

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

AVALIAÇÃO DE PLUVIOMETRIA SIMULADA PELO MCG INGV-SXG

Davi de Carvalho Diniz Melo ¹; Edson Wendland ²

RESUMO – Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) são largamente utilizados para estudos de impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. No entanto, poucos estudos tem analisado as simulações para o período de controle e avaliado se as mesmas conseguem representar satisfatoriamente o clima observado. Este estudo analisa estatisticamente o desempenho do modelo INGV-SXG em simular precipitação no estado de São Paulo, comparando a série simulada pelo mesmo com séries observadas em 47 estações da Agência Nacional de Águas (ANA). Os índices estatísticos utilizados foram: raiz normalizada do erro quadrático médio, erro médio normalizado e coeficiente de correção. Além disso, aplicou-se uma análise de distribuição de frequências, tempo de retorno e quantile bias. Verificou-se que o modelo apresenta inconsistência com as observações no que se refere à variabilidade da precipitação. Por outro lado, a distribuição da precipitação mensal é bem reproduzida no modelo.

ABSTRACT– Global Climate Models (GCMs) are widely used to assess climate change impacts on water resources. However, it is not a usual practice to analyze GCMs simulations for the control period and evaluate if they are able to represent well the observed climate. Through a statistical analysis, this paper assesses the performance of the INGV-SXG model in simulating precipitation in São Paulo State, comparing the simulated series with the observed one in 47 ANA's rainfall stations. The statistics used were: normalized root mean squared error, normalized mean error and correlation coefficient. We also analyzed the frequency distribution, return period and quantile bias. The results show some inconsistencies of the model in terms of reproducing rainfall variability. On the other hand, monthly rainfall distribution is well simulated by the model.

Palavras-Chave – Modelos Climáticos Globais, Variabilidade Climática, Mudanças Climáticas.

1) Mestrando em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, Av. Trabalhador são carlense, 400, melo.dcd@gmail.com, (16) 3373-8270

2) Professor Titular, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Av. Trabalhador são carlense, 400, ew@sc.usp.br, (16)3373 - 8270

INTRODUÇÃO

Em 1990, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) divulgou seu 1º Relatório de Avaliação. Desde então, foram publicadas mais três versões e em 2013 será divulgado o Fifth Assessment Report on Climate Change. Segundo o IPCC (2007c), as mudanças no clima afetam os sistemas naturais principalmente devido ao aumento da temperatura média do ar e dos oceanos. No que se refere aos processos hidrológicos, em função do aumento da temperatura, estariam, por exemplo, ocorrendo maiores vazões, uma vez que as mudanças na precipitação são amplificadas na vazão (Chiew & McMahon, 2002).

Diversas pesquisas têm se voltado para o estudo das mudanças climáticas e seus impactos sobre os recursos hídricos (e.g. Gosain et al., 2006; Bouraoui et al, 1999; Legesse et al., 2003; Crosbie et al. 2010; Chiew e McMahon, 2002; Pulido-Velazquez, 2011). As principais ferramentas utilizadas para prever mudanças do clima, embora com limitações, são os Modelos Climáticos Globais (MCG) e Regionais (MCR). Para previsão de possíveis impactos nos recursos hídricos, as simulações (*outputs*) são utilizadas como entradas em modelos hidrológicos. Tais previsões são fundamentais para o planejamento do manejo desses recursos no futuro e de medidas mitigadoras ou adaptativas.

Para que se tenha confiabilidade sobre o desempenho dos modelos climáticos para o futuro, é importante o clima simulado para o período de controle seja coerente com o clima observado para esse período. Caso não seja observada essa coerência, todo planejamento desenvolvido com base em simulações não realísticas podem se mostrar futuramente inadequados e ineficientes. Ainda assim, encontram-se na literatura inúmeros trabalhos estimando impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos com base simulações de modelos sem, no entanto, avaliar o desempenho dos mesmos (e. g. Dams et al, 2012; Jyrkama e Sykes 2007).

Com essa preocupação, alguns estudos tem se voltado para avaliação de *outputs* de modelos climáticos (e.g. Nyeko-Ogiramoi et al., 2010; Chen et al., 2012). A precipitação é uma das variáveis que ainda não são satisfatoriamente reproduzidas em escala diária pelos mesmos (Trigo e Palutikof, 2001).). Nesse sentido, objetivou-se neste estudo avaliar a precipitação simulada pelo modelo climático INGV-SXG. Isso foi feito através de uma análise estatística e comparação entre as séries simuladas e observadas em estações pluviométricas localizadas dentro de uma quadrícula desse no estado de São Paulo.

MÉTODOS

Modelos Climáticos Globais

Os Modelos Climáticos Globais são as principais ferramentas utilizadas nos estudos de impacto das mudanças climáticas. Os MCG são representações matemáticas das leis físicas que governam o sistema climático que, por sua vez é extraordinariamente complexo e, portanto, somente poderá ser representado por meio de equações após simplificações (IPCC, 2007). Os *outputs* gerados por esses modelos se apresentam em resoluções espaciais consideravelmente grosseiras (em torno de 2° de latitude e longitude) para aplicação em estudos em escala de bacia. As simulações geradas são, portanto, médias espaciais e devem passar por um processo de redução de escala (*downscaling*) para então serem utilizadas como entradas de modelos hidrológicos, por exemplo.

Nesse estudo, serão utilizados dados de precipitação simulados para o período de controle 1956 – 2000 pelo Modelo Climático de Circulação Geral com Acoplamento Atmosfera-Oceano-Gelo Marítimo INGV-SXG. As principais características desse modelo são destacadas na Tabela 1. A documentação completa do mesmo pode ser consultada em Scoccimarro *et al.* (2007).

Tabela 1 - Características do Modelo INGV-SXG

Componente	Resolução Horizontal	Resolução Vertical
Gelo Marítimo	Grid tri-polar (2 pólos no hemisfério norte, 1 sobre o Canadá e outro sobre a Sibéria). Grid Mercator de resolução de 2° com resolução meridional melhorada próximo ao equador e Mares Mediterrâneo e Vermelho (1°)	31 níveis com 14 destes localizados nos 150 metros do topo
Atmosférica	~1,125 ° x 1,125 °	19 níveis de pressão
Oceânica	Mesmo do modelo oceânico	3 camadas (1 em neve e 2 em gelo)

Área de Estudo e Dados Pluviométricos Simulados

A área de estudo corresponde a Bacia do Ribeirão da Onça (Figura 1), na qual é realizado o monitoramento hidrogeológico e a mesma tem sido o foco de diversos estudos do grupo do Laboratório de Hidráulica Computacional da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. A a partir da definição da área de estudo foi definido o posicionamento das células do grid do INGV-SXG.

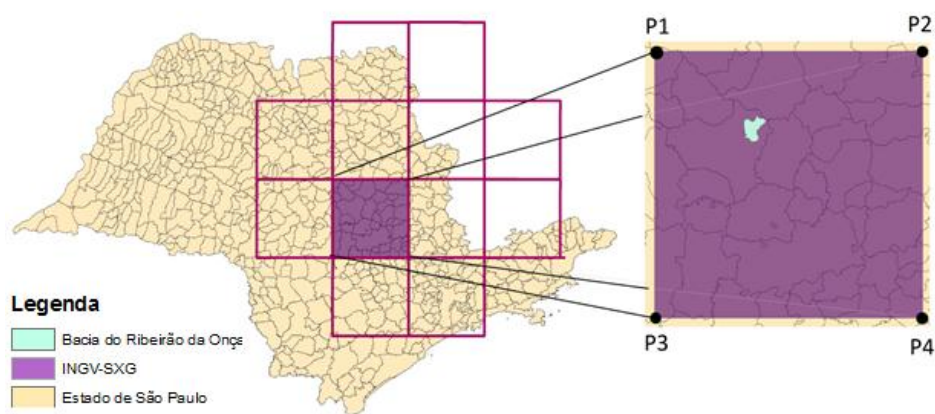


Figura 1 – Área de Estudo

Os *outputs* dos MCG são gerados para os pontos centrados nos nós da grade. No INGV-SXG, os pontos P1, P2, P3 e P4 representam as posições para as quais foram geradas as simulações. Assim, considerando uma escala mensal, se P_i , $i = \{1,2,3,4\}$, for o total pluviométrico simulado para o mês m , a precipitação média simulada para a área destacada no mês m é dada por $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 P_i$.

Dados Pluviométricos Observados

Para geração das séries observadas, foram consideradas 146 estações pluviométricas Agência Nacional de Águas (ANA) (Figura 2). Buscou-se utilizar o maior número de estações possíveis que disponibilizassem de séries com pelo menos 40 anos de dados localizadas dentro da área de estudo.

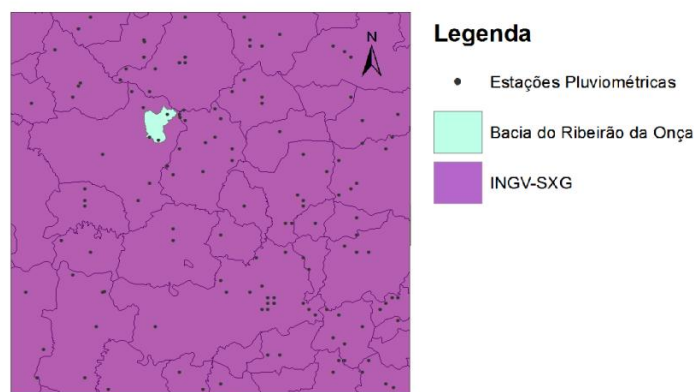


Figura 2 – Total de posto pluviométricos da ANA

Do total inicialmente considerado, foram utilizados dados de 47 estações, sendo 10 destas localizadas próximas às bordas da área de estudo e foram acrescentadas em virtude de sua representatividade em algumas áreas que não dispõem de estações interiores à célula em suas proximidades (Figura 3).

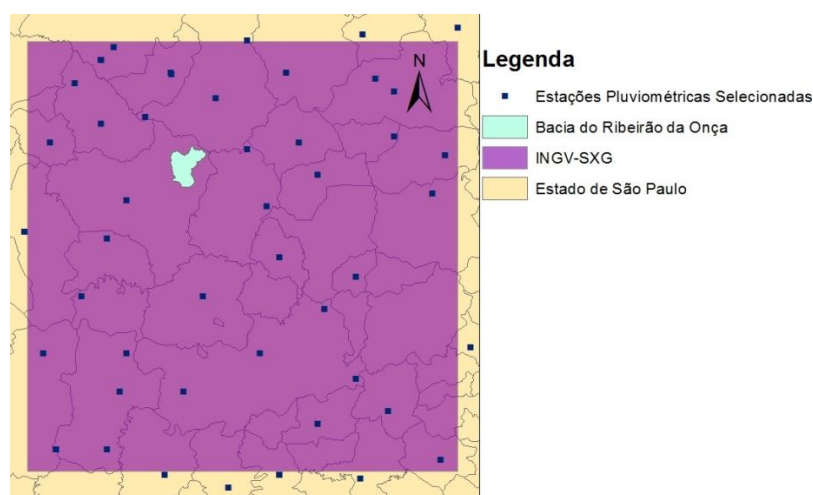


Figura 3 - Estações Selecionadas

Embora houvesse mais de 47 estações cuja série disponível se estendia por pelo menos 40 anos, algumas estações foram excluídas por apresentarem valores inconsistentes. Também foi adotado o critério de eliminar estações que apresentassem dados com falhas de mais de 2 anos consecutivos ou em longos períodos durante os quais não há dados de estações vizinhas para se realizar o preenchimento das mesmas.

Precipitação Média

Para o cálculo da precipitação média, foram inicialmente consideradas áreas de influências das estações através de polígonos de Thiessen. Entretanto, em função da quantidade e da

distribuição grosseiramente homogênea das estações, foi utilizada a média dos registros mensais considerando pesos iguais para todas as estações. A adoção dessa aproximação é possível e foi comprovada ao comparar as médias calculadas pelos dois métodos (Figura 4). Não será considerado o intervalo compreendido entre Março/1981 e Janeiro/1982, pois mais de 90% das estações apresentaram valores nulos nesse período.

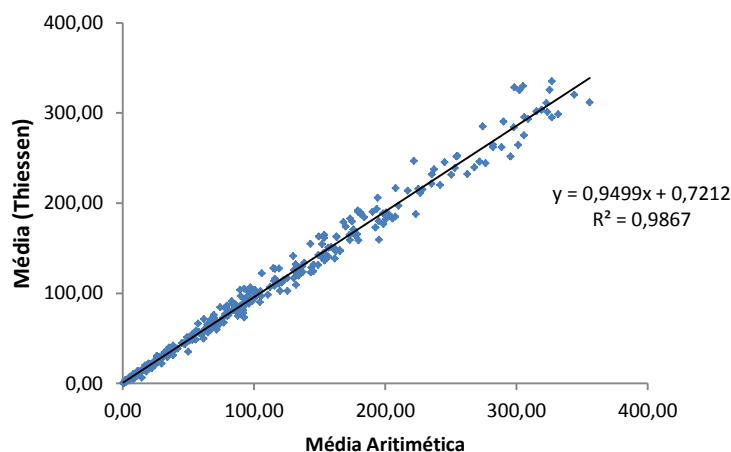


Figura 4 - Comparação entre Médias

Análise Estatística

Os métodos utilizados neste trabalho para avaliar o desempenho do INGV-SXG em reproduzir a precipitação pluviométrica observada fazem uso dos índices estatísticos adotados por Nyeko-Ogiramoi (2010). As séries (observada e simulada) foram organizadas e comparadas no mesmo nível de agregação (mensal).

Será adotado $(Y)^k$ como sendo a série de precipitação mensal do modelo climático e P^k a série de precipitação mensal observada, onde $k \in \{1, \dots, K\}$, sendo $K = 12$ na escala mensal para os n anos da série. Serão calculados a raiz do erro quadrático médio (REQM) (eq. 2) e o erro médio (EM) (eq. 3).

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^K ((P)^k - Y^k)^2} \quad (2)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K ((P)^k - Y^k) \quad (3)$$

Dividindo REQM e EM pela média da amostra de $(Y)^k$, obtém-se a raiz normalizada do erro quadrático médio (RNEQM) e do erro médio normalizado (EMN), os quais são fortemente relacionados com o coeficiente de variação das observações (CV_{obs}) e com a raiz do erro quadrático médio observado dividido pela média das observações ($rneqm$). Essas quantidades serão

comparadas para identificar inconsistências no modelo. Modelos com bom desempenho devem apresentar EMN entre o limite de incerteza de $\pm 2 \times CV_{obs}$ e inferior a $2 \times rneqm$, respectivamente (Nyeko-Ogiramoi, 2010). Calculou-se também o coeficiente de correlação de Pearson (r).

A capacidade do modelo em reproduzir distribuições extremas será avaliada pela análise de frequência/quantis. Os quantis da série do modelo de controle são comparados com os quantis correspondentes das séries observadas. O *quantile bias* será calculado para cada evento chuvoso em toda série, fornecendo uma nova série de valores de *quantile bias* e períodos de retorno correspondentes.

Organizar-se-á, então, P^k em ordem decrescente, obtendo-se P_j^k , onde $j = 1$ corresponde ao maior valor da série observada. As séries de controle também serão classificadas da mesma maneira. O período de retorno empírico para cada quantil (T_j), para os w anos, será calculado usando o papel de probabilidade de Weibull (eq. 4).

$$T_j = \frac{w+1}{j} \quad (4)$$

Comparam-se, através da plotagem, as séries, classificando-as em relação ao período de retorno e calculando as séries de *quantile bias* (eq. 5):

$$(B_n)_j = \{(P_n)_j^k - Y_j^k\} / Y_j^k \quad (5)$$

Para avaliar o desempenho do modelo através da análise de frequências e período de retorno, serão considerados limites de incerteza dados pelas observações $\pm 2 \times$ desvio padrão (σ), para a distribuição de frequências, e $\pm 2 \times CV_{obs}$ (para *quantile bias*).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando os métodos descritos, foram calculadas as médias espaciais dos totais mensais de 47 estações pluviométricas e comparadas com as simulações do modelo INGV-SXG. A figura A1 do Anexo mostra os totais mensais registrados em cada estação (linhas claras), as médias dos totais mensais observados (MTO) e os totais simulados (TS). A partir de uma análise visual dos gráficos, pode-se verificar que o modelo INGV-SXG simula bem as sazonalidades do período considerado. As maiores diferenças entre os gráficos de MTO e TS são observadas em maiores proporções até a década de 80. Observa-se também que, em geral, há uma tendência do modelo INGV-SXG superestimar os picos durante os períodos chuvosos e ignorar variações intra-anuais mais bruscas.

A análise através dos índices estatísticos descritos anteriormente possibilitou extrair informações não evidentes na análise visual. Nota-se na Figura 5 que o EMN aumenta consideravelmente durante o período seco, ultrapassando os limites adotados. Isso ocorre porque as precipitações simuladas pelo INGV-SXG para esse período são preponderantemente menores que

as registradas. Assim, as médias das simulações dos meses secos são inferiores às observadas, elevando o valor do erro médio. Calculando o mesmo índice considerando a série gerada a partir das observações que resultaram em menores erros (SME), o erro médio foi menor, mas ainda assim, apresentou valores acima do limite estabelecido.

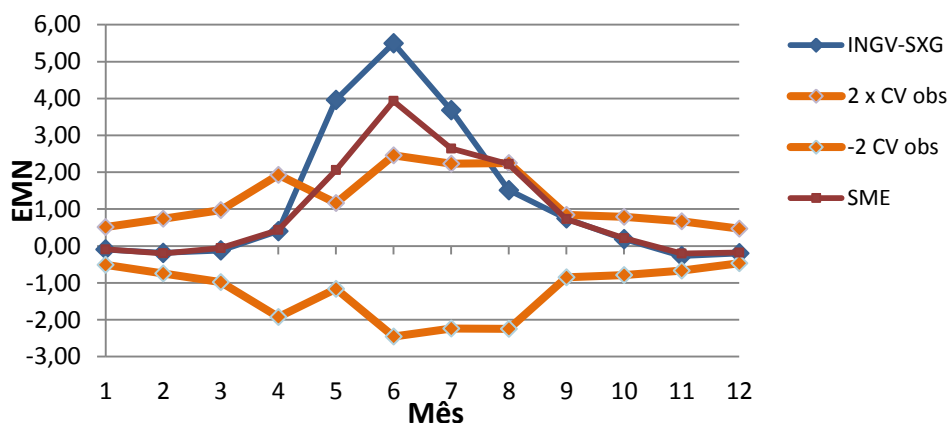


Figura 5 - EMN entre as simulações e observações para precipitação mensal

A mesma tendência observada na Figura 5 pode ser notada através da análise da RNEQM (Figura 6). O EMN apresenta valores acima do limite estabelecido nos meses de maio, junho e julho. Para o mês de agosto, o erro médio foi ligeiramente acima da faixa aceitável. Valores elevados de EMN e RNEQM significam que as variabilidades da precipitação não são bem capturadas pelo modelo climático. Apesar disso, a variabilidade pluviográfica nos períodos chuvosos está satisfatoriamente representada pelo INGV-SGX, enquanto que no final do ano hidrológico isto não se observa.

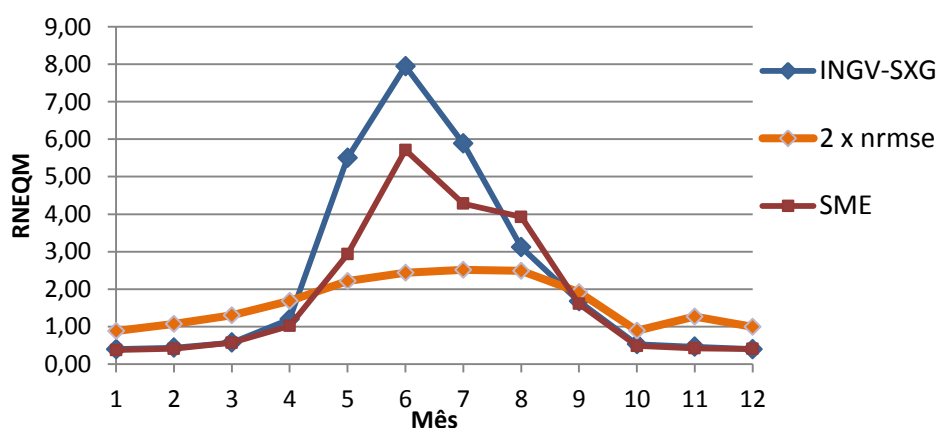


Figura 6 - RNEQM entre as simulações e observações para precipitação mensal

Pode-se destacar que os maiores erros obtidos por esses dois índices correspondem ao observado na da Figura A1 do Anexo. Além disso, esses erros podem ser identificados através do coeficiente de correlação entre as duas séries (Tabela 2). Para o INGV-SGX, o mês com melhor

correlação (29%) foi outubro. Na mesma tabela, é possível notar que mesmo o SME apresentou baixos valores de correlação, ainda que tenha havido melhora em outros meses, como maio e julho.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação mensais

Mês	Coeficiente de Correlação de Pearson	
	SME	INGV-SXG
Janeiro	7%	1%
Fevereiro	22%	15%
Março	-4%	-11%
Abril	16%	-12%
Maio	50%	11%
Junho	21%	0%
Julho	49%	25%
Agosto	2%	6%
Setembro	-30%	-50%
Outubro	43%	29%
Novembro	51%	24%
Dezembro	23%	15%

Nyeko-Ogiramoi *et al.* sugerem que o coeficiente de correlação não seja bom para avaliar consistência desse tipo de simulações. Ainda assim, esse índice pode ser útil para reforçar a hipótese de que determinados modelos não conseguem representar o clima observado em algumas áreas do globo. No caso dos meses de junho, para os quais foram calculados péssimos valores de correlação, observa-se que a distribuição dos pontos não segue uma tendência linear bem definida (Figura 7).

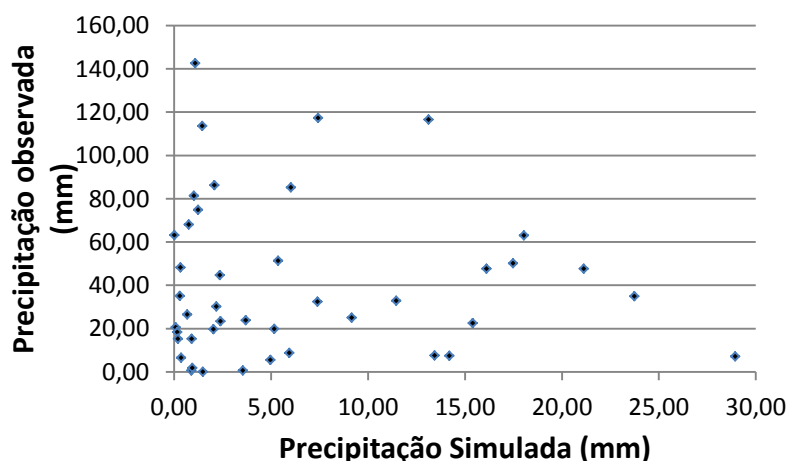


Figura 7 – Comparação entre precipitações simuladas e observadas nos meses de junho

Os resultados da análise de frequência são apresentados na Figura 8. Esse gráfico auxilia na análise de consistência de modelos climáticos em relação à dependência do período de retorno e a variação de extremos baixos e elevados de intensidade pluviométrica (Nyeko-Ogiramoi, 2010).

Observa-se que a curva dos quantis de precipitação do INGV-SXG se sobrepõe à dos observados e se encaixa totalmente dentro dos limites de incerteza estabelecidos. Em contrapartida, o modelo tende a subestimar precipitações com tempo de retorno superior a 10 anos enquanto que superestima precipitações com período de retorno inferior a 2 anos. O melhor desempenho do modelo nessa análise é na reprodução de precipitação com períodos de retorno entre 2 e 7 anos e é mais inconsistente a medida que são considerados maiores índices pluviométricos anuais.

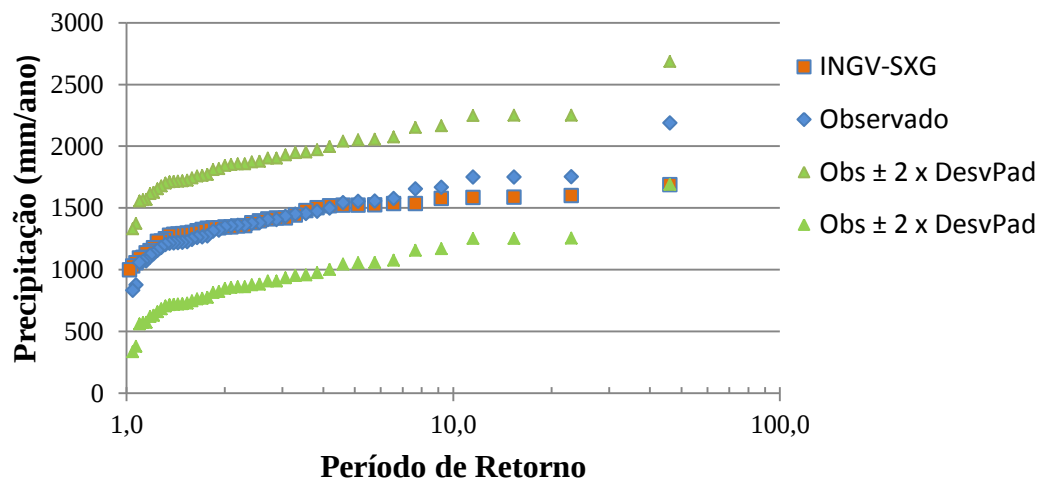


Figura 8 - Quantis de Precipitação Anual x Período de Retorno

Um modelo com desempenho perfeito teria o índice *quantile bias* (B_j) igual a zero possível. Na prática, toma-se como critério que B_j esteja próximo de zero e dentro de um limite de incerteza que, nesse trabalho, foi considerado como sendo $\pm 2 \times CV_{obs}$. Na Figura 9 nota-se que o B_j calculado encontra-se totalmente dentro desse intervalo. Observa-se que esse índice tende a crescer, positiva ou negativamente, à medida que se aumenta o período de retorno ou quando este está próximo de zero. Esse pico para T próximo de zero mostra que a menor precipitação anual simulada para o período de estudo foi em torno de 20% maior que a observada para o mesmo período. De forma semelhante, o maior registro das estações foi também próximo de 20% maior que a simulada.

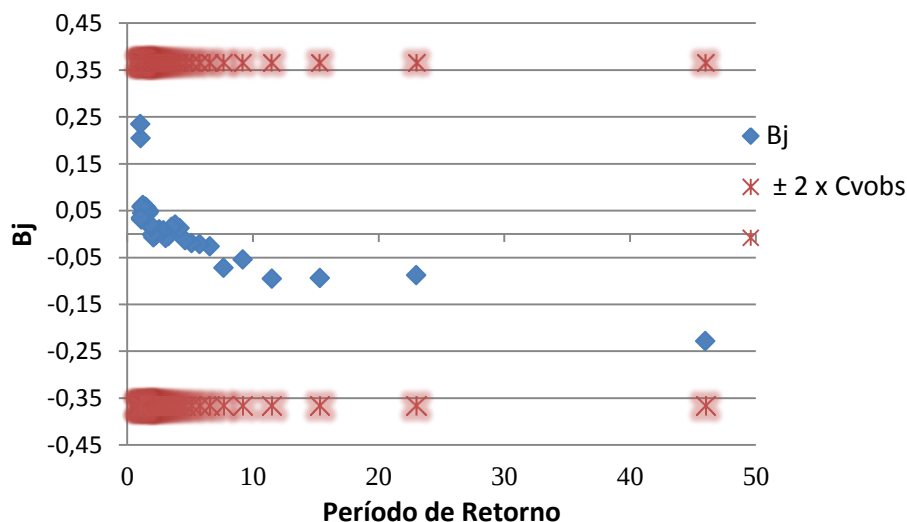


Figura 9 - Quantile Bias x Período de Retorno

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliada a série de precipitação mensal gerada pelo modelo INGV-SXG para o período de 1956 a 2000 através da comparação entre a mesma e a precipitação observada em 47 postos pluviométricos distribuídos dentro da célula do modelo climático. Foram utilizados índices estatísticos e, através do estabelecimento de faixas de variação aceitáveis destes, o desempenho do modelo em simular precipitação na área de estudo foi avaliado.

A comparação entre a média dos totais mensais observados e a série simulada pelo modelo mostrou que a distribuição da precipitação ao longo do ano se assemelha àquela registrada. Por outro lado, as simulações do INGV-SXG para o período de controle são inconsistentes com as observações no que se refere à variabilidade da precipitação. Considerando o EMN e a RNEQM, o modelo foi falho para o período seco, levando à conclusão de que o mesmo não consegue capturar bem a variabilidade da precipitação.

O modelo climático estudado tende a subestimar precipitações com tempo de retorno superior a 10 anos, enquanto que as superestima quando o tempo de retorno é inferior a 2 anos. Ainda assim, a análise de frequências mostrou que nesse critério, INGV-SXG apresentou bom desempenho, pois os valores encontrados estão dentro dos limites estabelecidos.

Destaca-se a importância de verificar o quanto os modelos climáticos conseguem representar o clima em diferentes escalas espaço-temporal, pois é possível que o desempenho de determinados modelos seja aceitável para estudos em macro escala, mas insatisfatório para menores escalas. Nesse sentido, será possível ter maior confiança nos resultados de modelagem hidrológica sob cenários de mudanças climáticas.

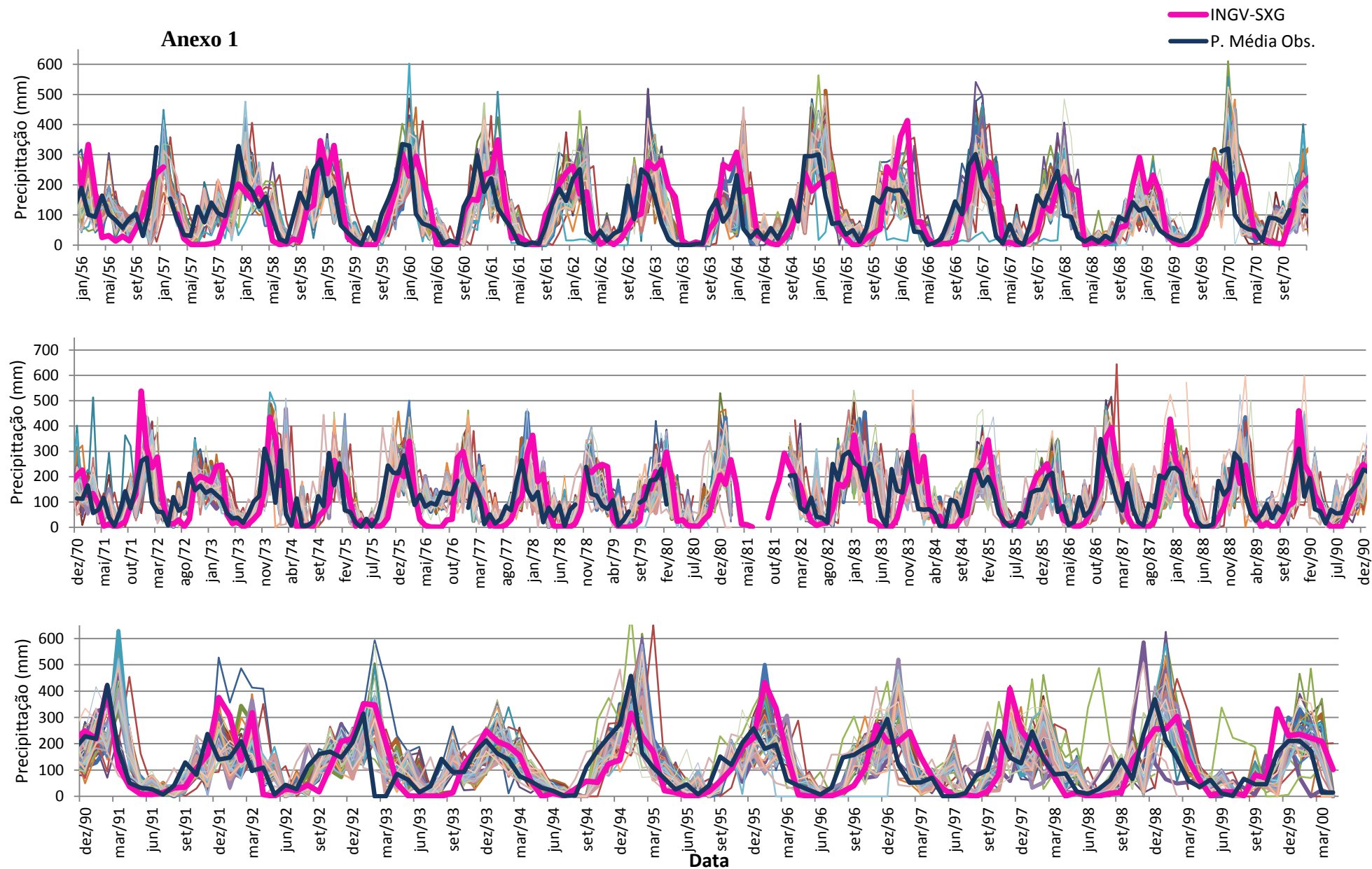


Figura A 1 – Séries pluviométricas observadas e simulada

BIBLIOGRAFIA

- BOURAOUI, F.; VACHAUD, G.; LI, L. Z. X.; LE TREUT, H.; CHEN, T. (1999). "Evaluation of the impact of climate changes on water storage and groundwater recharge at the watershed scale". *Climate Dynamics*, vol.15, pp. 153-161.
- CHEN, H.; XU, C-Y.; GUO, S. (2012). "Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff". *Journal of Hydrology*, vol. 434-435, pp. 36-45, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.040.
- CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; LECONTE, R. (2011). "Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology". *Journal of Hydrology*, vol. 401, pp. 190-202, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.020.
- CHIEW, F. H. S.; McMAHON, T. A. (2002). "Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow". *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 1235-1245, DOI: 10.1002/hyp.1059.
- CROSBIE, R. S.; McCALLUM, J. L.; WALKER, G. R.; CHIEW, F. H. S. (2010). "Modelling climate-change impacts on groundwater recharge in the Murray-Darling Basin, Australia". *Hydrogeology Journal*, vol. 18, pp.1639-1656, DOI: 10.1007/s10040-010-0625-x.
- DAMS, J.; SALVADORE, E.; VAN DAELE, T.; NTEGEKA, V.; WILLEMS, P.; BATELAAN, O. (2012). "Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system". *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, pp. 1517-1531, DOI: 10.5194/hess-16-1517-2012.
- GOSAIN, A. K.; RAO, S.; BASURAY, D. (2006). "Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins". *Current Science*, vol. 90, nº 3, pp. 346-353.
- IPCC (2007). "Climate Change 2007- The Physical Science Basis. Contribution of Working Groups I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 996.
- JYRKAMA, M. I.; SYKES, J. F. (2007). "The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario)". *Journal of Hydrology*, vol. 338, pp. 237-250, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.02.036.
- LEBEL, T.; TAUPIN, J.D.; D'AMATO, N. (1997). "Rainfall monitoring during HAPEZ-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology". *Journal of Hydrology* 188-189 (1-4), pp. 74 – 95.
- LEGESSE, D.; VALLET-COULOMB, C.; GASSE, F. (2003). "Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia". *Journal of Hydrology*, vol. 275, pp. 67-85, DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00019-2.
- NYEKO-OGIRAMOI, P.; NGIRANE-KATASHAYA, G.; WILLEMS, P.; NTEGEKA, V. (2010). "Evaluation and inter-comparison of Global Climate Models' performance over Katonga and Ruizi catchments in Lake Victoria basin". *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 35, pp. 618-633.
- PULIDO-VELAZQUEZ, D.; GARROTE, L.; ANDREU, J.; MARTIN-CARRASCO, F. J. (2011). "A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale". *Journal of Hydrology*, New York: vol. 405, pp. 532-560, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.014.

SCOCCIMARRO, ENRICO, GUALDI, SILVIO, FOGLI, PIER GIUSEPPE, MANZINI, ELISA, GREZIO, ANITA AND NAVARRA, ANTONIO. (2007). “*INGV-SXG: A Coupled Atmosphere Ocean Sea-Ice General Circulation Climate Model*”. CMCC Research Paper No. 15. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1365179>