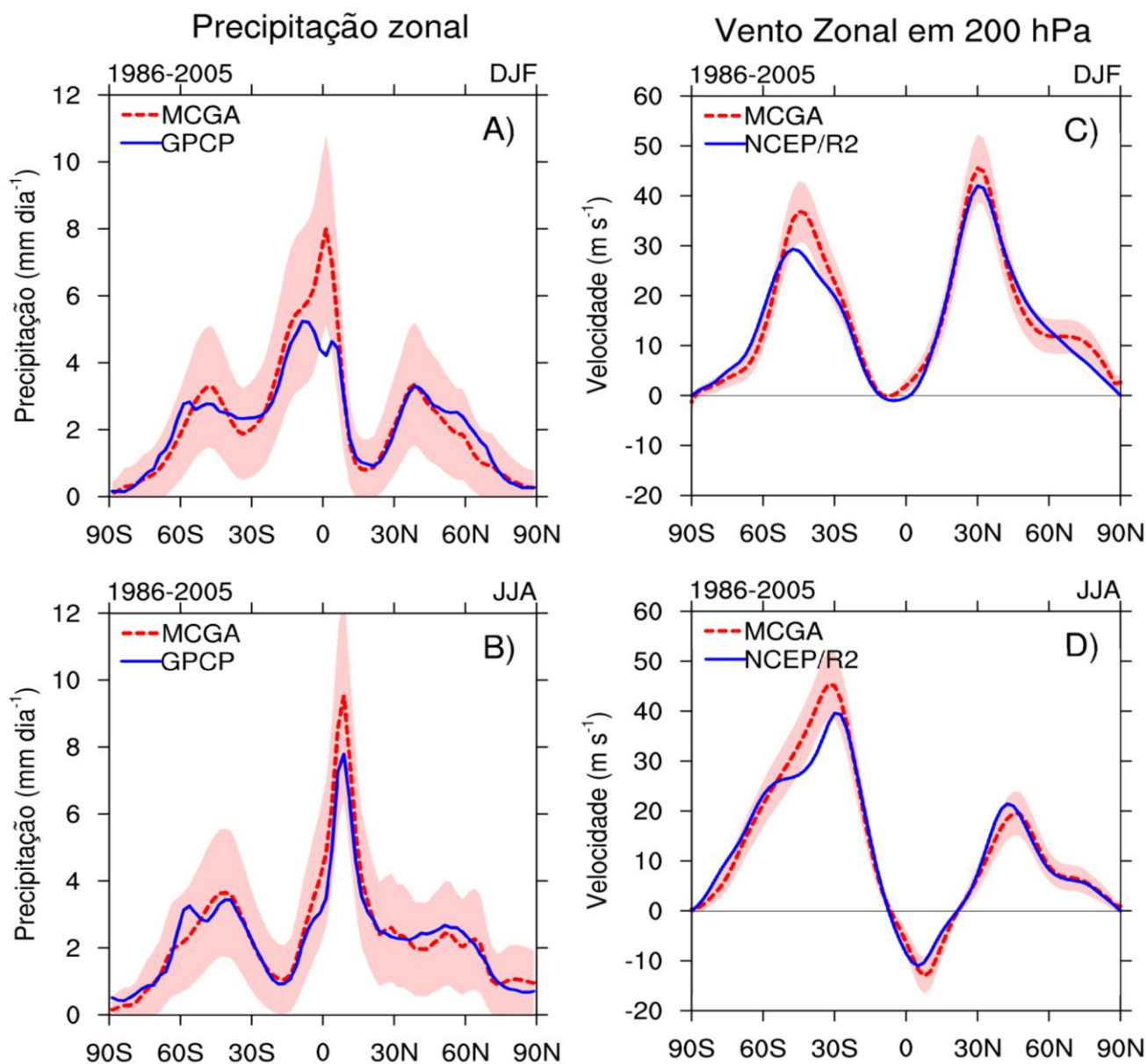
3.1 Análise meteorológica

Os resultados apresentados neste item correspondem à média sazonal do período de 1986 a 2005. As estações ou trimestres utilizados são: DJF (dezembro, janeiro e fevereiro), MAM (março, abril e maio), JJA (junho, julho e agosto) e SON (setembro, outubro e novembro). Todas as variáveis são discutidas para os trimestres DJF e JJA, com exceção da diferença de precipitação que é analisada para os quatro trimestres. A convenção utilizada para as figuras é de que o MCGA está localizado na parte superior e o dado observado está na parte inferior. O trimestre DJF encontra-se no lado esquerdo das figuras enquanto que JJA está do lado direito.

Na Figura 1 é apresentada a média zonal de precipitação (mm dia^{-1}) para o trimestre DJF (Figura 1A) e JJA (Figura 1B). Na Figura 1A o MCGA superestimou a precipitação na região tropical, alcançando valores de até $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto o GPCP registrou valores da ordem de $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Em média, nessa região, verifica-se super-estimativa de aproximadamente 60%. Nas demais regiões, o MCGA representa de forma satisfatória a distribuição da precipitação. Destacando-se a boa representação do máximo secundário em ambos os hemisférios. Padrão similar é também verificado no trimestre JJA, isto é, super-estimativa na região tropical de aproximadamente 25%, um pouco inferior ao encontrado no DJF. Como verificado por Cavalcanti et al. (2002), esse modelo foi capaz de representar de forma satisfatória a distribuição sazonal dessa variável em ambos os trimestres analisados. No trabalho de Silva et al. (2005) foi mostrado que a precipitação pelo modelo estatístico-dinâmico (MED) e o MCGA foi superestimada particularmente na região equatorial, sendo que a localização do máximo de precipitação foi bem representada.

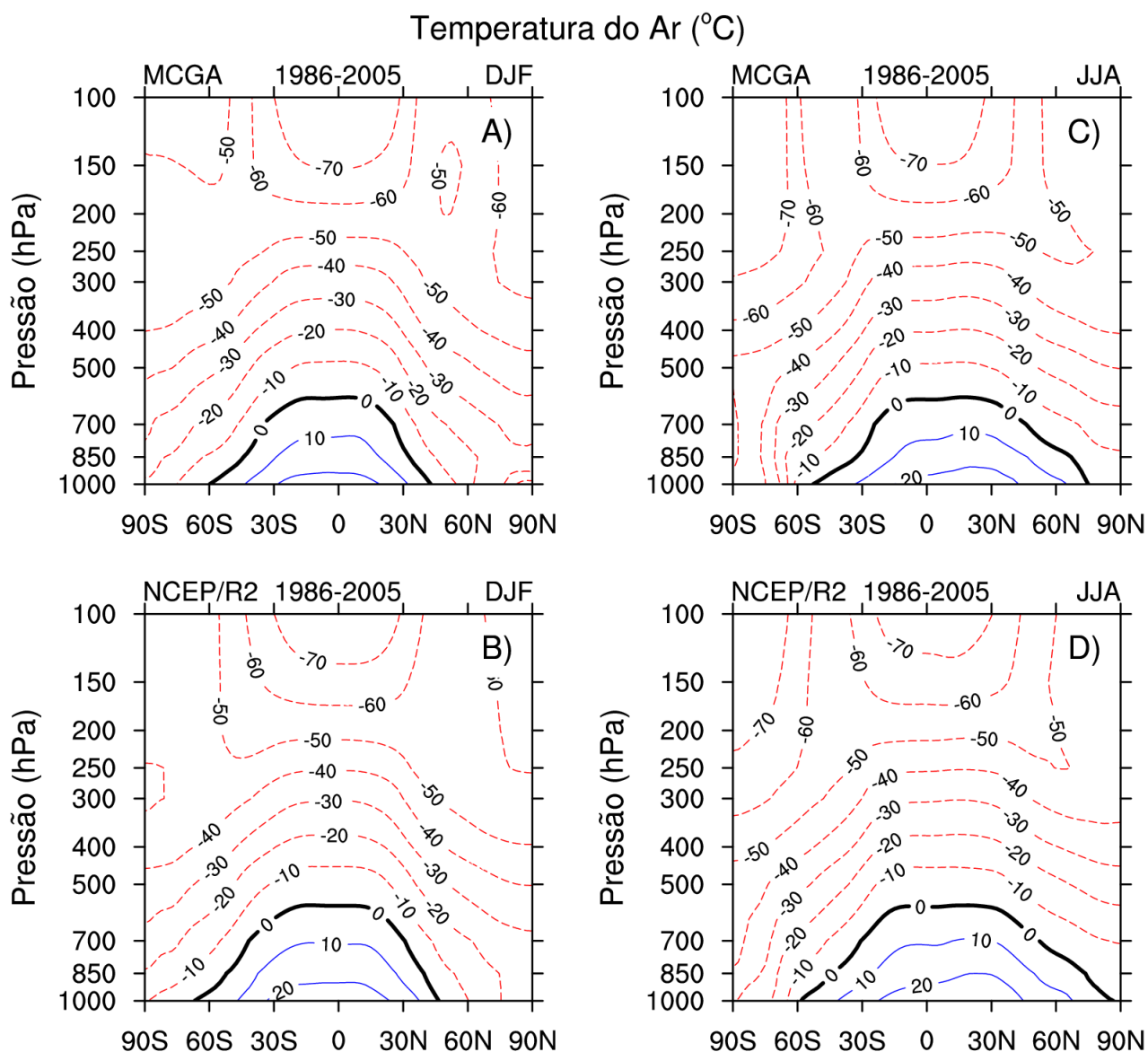
A média zonal do campo de vento zonal (m s^{-1}) em 200 hPa é mostrado na Figura 1 para DJF (Figura 1C) e JJA (Figura 1D). De uma forma geral, o MCGA é capaz de reproduzir os máximos associados com as linhas de leste e oeste em ambos os hemisférios, bem como as mudanças observadas na intensidade do vento devido ao aquecimento diferencial observado nessas duas estações. Nos trimestres DJF e JJA, o modelo simula ventos mais intensos no Hemisfério Sul (HS). Por outro lado, no Hemisfério Norte (HN), sua representação está mais próxima aos dados do NCEP/R2 para ambos os trimestres. Em JJA o MCGA simula bem as linhas de oeste e na região tropical, as simulações estão próximas ao dado observado. Os resultados encontrados estão mais ajustados com as análises do NCEP/R2 do que aqueles de Cavalcanti et al. (2002) que utilizaram uma versão mais antiga desse modelo. Silva et al. (2005) compararam o desempenho do MED e do MCGA/CPTEC em relação ao NCEP (observação) para dois períodos distintos (abril a setembro e outubro a março). Os resultados mostraram que os dois modelos simularam de forma satisfatória a variável sazonal média zonal do vento em 250 hPa apesar da superestimativa do MCGA e do MED.

Figura 1 – Média zonal de precipitação (mm dia^{-1}) e do vento zonal (m s^{-1}) em 200 hPa para os trimestres DJF (A) e (C) e JJA (B) e (D). A linha pontilhada representa o MCGA e a linha contínua representa o dado observado (GPCP para precipitação e NCEP/R2 para o vento zonal). A região preenchida corresponde ao desvio padrão do MCGA.



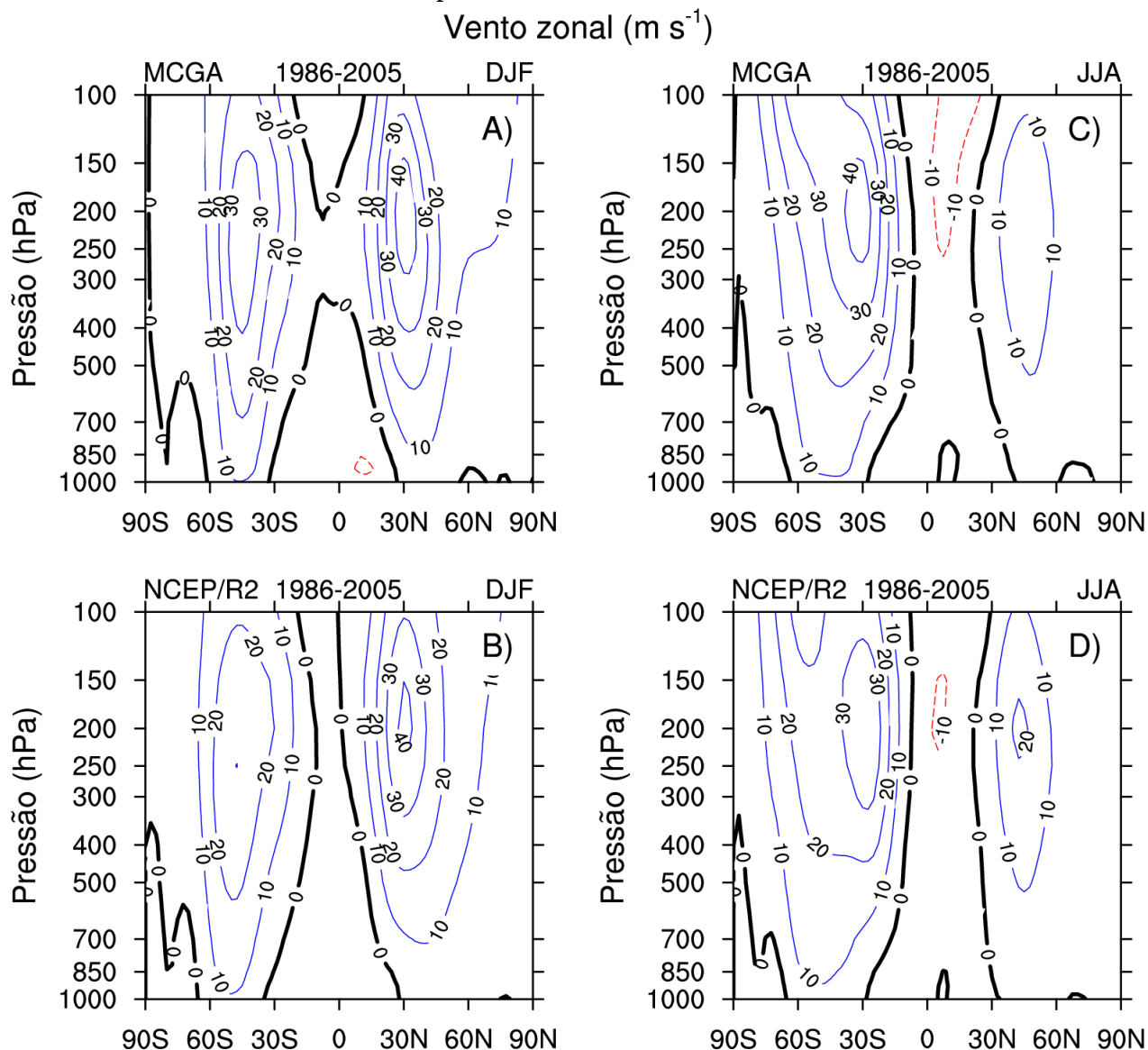
A estrutura vertical média de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) é mostrada na Figura 2 para o MCGA (Figuras 2A e 2C) e NCEP/R2 (Figuras 2B e 2D) referente aos trimestres DJF e JJA. Nota-se que os padrões de temperatura verificados pelo modelo são similares aqueles das análises do NCEP/R2 para ambos os hemisférios e que essa estrutura é bem simulada tanto na região tropical quanto na subtropical de ambos os hemisférios (CAVALCANTI et al., 2002). Pequenas diferenças são encontradas no MCGA durante JJA (Figura 2C) nas proximidades da Antártica em comparação ao NCEP/R2 (Figura 2D).

Figura 2 – Estrutura vertical da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do MCGA (A) e (C) e do NCEP/R2 (B) e (D) para os trimestres DJF e JJA. As linhas pontilhadas (contínuas) representam valores negativos (positivos) de temperatura.



A estrutura vertical do vento zonal (m s^{-1}) na Figura 3 mostra que o MCGA captura de forma satisfatória a intensidade e o posicionamento dos jatos em ambos os hemisférios para os trimestres DJF (Figura 3A) e JJA (Figura 3C). Porém, no HS a intensidade desse jato é superestimada pelo MCGA com núcleos de máxima velocidade em 200 hPa de 30 m s^{-1} contra 20 m s^{-1} do NCEP/R2 durante DJF. No caso do JJA, esse núcleo de máxima velocidade simulada pelo MCGA é mais intenso do que aquele do NCEP/R2, isto é, 40 m s^{-1} contra 30 m s^{-1} . Pezzi *et al.* (2008) utilizaram o MCGA com diferentes esquemas convectivos durante DJF e foi verificado que esse modelo foi capaz de representar a posição das correntes de jato apesar da superestimativa na intensidade do vento.

Figura 3 – Estrutura vertical do vento zonal (m s^{-1}) do MCGA (A) e (C) e do NCEP/R2 (B) e (D) para os trimestres DJF e JJA. As linhas contínuas representam vento de oeste e as pontilhadas representam vento de leste.



A Figura 4 mostra a diferença de precipitação (mm dia^{-1}) entre o MCGA e o GPCP para os trimestres DJF (Figura 4A), MAM (Figura 4B), JJA (Figura 4C) e SON (Figura 4D). São avaliados os valores positivos (negativos) que representam superestimativa (subestimativa) da precipitação.

No trimestre DJF (Figura 4A) o MCGA superestima a precipitação na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) como também no setor leste e nordeste da América do Sul. Por outro lado, subestimativa é notada no norte da Austrália. Há também subestimativa no leste dos Estados Unidos, Amazônia e centro sul da América do Sul. Nesse trimestre, o MCGA é capaz de simular os principais sistemas meteorológicos que produzem precipitação, como a ZCIT, a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS).

Em MAM (Figura 4B) superestimativa mais intensa é notada na região da ZCIT em relação ao trimestre anterior. Valores subestimados de precipitação são verificados no leste do Oceano Pacífico, as demais regiões de subestimativa são similares aquela do DJF.

No trimestre JJA (Figura 4C) o MCGA superestima a precipitação no Oceano Atlântico Norte (nas proximidades da região equatorial), na região da ZCPS e no Oceano Índico quando

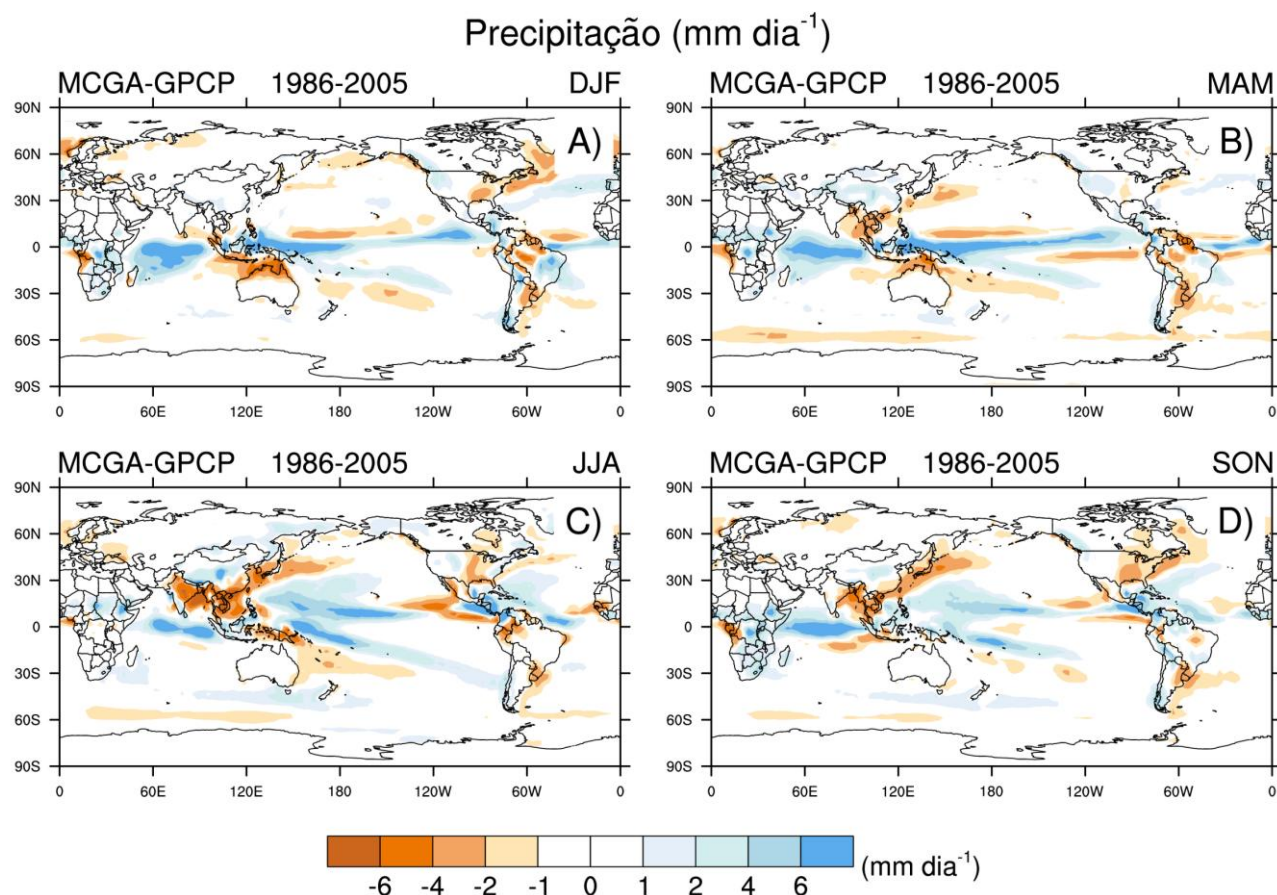
comparado com os trimestres anteriores. Esse trimestre é caracterizado por anomalias negativas de precipitação sobre a América do Sul, o qual foi bem simulado pelo modelo. Subestimativa é observada na parte sul e leste do continente asiático e no leste do Oceano Pacífico Norte. Nota-se persistência de subestimativa no Sul do Brasil, Uruguai e leste da Argentina que também é mostrada nos trimestres anteriores.

Finalmente, em SON (Figura 4D), as regiões de superestimativa são similares a JJA, porém com intensidade inferior. O mesmo padrão é verificado para subestimativa, com a diferença que no leste do Oceano Pacífico Norte não é tão intenso como observado em JJA. Outra região que apresentou subestimativa é a costa leste dos Estados Unidos e a mesma persistência é notada no Sul do Brasil, Uruguai e leste da Argentina.

No trabalho de Carneiro e Cavalcanti (2010) foi estudada a Variabilidade Intrassazonal (VI) durante o verão austral (DJF) utilizando o MCGA e comparando sua destreza em relação às reanálises do NCEP. Os resultados mostraram que houve subestimativa da convecção na região da Indonésia por parte do MCGA. Também, foi verificado déficit de precipitação na Amazônia e sul da América do Sul. Por outro lado, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) tanto no Pacífico quanto no Atlântico foi superestimada por esse modelo.

Pezzi et al. (2008) avaliaram diferentes esquema de convecção *Cumulus* sobre a América do Sul utilizando o MCGA durante o verão austral. Os resultados mostraram que o modelo superestima a convecção na parte sul da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e subestima na região mais oeste deste sistema. O motivo pelo qual isso ocorreu foi devido a resposta do esquema de convecção a forçante dinâmica (convergência de umidade em baixos níveis).

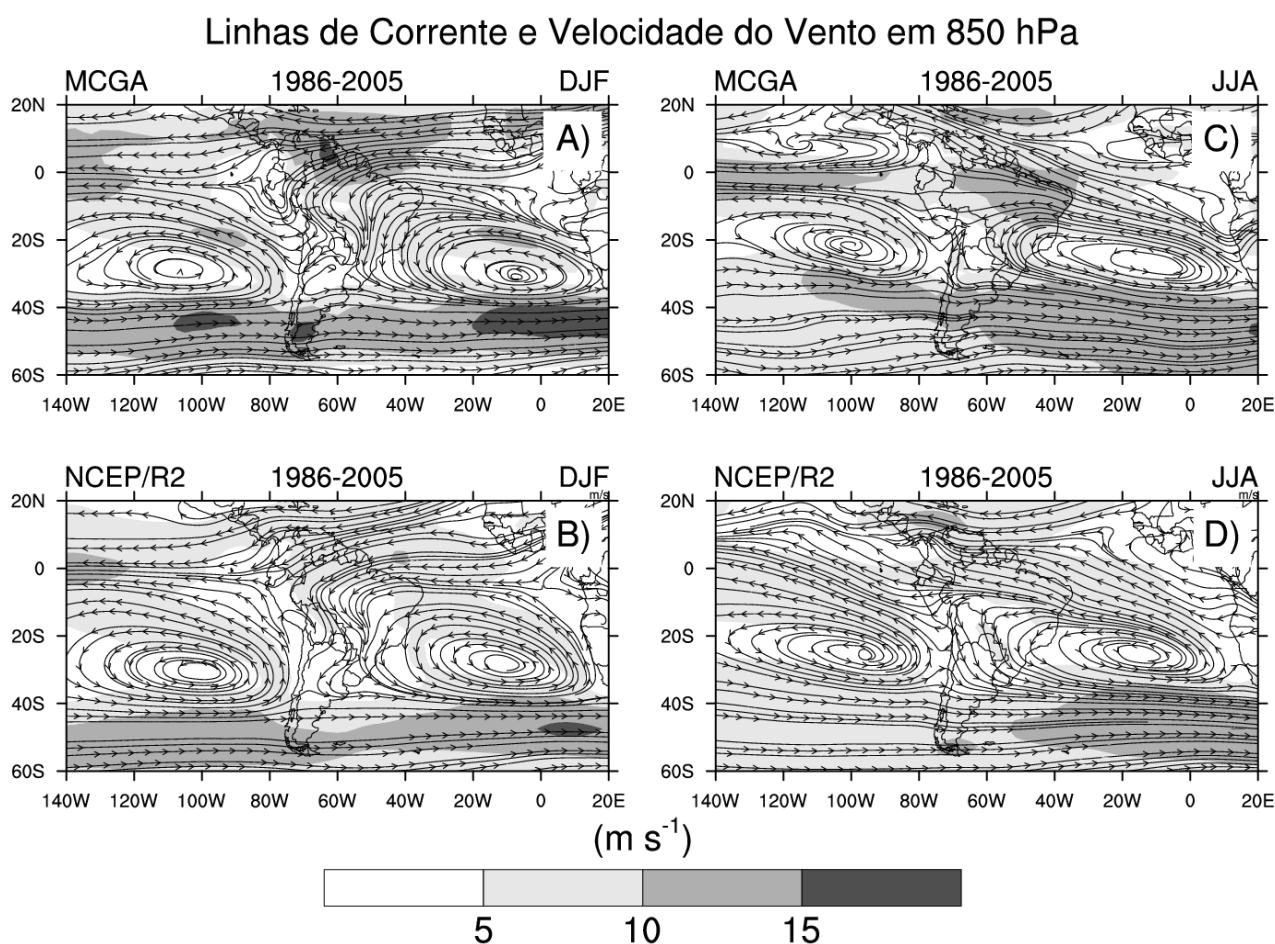
Figura 4 – Diferença na distribuição espacial da precipitação (mm dia^{-1}) entre o MCGA e o GPCP para os trimestres DJF (A), MAM (B), JJA (C) e SON (D). As cores quentes (frias) representam subestimativa (superestimativa) do MCGA em relação ao GPCP.



As figuras a seguir mostram as características de circulação atmosférica sobre a América do Sul no nível de 850 hPa. De uma forma geral, pode-se afirmar pelas Figuras 5A (DJF) e 5B (JJA) que o MCGA representa de forma satisfatória essas características, como por exemplo, a localização das Altas Subtropicais dos Oceanos Atlântico e Pacífico. Contudo, não é capaz de capturar o Jato de Baixos Níveis (MARENGO et al., 2004), que é uma característica comum no trimestre DJF sobre a América do Sul.

Com relação a velocidade do vento, o MCGA simula valores mais intensos na faixa de latitude entre 40°S e 60°S e entre 0° e 20°N. No trimestre JJA (Figuras 5C e 5D) o MCGA também consegue representar os anticiclones dos Oceanos Atlântico e Pacífico. A localização e a intensidade do vento também são representadas, contudo, as simulações mostram que essa intensidade é superior as análises do NCEP/R2 na faixa de latitude entre 40°S e 60°S sobre o Oceano Atlântico.

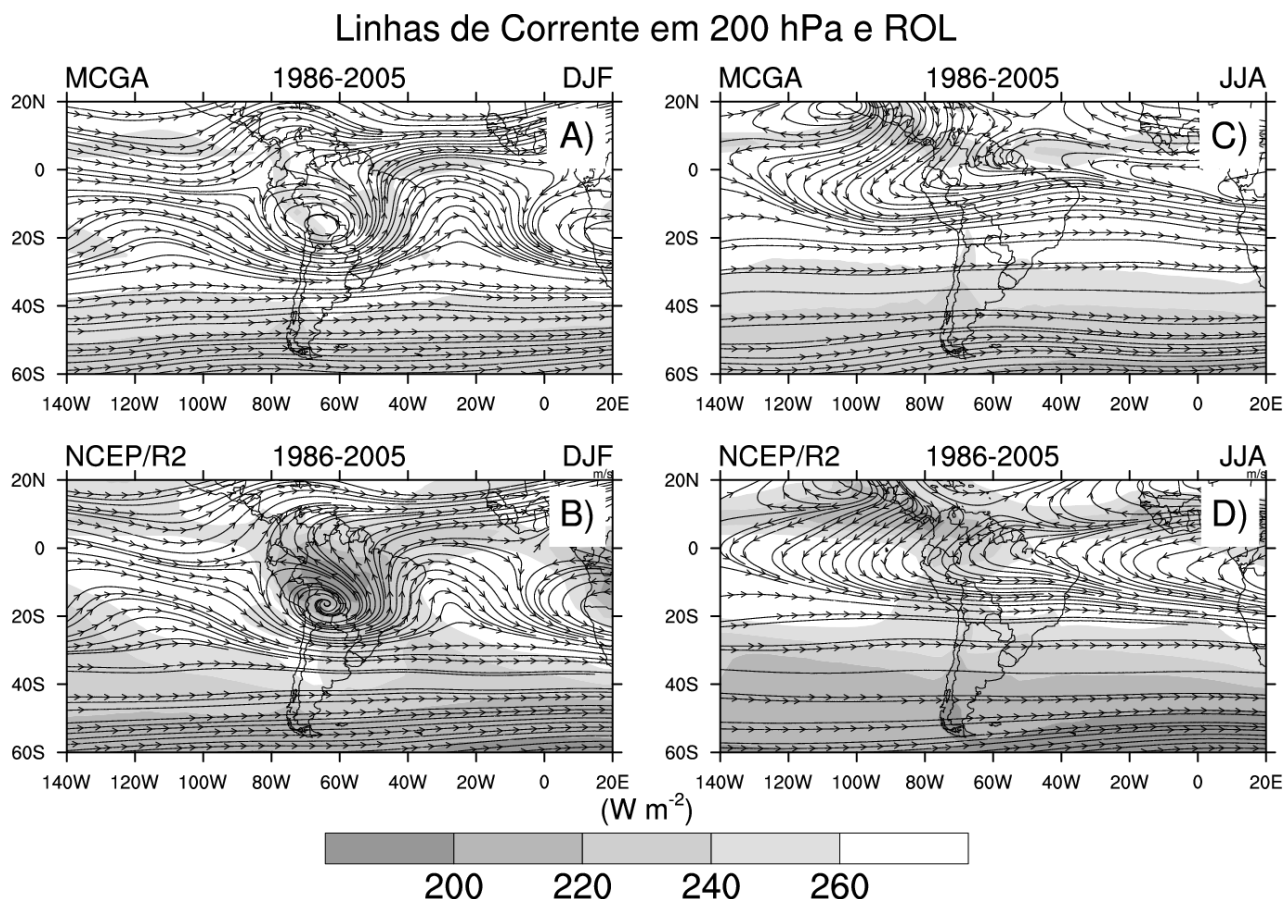
Figura 5 – Linhas de corrente e velocidade do vento em 850 hPa (m s^{-1}) para o MCGA (A) e (C) e o NCEP/R2 (B) e (D) para os trimestres DJF e JJA. As regiões preenchidas correspondem à velocidade do vento.



Na Figura 6 observa-se a circulação atmosférica no nível de 200 hPa e a Radiação de Onda Longa (ROL, W m^{-2}) para os trimestres DJF e JJA para o MCGA e NCEP/R2. Nas Figuras 6A e 6B o MCGA representa de forma satisfatória a Alta da Bolívia. Além disso, outra característica bem representada é o cavado do Nordeste. O ROL fornece uma boa indicação da atividade convectiva, porém o MCGA simula valores inferiores no centro da América do Sul indicando pouca atividade convectiva em relação ao NCEP/R2, que por sua vez, mostra maior atividade nessa região.

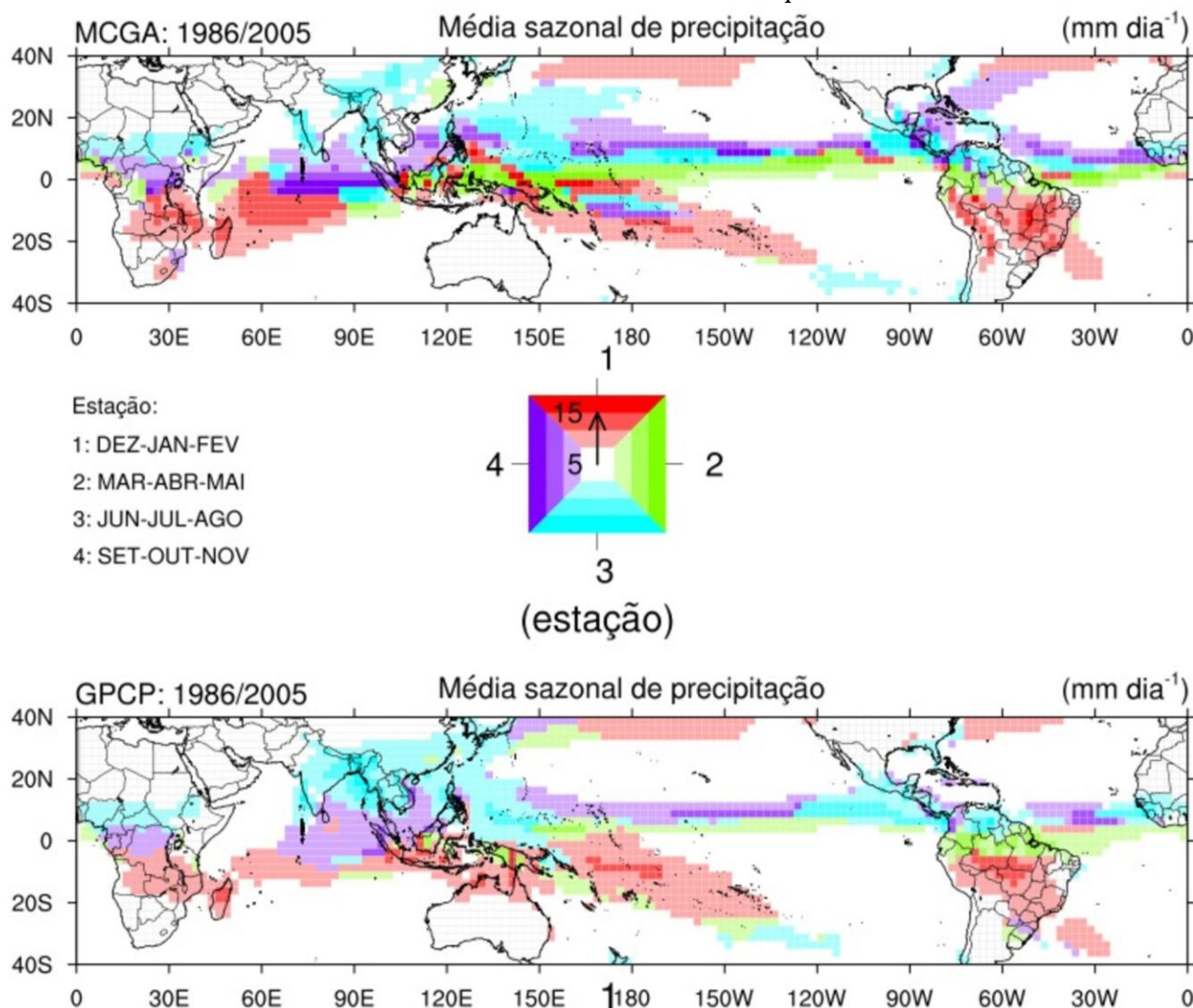
No trimestre JJA (Figuras 6C e 6D) destaca-se o posicionamento do Jato Subtropical mostrado pelo MCGA que se assemelha ao observado pelo NCEP/R2 e o escoamento mais zonal característico dessa estação.

Figura 6 – Linhas de corrente em 200 hPa (m s^{-1}) e ROL (W m^{-2}) para o MCGA (A) e (C) e o NCEP/R2 (B) e (D) para os trimestres DJF e JJA. As regiões preenchidas correspondem ao ROL.



É mostrada na Figura 7 a média sazonal dos valores máximos de precipitação no período de 1986 a 2005. O MCGA (figura superior) representa de forma satisfatória os principais sistemas produtores de precipitação no globo como também o trimestre em que eles ocorrem. Como por exemplo, na América do Sul, no DJF, o MCGA simula bem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) com seu máximo valor de precipitação ocorrendo no verão austral (DJF). Além desse sistema, a ZCPS no Oceano Pacífico Sul, a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS) e a ZCIT também são identificados nesse trimestre como também em MAM no HS e em JJA e SON no HN. Ao comparar com o GPCP (figura inferior) o MCGA simula chuvas mais intensas, sendo que o mais importante é verificado, isto é, a capacidade desse modelo em identificar corretamente a posição dos principais sistemas produtores de precipitação ao redor do globo.

Figura 7 – Distribuição sazonal de precipitação (mm dia^{-1}) para o MCGA (figura superior) e o GPCP (figura inferior). A legenda mostra quatro valores (1, 2, 3 e 4) que correspondem às estações do ano que são descritas à esquerda dela. Os valores no centro da legenda representam a intensidade da precipitação (nesse caso, variando de 5 a 20 mm dia^{-1} , com intervalo de 5 mm dia^{-1}), onde o valor menor está no centro e aumenta à medida que se afasta dele.



4 CONSIDERAÇÕES

Neste trabalho utilizou-se o modelo de superfície IBIS acoplado ao MCGA/CPTEC com o objetivo de avaliar as características de circulação atmosférica como também a precipitação ao redor do globo. Foram utilizados dados observacionais (NCEP/R2 e GPCP) para verificar a destreza desses em subestimar ou superestimar as variáveis utilizadas. Os resultados mostraram que o MCGA/CPTEC foi capaz de simular de forma satisfatória os principais padrões de circulação (alta subtropical do Atlântico Norte e do Sul, alta da Bolívia, cavado do Nordeste) ao redor do globo, como também os sistemas produtores de precipitação (ZCAS, ITCZ e ZCPS). A variável precipitação por ser um parâmetro de difícil previsão ora foi superestimado ora subestimado pelo modelo em algumas regiões do globo, mas de uma forma geral, o MCGA simulou com certo grau de confiabilidade essa variável.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao projeto FP7-AMAZALERT (número do projeto 282664) pelo apoio financeiro e aos revisores anônimos pelas sugestões para a melhoria do trabalho.

REFERÊNCIAS

ADLER, R. F.; HUFFMAN, G. J. et al. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). **Journal of Hydrometeorology**, v.4, p.1147-1167, 2003. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004%3C1147:TVGPCP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004%3C1147:TVGPCP%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

BONATTI, J. P. 1996. Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC. **Climanálise Especial**, edição comemorativa de 10 anos. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A. et al. Global climatological features in a simulation using CPTEC/COLA AGCM. **Journal Climate**, v.15, p.2965-2988, 2002. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C2965:GCFIAS%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C2965:GCFIAS%3E2.0.CO;2)>. Acesso: em 18 Dez. 2014.

CARNEIRO, G. M; CAVALCANTI, I. F. A. Características da convecção associada à variabilidade intrassazonal: comparação entre resultados do MCGA CPTEC/COLA e observação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.4, p.525-534, 2010. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=1011&id_arquivo=2635>. Acesso em: 19 Dez. 2014.

CHAVES, R. R. Resposta de um modelo de circulação geral do oceano ao campo de tensão de cisalhamento do vento produzido por um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera e reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.3, p.437-450, 2005. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=147&id_arquivo=149>. Acesso em: 24 Dez. 2014.

CHOU, M. D.; SUAREZ, M. J. A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW). **NASA Technical Memorandum no. 104606**, v.15, 48p, 1996. Disponível em: <<http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/tm/docs/Chou136.pdf>>. Acesso em 18 Dez. 2014.

FOLEY, J. A.; LEVIS, S. et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. **Ecological Applications**, v.10, n.6, p.1620-1632, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[1620:IDVCWG\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1620:IDVCWG]2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C. et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v.10, n.4, p.603-628, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/96GB02692>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

GATES, W. L. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison. Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.73, p.1962-1970, 1992. Disponível em: <<http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

GATES, W. L.; BOYLE, J. S. et al. An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.80, p.29-55, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080%3C0029:AOOTRO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080%3C0029:AOOTRO%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

GRELL, G. A. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by *Cumulus* Parameterizations. **Monthly Weather Review**, v.121, p.764-787, 1993. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121%3C0764:PEOAUB%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121%3C0764:PEOAUB%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v.29, n.14, p.38-1-38-4, 2002. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002GL015311/supplinfo>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

HARSHVARDHAN, R. D.; RANDALL, D. A. et al. G. A fast radiation parameterization for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v.92, p.1009-1016, 1987. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029%2fJD092iD01p01009>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

HURRELL, J. W., HACK, J. J. et al. A New Sea Surface Temperature and Sea Ice Boundary Dataset for the Community Atmosphere Model. **Journal of Climate**, v.21, p.5145-5153, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2292.1>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, n.3, p.437-471, 1996. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRPP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRPP%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

KANAMITSU, M., EBISUZAKI, W. et al. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.83, p.1631-1643, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

KUBOTA, P.Y. 2012. **Variabilidade de energia armazenada na superfície e seu impacto na definição do padrão de precipitação na América do Sul**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 285p. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP7W/3CCP5R2?ibiurl.language=pt-BR>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A. et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, n.3, p.795-825, 2000. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999GB001138/abstract>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. et al. Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalyses. **Journal of Climate**, v.17, p.2261-2280, 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2261:COTLJE%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2261:COTLJE%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Review of Geophysics and Space Physics**, v.20, p.851-875, 1982. Disponível em:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/RG020i004p00851/abstract>>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

NCAR/NCL - **The NCAR Command Language** (NCL, Version 6.1.2) [Software]. (2013). Boulder, Colorado: UCAR/NCAR/CISL/VETS. <http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5>.

PEZZI, L. P. P.; CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* A sensitivity study using two different convection schemes over South America. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, p.170-190, 2008. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=878&id_arquivo=1879>. Acesso em: 19 Dez. 2014.

SILVA, M. E. S.; FRANCHITO, S. H. *et al.* Simulação da variação sazonal do clima com um modelo acoplado biosfera-atmosfera com hidrologia de solo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.3, p.375-384, 2005. Disponível em: <http://www.rbmet.org.br/port/revista/revista_dl.php?id_artigo=142&id_arquivo=144>. Acesso em: 19 Dez. 2014.

TARASOVA, T. A.; FOMIN, B. A. Solar radiation absorption due to water vapor: Advanced broadband parameterizations. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, p.1947-1951, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039%3C1947:SRADTW%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039%3C1947:SRADTW%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

TIEDTKE, M. The sensitivity of the time mean large scale flow to *Cumulus* convection in the ECMWF model. In: Workshop on convection in large scale numerical models. Reading. **Proceedings...** Reading: CMWF, 1983. p.297-316, 1983.

XUE, Y.; ZENG, F. *et al.* SSiB and its sensitivity to soil properties – a case using HAPEX - mobilhy data. **Global and Planetary Change**, v.13, p.183-194, 1996. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035%3C0386:SOSSFT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035%3C0386:SOSSFT%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 Dez. 2014.

Data de submissão: 07.03.2014

Data de aceite: 16.06.2015

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.