



ANÁLISE COMPARATIVA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS UTILIZANDO OS MODELOS MGB-SED E HEC-RAS

Hugo de Oliveira Fagundes¹; Arthur da Fontoura Tschiedel²; Fernando Mainardi Fan³; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva⁴

ABSTRACT – The aim of the present work was to compare a simple module (programed in the MGB-SED model) and a robust model of sediment river routing (HEC-RAS 5.0.3) in order to identify if it would be possible to obtain similar results from the application of both models using the same upstream boundary condition. For this, a comparison was made between the results obtained from both models for a river reach that is located between the sedimentometric stations Governador Valadares and Resplendor, located 100 km between each other in the Doce river, State of Minas Gerais, Brazil. The input data were the same for both models, as well as the upstream and downstream boundary conditions. On the other hand, the channel cross section changes, which process is considered in HEC-RAS 5.0.3 was not considered in the MGB-SED. In both models, sediment transport is governing by sediment continuity equation (Exner equation). As for the flow routing, whereas for the model MGB-SED is considered the method of Muskingum-Cunge, for HEC-RAS 5.0.3 were considered the unsteady and quasi-unsteady methods. Among the results obtained, it was observed that the relationship between the MGB-SED and the HEC-RAS 5.0.3 sediment module is related not only to formulations considered in one or the other but mainly to the variation of the coefficients used in the equations of both models, once that different models in terms of complexity resulted in very similar downstream sedimentometric curves.

Palavras-Chave – MGB-Sed; Hec-Ras 5.0.3; Modelagem de Sedimentos.

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e uso de modelos hidrodinâmicos vem crescendo nos últimos anos, principalmente devido aos avanços computacionais que permitiram não apenas a solução das equações de Saint Venant, mas também devido à possibilidade de integração dos modelos com Sistemas de Informações Geográficas. Esses modelos se diferenciam, dentre vários aspectos, por utilizarem diferentes abordagens na propagação do escoamento.

No que se refere ao uso da integração de modelos hidrodinâmicos e de sedimentos, geralmente esses têm sido aplicados para analisar alterações geomorfológicas nos rios. Por

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; h.o.fagundes@hotmail.com; 51 33086670

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; arthurtidel@hotmail.com; 51 33086670

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; fernando.fan@ufrgs.br; 51 33086670

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre; rodrigocdpaiva@gmail.com; 51 33086670



exemplo, Zhang *et al.* (2014) desenvolveram um modelo hidrodinâmico bidimensional para avaliar o transporte de sedimentos e a evolução do leito do rio Yangtze a montante do reservatório de Três Gargantas – China e como esse poderia ser afetado pela deposição de sedimentos. Por outro lado, alguns trabalhos buscaram integrar modelos de erosão a modelos hidrodinâmicos para avaliar, de forma contínua, a concentração de sedimentos em suspensão ao longo de um rio (Conroy *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2013). Nesta linha, é aqui destacado o trabalho de Buarque (2015), que aplicou o modelo MGB-SED na bacia do rio Madeira (Amazônia, Brasil) e observou que ao utilizar uma abordagem de propagação de vazões mais completa, considerando trocas laterais de água com planícies de inundação e deposição de material finos nessas regiões, os valores calculados pelo modelo eram melhores se comparados aqueles gerados considerando a propagação pelo método de Muskingum-Cunge.

O objetivo desse trabalho segue esta linha de investigação e se propõe a avaliar em mais casos se um modelo de transporte de sedimentos mais simplificado consegue apresentar resultados tão satisfatórios quanto um modelo mais robusto. Para isso, foram comparados o módulo de transporte, baseado em Muskingum-Cunge, do modelo MGB-SED (Buarque, 2015), que permite uma abordagem mais simplificada do transporte do escoamento e de sedimentos no canal, e o modelo HEC-RAS 5.0.3 (USACE, 2016), que tem uma abordagem mais detalhada, tanto na parte da geometria do canal, quanto do transporte do escoamento e dos sedimentos. Os modelos foram aplicados para um trecho de 100 quilômetros na bacia do rio Doce.

2 - OS MODELOS MGB-SED E HEC-RAS 5.0.3

O modelo MGB-SED é constituído de um módulo hidrológico, conhecido como MGB e um módulo de sedimentos, que leva o mesmo nome: MGB-SED. O modelo MGB pode ser considerado um modelo conceitual, distribuído, de simulação contínua que pode ter um passo de tempo diário ou horário, que simula os processos de interceptação, infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Todos os processos de transformação de chuva em vazão são realizados dentro de minibacias que compõe a área simulada, que por sua vez é discretizada por Unidades de Resposta Hidrológica (URH). A propagação do escoamento pode ser realizada de três formas: utilizando o método de Muskingum-Cunge (Collischonn *et al.* (2007); por meio das equações completas de Saint Venant (Paiva *et al.*, 2011); ou uma versão simplificada dessas últimas (Pontes *et al.*, 2017).

O módulo de sedimentos apresenta estrutura semelhante ao módulo hidrológico, o que facilita a interação entre eles. Assim, a discretização espacial é a mesma e os volumes de sedimentos também são gerados em cada URH para posteriormente serem transferidos à rede de drenagem. Esses volumes são estimados a partir da equação MUSLE (Williams, 1975) (Equação 1),



que considera além de outros fatores, os volumes de escoamento superficial gerados pelo módulo hidrológico.

$$Sed = \alpha \cdot (Q_{sup} * q_{pico} * A)^{\beta} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \quad (1)$$

em que Sed [t/dia] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo, Q_{sup} [mm/ha] é o volume de escoamento superficial, q_{pico} [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial, A [ha] é a área superficial, α e β são coeficientes de ajuste, adotados como 11,8 e 0,56, respectivamente, K [0,013.t.m².h./m³.t.cm] é o fator erodibilidade do solo, C [-] é fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas e LS [-] é o fator topográfico.

A transferência dos sedimentos das minibacias para os cursos d'água é feita através de reservatórios lineares simples e um tempo de retardo, uma vez que os volumes gerados não chegam todos ao mesmo tempo à rede de drenagem. Esse aporte de sedimentos é realizado para cada fração do solo (silte, argila e areia). O material fino (silte e argila) é transportado em suspensão de forma contínua ou intermitente pelo escoamento por meio da equação de difusão-advecção e não é erodido ou depositado na calha do rio. Já as partículas de areia são transportadas no MGB-SED por meio da equação de Exner.

O MGB-SED considera que o volume de sedimentos disponível para erodir é sempre suficiente para suprir a capacidade de transporte do escoamento. Entretanto, para cada passo de tempo computacional do modelo, nem todo déficit (ou excesso) de sedimentos consegue ser convertido em erosão (ou depósito). Assim Buarque (2015) considerou limitadores de erosão e deposição semelhantes àqueles adotados no modelo HEC-RAS. Mais informações sobre o MGB-SED são apresentadas em Buarque (2015) e em Fagundes *et al.* (2017).

O modelo HEC-RAS é um modelo hidrodinâmico que permite realizar simulação do escoamento em regime hidráulico permanente; em regime não permanente, tanto para o escoamento unidimensional (1D), quanto bidimensional (2D); em regime quase não permanente e completamente não permanente do transporte de sedimentos. Para a propagação do escoamento no canal em regime não permanente, o modelo 1D pode utilizar as equações completas de Saint Venant ou simplificações da mesma. As equações de Saint Venant podem ser aproximadas por um esquema implícito de diferenças finitas e resolvidas numericamente usando o método de Newton-Raphson.

Quanto ao módulo de sedimentos, o modelo foi projetado para simular tendências de longo período de erosão e deposição no canal que pode ser resultante da modificação da frequência e duração das descargas líquidas e do armazenamento, ou modificações na geometria do canal. Esse sistema pode ser usado, por exemplo, para estimar as máximas taxas de erosão durante eventos de cheias e avaliar a sedimentação em canais fixos.



A versão do HEC-RAS 5.0.3 possui grande versatilidade, com várias configurações disponíveis para cálculo do transporte de sedimentos. Dentre essas, é possível: considerar uma camada fixa de sedimentos em seções transversais de interesse; incluir séries históricas de temperatura da água; inserir uma concentração de sedimentos em uma seção de montante ou calcular com base nas características do canal; calcular a capacidade de transporte do escoamento por diferentes formulações e as velocidades de queda das partículas por diferentes formulações. A propagação dos sedimentos de leito no canal é feita utilizando a equação de Exner e a equação completa de Advecção-Difusão é utilizada para a propagação dos sedimentos em suspensão.

O modelo possui ainda duas abordagens para análise do transporte de sedimentos: Fluxo semi-não-permanente e fluxo não-permanente, em que cada uma dessas abordagens possui vantagens e desvantagens, principalmente relacionadas a estabilidade numérica da simulação, com conservação de massa apenas para a segunda abordagem. É possível estabelecer profundidades máximas em que o leito pode ser erodido e a forma com que essa erosão irá ocorrer, bem como os limites laterais da seção transversal que poderão sofrer com processos erosivos, além de definir uma curva granulométrica dos sedimentos e critérios de deposição.

O HEC-RAS 5.0.3 apresenta um acoplamento *online* com seu módulo hidráulico, atualizando a geometria do canal a cada passo de tempo e dois métodos de propagação: um mais simples (*quasi-unsteady*) e outro mais complexo (*unsteady*). O HEC-RAS foi rodado na opção unidimensional (1D).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende um trecho do rio Doce, destacado em azul escuro na Figura 1, de aproximadamente 100 quilômetros, localizado na região média da bacia, entre as estações fluviométricas Governador Valadares (GV) e Resplendor (representadas por pontos verdes no mapa). Este trecho do Rio Doce apresenta uma declividade média de 54 cm/km, sendo a cota na seção de jusante de 88 metros, e a de montante de 142 metros. Em todas as simulações realizadas, considerou-se um período de simulação de 2 anos e 1 mês: de 01/12/1998 a 31/12/2000.



Figura 1 – Área de Estudo

A partir do estudo de Fagundes *et al.* (2017) foram adquiridos dados diários de vazões e de concentração de sedimentos para as estações fluviométricas, estimados pelo modelo MGB-SED. Os dados da estação GV foram utilizados como condição de contorno de montante no HEC-RAS 5.0.3, sendo os mesmos propagados para jusante até a estação de Resplendor, fazendo assim um acoplamento off-line desse com o MGB-SED. Na Figura 2, observa-se as séries de vazões e de sedimentos gerados pelo MGB-SED e utilizadas como dado de entrada de montante no HEC-RAS 5.0.3 para a estação GV.

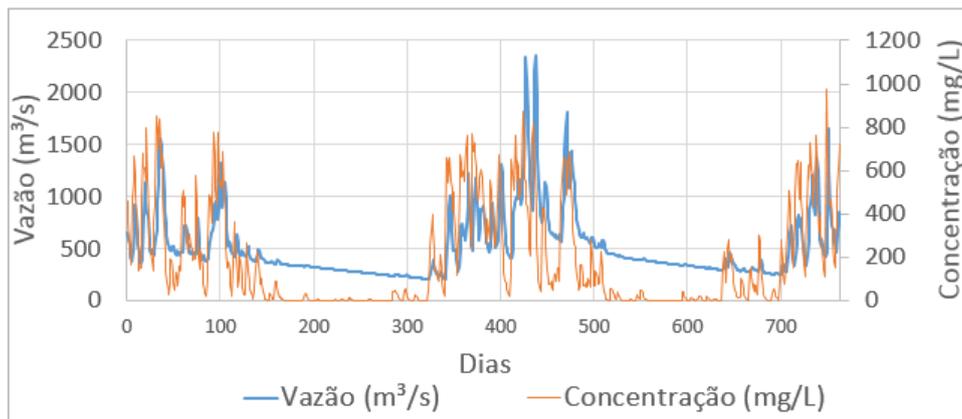


Figura 2 – Hidrograma e Concentração de Sedimentos em Governador Valadares

A simulação com o modelo HEC-RAS foi realizada com diferentes abordagens: duas simulações em regime quase-não-permanente (*quasi-unsteady*) sem contribuições laterais (testes ‘quasi-01’ e ‘quasi-03’) e outra com contribuições laterais (teste ‘quasi-02’); e uma simulação em regime não permanente (teste ‘unsteady’). O regime *quasi-unsteady* é simulado por meio de séries de vazões com uma sequência de cálculos de vazões constantes. Foi utilizado um coeficiente de Manning de 0,035 para o canal e 0,060 nas planícies para todas as simulações e como condição de contorno de jusante, adotou-se a condição do tipo profundidade normal com coeficiente de fricção de 0.001. A diferença entre o teste 01 e o teste 03 é que no primeiro é considerado uma camada de sedimentos no fundo do canal disponível para ser erodida de 3m, o que também foi adotado para os testes 02 e 04. Nas laterais, o máximo que poderia ser erodido seria até próximo as margens, definidas na construção do modelo.

Ainda, utilizou-se a Equação de Yang (1973) como método para estimativa da capacidade de transporte do escoamento. Para regular a capacidade de suprimento de sedimentos do leito para o escoamento, foi utilizado o método de Thomas (EX5), que considera o leito composto por três camadas que formam uma camada independente de material grosso e que assim limita a erosão de camadas profundas. O método de velocidade de queda das partículas utilizado foi o de Ruby. Quanto ao método de propagação dos sedimentos, foi utilizada a equação da continuidade de Exner, assim como no MGB-SED. No que se refere à mudança do leito, o método de deposição considerado foi o de reservatório (*Reservoir option*) e o de erosão foi o *veneer*, que representa a

erosão por meio de um canal formado através dos reservatórios de sedimentos do fundo. Os demais parâmetros foram mantidos com os valores padrões estabelecidos pelo modelo.

4 - RESULTADOS

A partir da metodologia exposta foram geradas séries de concentração de sedimentos (mg/L) para o local da Estação Fluviométrica Resplendor. Uma série foi obtida a partir da utilização do MGB-SED e as demais foram obtidas a partir da utilização do acoplamento MGB-SED - HEC-RAS 5.0.3. Estas séries podem ser comparadas a partir da Figura 3-a, para cada simulação realizada e na Figura 3-b, que é um zoom do gráfico para a área próxima a 450 dias de simulação.

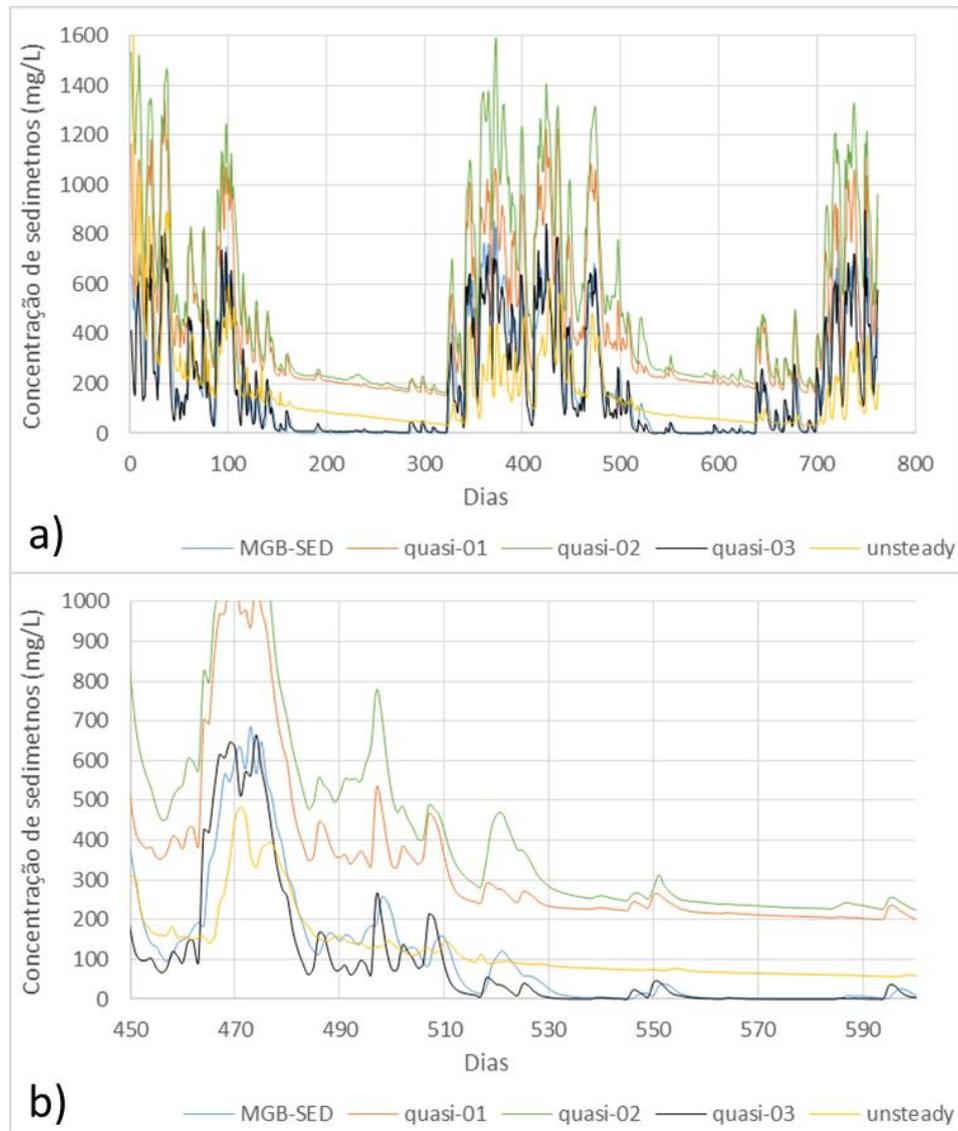


Figura 3 – Comparação entre os Resultados do MGB-SED e HEC-RAS 5.0.3: a) toda o período de simulação; b) zoom gráfico entre o 450º e 600º dia de simulação.



Observa-se boa correlação entre as curvas de concentração de sedimentos, com picos e vales bem representados, entretanto, alguns em magnitudes diferentes, ora com valores superestimados, como no caso dos resultados dos testes 'quasi-01' e 'quasi-02' e subestimados como no teste 'unsteady'. O resultado que melhor se aproximou do resultado do MGB-SED foi o teste 'quasi-03', que não considerou uma camada erodível no fundo do canal. Esse fato demonstra que a forma com que o leito erodível é abordado no HEC-RAS permite com que partículas de silte e argila alcancem a massa líquida e aumente o valor da concentração de sedimentos em suspensão. Destaca-se que as diferenças podem ainda estar relacionadas com outros fatores como simplificações e outros métodos e abordagens utilizados em cada modelo.

As simulações realizadas com o modelo MGB-SED e HEC-RAS 5.0.3 mostram que apesar do primeiro ser um modelo mais simples no que tange a representação dos processos hidráulicos e sedimentológicos de um canal, é possível representar de forma parecida o transporte de sedimentos, principalmente aqueles em suspensão, com um custo computacional menor. Esse fato pode ser observado, principalmente, ao se comparar os resultados do MGB-SED com o teste 03 realizado no HEC-RAS.

Mesmo o HEC-RAS utilizando formulações mais complexas para a propagação de vazão (método *unsteady*), não se pode afirmar nesse estudo que os resultados do transporte de sedimentos são melhores do que aqueles encontrados com formulações mais simples (*quasi-unsteady*), além de toda essa complexidade exigir um tempo de simulação muito maior (75 vezes mais demorado para esse estudo de caso). Apesar disso, observou-se que o HEC-RAS se mostra potencialmente melhor para investigar padrões de erosão e deposição ao longo do trecho, visto que permite a representação de processos mais complexos e melhor detalhamento da geometria do canal, e a definição de camadas erodíveis na seção. Sendo assim, a escolha de um modelo ou outro, ou mesmo a combinação dos dois como foi realizada nesse estudo, deve ser realizada visando atender de forma clara aos objetivos do estudo a ser realizado.

5 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o MGB-SED e com o HEC-RAS no teste quasi-03 permitiram observar que, quanto ao transporte de sedimentos no canal, é possível obter resultados muito similares com os modelos, mesmo que um seja mais simples que o outro. O modelo MGB-SED apresentou menor custo na preparação e menor tempo de simulação. Observou-se ainda que a versão *unsteady* do HEC-RAS demorou 75 vezes mais tempo para realizar a simulação usando a versão *quasi-unsteady*, que usa uma abordagem mais simplificada.

Isso mostra que muitas vezes os resultados oriundos de simulações de transporte de sedimentos (assim como simulações de qualidade d'água) estão mais diretamente relacionados



com os valores adotados para determinados coeficientes do que especificamente com os processos que os modelos poderiam representar.

Os resultados obtidos nesse estudo são preliminares e resultam de uma comparação entre modelos. Para uma análise melhor, deve-se estudar com mais profundidade os métodos e processos considerados em cada modelo e usar dados observados tanto de sedimentos em suspensão como de sedimentos de leito para comparar com os valores simulados.

6 - REFERÊNCIAS

BUARQUE, D. C. *SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS: Estudo de caso do rio Madeira*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COLLISCHONN, W. et al. *The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling*. Hydrological Sciences Journal, v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.

CONROY, W. J. et al. *A coupled upland-erosion and instream hydrodynamic-sediment transport model for evaluating sediment transport in forested watersheds*. Transactions of the ASABE, v. 49, n. 6, p. 1713-1722, 2006.

FAGUNDES, H. O. et al. *Simulação Hidrossedimentológica Preliminar na Bacia do Rio Doce com o Modelo MGB-SED*. In: Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, Foz do Iguaçu.

KIM, J. et al. *Modeling erosion and sedimentation coupled with hydrological and overland flow processes at the watershed scale*. Water Resources Research, v. 49, n. 9, p. 5134-5154, 2013.

PAIVA, R. C. D. et al. *Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling using limited data and a GIS based approach*. Journal of Hydrology (Amsterdam), v. 406, p. 170-181, 2011.

PONTES, P. et al. *MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS*. Environmental Modelling & Software, v. 94, p. 1-20, 2017.

United States Army Corps of Engineers - USACE. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual – Version 5.0*. Davis, California, 2016.

WILLIAMS, J. R. *Sediment – yield prediction with universal equation using runoff energy factor*. In: Proceedings of the sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, 1975.

YANG, C. T. *Incipient motion and sediment transport*. Journal of Hydraulic Engineering. 1973.

ZHANG, W.; XU, Y.; WANG, Y. PENG, H. *Modeling Sediment Transport and River Bed Evolution in River System*. Journal of Clean Energy Technologies, 2014.