

Modelagem de sedimentos com o MGB-SED na bacia hidrográfica do rio Ivaí: análise de resíduos no exutório

Ivan Mangini¹ & Hugo de Oliveira Fagundes²

Resumo: Desde a década de 1980, as mudanças climáticas têm ganhado destaque global, impulsionadas pela criação do IPCC em 1988. Relatórios recentes, como o IPCC AR6 (2021), apontam para o agravamento dos impactos climáticos, incluindo eventos extremos como enchentes e secas. No Brasil, esses efeitos são observados tanto em pequenas escalas, como as enchentes na cidade de São Paulo, como em grandes bacias hidrográficas, como as secas no rio Amazonas e as cheias ocorridas no Rio Grande do Sul em 2023 e 2024. O desastre de Mariana (2015) ilustra o papel dos sedimentos na amplificação de impactos ambientais, destacando a necessidade de políticas integradas para gestão de sedimentos e mitigação de desastres. No Brasil, o assoreamento de reservatórios compromete a geração de energia, a disponibilidade hídrica e a produtividade agrícola, além de aumentar custos industriais. Como solução, modelos numéricos distribuídos têm se mostrado eficazes na análise hidrossedimentológica, especialmente com a disponibilidade de dados históricos. Entretanto, a simulação do transporte de sedimentos ainda é um desafio, pois esses processos apresentam forte variabilidade espacial e temporal, resposta não linear à vazão e elevada sensibilidade a eventos extremos. Além disso, a calibração e a validação de modelos hidrossedimentológicos dependem diretamente da quantidade e da representatividade dos dados observados, que frequentemente são escassos e irregulares em estações sedimentométricas. Nesse contexto, torna-se necessário avaliar não apenas o desempenho global dos modelos, mas também sua capacidade de representar eventos críticos e sua sensibilidade à densidade de dados observados.

Palavras-Chave: modelagem hidrossedimentológica; MGB-SED; dados sedimentométricos; descarga de sedimentos; transporte de sedimentos.

Abstract: Since the 1980s, climate change has gained global prominence, driven by the establishment of the IPCC in 1988. Recent reports, such as the IPCC AR6 (2021), indicate the worsening of climate impacts, including extreme events such as floods and droughts. In Brazil, these effects are observed both at small scales, such as floods in the city of São Paulo, and in large river basins, such as droughts in the Amazon River and the floods that occurred in Rio Grande do Sul in 2023 and 2024. The Mariana disaster (2015) illustrates the role of sediments in amplifying environmental impacts, highlighting the need for integrated policies for sediment management and disaster mitigation. In Brazil, reservoir siltation compromises energy generation, water availability, and agricultural productivity, in addition to increasing industrial costs. As a solution, distributed numerical models have proven effective in hydrosedimentological analysis, especially when historical data are available. However, simulating sediment transport remains a challenge, as these processes exhibit strong spatial and temporal variability, a nonlinear response to streamflow, and high sensitivity to extreme events. In addition, the calibration and validation of hydrosedimentological models directly depend on the quantity and representativeness of observed data, which are often scarce and irregular at sediment monitoring stations. In this context, it is necessary to evaluate not only the overall performance of models, but also their ability to represent critical events and their sensitivity to the density of observed data.

Keywords: hydrosedimentological modelling; MGB-SED; sedimentometric data; sediment discharge; sediment transport.

1) Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224 – Campinas-SP, CEP: 13083-889, i237471@dac.unicamp.br

2) Universidade Estadual de Campinas. Rua Saturnino de Brito, 224 – Campinas-SP, CEP: 130083-889, hugoo@unicamp.br

INTRODUÇÃO

Segundo o Guia de Práticas Sedimentométricas (CARVALHO et al., 2000), os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreadores e como agentes fixadores para outros agentes poluidores. O sedimento sozinho degrada a qualidade da água para consumo humano, para recreação, para o uso industrial, infraestruturas hidroelétricas e vida aquática. Dessa forma, as partículas de sedimento agem como um potencializador dos problemas causados por pesticidas, agentes químicos decorrentes do lixo, resíduos tóxicos, nutrientes, bactérias patogênicas e vírus. Horowitz (2009) mostra em seu estudo que 75% dos elementos traço (como cobre, chumbo e zinco), elementos maiores (como ferro, manganês e alumínio) e fósforo total foram transportados associados aos sedimentos suspensos, sendo que 90% foram transportados durante eventos de cheia. Além disso, através do processo de sedimentação das partículas em suspensão transportadas no rio, ocorre o assoreamento de rios e reservatórios.

Com o aumento da temperatura provocado pelo aquecimento global e a alteração nas componentes do ciclo hidrológico, na região Sul do Brasil devem ocorrer mais chuvas fortes e com grandes volumes de água (ROCHA, 2021). Segundo o IPCC (2021), se a temperatura média do planeta aumentar 4,0°C (em relação ao período de 1850-1900) antes de 2100 o número de eventos climáticos extremos em algumas regiões pode se tornar nove vezes maior. No Brasil, cheias extremas como as de 1983-1984, no Sul do país, e as de 2023-2024, no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, produziram severos impactos sociais, econômicos e ambientais. Esses eventos causaram mortes, evacuações, destruição de infraestrutura, perdas agrícolas e prejuízos bilionários, além de intensificarem processos de erosão, deslizamentos e transporte de sedimentos. Estando as fortes chuvas e as cheias associadas ao transporte massivo de sedimentos, nota-se que compreender a dinâmica desse material é fundamental para mitigar prejuízos sociais, ambientais e econômicos.

A forma convencional de estudar sedimentos é a partir de modelos matemáticos computacionais. Esses modelos permitem a predição e quantificação dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza (ALMEIDA; SERRA, 2017). Os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica requerem uma análise como um sistema, pelo qual as variáveis interagem de maneira interdependente e variam espacialmente, resultando em comportamentos complexos.

A partir do modelo de sedimentos MGB-SED AS, por exemplo, Fagundes et al. (2023) identificaram que 51% dos principais rios da América do Sul apresentaram mudanças significativas no transporte de sedimentos entre 1984 e 2019. Estudos como esse demonstram a capacidade dessas ferramentas em simular os fluxos de sedimentos em bacias com pouco monitoramento.

MÉTODOS

Área de Estudo

A escolha da bacia do rio Ivaí sustenta-se na abundante disponibilidade de dados sedimentométricos em sua estação de exutório. Localizada no estado do Paraná (Figura 1), destaca-se como a segunda maior do estado, ocupando uma área de 36.587 km² (20% do estado). O rio Ivaí é subdividido em três segmentos: o segmento superior, com desníveis mais acentuados, relevo formado por topos planos e vertentes íngremes; segmento médio, com morros arredondados e segmento inferior, formado por chapadas e colinas suaves. Nas porções média e alta, o relevo acidentado e o clima subtropical, com frequentes geadas, limitam a agricultura, permitindo a presença de vegetação primária subtropical em algumas áreas. Na parte média-baixa, o relevo mais favorável e o clima tropical facilitaram a mecanização agrícola, promovendo intenso desmatamento.

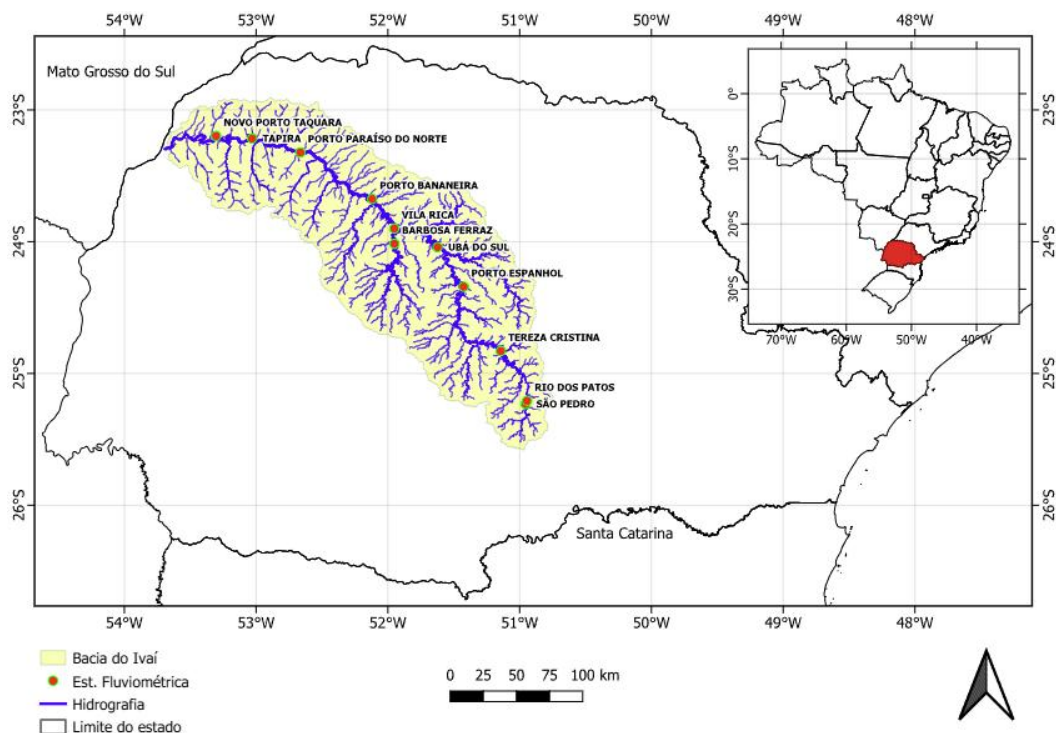


Figura 1 – Localização da bacia do rio Ivaí e de suas estações fluviométricas.

Aquisição de dados, Preparação e calibração do Modelo Hidrológico MGB-IPH

Os dados de vazão, precipitação e sedimentos foram obtidos no HidroWeb/ANA. As informações climáticas vieram da base interna do MGB, associada ao INMET. O uso e cobertura do solo foi representado pelo mapa de 1985 do MapBiomass. A topografia foi baseada no MDE FABDEM v1-2. As frações de silte, argila, areia e carbono orgânico foram extraídas do SoilGrids250m v2.0, enquanto o tipo de solo foi obtido a partir da base cartográfica do IBGE em escala 1:250.000. Além disso, produtos cartográficos complementares, como rede hidrográfica, limite da bacia, áreas de contribuição das estações fluviométricas, dentre outros, foram derivados em ambiente GIS.

O modelo hidrológico MGB-IPH requer uma etapa de pré-processamento para definir as características físicas e espaciais da bacia hidrográfica. Essa etapa inclui a preparação do MDE, a geração da rede de drenagem, a discretização em sub-bacias e minibacias e a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). Este procedimento foi executado de acordo com o manual de aplicação do MGB de Alves et al. (2020).

A partir do MDE, foi realizado a remoção de depressões e geração adequada das direções de fluxo. Em sequência, foram produzidos os arquivos de direção de escoamento, fluxo acumulado e rede de drenagem, adotando-se um limiar de área de contribuição de 10 km². Com base nessa rede, foram delimitadas a bacia do rio Ivaí e suas principais sub-bacias. A rede de drenagem foi posteriormente segmentada em trechos mínimos de 10 km, resultando em 1816 minibacias. Por fim, a bacia foi discretizada em 12 sub-bacias para apoiar a regionalização da calibração, considerando a disponibilidade de estações no período analisado, com cada estação localizada no exutório de uma sub-bacia. As Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) foram adotadas para representar regiões com comportamento hidrológico homogêneo, permitindo incorporar a variabilidade das características físicas da bacia e simplificar a parametrização do modelo. O balanço hídrico é

calculado em cada URH de cada minibacia, posteriormente somado e propagado pela rede de drenagem.

Para a definição das URHs, foram mesclados e reclassificados o MDE FABDEM v1-2, o mapa de uso e cobertura do solo MapBiomass, e o mapa de tipos de solo do IBGE. A reclassificação dos mapas seguiu Fan et al. (2015). O uso e cobertura do solo foi agrupado nas classes floresta, agricultura, campo, área semi-impermeável, várzea e água. Os tipos de solo foram reorganizados conforme o potencial de geração de escoamento superficial, enquanto a declividade foi classificada em duas categorias: menor ou igual a 20% e maior que 20%, distinguindo áreas menos inclinadas de encostas mais íngremes. A reclassificação resultou no raster final das URHs, composto por 15 unidades: combinações entre floresta, agricultura e campo com solo profundo ou raso e declividade baixa ou alta, além das classes área semi-impermeável, várzea e água.

Dados hidrológicos, meteorológicos e seleção das estações

A seleção das estações de monitoramento considerou a disponibilidade de dados de vazão para calibração e validação do MGB hidrológico, bem como de dados de sedimentos para o MGB-SED. O período adotado foi de 1974 a 1996 para calibração e de 1997 a 2020 para validação.

Tabela 1 - Disponibilidade de dados para cada estação

Nº	Estação	Nome	Dados de vazão		Dados de sedimento		Total	Etapa modelagem
			Período	Etapa modelagem	1974-1996	1997-2020		
1	64619950	SÃO PEDRO	>1983	calib/valid	20	17	37	calib/valid
2	64620000	RIO DOS PATOS	total	calib/valid	6	47	53	calib/valid
3	64625000	TEREZA CRISTINA	total	calib/valid	54	54	108	calib/valid
4	64645000	PORTO ESPANHOL	total	calib/valid	-	-	-	-
5	64655000	UBÁ DO SUL	total	calib/valid	62	56	118	calib/valid
6	64659000	BARBOSA FERRAZ	total	calib/valid	47	51	98	calib/valid
7	64660500	VILA RICA	>1985	validação	27	64	91	calib/valid
8	64675002	PORTO BANANEIRA	total	calib/valid	52	13	65	calib/valid
9	64685000	PORTO PARAÍSO DO NORTE	total	calib/valid	60	55	115	calib/valid
10	64689000	TAPIRA	>1976	calib/valid	-	-	-	-
11	64693000	NOVO PORTO TAQUARA	total	calib/valid	119	57	176	calib/valid

O modelo MGB calcula séries temporais de vazão e outras variáveis hidrológicas a partir de séries temporais de dados meteorológicos. Os dados de vazão e sedimento observados são utilizados para o processo de calibração e validação. Para propagação de vazão adotou-se o método inercial.

Os parâmetros de vegetação (albedo, índice de área foliar, altura de vegetação e resistência superficial), utilizados para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, são fixos e foram adotados com base nos valores sugeridos pelo manual de aplicação do modelo. Os parâmetros do solo são calibráveis: W_m , representa a capacidade máxima de armazenamento de água no solo; b , controla a forma da relação empírica entre armazenamento e saturação; K_{bas} , escoamento subterrâneo ou de base; K_{int} , escoamento subsuperficial; W_c , fração de W_m abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial; CAP , fluxo de retorno do reservatório subterrâneo para a camada de solo (capilaridade); CS , coeficiente de calibração da propagação superficial; CI , coeficiente de calibração da propagação subsuperficial; CB , parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo; XL , controla a curva de redução da drenagem do reservatório subsuperficial. Para os parâmetros de XL , CAP e W_c , foram adotados valores sugeridos pelo manual de aplicação do modelo (ALVES et al., 2020).

A calibração manual foi realizada por meio da definição de valores para os parâmetros de cada uma das 12 sub-bacias da área de estudo, de montante para jusante. Os valores adotados para

cada parâmetro foram identificados por meio de tentativa e erro, após diversos ajustes. Após a calibração, foi realizada a validação, obtendo-se as métricas para ambas as etapas.

Módulo de sedimentos

O aporte de sedimentos nos cursos de água ocorre mediante um reservatório linear simples para cada fração do solo (silte, argila e areia), sendo estes propagados pelo curso de água por uma equação do tipo difusão-advecção. O módulo possibilita estimar a carga de sedimentos erodidos e depositados em cada trecho do rio, além de identificar as regiões da bacia que mais contribuem para o volume. Portanto, o modelo busca estimar a carga de sedimentos aportados nos rios por meio da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) (WILLIAMS, 1975), na escala de bacia para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH), representada pela Equação a seguir:

$$Sed = \alpha \cdot (Q_{sur} * q_{peak} * A)^{\beta} K * C * P * LS_{2D}$$

Em que Sed, (t dia⁻¹), representa a carga de sedimentos resultante da erosão; Q_{sur}, (mm dia⁻¹), representa o volume específico de escoamento superficial; q_{peak} (m³ s⁻¹), corresponde à taxa de pico do escoamento superficial; A (ha), representa a área da minibacia; K é o fator de erodibilidade do solo; C é o fator de manejo e cobertura do solo; P é o fator de prática conservacionista; LS_{2D} é o fator topográfico bidimensional; e α e β são coeficientes de ajuste da equação. Os valores de Q_{sur} e q_{peak} são estimados pelo do modelo hidrológico acoplado (MGB) (BUARQUE, 2015). O fator P é determinado com base nas práticas de conservação do solo, porém, frequentemente assume-se o valor 1 em aplicações de larga escala. O fator C representa o manejo e a cobertura vegetal, podendo ser obtido a partir da literatura. O fator de erodibilidade K é calculado a partir da equação proposta por Williams (1995), considerando a textura do solo (percentuais de silte, argila e areia) e seu teor de matéria orgânica. O fator topográfico LS_{2D} é estimado no pré-processamento do modelo com base no MDE.

Para o cálculo da produção de sedimento, foi utilizado o resultado do volume de escoamento gerado pelo modelo hidrológico. Na equação da MUSLE são calibráveis os parâmetros α , β e TKS, sendo este último um parâmetro de retardo que atua como um fator multiplicativo para ajustar a carga de sedimentos

Avaliação de desempenho

A avaliação do desempenho das simulações foi realizada com as métricas NSE, NSElog, BIAS, KGE, KGE-log e coeficiente de correlação de Pearson. O NSE avalia a capacidade do modelo de reproduzir a variabilidade da série observada, enquanto o NSElog aplica essa análise em escala logarítmica, reduzindo o peso dos picos e aumentando a sensibilidade aos baixos valores. O BIAS quantifica o erro sistemático da simulação, indicando tendência de superestimativa ou subestimativa do volume total. O KGE e o KGE-log avaliam o desempenho com base em três componentes: correlação, variabilidade e viés, sendo melhores quanto mais próximos de 1 forem seus valores. Os valores obtidos de vazão foram interpretados com base na classificação de desempenho proposta por Moriasi et al. (2015) para NSE e BIAS (%): muito bom para NSE entre 0,80 e 1,00 e |BIAS| < 5%; bom para NSE entre 0,70 e 0,80 e 5% < |BIAS| < 10%; satisfatório para NSE entre 0,50 e 0,70 e 10% < |BIAS| < 15%; e insatisfatório para NSE < 0,50 e |BIAS| > 15%. Ainda, a classificação de desempenho para sedimentos de Moriasi et al. (2015) foi utilizada para avaliação do modelo de sedimentos, para NSE e BIAS (%): muito bom para NSE entre 0,80 e 1,00 e |BIAS| < 10%; bom para NSE entre 0,70 e 0,80 e 10% < |BIAS| < 15%; satisfatório para NSE entre 0,45 e 0,70 e 15% < |BIAS| < 20%; e insatisfatório para NSE < 0,45 e |BIAS| > 20%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados hidrológicos alcançaram desempenho classificado como muito bom, indicando estabilidade da simulação hidrológica. Na simulação de sedimentos, a estação Novo Porto Taquara (11), localizada no exutório, apresentou desempenho insatisfatório nos dois períodos avaliados, com NSE de 0,200 na calibração e 0,290 na validação, além de BIAS de -56,76% e -51,53%, respectivamente (Tabela 2). Em contraste, parte das estações a montante apresentaram desempenho satisfatório pelo NSE, especialmente na validação, embora com número menor de observações sedimentométricas, variando de 37 a 118 registros, em comparação com 176 registros no exutório. Essa diferença no tamanho amostral deve ser considerada, pois influencia a robustez das métricas e a probabilidade de inclusão dos eventos de maior magnitude.

A calibração de sedimentos no exutório é limitada não apenas pela estrutura do módulo de sedimentos (poucos graus de liberdade ajustáveis) mas principalmente pela dificuldade de reproduzir a resposta sedimentológica não linear e histerética durante eventos extremos, que tornam-se aparente com a grande disponibilidade de dados, como é o caso da estação nº 11. Essa hipótese é reforçada por uma análise dos resíduos entre a descarga sólida em suspensão observada e simulada (QSS) no exutório (Figura 2), que revela uma estrutura de erro assimétrica e concentrada em um pequeno número de dias críticos. Considerando toda a série utilizada no estudo (1974–2020), aproximadamente 6% dos dias com os maiores erros (10 dias), responde por cerca de 82% do erro quadrático total. Esse padrão indica que o baixo NSE é controlado por um pequeno subconjunto de eventos, possivelmente cheias, durante os quais o modelo apresenta desvios consistentes e de grande magnitude.

Tabela 2 - Métricas estatísticas de desempenho do modelo para descarga de sedimento suspenso (QSS) no período de calibração (1974–1996) e validação (1997–2020)

Nº	Estação	Nome	Área (km²)	Calibração (1974-1996)						Validação (1997-2020)					
				NSE	NSElog	KGE	KGE-log	Pearson r	BIAS (%)	NSE	NSElog	KGE	KGE-log	Pearson r	BIAS (%)
1	64619950	SÃO PEDRO	1050	0.371	-0.64	0.192	0.362	0.813	-49.26	-0.437	-0.127	0.329	0.390	0.333	1.1
2	64620000	RIO DOS PATOS	1090	0.689	0.609	0.805	0.588	0.875	1.23	0.178	0.364	0.023	0.677	0.490	-50.83
3	64625000	TEREZA CRISTINA	3560	0.416	0.515	0.521	0.647	0.646	-0.23	0.543	0.605	0.375	0.807	0.784	-38.82
4	64645000	PORTO ESPANHOL	8540	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	64655000	UBÁ DO SUL	12700	0.340	0.276	0.221	0.657	0.676	-26.74	0.635	0.688	0.456	0.853	0.893	-16.54
6	64659000	BARBOSA FERRAZ	3290	0.059	-0.186	0.285	0.390	0.378	11.11	0.688	0.251	0.321	0.644	0.984	-41.94
7	64660500	VILA RICA	19400	0.435	0.029	0.442	0.572	0.670	2.8	0.593	0.368	0.580	0.689	0.783	0.67
8	64675002	PORTO BANANEIRA	23100	0.107	0.666	-0.005	0.753	0.386	-48.77	0.623	0.763	0.272	0.874	0.992	-42.72
9	64685000	PORTO PARAÍSO DO NORTE	28400	0.888	0.320	0.789	0.670	0.946	-18.64	0.429	0.157	0.334	0.623	0.707	-31.19
10	64689000	TAPIRA	31900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	64693000	NOVO PORTO TAQUARA	34400	0.200	0.285	0.070	0.711	0.548	-56.76	0.290	-0.287	0.157	0.564	0.666	-51.53

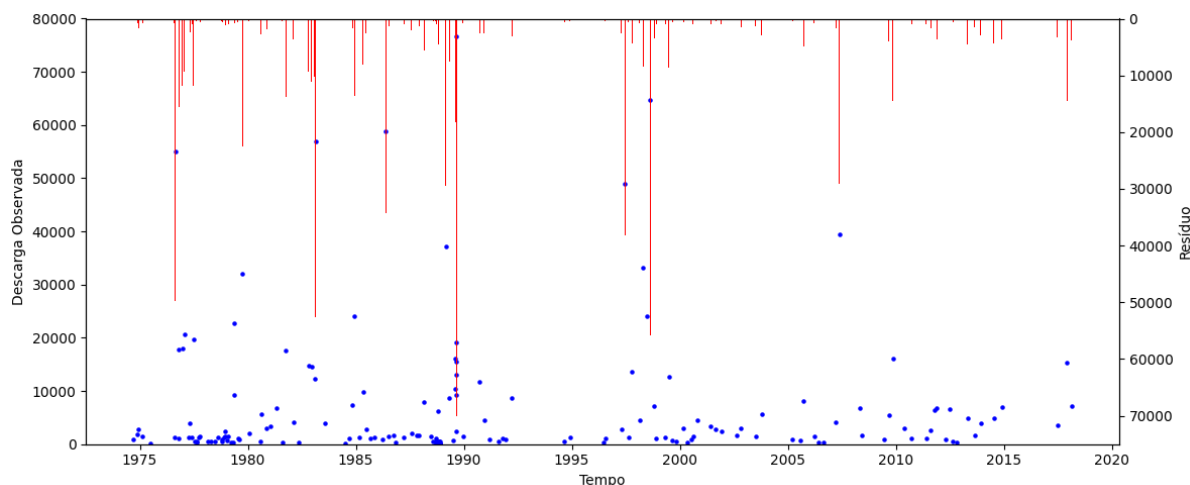


Figura 2 - Série temporal diária da descarga sólida em suspensão observada plotada em relação ao resíduo entre a QSS observada e simulada na estação fluviométrica 11 (exutório da bacia).

Os resultados sedimentológicos indicam desempenho heterogêneo entre as estações avaliadas. Na calibração, Porto Paraíso do Norte (9) apresentou o melhor desempenho, com NSE de 0,888, classificado como muito bom para sedimentos, além de KGE de 0,789 e Pearson (r) de 0,946, embora o BIAS de -18,64% indique subestimativa das cargas simuladas. Rio dos Patos (2) também apresentou desempenho adequado, com NSE de 0,689, KGE de 0,805, Pearson (r) de 0,875 e BIAS de 1,23%. Esses valores indicam que, nessas estações, o modelo conseguiu representar de forma mais equilibrada a variabilidade temporal, a associação entre valores observados e simulados e o viés médio da simulação. Nas demais estações, os baixos valores de NSE indicaram desempenho insatisfatório na calibração.

Na validação, parte das estações a montante apresentou melhora, com NSE satisfatório em Barbosa Ferraz (6), Ubá do Sul (5), Porto Bananeira (8), Vila Rica (7) e Tereza Cristina (3). Entretanto, o BIAS revelou limitações importantes, principalmente em Tereza Cristina, Barbosa Ferraz e Porto Bananeira, que apresentaram subestimativa expressiva das cargas simuladas. As métricas complementares reforçam essa interpretação. Em algumas estações, como Barbosa Ferraz (6) e Porto Bananeira (8), os coeficientes de Pearson foram elevados na validação, com (r) de 0,984 e 0,992, respectivamente, indicando boa associação temporal entre observações e simulações. No entanto, os valores de KGE permaneceram baixos, com 0,321 e 0,272, mostrando que a boa correlação não foi acompanhada por representação adequada da magnitude, da variabilidade e do viés. Assim, embora algumas estações tenham apresentado desempenho satisfatório pelo NSE, a avaliação conjunta das métricas mostra que o desempenho sedimentológico não foi uniforme e permaneceu condicionado por erros sistemáticos em parte da bacia.

A estação Novo Porto Taquara (11), localizada no exutório e com a maior área de drenagem entre as estações avaliadas, apresentou desempenho insatisfatório nos dois períodos. O NSE foi de 0,200 na calibração e 0,290 na validação, enquanto o BIAS foi de -56,76% e -51,53%, respectivamente, indicando forte subestimativa das cargas sedimentológicas. Esse resultado contrasta com o desempenho satisfatório observado em parte das estações a montante, mas deve ser interpretado considerando as diferenças no tamanho e na composição das séries sedimentométricas. As estações com resultados a montante possuem entre 37 e 118 observações, enquanto Novo Porto Taquara possui 176 registros e inclui eventos de maior magnitude. Como o transporte de sedimentos apresenta resposta não linear à vazão e é fortemente condicionado por eventos de pico, séries com menor número de observações podem representar apenas uma fração limitada dos regimes hidrossedimentológicos da bacia. Nesses casos, bons valores de NSE, KGE ou Pearson (r) indicam aderência entre simulação e observação nos pontos amostrados, mas não comprovam, isoladamente, que o modelo reproduz de forma robusta toda a dinâmica sedimentológica local. Assim, o desempenho aparentemente superior de algumas estações a montante pode estar relacionado tanto à capacidade do modelo de representar condições médias e intermediárias quanto à menor exposição das métricas aos eventos que mais penalizam a simulação.

CONCLUSÃO

Os resultados indicam que o MGB-SED apresentou desempenho hidrológico consistente, mas limitações relevantes na simulação da descarga de sedimentos em suspensão. Na estação Novo Porto Taquara (11), o desempenho sedimentológico foi insatisfatório nos períodos de calibração e validação, com forte subestimativa das cargas simuladas. A maior disponibilidade relativa de dados nessa estação, em comparação às estações a montante, permitiu uma avaliação mais rigorosa dos erros e evidenciou que a maior parte do erro quadrático está concentrada em poucos eventos de maior magnitude. Embora algumas estações a montante tenham apresentado desempenho satisfatório em parte das métricas, especialmente pelo NSE na validação, esses resultados devem ser

interpretados com cautela. As séries sedimentométricas dessas estações possuem menor número de observações, variando de 37 a 118 registros, e podem representar de forma limitada os eventos extremos que controlam grande parte do transporte de sedimentos. Assim, o desempenho aparentemente superior em algumas estações a montante não elimina as limitações do módulo sedimentológico, mas indica que a avaliação do modelo pode ser condicionada pela densidade, distribuição e representatividade dos dados observados.

Em termos metodológicos, os resultados reforçam a importância de combinar a avaliação espacial das estações com uma análise da representatividade amostral. As estações a montante são úteis para verificar a coerência geral da resposta espacial do modelo, mas a estação do exutório, por apresentar maior número de registros e maior exposição aos eventos de pico, fornece a base mais robusta para identificar erros sistemáticos, avaliar a influência dos eventos extremos e discutir limitações estruturais do módulo sedimentológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, N. O. et al. Guia de práticas sedimentométricas. Brasília, DF, 2000. 154 p.
- HOROWITZ, A. J. Monitoring suspended sediments and associated chemical constituents in urban environments: lessons from the city of Atlanta, Georgia, USA water quality monitoring program. *Journal of Soils and Sediments*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11368-009-0092-y>.
- RIBEIRO, D. R. Apresentação do SWAT como ferramenta de gestão de recursos hídricos. Estudo de caso: Rio São José dos Dourados. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2021.
- IPCC. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista da FAE*, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017.
- FAGUNDES, H. de O. et al. An assessment of South American sediment fluxes under climate changes. *Science of The Total Environment*, Elsevier BV, v. 879, p. 163056, jun. 2023. ISSN 0048-9697. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163056>.
- ALVES, M. et al. Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-Hydro Tools. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS, 2020.
- FAN, F. M. et al. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v. 22, 2015.
- WILLAMS, J. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1975.
- BUARQUE, D. C. Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira. 2015.
- WILLIAMS, J. R. The EPIC model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Resources Publications, 1995. cap. 25, p. 909–1000.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.