

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS ÁREAS INUNDÁVEIS DA AMÉRICA DO SUL

Gabriel Matte Rios Fernandez¹; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva²; Walter Collischonn³; Hugo de Oliveira Fagundes⁴; Pedro Torres Miranda⁵; Júlia Brusso Rossi⁶; Arthur Kolling Neto⁷; Ingrid Petry⁸; Willany Alves⁹; Larissa Ribeiro¹⁰; Saulo Aires de Souza¹¹ & Alexandre Abdalla Araujo¹².

Abstract: Floods are natural disasters with the greatest socio-economic impacts, which have been intensifying in recent decades. Considering the changes to the flood dynamics in South America, this study utilizes hydrological modeling combined with projections from global climate models to assess changes in floodplain patterns on the continent. Variations in the extent of flooded areas were analyzed using the Large Basin Model (MGB-SA) and input data from Global Climate Models (GCMs). The results were examined in terms of maximum annual series, considering variations between historical and future periods, mean, and coefficient of variation. An increase in the extent of flooded areas was estimated for the upper Amazon River basin and the lower Paraguay River basin, by 19% and 4%, respectively. A reduction in flooded areas was estimated for the lower Amazon River, Ilha do Bananal region, and the Pantanal, by 14%, 17%, and 15% respectively. In these regions, agreement was observed in the signs of 2/3 of the simulations.

Resumo: As inundações são os desastres naturais com os maiores impactos socioeconômicos, os quais têm se intensificado nas últimas décadas. Considerando as alterações que estão sujeitas a dinâmica das cheias na América do Sul, este estudo utiliza modelagem hidrológica combinada com projeções de modelos climáticos globais para avaliar as mudanças nos padrões de áreas inundáveis no continente. Foram analisadas variações na extensão de áreas inundáveis, utilizando o Modelo de Grandes Bacias (MGB-SA) e dados de entrada de Modelos Climáticos Globais (GCMs). Os resultados foram analisados em termos das máximas das séries anuais, considerando suas variações entre período histórico e futuro, média e coeficiente de variação. Foi estimado um aumento na extensão das áreas inundáveis nas bacias do alto rio Amazonas e do baixo rio Paraguai de, respectivamente, 19% e 4%. Por outro lado, foi estimada uma redução nas áreas inundáveis para o baixo rio Amazonas, a região da Ilha do Bananal e o Pantanal de, respectivamente, 14%, 17% e 15%. Nessas regiões foi observada concordância entre os sinais de 2/3 das simulações.

Palavras-Chave – Inundações, CMIP6, modelagem hidrológica.

-
- 1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, matte.rios@ufrgs.br
 - 2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, rodrigo.paiva@ufrgs.br
 - 3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, collischonn@iph.ufrgs.br
 - 4) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, h.o.fagundes@hotmail.com
 - 5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, pedrotorresm121@gmail.com
 - 6) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, juliabrusso@gmail.com
 - 7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, arthur.kolling@hotmail.com
 - 8) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, ingridp8396@gmail.com
 - 9) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, wilanyg.alves@gmail.com
 - 10) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Larissa.ribeirocr@gmail.com
 - 11) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília - DF, saulo.souza@ana.gov.br
 - 12) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília - DF, alexandre.araujo@ana.gov.br

INTRODUÇÃO

Cheias são uma das maiores causas de desastres naturais e tem intensificado seus danos socioeconômicos nas últimas décadas (EM-DAT, 2023), ao mesmo tempo em que são de extrema importância para a manutenção de serviços ecossistêmicos nos rios e planícies de inundação (Junk et al., 1989; Poff et al., 1997). A dinâmica das cheias na América do Sul está sujeita a alterações devido às Mudanças Climáticas. Estudos recentes em escala global utilizando modelagem hidrológica com projeções de modelos climáticos apresentam resultados indicando um aumento na frequência das cheias na América do Sul (Hirabayashi et al., 2013, 2021; He et al., 2022). Essas alterações devem ser melhor exploradas na escala do continente sul-americano considerando projeções mais recentes e suas incertezas. Tal análise pode contribuir com a futura gestão de recursos hídricos em escala continental, envolvendo o planejamento adequado de políticas públicas, implementação de infraestrutura e gerenciamento de desastres das próximas décadas.

Nesse estudo as cheias foram estudadas a partir das extensões de áreas inundadas calculadas utilizando o Modelo de Grandes Bacias (Collischonn et al., 2007) aplicado em escala continental na América do Sul (MGB-SA) (Siqueira et al., 2018) com dados de entrada de Modelos Climáticos Globais (GCMs) contendo séries históricas e projeções do clima futuro. Os resultados são analisados em termos de diferenças absolutas e relativas entre as simulações hidrológicas com o clima histórico e futuro. São apresentados mapas e séries temporais que demonstram as alterações na extensão das áreas inundáveis em diferentes regiões de interesse no continente, incluindo uma análise da concordância entre as simulações em relação às alterações projetadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise das áreas inundáveis foi utilizado o MGB-SA (Siqueira et al., 2018), um modelo hidrológico-hidrodinâmico de base física semi-distribuído discretizado em unidades de cálculo menores denominadas minibacias, com comprimento de trecho de rio de aproximadamente 15 km cada. Para cada minibacia foram calculadas diversas componentes do ciclo hidrológico como vazão, evapotranspiração, infiltração, áreas inundadas, entre outros. O MGB-SA é um modelo focado em aplicações de larga escala e tem sido aplicado em diversos estudos de projeções de impactos de mudanças climáticas (e.g. Brêda et al., 2020, 2023; Sorribas et al., 2016), tornando-o adequado para os objetivos do presente estudo. Para fins de compatibilização das simulações do MGB-SA com os resultados dos GCMs utilizados nesse estudo, foi utilizada uma versão do modelo recalibrada para a base de dados Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling (GMFD) (Sheffield et al., 2006), base utilizada na remoção de viés dos GCMs.

Os dados de entrada do MGB-SA foram obtidos do projeto NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2012), que agrega dados de 35 modelos climáticos globais com projeções de mudanças climáticas considerando 4 cenários diferentes de emissões. Os dados já possuem remoção de viés pelo método Quartil-Quartil e downscaling espacial. Nesse estudo foram utilizados 28 dos GCMs disponibilizados para apenas o cenário de emissões SSP2-4.5 do CMIP6 (Arias et al., 2021), que corresponde a um cenário intermediário. Os dados estão disponíveis para o período histórico (1950 a 2014) e para o período futuro (2015 a 2100).

Os dados analisados neste estudo são os resultados de extensão de área inundada nas minibacias obtidos a partir das simulações do MGB-SA usando como entrada 28 GCMs da base NEX-GDDP-CMIP6. Foram analisadas as mudanças relativas e absolutas nas áreas inundáveis da América do Sul considerando os períodos passado e futuro. Para isso foram calculadas as diferenças entre as médias das máximas áreas inundadas anuais no período histórico e futuro em termos relativos e absolutos, conforme as equações

$$\Delta_{km^2} = Flood_{futuro,gcm} - Flood_{histórico,gcm} \quad (1)$$

$$\Delta_{\%} = \frac{\Delta_{km^2}}{Flood_{histórico,gcm}} \quad (2)$$

Para a análise da concordância nos sinais de variação entre as simulações, considera-se que existe concordância quando pelo menos dois terços (66,67% ou 19 dos 28 GCMs) deles apresentam o mesmo sinal de variação (aumento ou diminuição). Caso essa proporção não seja atingida em nenhum dos sinais, considera-se que há discordância entre as simulações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentada a média e o coeficiente de variação da série anual de áreas inundáveis considerando todos os 28 GCMs utilizados neste estudo para o período histórico. Fica evidente os padrões de ocorrência de inundações e sua variabilidade. Regiões como as margens do rio Amazonas apresentam em média uma grande área inundada e uma baixa variabilidade interanual, enquanto em regiões como a bacia do rio Tocantins-Araguaia observa-se menor extensão de área inundada e maior variabilidade. A Figura 1 ainda apresenta a localização de regiões de interesse para as análises que seguem, como a Ilha do Bananal e Pantanal

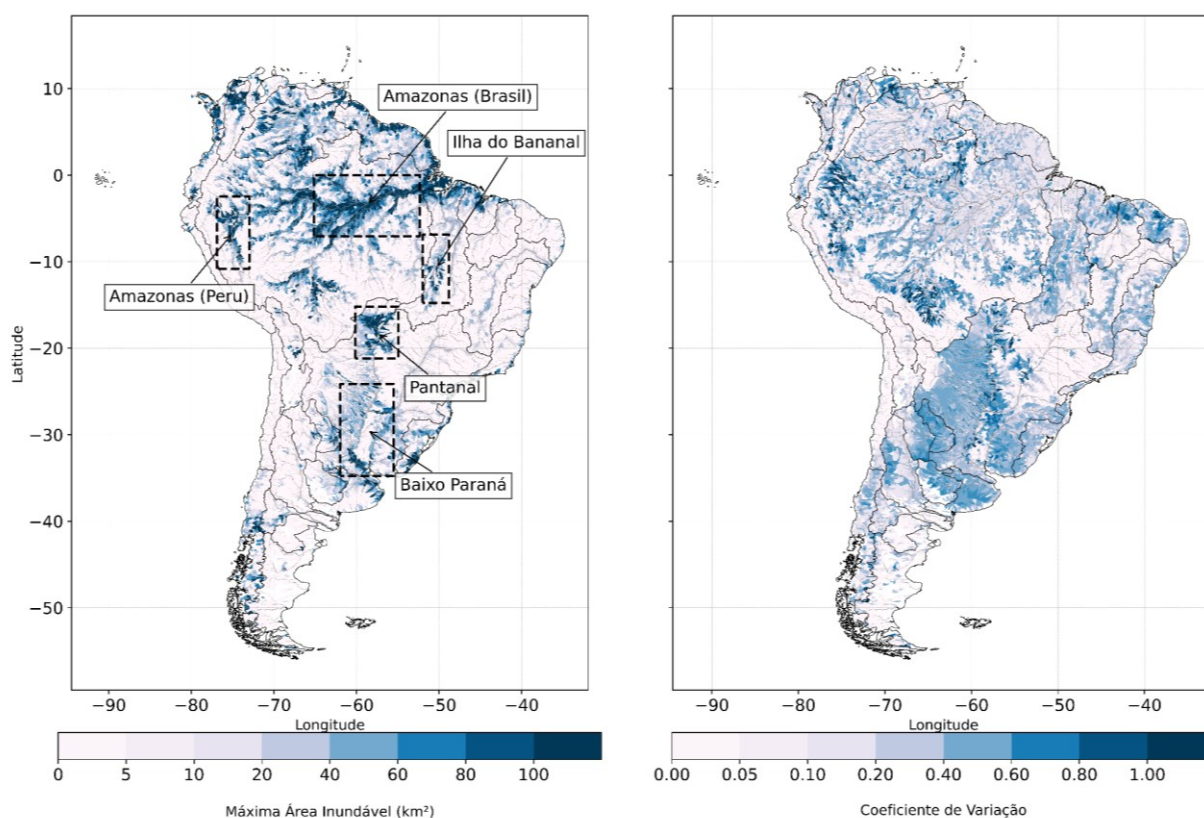


Figura 1. Média e o coeficiente de variação da série anual de áreas inundáveis considerando 28 simulações para o período histórico.

A Figura 2 apresenta as variações absoluta e relativa das áreas inundáveis da América do Sul. Em valores absolutos (km²) as maiores alterações de área inundável ocorreram na bacia do rio Amazonas apresentando uma redução da área inundada, exceto ao longo da região mais a montante, onde são apresentados incrementos positivos. Também foram estimadas alterações no sentido de redução das áreas inundáveis em termos absolutos nas bacias do rio Paraguai, na região do Pantanal,

na bacia do rio Tocantins-Araguaia, ao longo da Ilha do Bananal, e em parte do litoral norte da América do Sul, passando por Guiana, Suriname e Guiana Francesa.

Observando as diferenças relativas, a bacia amazônica apresenta maior equilíbrio entre variações negativas e positivas, estando mantido o padrão das regiões mais a montante do rio Amazonas apresentar majoritariamente aumento das áreas inundáveis, enquanto que as regiões mais a jusante apresentam redução de área inundável (Figura 2). Na bacia do rio Tocantins-Araguaia é observado apenas redução na área inundável, principalmente na região da Ilha do Bananal. Na porção jusante da bacia do rio Paraguai e, após sua confluência com o rio Paraná, são observadas variações relativas positivas. Na bacia do rio Orinoco, a Figura 2 mostra uma redução das áreas inundáveis.

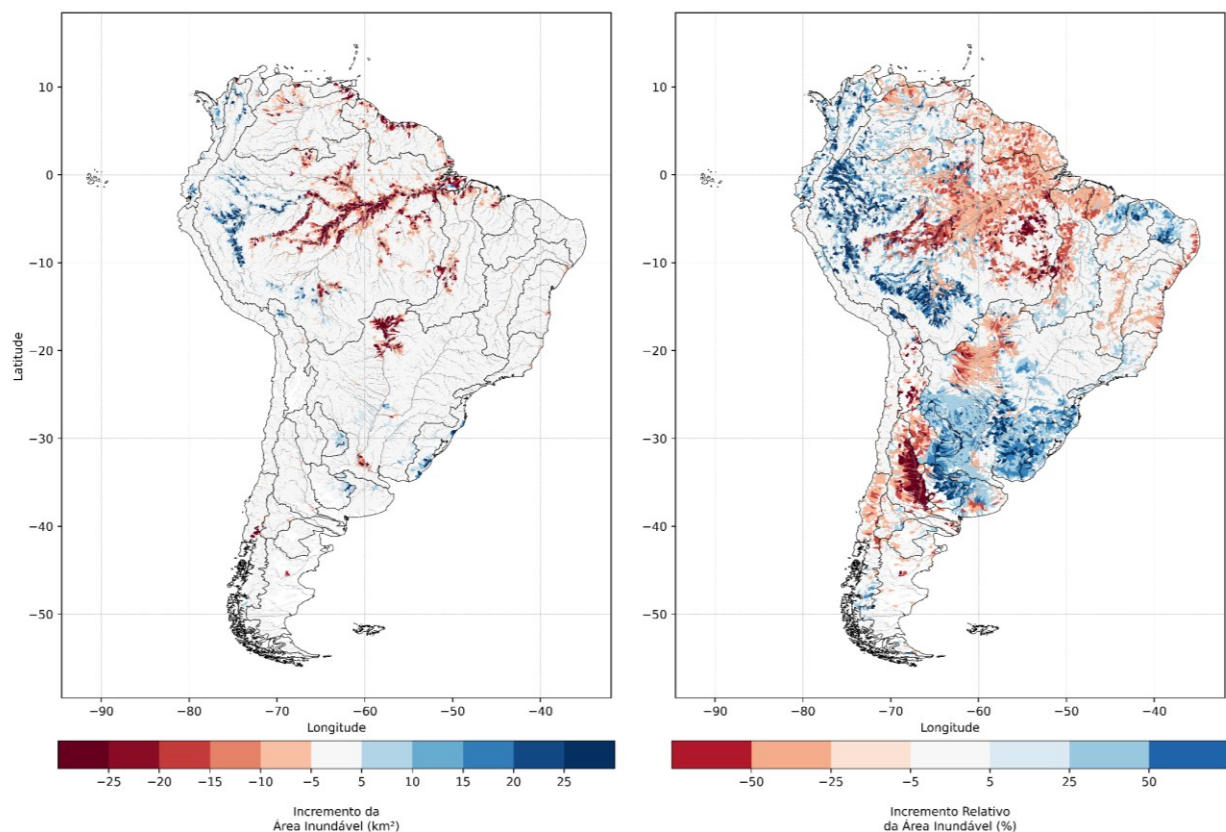


Figura 2. Variação absoluta da área inundável da América do Sul, em km², (esquerda) e a variação relativa da área inundável, em %, (direita).

A Figura 3 apresenta a classificação de concordância dos resultados de áreas inundáveis máximas anuais considerando os 28 GCMs utilizados como dados de entrada do MGB-SA. O mapa mostra concordância nos sinais de aumento e diminuição de áreas inundáveis já apontados na Figura 2. Observa-se concordância nas projeções de redução das áreas inundáveis ao longo do Baixo Amazonas e seus tributários, acompanhado de um aumento da extensão das áreas inundáveis nas regiões mais a montante da bacia. Também na bacia do rio Araguaia, especialmente na região da Ilha do Bananal, e no Alto Paraguai, no bioma Pantanal, é observado concordância nas projeções de redução da área inundável. Além disso, as projeções concordam no aumento das áreas inundáveis no Baixo Paraná, no Uruguai e no Alto Amazonas. Outro ponto a ressaltar é a discordância entre as projeções em uma parte considerável do território da América do Sul, como nos rios Orinoco, Tocantins, Japurá. Paraguai, Uruguai e os rios das bacias do Atlântico leste e sudeste.

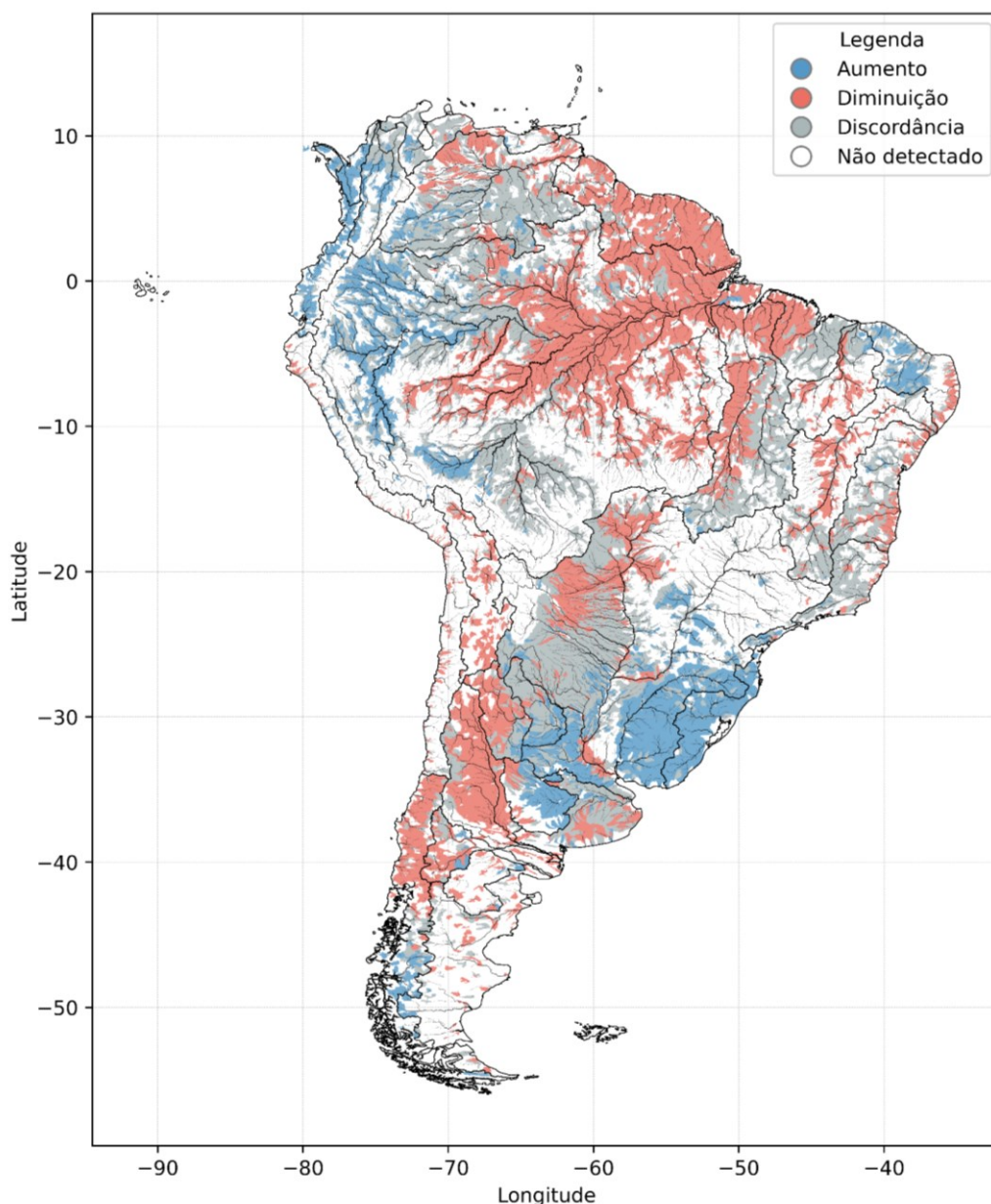


Figura 3. Classificação da concordância das variações de áreas inundáveis entre o período histórico e futuro das simulações com MGB-SA utilizando 28 GCMs. O mapa apresenta concordância nos sinais de aumento (Azul) ou diminuição (Vermelho), quando 66,67% das simulações com os GCMs concordam no sinal, e discordância (Cinza) quando esse critério não é satisfeito. Também há regiões onde o MGB-SA não detectou inundação (Branco)

A Figura 4 apresenta as séries temporais histórica e futura da extensão de áreas inundáveis nas regiões destacadas na Figura 1. São apresentadas as séries dos 28 GCMs, com destaque para a média desses. A região da bacia do rio Amazonas situada no Brasil apresentou reduções constantes na área inundável durante o período futuro em relação ao histórico, apresentando uma redução de aproximadamente 14% ou 23.220 km² na comparação entre as médias. O oposto ocorre na região Peruana da bacia, onde observa-se aumento da área inundável durante o período futuro, aumento de aproximadamente 19% ou 5.720 km². Nas regiões mais a montante do rio Paraguai, localizadas no bioma Pantanal, foi projetado uma redução na área inundável. No comparativo entre as médias histórica e futura, a redução equivale a cerca de 15% ou 5.700 km². Nas regiões próximas à confluência dos rios Paraná e Paraguai e a jusante desta ocorre o oposto, tendo sido projetado um aumento na área inundável de cerca de 4% ou 1.320 km². Também foi projetado uma redução na região da Ilha do Bananal, com uma extensão de área inundável 17% ou 2.250 km² menor no futuro.

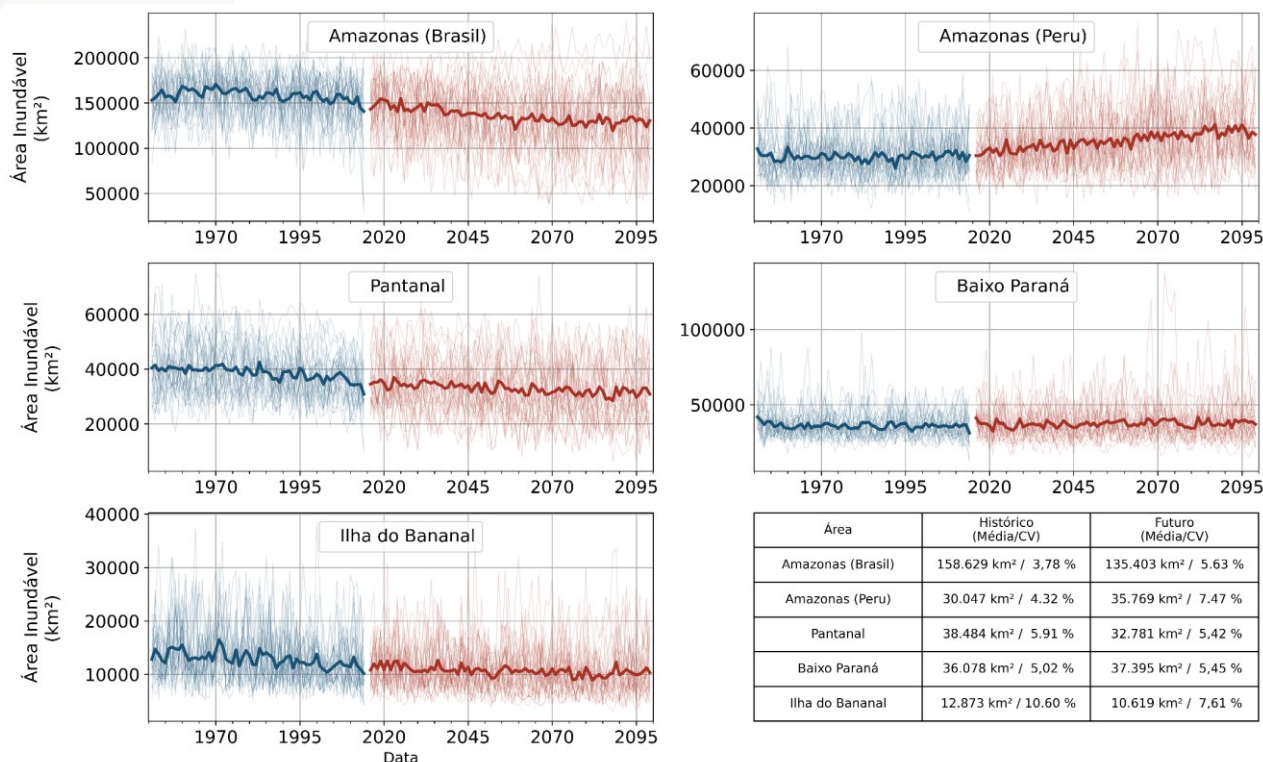


Figura 4. Séries de área inundável simuladas no MGB-SA para os GCMs utilizados no estudo, com destaque para o valor médio das simulações.

CONCLUSÕES

Após as análises e comparações das alterações das áreas inundáveis na América do Sul utilizando 28 GCMs como dados de entrada de modelagem hidrológica com o MGB-SA, foram destacadas as seguintes conclusões:

- No período histórico, o baixo Amazonas e Pantanal apresentam altos valores absolutos de área inundável e baixa variabilidade interanual
- As variações absolutas mostraram acentuada diminuição nas áreas inundáveis do baixo Amazonas, alto Paraguai e na Ilha do Bananal, enquanto foi observado aumento no alto Amazonas.
- As variações relativas seguiram os padrões das variações absolutas, com o acréscimo de variações positivas no baixo Paraná, Paranaíba e nos tributários do alto Amazonas e variações negativas na bacia do rio Colorado.
- As variações citadas acima apresentaram concordância significativa das simulações considerando os 28 GCMs utilizados como dados de entrada. Ainda assim, em apenas 32% do território do continente foi identificada concordância significativa nos sinais de variação. Em 29% do território foi identificada discordância entre as simulações e em 39% do território as simulações não detectaram inundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANA pelo financiamento através do projeto “Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em escala Nacional”

REFERÊNCIAS

- Arias, P.A., et al. 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144, doi:10.1017/9781009157896.002.
- Brêda, J. P. L. F., Cauduro Dias de Paiva, R., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619, 129284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284>
- Brêda, J. P. L. F., de Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Bravo, J. M., Siqueira, V. A., & Steinke, E. B. (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, 159(4), 503–522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>
- Collischonn, W., Allasia, D., da Silva, B. C., & Tucci, C. E. M. (2007). *The MGB-IPH model for rainfall-runoff modelling*. *Hydrological Sciences Journal*, 52:5, 878-895, doi: 10.1623/hysj.52.5.878
- He, Y., Manful, D., Warren, R., Forstehäusler, N., Osborn, T. J., Price, J., Jenkins, R., Wallace, C., & Yamazaki, D. (2022). Quantification of impacts between 1.5 and 4 °C of global warming on flooding risks in six countries. *Climatic Change*, 170(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03289-5>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), Art. 9. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Hirabayashi, Y., Tanoue, M., Sasaki, O., Zhou, X., & Yamazaki, D. (2021). Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Scientific Reports*, 11, 3740. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088–3111. <https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>
- Siqueira, V. A., Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R. M., Paris, A., Calmant, S., & Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., Beighley, E., Forsberg, B., & Costa, M. H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136(3), 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309–3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>