

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### VALIDAÇÃO DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS PARA O RIO GRANDE DO SUL

*Letícia Naitzel<sup>1\*</sup> ; Juan Martín Bravo<sup>1</sup> & Anderson Ruhoff<sup>1</sup>*

**RESUMO** – Mudanças climáticas são um assunto cada vez mais presente em pautas não apenas ambientais, como também políticas, acadêmicas e sociais. Isso porque as consequências da alteração no clima são evidentes desde escalas locais até globais, abrangendo desde distúrbios no balanço hídrico e energético do planeta, até impactos que afetam diretamente a produção agrícola, a produção de energia hidrelétrica, e até mesmo a dispersão de doenças. Os modelos climáticos globais (MCG) são muito importantes para fazer projeções do clima futuro considerando diferentes cenários. Porém é importante analisar a acurácia desses modelos em simular o histórico observado. Por isso, o objetivo do presente estudo é avaliar a capacidade de MCG oriundos da Quinta Fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) em representar o clima atual (1961-2005) do Rio Grande do Sul considerando as variáveis climáticas precipitação, radiação solar incidente e temperatura. Para isso, as medidas de erro RMSE, BIAS e  $r^2$  foram calculadas considerando médias mensais observadas, obtidas das estações meteorológicas convencionais do INMET, e simuladas no período atual pelos MCG. Posteriormente, os valores obtidos para cada medida de erro foram submetidos a um procedimento de ranqueamento por variável climática e para todas as variáveis simultaneamente. Tanto o conjunto geral dos 22 MCG quanto os conjuntos de modelos com melhor desempenho em cada variável foram comparados ao histórico observado, e os resultados apontam que o histórico simulado pelos conjuntos de melhores modelos se aproximou mais das médias observadas em cada variável climática.

**ABSTRACT** - Studies about climate changes have been increasingly present not only in environmental, but also in political, academic and social topics. That is because the consequences of climate change are each day more evident, from local scale to global scale, encompassing disturbances in the planet's hydric and energetic balance, to alterations that affects directly agricultural productions, hydroelectric power generation and even spread of diseases. Climate models are important to project the future of the climate in different scenarios. However, it is important to analyze the accuracy of these models in simulating the observed data. Therefore, the aim of this study is to evaluate the capacity of GCM from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) of representing the current climate (1961-2005), for the considered climate variables precipitation, incident solar radiation and temperature. To achieve this, the error measurements RMSE, BIAS and  $r^2$  were calculated taking into consideration observed monthly averages, obtained from meteorological stations of INMET, and simulated, originated in projections of the present period of GCM. Subsequently, the values obtained for each error measurement were submitted to a ranking process by climate variable and for all variables simultaneously. Both the overall set of 22 GCM and the sets of models with the best performance in each variable were compared to the observed data, and the results show that the current climate simulated by the sets of best models came closer to the averages observed in each climate variable.

**Palavras-Chave** - Ranqueamento, mudanças climáticas, CMIP5

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (lee\_naitzel@hotmail.com, jumarbra@iph.ufrgs.br, andersonruhoff@gmail.com).

\* Autor correspondente.

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas causadas por atividades antrópicas estão diretamente relacionadas com o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE), com o desmatamento, a criação de ilhas de calor, entre outros Nobre *et al.* (2007), e têm sido um assunto cada vez mais em pauta no mundo. Essas mudanças afetam diretamente o balanço hídrico dos ecossistemas aquáticos e os ciclos biogeoquímicos nas bacias hidrográficas Stocker *et al.* (2013), o uso da terra e a erosão do solo pela água Borrelli *et al.* (2020), as doenças transmitidas por vetores ou por veiculação hídrica e as respiratórias Barcellos *et al.* (2009), e a disponibilidade hídrica para produção de energia hidrelétrica Lima *et al.* (2014) e para produção agrícola Kogo *et al.* (2020); Alberto *et al.* (2006).

Modelos Climáticos Globais (MCG) são ferramentas primordiais para fazer previsões sobre o estado futuro do clima no mundo Delworth *et al.* (2012), porém são limitados pelo atual conhecimento físico e pela representação matemática incompleta de componentes dos sistemas terrestres Flato *et al.* (2013). Por isso, o uso de diversos modelos em um conjunto (*ensemble*) geralmente torna-se útil para avaliar a variabilidade entre os modelos do sistema terrestre, podendo-se quantificar as incertezas das projeções futuras considerando vários cenários de vários modelos Homsí *et al.* (2020); Lutz *et al.* (2016); PBMC (2014). O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, *Coupled Models Intercomparison Project*), por exemplo, foi criado com o intuito de comparar continuamente os MCG e corrigir erros globais encontrados, aumentando a credibilidade das projeções Eyring *et al.* (2016). Apesar de haver essa análise envolvendo multi-modelos para aprimorar cada vez mais as projeções, é necessário realizar uma validação dos modelos para a região de interesse, a fim de analisar o quanto esses modelos estão conseguindo representar o clima atual Raju e Kumar (2020); Bonan e Bonan (2015). Para isso, são usadas observações de variáveis climáticas e calculadas métricas para quantificar o desempenho dos modelos climáticos Baker e Taylor (2016).

Este estudo busca validar os MCG oriundos do CMIP5 para o clima de todo estado do Rio Grande do Sul considerando as variáveis climatológicas precipitação, temperatura e radiação solar incidente. Essa análise é importante, pois possibilita avaliar quais são os modelos que melhor representaram o clima do Estado no período histórico (1961-2005) e, assim, utilizar seus dados em simulações de projetos hidráulicos, hidrossanitários, ecológicos e agroindustriais, bem como para gestão de recursos hídricos e Planos de Bacia Hidrográfica. O Rio Grande do Sul, por exemplo, participa da iniciativa *Regions Adapt*, um programa internacional criado em 2015 durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) para trocar experiências e qualificar as ações de adaptação às mudanças climáticas.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

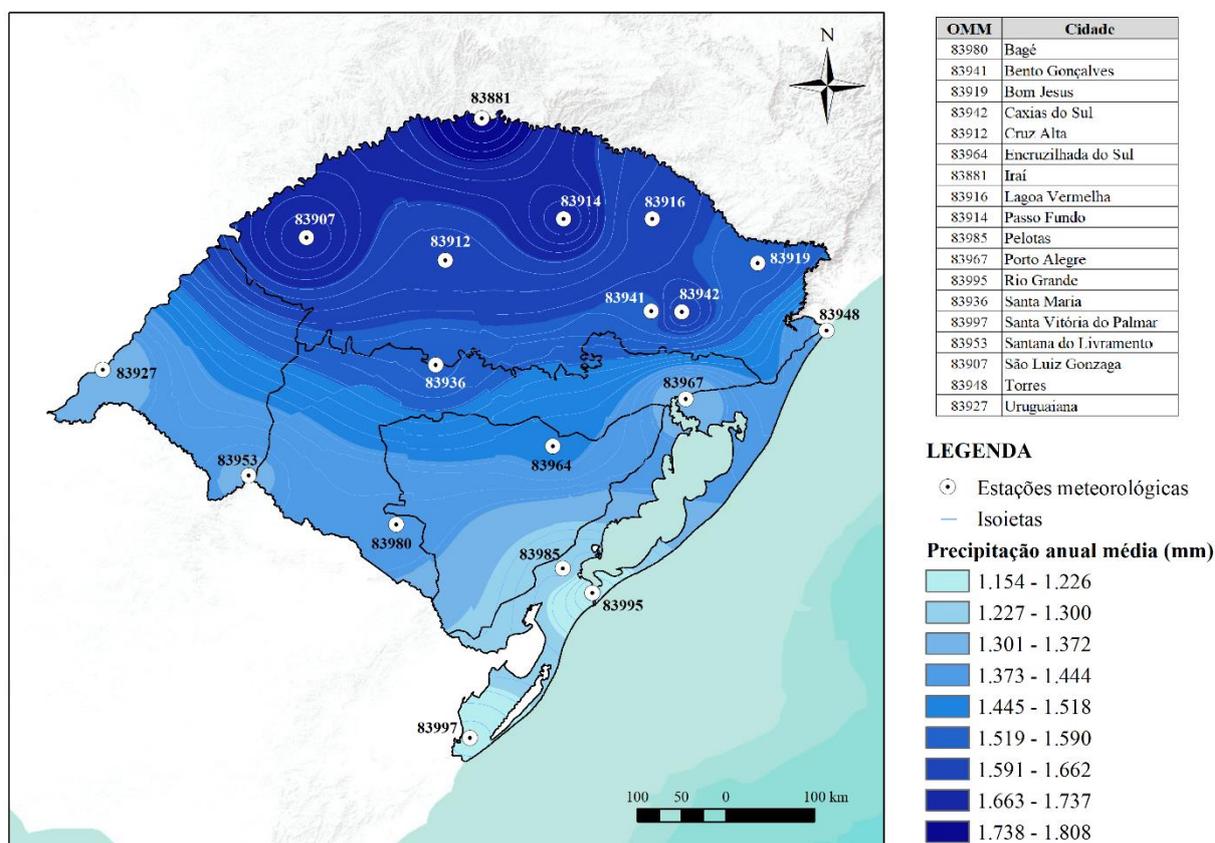
O presente estudo de mudanças climáticas foi realizado para o Rio Grande do Sul, estado do Brasil localizado no extremo sul do país. Segundo a classificação de Köppen, o Rio Grande do Sul apresenta clima dos tipos Cfa e Cfb, com precipitação bem distribuída ao longo do ano, variando de 100 a 170 mm mensais Alvares *et al.*, (2013). Segundo dados do INMET, a normal climatológica mais recente (1981 a 2010) de temperatura média compensada anual para o estado é de 18,1 °C, e de precipitação acumulada anual é de aproximadamente 1650 mm.

## Dados observados

Os dados observados foram extraídos do BDMEP, o Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Ao todo, são 18 estações localizadas dentro do Rio Grande do Sul, as quais são apresentadas no mapa da Figura 1 com seu código OMM de acordo com a Organização Meteorológica Mundial. A cidade em que cada estação está localizada se encontra no quadro ao lado do mapa. Todas as estações possuem dados disponíveis na plataforma somente a partir de 1961, sendo essa a data inicial do período atual considerado no presente estudo.

A radiação solar incidente e a temperatura são variáveis climáticas que possuem sazonalidade marcante no Rio Grande do Sul e possuem valores semelhantes para todas as regiões do Estado comparando-se uma mesma estação do ano. Porém a chuva é bastante heterogênea, sendo que as maiores contribuições de precipitação anual são oriundas da região norte, conforme pode ser visto nessa mesma figura, onde é apresentada a distribuição espacial da precipitação média anual.

Figura 1 – Estações meteorológicas convencionais do INMET localizadas no Rio Grande do Sul e distribuição espacial da precipitação média anual no Estado



## Dados simulados

O Quadro 1 apresenta os 22 MCG considerados, os quais são oriundos do CMIP5, desenvolvido pelo Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP, *World Climate Research Programme's*) de 2010 a 2014, e são resumidos no Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), o AR5. Todos esses dados foram disponibilizados pelo Centro Alemão de Cálculo Climático (DKRZ, *Deutsches Klimarechenzentrum*). No conjunto de dados obtidos do DKRZ, estes 22 MCG foram selecionados por apresentarem simultaneamente dados das três variáveis no período de interesse. Os dados

disponíveis na plataforma do INMET iniciam em 1961 para as estações meteorológicas instaladas no RS, e o período atual dos modelos climáticos do CMIP5 finda em 2005. Portanto, o período atual considerado no presente estudo vai de 1961 até 2005, totalizando 45 anos.

Quadro 1 – Modelos climáticos globais considerados

MCG	Instituição	País	Resolução (°)	
			Lat <sup>1</sup>	Lon <sup>2</sup>
<b>bcc-csm1.1</b>	Beijing Climate Center (BCC)	China	2,7906	2,8125
<b>bcc-csm1.1m</b>			1,1215	1,125
<b>BNU-ESM</b>	Beijing Normal University (BNU)		2,7906	2,8125
<b>CanESM2</b>	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Canadá	2,7906	2,8125
<b>CESM1-CAM5</b>	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	EUA	0,9424	1,25
<b>CESM1-WACCM</b>			1,8848	2,5
<b>CNRM-CM5</b>	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	França	1,4008	1,40625
<b>CSIRO-Mk3-6-0</b>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)	Austrália	1,8653	1,875
<b>FGOALS-g2</b>	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (LSAG-CESS)	China	2,7906	2,8125
<b>FIO-ESM</b>	The First Institute of Oceanography, SOA (FIO)	China	2,7906	2,8126
<b>GISS-E2-H</b>	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	EUA	2	2,5
<b>GISS-E2-R</b>			2	2,5
<b>IPSL-CM5A-LR</b>	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	França	1,8947	3,75
<b>IPSL-CM5A-MR</b>			1,2676	2,5
<b>MIROC5</b>	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japão	1,4008	1,40625
<b>MIROC-ESM</b>			2,7906	2,8125
<b>MIROC-ESM-CHEM</b>			2,7906	2,8125
<b>MPI-ESM-LR</b>	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemanha	1,8653	1,875
<b>MPI-ESM-MR</b>			1,8653	1,875
<b>MRI-CGCM3</b>	Meteorological Research Institute (MRI)	Japão	1,12148	1,125
<b>NorESM1-M</b>	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega	1,8947	2,5
<b>NorESM1-ME</b>	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)		1,8947	2,5

## Estratégia Metodológica

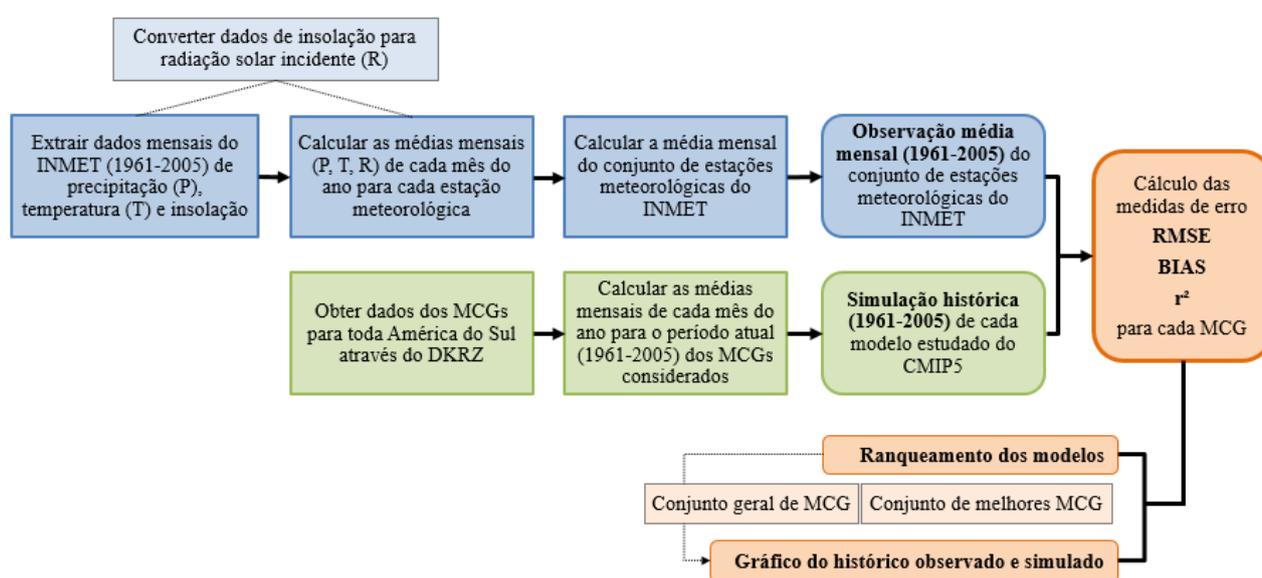
Para validar os MCG, foi necessário processar tanto dados observados quanto dados simulados pelos modelos, como pode ser visto na Figura 2, em azul e verde, respectivamente.

Os dados observados foram extraídos do BDMEP, para o período de 1961 a 2005, sendo obtidos mensalmente para cada estação meteorológica convencional do INMET. As variáveis disponibilizadas que foram utilizadas são precipitação mensal (em mm), temperatura do ar a 2 m de altura (em °C) e insolação (em horas), sendo essa última convertida em radiação solar incidente na superfície terrestre (em W/m<sup>2</sup>) conforme Shuttleworth (2012). Após essa etapa, foram calculadas as médias mensais de cada mês do ano para o período histórico considerado (1961-2005), para cada variável climática considerada e cada estação meteorológica. Na sequência, foi calculada a média de

cada mês do ano do conjunto de estações meteorológicas localizadas no Rio Grande do Sul, para cada variável climática.

Simultaneamente à manipulação dos dados observados, foi feito o processamento dos dados simulados pelos MCG. Primeiramente, foi solicitado ao DKRZ os dados de todos os modelos climáticos do CMIP5 para o *grid* da América do Sul. A partir daí, foram realizadas as médias mensais de cada mês do ano para o mesmo período atual de dados observados (1961-2005), para cada MCG considerado neste estudo. Para isso, foi necessário utilizar uma rotina do MATLAB, visto que a resolução de cada MCG varia, ou seja, cada modelo abrange um número diferente de pontos cujas coordenadas se situam dentro da área de estudo.

Figura 2 - Fluxograma de atividades. Em azul, estão as etapas de manipulação dos dados observados e, em verde, a manipulação dos dados simulados pelos modelos para obter o resultado destacado em laranja.



Com as médias mensais de cada mês do ano para o período histórico observado e simulado, foi possível calcular a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), o viés (BIAS) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), para cada MCG e cada variável climática, assim como é mostrado no fim do fluxograma da Figura 2. Para analisar a acurácia dos modelos climáticos em representar o clima na área de estudo do presente trabalho, foi utilizado o processo de ranqueamento descrito por Wigley (2008). Essa técnica consiste em organizar os modelos na ordem do melhor ao pior resultado para cada uma das métricas de erro consideradas. O primeiro terço de modelos recebe valor igual a 1 no ranqueamento individual (de cada medida de erro considerada), o segundo terço recebe valor 0 (zero), e o último terço recebe valor igual a -1. Por fim, para cada modelo climático, os 3 valores obtidos no ranqueamento parcial de cada métrica considerada são somados, chegando a um valor final para o ranqueamento. Esse valor é organizado em ordem decrescente, sendo que maiores valores são referentes aos modelos que melhor representaram o clima atual, em cada variável climática considerada. No presente estudo, considerou-se 22 modelos para validação, portanto, os sete primeiros (primeiro terço) do ranqueamento parcial receberam valor igual a 1, os sete últimos (último terço) receberam valor igual a -1, e os oito intermediários (segundo terço), receberam valor igual a 0 (zero).

Para separar os modelos climáticos conforme seu desempenho em três categorias (bom, mediano e insatisfatório), foi considerado como modelo com bom desempenho aquele cuja soma dos rankings individuais resultou em 3, 2 ou até mesmo 1, em que a soma com o resultado igual a 1 só foi considerada como critério para considerar um modelo bom quando suas parcelas eram dois valores

igual a 1 e o terceiro igual a -1 ( $1 + 1 - 1 = 1$ ). O mesmo foi feito para elencar os modelos com desempenho não satisfatório: todos aqueles cuja soma resultasse em -3, -2 ou -1 (quando a soma é dada por duas parcelas igual a -1 e uma igual a 1).

Com os resultados dos conjuntos de melhores modelos para cada região geomorfológica do RS e cada variável climática considerada no presente estudo, foram gerados gráficos comparando as médias mensais de cada mês do ano do histórico observado com as médias do histórico simulado, tanto pelo conjunto inicial de modelos climáticos estudados, quanto pelo conjunto de melhores modelos obtido através do ranqueamento. Dessa maneira, foi possível verificar visualmente qual conjunto de modelos conseguiu representar com maior acurácia as variáveis climáticas no Rio Grande do Sul.

## RESULTADOS

### Ranqueamento de modelos

O Quadro 2 apresenta o resultado do ranqueamento dos modelos em três terços aproximadamente: desempenho bom (verde), desempenho mediano (laranja) e desempenho não satisfatório (vermelho).

Quadro 2 – Ranqueamento dos MCG para cada variável climática, com respectivos valores da soma dos rankings individuais de RMSE, BIAS e  $r^2$ .

PRECIPITAÇÃO		RADIAÇÃO SOLAR		TEMPERATURA	
bcc-csm1.1m	3	BNU-ESM	3	bcc-csm1.1m	2
MIROC-ESM-CHEM	3	MIROC-ESM	3	CanESM2	2
MPI-ESM-LR	3	NorESM1-M	3	CESM1-WACCM	2
BNU-ESM	2	CESM1-WACCM	2	CSIRO-Mk3-6-0	2
MIROC5	2	FIO-ESM	2	MPI-ESM-MR	2
MIROC-ESM	2	MPI-ESM-MR	1	NorESM1-ME	2
CanESM2	1	MRI-CGCM3	1	MIROC-ESM	1
MPI-ESM-MR	1	bcc-csm1.1	1	MRI-CGCM3	1
MRI-CGCM3	1	CNRM-CM5	1	CNRM-CM5	1
CESM1-WACCM	0	FGOALS-g2	1	IPSL-CM5A-LR	1
FIO-ESM	0	MIROC-ESM-CHEM	1	IPSL-CM5A-MR	1
NorESM1-M	0	bcc-csm1.1m	0	bcc-csm1.1	-1
bcc-csm1.1	-1	NorESM1-ME	0	GISS-E2-H	-1
CSIRO-Mk3-6-0	-1	CanESM2	-1	MIROC-ESM-CHEM	-1
IPSL-CM5A-MR	-1	MPI-ESM-LR	-1	MPI-ESM-LR	-1
CNRM-CM5	-2	CSIRO-Mk3-6-0	-2	FGOALS-g2	-1
FGOALS-g2	-2	IPSL-CM5A-LR	-2	MIROC5	-1
GISS-E2-H	-2	IPSL-CM5A-MR	-2	BNU-ESM	-2
GISS-E2-R	-2	MIROC5	-2	CESM1-CAM5	-2
IPSL-CM5A-LR	-2	CESM1-CAM5	-3	FIO-ESM	-2
NorESM1-ME	-2	GISS-E2-H	-3	NorESM1-M	-2
CESM1-CAM5	-3	GISS-E2-R	-3	GISS-E2-R	-3

A partir desse quadro, pode-se perceber que alguns modelos possuem bom desempenho para determinada variável, mas não são satisfatórios para outra. Por exemplo, o modelo BNU-ESM é considerado bom para precipitação e radiação solar, mas está com um valor negativo no ranqueamento de temperatura; o modelo MIROC5 é bom para precipitação, mediano para temperatura, e não satisfatório para radiação solar incidente; o modelo NorESM1-M é considerado mediano para precipitação, satisfatório para radiação solar incidente e insatisfatório para temperatura; e assim sucessivamente.

Porém, quando se trata de utilizar dados de variáveis climáticas na entrada de outros modelos de simulação de eventos ambientais, é preciso haver coerência na escolha de um mesmo modelo ou conjunto de modelos para todas as variáveis consideradas. Dessa forma, foi realizado um ranqueamento geral considerando as três variáveis climáticas consideradas no presente estudo, e os resultados são apresentados no Quadro 3. As cores são as mesmas àquelas atribuídas aos modelos no Quadro 2. O modelo MIROC-ESM obteve um bom desempenho nas três variáveis climáticas consideradas, sendo que a soma dos rankings individuais foi igual a 6. O modelo BNU-ESM ficou com um valor alto no ranqueamento geral, apesar de não ser muito satisfatório para temperatura, pois obteve valores bons para radiação solar e precipitação. Esse tipo de análise utilizando cores para diferenciar os desempenhos dos modelos é muito importante para avaliar de forma dinâmica e visual quais deles serão considerados para determinada simulação em outro modelo.

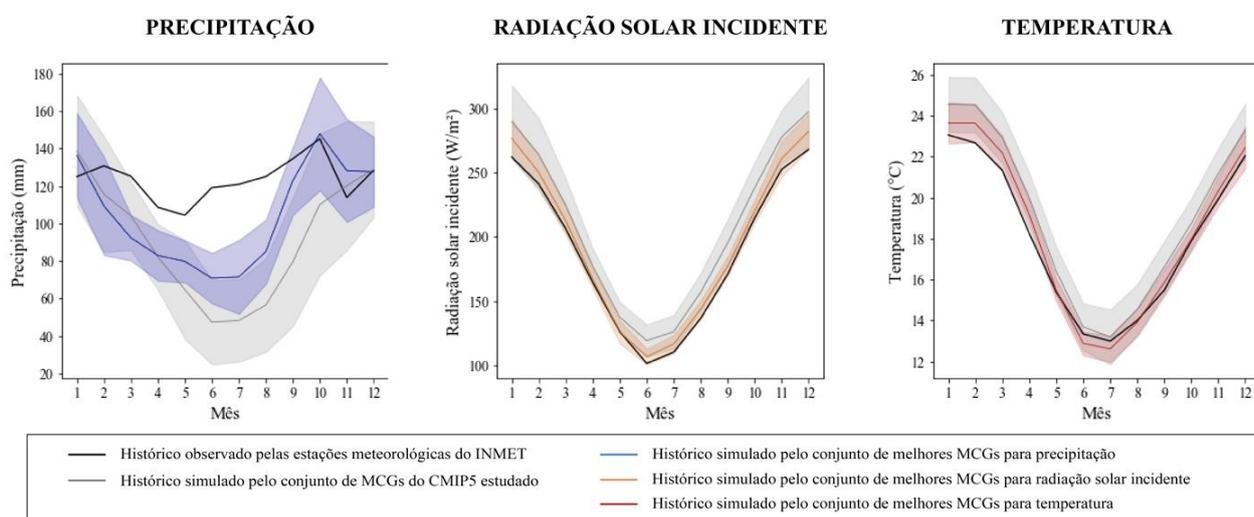
Quadro 3 - Ranqueamento geral dos modelos somando-se os rankings obtidos para cada variável climática individualmente. A cor verde representa modelos climáticos com bom desempenho para a variável climática em questão; a cor vermelha, modelos com desempenho insatisfatório; e a cor laranja, modelos com desempenho mediano.

Modelo	PREC	RAD	TEMP	SOMA
MIROC-ESM	2	3	1	6
bcc-csm1.1m	3	0	2	5
CESM1-WACCM	0	2	2	4
MPI-ESM-MR	1	1	2	4
BNU-ESM	2	3	-2	3
MIROC-ESM-CHEM	3	1	-1	3
MRI-CGCM3	1	1	1	3
CanESM2	1	-1	2	2
MPI-ESM-LR	3	-1	-1	1
NorESM1-M	0	3	-2	1
CNRM-CM5	-2	1	1	0
FIO-ESM	0	2	-2	0
NorESM1-ME	-2	0	2	0
bcc-csm1.1	-1	1	-1	-1
CSIRO-Mk3-6-0	-1	-2	2	-1
MIROC5	2	-2	-1	-1
FGOALS-g2	-2	1	-1	-2
IPSL-CM5A-MR	-1	-2	1	-2
IPSL-CM5A-LR	-2	-2	1	-3
GISS-E2-H	-2	-3	-1	-6
CESM1-CAM5	-3	-3	-2	-8
GISS-E2-R	-2	-3	-3	-8

## Histórico observado e simulado

Para corroborar os resultados da validação dos modelos climáticos realizada através do ranqueamento, foram gerados gráficos de histórico considerando as médias mensais de 1961 a 2005 para o Rio Grande do Sul, conforme é apresentado na Figura 3. Nessa figura, são apresentadas as médias mensais de cada mês do ano das estações meteorológicas do INMET presentes em cada região (dados observados - linha preta); médias mensais de cada mês do ano do histórico simulado pelo conjunto de modelos climáticos do CMIP5 considerado nesse estudo (linha cinza); e, por fim, as médias mensais de cada mês do ano do histórico simulado pelo conjunto com bom desempenho em cada variável climática (modelos em verde no Quadro 2) e que foi denominado de conjunto de melhores modelos climáticos (linha azul para precipitação, laranja para radiação solar incidente, e vermelha para temperatura).

Figura 3 - Histórico observado e simulado (por ambos os conjuntos de MCG analisados) considerando médias mensais do Rio Grande do Sul no período de 1961 a 2005. A área sombreada no histórico simulado representa o desvio padrão do conjunto de modelos em questão.



Considerando a variável precipitação, percebe-se que, embora os modelos representem a chuva com uma sazonalidade marcante no histórico simulado, essa curva sazonal tende a ser mais suave quando selecionamos apenas os modelos que obtiveram melhor desempenho no ranqueamento. Mesmo assim, a sazonalidade ainda é evidente, o que é característico de climas tropicais, que se estendem aproximadamente até o estado de São Paulo Alvares *et al.* (2013). Porém, pela resolução grosseira dos modelos climáticos globais (que chega até 2,8 graus), pode ser que essa sazonalidade na precipitação acabe se estendendo até a região sul do Brasil. Possivelmente, os MCG simulam satisfatoriamente a influência da umidade oriunda da Amazônia, mas não simulam adequadamente os sistemas frontais vindos do Sul do continente e que atingem o Rio Grande do Sul. Assim, possivelmente as chuvas frontais que ocorrem durante os meses de inverno na região Sul do Brasil acabam não sendo adequadamente representadas. Pesquisas anteriores já apontaram que os fenômenos que ocasionam chuvas convectivas e orográficas em escalas pequena e intermediária não são considerados por modelos climáticos globais Mesa (2006), entretanto, as frentes frias que ocorrem no sul do Brasil possivelmente também estão subestimadas pelos modelos de escala global. Além disso, há que se considerar que o *feedback* de vapor d'água, o mais importante para aumentar a sensibilidade climática dos modelos, ainda é uma fonte substancial de incertezas nas projeções, já que os modelos possuem diferentes respostas para a simulação de nuvens convectivas e precipitação tropical Souza *et al.* (2014); Randall *et al.* (2007).

Pode-se perceber que os resultados do conjunto de modelos climáticos com melhor desempenho aproximaram-se mais dos dados observados. Ou seja, os gráficos mostram de forma visual que os modelos que apresentaram um desempenho melhor no ranqueamento são aqueles cujas médias mensais estão mais próximas das médias históricas observadas se comparado ao conjunto de todos os 22 MCG do CMIP5 considerados no estudo. Além disso, o desvio padrão do conjunto de melhores modelos, representado pela sombra da linha colorida (azul para precipitação, laranja para radiação solar incidente, e vermelha para temperatura), é menor que a sombra da linha cinza, o que demonstra que existe uma discrepância menor quando selecionamos um conjunto com características semelhantes.

## CONCLUSÃO

Analisando a validação dos modelos climáticos considerados no estudo, pode-se perceber que o desempenho de cada um varia conforme a medida de erro e a variável climática em questão, sendo que os conjuntos de melhores modelos considerando cada variável separadamente são diferentes. Comparando-se o histórico simulado pelo conjunto de modelos com melhor desempenho às médias mensais históricas simuladas pelo conjunto de todos os MCG analisados, percebe-se que o primeiro se aproximou mais das médias observadas, o que já era esperado, visto que esse conjunto é composto apenas por modelos selecionados, que melhor representaram o clima atual.

Por fim, é importante salientar que fazer um ranqueamento geral de modelos considerando mais de uma variável climática se torna necessário para utilizar dados de entrada de um mesmo conjunto de MCG em outros modelos de simulação ambiental que levam em conta várias variáveis climáticas de entrada. Isso se torna muito importante para projetos de gestão que envolvem as mudanças climáticas, um assunto cada vez mais estudado e considerado para tomadas de decisão nas mais diversas áreas. Nesse sentido, considerando que todas as variáveis climáticas analisadas no presente estudo tenham igual relevância em determinado projeto, os melhores modelos para estas aplicações seriam aqueles com maior valor na soma dos rankings individuais apresentados no Quadro 3: MIROC-ESM (Soma = 6), bcc-csm1.1m (Soma = 5), CESM1-WACCM (Soma = 4) e MPI-ESM-MR (Soma = 4).

## REFERÊNCIAS

- ALBERTO, C. M. *et al.* (2006). *Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 7, pp. 1067–1075.
- ALVARES, C. A. *et al.* (2013). *Köppen's climate classification map for Brazil*. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, pp. 711-728.
- BAKER, N. C.; TAYLOR, P. C (2016). *A framework for evaluating climate model performance metrics*. Journal of Climate, [S. l.], v. 29, n. 5, pp. 1773–1782.
- BARCELLOS, C. *et al.* (2009). *Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil*. Epidemiologia e Serviços de Saúde, v. 18, n. 3, pp. 285–304.
- BONAN, G.; BONAN, G. (2015). “Chapter 25 - Terrestrial Ecosystems and Earth System Models”, in *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge University Press, pp. 453–482.
- BORRELLI, P. *et al.* (2020). *Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)*. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, n. 36, pp. 21994-22001.
- DELWORTH, T. L. *et al.* (2012). *Simulated climate and climate change in the GFDL CM2.5 high-resolution coupled climate model*. Journal of Climate, v. 25, n. 8, pp. 2755–2781.
- EYRING, V. *et al.* (2016). *Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*. Geoscientific Model Development, v. 9, n. 5, pp. 1937–1958.

- FLATO, G. M. *et al.* (2013) “*Evaluation of climate models*”, in *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 741–866.
- HOMSI, Rajab *et al.* (2020). *Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria*. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 14, n. 1, pp. 90-106, 2020.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. *Normais Climatológicas do Brasil*. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em 08 de dezembro de 2020.
- KOGO, B. K.; KUMAR, L.; KOECH, R. (2020). *Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security*. *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-21.
- LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (2014). *Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica*. Hunter Books Editora, São Paulo - AES Tietê.
- LUTZ, A. F. *et al.* (2016). *Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach*. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 12, pp. 3988-4005.
- MESA, O. J. (2006). *¿Adónde va a caer este globo?- Acerca del futuro de la Tierra*. *Avances en recursos hidráulicos*, n. 14.
- NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. (2007). *Mudanças climáticas e Amazônia*. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, pp. 22-27.
- PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2014). *Base científica das mudanças climática - Contribuição do grupo de trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas*, v. 1.
- RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. (2020). *Review of approaches for selection and ensembling of GCMs*. *Journal of Water and Climate Change*, v. 11, n. 3, pp. 577-599.
- RANDALL, D. A. *et al.* (2007). “*Climate Models and Their Evaluation*”, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 589-662.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (2012). *Terrestrial hydrometeorology*. John Wiley & Sons.
- SOUZA, E. B. *et al.* (2014). “*Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição*”, in *Base científica das mudanças climáticas - Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas*, pp. 320-346.
- STOCKER, T. F. *et al.* (2013). *Climate change 2013: the physical science basis - Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, v. 1535.
- WIGLEY, T.M.L. (2008). *MAGICC/SCENGEN 5.3: User Manual (version 2)*. National Center for Atmospheric Research. Colorado, USA. 81 pp.