



Simulação preliminar do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Guaíba nas últimas grandes cheias de 2023 e 2024

*Hugo de Oliveira Fagundes¹, José Rafael de Albuquerque Cavalcanti², Gustavo Ribeiro da Silva³
& Fernando Mainardi Fan⁴*

Abstract: In May 2024, one of the largest extreme rainfall events recorded in Brazil took place in the Guaíba river basin. In the context of extreme rainfall events, sediment flows are relevant for understanding changes in the landscape and environmental, economic and social impacts, since a significant amount of sediment is mobilized during these events. The aim of this study was to carry out a preliminary simulation of suspended sediment transport for extreme precipitation events in September and November 2023 and May 2024 in Rio Grande do Sul. To do this, the sediment transport model for large basins MGB-SED and daily rainfall from telemetry stations were used. The simulation estimated that 5,720,762 tons of suspended sediment were delivered to Guaíba from April 27 to June 17, 2024, which would be equivalent to filling with sediment about 1,500 stadiums the size of the Beira Rio Stadium in Porto Alegre. We concluded that the 2024 event was around three times greater than those recorded in 2023 in terms of sediment transport. In the case of the Taquari-Antas River, the September 2023 event had a greater impact on the upstream areas of the basin. The study is still preliminary and will be improved by including elements such as floodplains and estimates of sediment from landslides.

Keywords: Intense rainfall, extreme events, MGB-SED, erosion, siltation.

Resumo: Em maio de 2024 ocorreu um dos maiores eventos de chuva extrema registrados no Brasil, na bacia hidrográfica do Guaíba. No contexto de chuvas extremas, os fluxos de sedimentos possuem relevância para a compreensão das alterações na paisagem e impactos ambientais, econômicos e sociais, uma vez que uma quantidade significativa de sedimentos é mobilizada durante esses eventos. O presente estudo teve por objetivo realizar uma simulação preliminar do transporte de sedimentos em suspensão para os eventos de precipitação extrema ocorridos em setembro e novembro de 2023 e em maio de 2024 no Rio Grande do Sul. Para isso, foi utilizado o modelo de transporte de sedimentos para grandes bacias MGB-SED e chuvas diárias de estações telemétricas. A simulação realizada estimou que 5.720.762 toneladas de sedimentos em suspensão foram aportados para o Guaíba do dia 27 de abril a 17 de junho de 2024, o que seria equivalente a encher com sedimentos cerca de 1500 estádios do tamanho do Estádio Beira Rio em Porto Alegre. Conclui-se que o evento ocorrido em 2024 foi cerca de três vezes maiores do que aqueles ocorridos em 2023 em termos de transporte de sedimentos. No caso do rio Taquari-Antas, o evento de setembro de 2023 foi mais impactante nas áreas mais a montante da bacia. O estudo ainda é preliminar e será aprimorado considerando a inclusão de elementos como planícies de inundação e estimativas do aporte de sedimentos oriundos de movimentos de massa.

Palavras-Chave: Chuvas intensas, eventos extremos, MGB-SED, erosão, assoreamento.

1) UNICAMP – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos. hugoo@unicamp.br

2) EcoNumérica Engenharia. j.rafael.cavalcanti@econumerica.com.br

3) UNICAMP – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos. gusribeiro@dac.unicamp.br

4) UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. fernando.fan@ufrgs.br



INTRODUÇÃO

“Eventos extremos” é um tema que vem sendo discutido amplamente em todo o mundo. No Brasil, recentemente, diversos eventos de precipitações extremas foram registrados, tais como aqueles na Bahia em 2021, Petrópolis – RJ em 2022, São Sebastião – SP e cidades da região serrana do RS em 2023, Mimoso do Sul – ES e, mais recentemente todo o estado do RS em 2024. De acordo com Brêda et al. (2020), um aumento da precipitação anual média é projetado para a região do extremo sul do Brasil.

Com o aumento das precipitações, aumenta-se também a erosão, transporte e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas, uma vez que a precipitação está entre os principais fatores que governam a erosão (García-Ruiz et al., 2015). No contexto de chuvas extremas, os fluxos de sedimentos possuem relevância para a compreensão das alterações geológicas e de evolução da paisagem, uma vez que uma quantidade significativa de sedimentos é mobilizada durante esses eventos. Fagundes et al. (2023) mostraram que as alterações nas chuvas podem impactar de forma distintas as descargas líquidas e sólidas. Por exemplo, para a bacia do rio Uruguai, os autores mostraram que a vazão média dos rios devem aumentar em 15%, enquanto a descarga de sedimentos deve aumentar em torno de 40%.

A cheia de 2024 ocorrida no RS foi amplamente noticiada em todo o país por várias semanas devido a magnitude dos impactos jamais registrada na região. Foi a maior cheia já registrada nos rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos, Guaíba e na Lagoa dos Patos. Dentro da bacia do Guaíba só não foi a maior no rio Gravataí. Ao todo, 2,3 milhões de gaúchos afetados, 540 mil desalojados e 77 mil foram encaminhados para abrigos públicos de acordo com boletins da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul (<https://defesacivil.rs.gov.br/inicial>). No rio Taquari, a elevação do nível do rio chegou a mais de 14 metros acima da cota de inundação na estação Estrela/Lajeado e o Guaíba deixou a região metropolitana de Porto Alegre (RMPA) inundada por quase 30 dias. Além disso, foram registrados milhares de deslizamentos de terra, que transportam uma quantidade considerável de sedimentos para os corpos d’água. Diversos foram os relatos de deposição de sedimentos nas regiões planas da bacia, sendo de mais de um metro de altura na Ilha da Pintada, localizada na RMPA.

Assim, o presente estudo tem como objetivo realizar uma simulação preliminar do transporte de sedimentos em suspensão (silte e argila) na bacia hidrográfica do Guaíba para os eventos de precipitação extrema ocorridos em setembro e novembro de 2023 e em maio de 2024. Para isso, foi utilizado o modelo de transporte de sedimentos para grandes bacias MGB-SED.

MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo considerou a bacia hidrográfica do Lago Guaíba, no Rio Grande do Sul. A delimitação considerou a área de drenagem do lago com exultório próximo a confluência entre o lago Guaíba e a laguna dos Patos. Foram simuladas as sub-bacias dos rios Jacuí (considerando o Alto e o Baixo Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, e Pardo), Taquari-Antas, Sinos, Caí, Gravataí e os afluentes diretos ao lago Guaíba. Os dados de precipitação utilizados na simulação dos eventos de chuva de 2023 e 2024 foram obtidos a partir das estações da ANA, apresentadas na Figura 1 (c e d). As estações são telemétricas e os dados utilizados foram transformados de dados horários para diários a fim de serem compatíveis com a resolução temporal do modelo de sedimentos.

Modelo MGB-SED

A simulação do transporte de sedimentos foi realizada com o modelo de sedimentos de grandes bacias MGB-SED. O MGB-SED (Buarque, 2015) é um modelo determinístico, conceitual, semi-distribuído e que utiliza Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs) a nível de píxel para

computar o balanço hídrico e os volumes de sedimentos gerados a partir da chuva. O modelo permite simular, além do balanço hídrico no solo, os processos de interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, armazenamento de água no solo, erosão, transporte e deposição de sedimentos finos e grosseiros. Para estimar a carga de sedimentos a ser transportada pelos rios, o modelo utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE, Williams, 1975), o que não inclui a simulação de movimentos de massa. A propagação do escoamento foi realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge e a equação da continuidade de sedimentos foi utilizada para o transporte de sedimentos nos rios.

Rossoni (2018) utilizou o modelo MGB-SED para um estudo de caso envolvendo toda a Laguna dos Patos. Neste trabalho, será utilizada apenas a parte do modelo que abrange a bacia hidrográfica do Guaíba. O Modelo Digital de Elevação utilizado para discretização e cálculo de variáveis como a declividade foi o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 90m. As URHs foram obtidas do mapa de URHs da América do Sul (Fan et al., 2015). Os dados de textura de solo foram obtidos do “Mapa de Solos do Mundo” da FAO (1974). Foram utilizados dados de 813 estações pluviométricas da ANA para representar a chuva no modelo na etapa de calibração e validação (1975-2015).

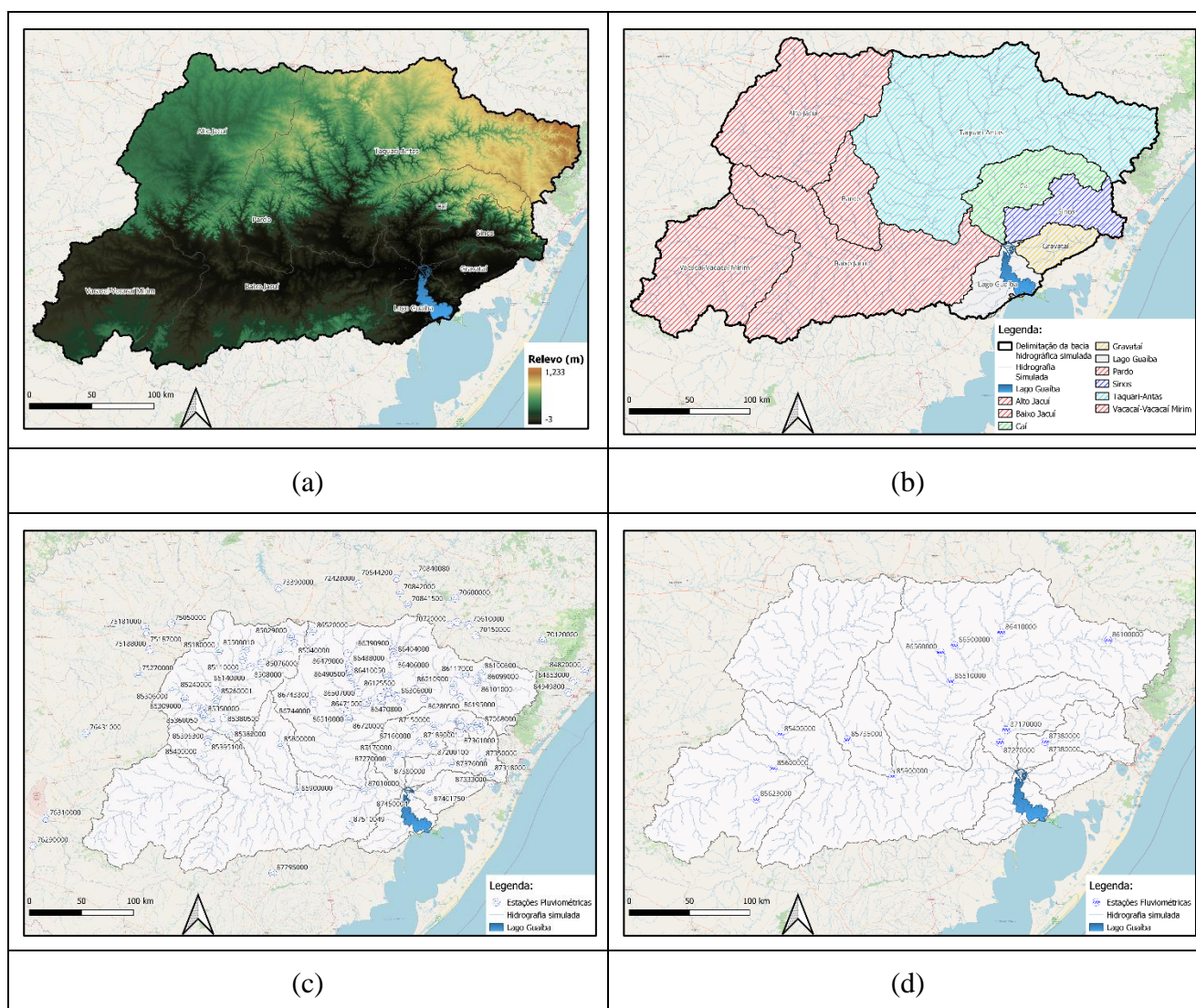


Figura 1. Detalhamento da área de estudo. (a) Topografia da bacia hidrográfica do Lago Guaíba, (b) Detalhamento das subbacias simuladas, (c) postos telemétricos de precipitação considerados na simulação, e (d) postos telemétricos de vazão considerados na simulação.



No trabalho de Rossoni (2018), o modelo foi calibrado e validado no período entre 1990-2010. Neste trabalho, o modelo foi calibrado para o período de 1975-2005, validado entre 2006 e 2015 e aplicado para o período de julho de 2023 a junho de 2024. A calibração e validação foi realizada com 13 estações fluviométricas da ANA e utilizando o coeficiente de correlação de Pearson r , o erro relativo percentual $BIAS$ para estimar o viés e o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE). Foram utilizados dados climatológicos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação que estão disponíveis no banco de dados interno do modelo MGB, obtidos das normais climatológicas do INMET.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere as vazões diárias, a calibração do modelo hidrológico mostrou que 100% e 61% das estações apresentaram valores de r e NSE superiores a 0,6 e 0,65, respectivamente. 85% das estações apresentaram valores de $BIAS$ entre -15% e 15%. Na validação 100% e 54% das estações apresentaram valores de r e NSE superiores a 0,6 e 0,65, respectivamente. 70% das estações apresentaram valores de $BIAS$ entre -15% e 15%.

Com relação as descargas de sedimentos em suspensão (QSS) diárias, a calibração do MGB-SED mostrou que 100% e 66% das estações apresentaram valores de r e NSE superiores a 0,6 e 0,25, respectivamente. 75% das estações apresentaram valores de $BIAS$ entre -30% e 30%. As estações 85735000 no rio Pardo e a estação 86510000 no rio Taquari apresentaram, respectivamente, valores de NSE de -0,07 e 0,01, indicando uma baixa performance do modelo nessas regiões. Destaca-se que na porção mais alta da bacia do Taquari, a estação 86100000 no rio das Antas apresentou um NSE de 0,98. O pior valor de $BIAS$ foi de 58% para a estação 85623000 no rio São Sepé. Na validação, os resultados foram semelhantes, com 100% e 54% das estações apresentaram valores de r e NSE superiores a 0,6 e 0,65, respectivamente. Contudo, para o $BIAS$, 46% das estações apresentaram valores entre -15% e 15%.

Os valores de $BIAS$ no rio Jacuí (85400000) foi de -12% para 200% e no Taquari de 23% para 109%, o que está associado com as medições realizadas *in situ* que quase sempre ocorrem no período de baixa QSS, o que dificulta obter um bom ajuste dos resultados simulados e observados, sem gerar uma tendência de subestimativas por parte do modelo. Além disso, como mencionado, na mesma bacia do rio Taquari, valores muito próximos ao ideal foram encontrados para a estação 86100000. É importante ressaltar ainda que a calibração de modelos de transporte de sedimentos a nível diário é uma tarefa difícil, uma vez que a variação temporal da concentração de sedimentos no rio é muito alta e as incertezas associadas as medições de sedimentos *in situ* podem ser maiores que 50% (Navratil et al., 2011).

Apresenta-se na sequência os resultados obtidos para as simulações dos eventos de 2023 e 2024 na bacia hidrográfica do Guaíba. A Figura 2 mostra a variação espacial das QSS máximas simuladas na bacia para os eventos de cheia de 2023 e 2024. A partir dessa figura, fica muito claro notar a abrangência espacial e impacto das chuvas de 2024 na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Guaíba. Em set/23, a maior carga de sedimentos que chega ao Guaíba veio do rio Taquari-Antas (46%). Já em nov/23 e mai/24, os maiores valores vieram do rio Jacuí (antes da confluência com o Taquari-Antas), sendo esse responsável por 37% e 39%, respectivamente, da carga transportada. Para esses dois últimos eventos, o rio Taquari-Antas foi responsável por transportar 32% e 36% da carga em suspensão que chegou ao Guaíba.

A tabela presente na Figura 2 apresenta os valores de QSS máximos (t/dias) para várias estações fluviométricas e a foz de alguns dos principais rios da bacia do Guaíba. A partir dessa tabela é notável que o evento de maio de 2024 é aquele que mostra os valores mais altos de QSS máxima para quase todos os locais indicados, exceto para a parte alta do rio Taquari-Antas.



Novamente se nota que para essa região, o evento de setembro de 2023 parece ter tido um efeito mais pronunciado na erosão do solo. Contudo, é importante ressaltar que no evento de 2024 houve mais relatos de deslizamentos e movimentos de massa nesta região se comparado ao evento de set/23, o que não permite concluir se de fato a carga de sedimentos mobilizada em maio de 2024 foi menor. Segundo a nota técnica “Mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa decorrentes do acumulado de chuva no RS entre 27/04 e 13/05 de 2024.” emitida pelo Laboratório Latitude o evento extremo de 2024 foi considerado o maior evento de movimentos de solo e rocha nas encostas já ocorrido no Brasil.

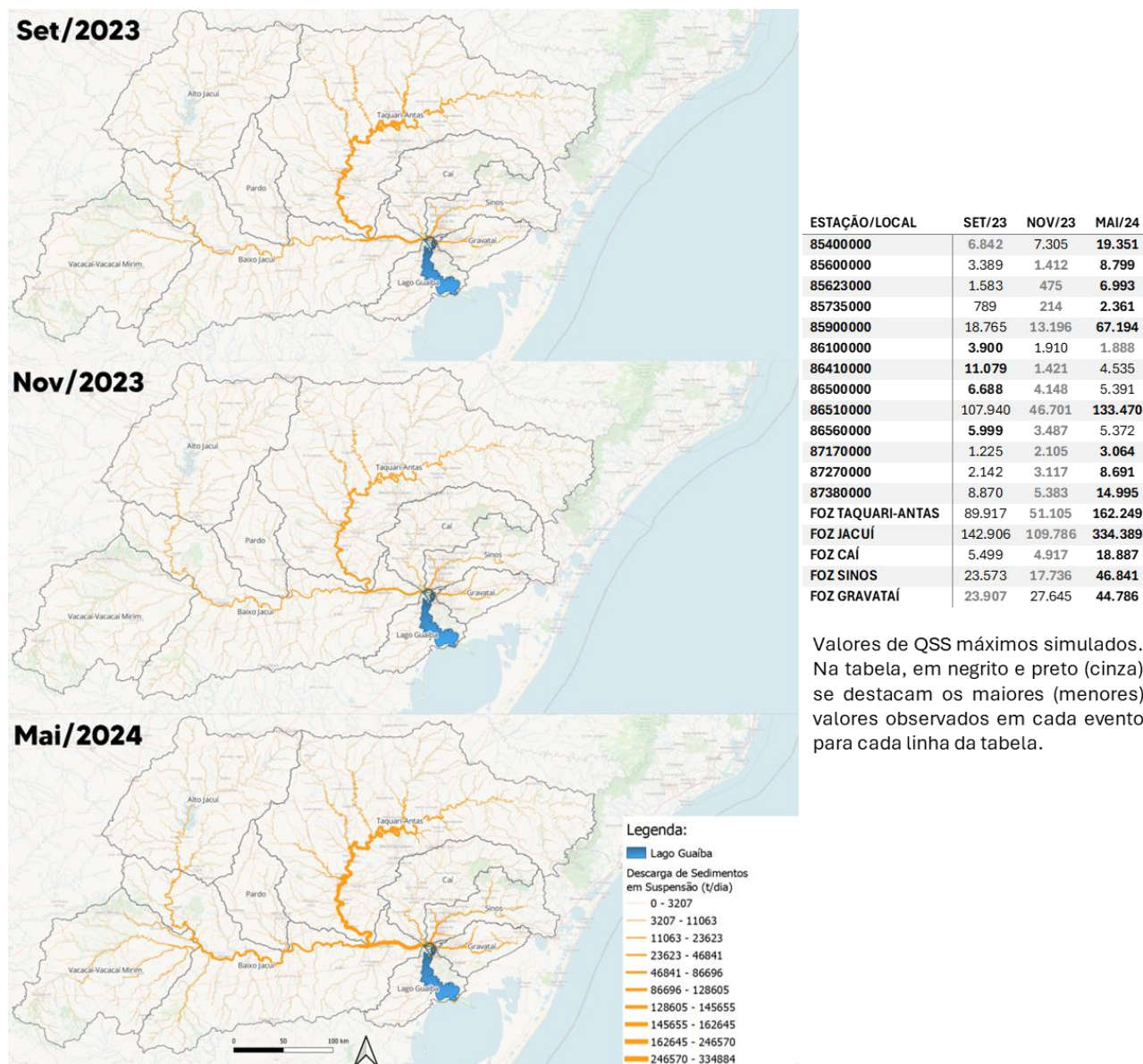


Figura 2 – Mapas com as descargas de sedimentos em suspensão (QSS) máximas simuladas para os eventos de setembro e novembro de 2023 e maio de 2024 e tabela resumo com informações em alguns locais específicos da bacia hidrográfica do Guaíba.

Na Figura 3 são apresentados sedimentogramas da QSS para as estações Rio Pardo e Muçum, localizadas nos rios Jacuí e Taquari, respectivamente e para a foz dos rios Caí e Sinos. A Figura 3-A mostra que no início de setembro, quando o rio Taquari (Figura 3-C) atingia valores elevados de QSS, essa região ainda não havia sido tão afetada por chuvas. A Figura 3-C evidencia mais uma vez que o evento de set/23 foi mais significativo na bacia do rio Taquari-Antas. No rio



Caí, as chuvas mais intensas que provocaram o aumento da QSS vieram posteriormente em setembro, com valores acima de 5.000 t/dia. Na bacia do rio dos Sinos, set/23 também tiveram valores máximos maiores que em nov/23. Essa bacia também mostra que as chuvas geraram picos de QSS em vários momentos desde julho até novembro de 2023.

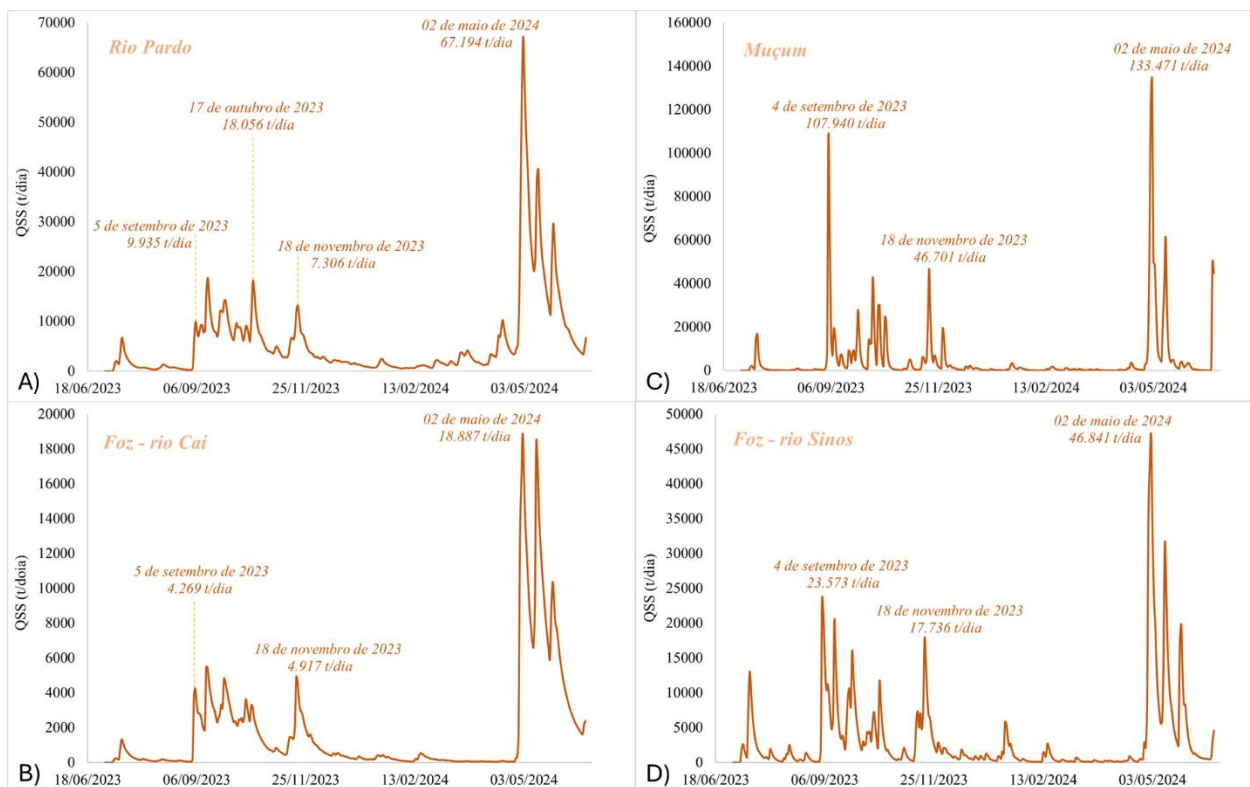


Figura 3 – Sedimentograma representativo da descarga de sedimentos em suspensão (QSS); A) Estação 85900000 - Rio Pardo, no rio Jauí; B) Foz do rio Caí; C) Estação 86510000 – Muçum, no rio Taquari; D) Foz do rio dos Sinos

A abrangência do impacto das chuvas em 2024 também pode ser visto na Figura 3, que apresenta diversos picos consecutivos em diversos locais da bacia, desde a parte oeste até a parte leste. Além disso, se observa padrões de variações da QSS. Na Figura 3-C, nota-se que a variação da QSS no tempo é muito mais rápida se comparada aos demais locais apresentados, uma vez que essa região é de altas declividades, enquanto as outras estão em regiões mais planas.

Na figura 4, nota-se a variação da QSS ao longo do período simulado para o Baixo Jacuí. Nesta região, o pico estimado pelo MGB-SED foi de 334.389 t/dia no dia 02 de maio de 2024. É possível observar ainda um segundo pico dias depois que foi maior do que aqueles observados anteriormente em 2023. Os valores simulados indicam que o pico em 2024 foi cerca de três vezes maior que aqueles simulados em 2023. Para o lago Guaíba em termos de cota de inundação atingida, o mês de novembro de 2023 registrou o segundo maior valor da série histórica antes da cheia de 2024. Contudo, ao observarmos as QSS foram maiores no dia 05 de setembro. Além disso, nota-se o quão significativo foi o evento de 2024 em comparação com os eventos de 2023. Ao se comparar com a média de longo período simulada entre 1975 e 2015, que é de 8.200 t/dia, o evento de 2024 foi cerca de 40 vezes maior.

Do dia 27 de abril quando as QSS começaram a subir até o dia 17 de junho que é quando se encerram as simulações deste trabalho, a carga de sedimentos em suspensão total transportada pelo rio Jacuí foi de 3.894.256 toneladas. Considerando também os rios Caí, Sinos e Gravataí, a carga



total aportada no Guaíba, de acordo com o MGB-SED, para o mesmo período foi de 5.720.762 toneladas de sedimentos em suspensão. Considerando uma densidade dos sedimentos de 2.650 kg/m³, o volume total de sedimentos mobilizado seria de 2,16 hm³, o que seria equivalente a encher com sedimentos cerca de 1500 estádios do tamanho do Estádio Beira Rio em Porto Alegre.

Devido aos valores elevados de sedimentos que chegaram nos rios, no dia 11/06/2024 o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS emitiram a nota técnica “Considerações sobre a dragagem como medida de redução das cheias”. O assoreamento observado nas planícies foi sem precedentes, mostrando o impacto do evento extremo. Diante do exposto, a nota técnica reitera a importância de estudos detalhados para que os locais a serem dragados sejam escolhidos de forma a minimizar o efeito de cheias futuras, visto que o assoreamento dos rios tende a diminuir a capacidade de escoamento dos canais.

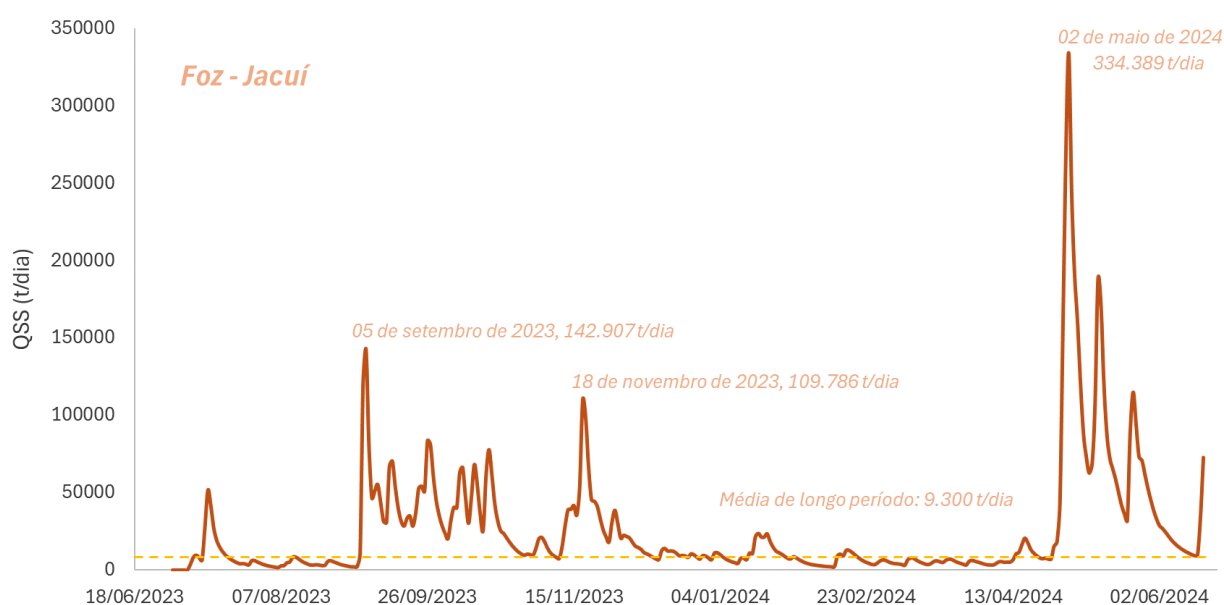


Figura 4 – Sedimentograma representativo da descarga de sedimentos em suspensão (QSS) na foz do rio Jacuí, próximo ao Guaíba. A linha amarela indica a média de longo período

CONCLUSÃO

No presente estudo, simulou-se o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Guaíba para os eventos extremos de precipitação ocorridos em setembro e novembro de 2023 e maio de 2024. Os resultados mostraram que o evento ocorrido em 2024 teve um impacto espacial muito mais abrangente do que aqueles ocorridos em 2023. Ainda, o evento ocorrido em 2024 gerou uma descarga de sedimentos em suspensão para o Guaíba cerca de três vezes maior que o evento ocorrido em set/23. No rio Jacuí, as estimativas realizadas com o modelo mostraram que o pico atingido em 02 de maio de 2024 foi 40 vezes superior à média de longo período simulada. Outra conclusão importante é que o rio Taquari-Antas, é o que, relativamente à sua área de drenagem, é aquele que mais contribui com sedimentos para o Guaíba, sendo responsável por 46% dos sedimentos transportados no evento de set/23.

O presente trabalho é uma análise preliminar e é limitado aos sedimentos em suspensão (argila e silte) transportados na bacia. Uma simulação mais robusta deve incluir um módulo de transporte de sedimentos que leve em conta a interação entre os rios e planícies e também o aporte



de sedimentos aos rios oriundos de movimentos de massa, uma vez que foram relatadas milhares de ocorrências deste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp, processo nº 2023/08711-5) pelo suporte financeiro na elaboração da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHON, 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, pp. 503-522.

BUARQUE, D. C. (2015). “Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira.” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FAGUNDES, H. de O.; PAIVA, R. C. D. de; BRÊDA, J. P. L. F.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; BORRELLI, P.; FAN, F. M. (2023). “An assessment of South American sediment fluxes under climate changes.” *Science of The Total Environment*, 879, 163056.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. (2015). “Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul.” XXI Simpósio Brasileiro e Recursos Hídricos, pp. 1–8.

FAO/UNESCO. (1974). “Soil Map of the World.” | Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO/UNESCO Soil Map of the World.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; LANA-RENAULT, N.; SANJUÁN, Y. (2015). “A meta-analysis of soil erosion rates across the world.” *Geomorphology*, 239, pp. 160–173.

NAVRATIL, O.; et al. (2011). “Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment.” *Journal of Hydrology*, 398, pp. 3-4.

ROSSONI, R. B. (2018). “Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias: O estudo de caso da bacia da Laguna dos Patos.” Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 226p.

WILLIAMS, J. R. (1975). “Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor.” In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service, Washington DC, pp. 244-252.