

## **COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES EQUAÇÕES DE PERDA DE SOLO EM MODELAGEM DISTRIBUÍDA DE GRANDES BACIAS**

*ALMEIDA, G. P. M.<sup>1</sup>; FÖEGER, B. L.<sup>2</sup> & BUARQUE, D. C.<sup>3</sup>*

**ABSTRACT** – Soil erosion is a determining factor for soil degradation and can cause several changes in the soil, which is why hydrosedimentological studies are increasingly important. Mathematical models have been widely used to understand the dynamics of sediments in watersheds. The MGB-SED is a distributed hydrosedimentological model coupled to the MGB model, which uses the MUSLE equation to calculate sediment production on a daily time scale. In addition to MUSLE, other soil loss equations have potential for these applications. The objective of this work was to compare the performance of the soil loss equations MUSLE, USLE-M and MUST for use in the MGB-SED model modeling, having the Doce River basin as a case study. Results showed that all equations are able to represent the temporal variability of suspended sediments along the Doce River and its sediment dynamics. Despite this, the best statistics were found when using the MUST equation.

**Palavras-Chave** – modelagem de sedimentos, equações de perda de solo, MGB-SED.

### **1 - INTRODUÇÃO**

A erosão é um dos fatores determinantes para a degradação do solo (Wen, 2020). A importância de compreender e estudar a erosão e a degradação a ela associada, se dá devido aos seus possíveis efeitos, como o aumento do transporte de sedimentos e o assoreamento de corpos hídricos (Durães; Mello, 2016).

A realização de estudos hidrossedimentológicos torna-se uma tarefa cada vez mais importante no gerenciamento de bacias hidrográficas, já que as transformações no ambiente podem acelerar a produção e o transporte dos sedimentos. Nas grandes bacias hidrográficas, os processos envolvidos são intensificados com o aumento da área, tornando os problemas relacionados aos sedimentos mais complexos (De Vente *et al.*, 2007; Buarque, 2015). Com isso, os dados de monitoramento como descarga sólida tornam-se essenciais, para um melhor entendimento do que ocorre na bacia.

Buscando auxiliar no uso dos dados monitorados para a compreensão da dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas, os modelos matemáticos têm sido bastante utilizados, permitindo análises espaciais e temporais de modificações de uso da terra (Borges, 2017). Os modelos hidrossedimentológicos vêm sendo uma boa alternativa para avaliar a erosão e o

1) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória, gabriellapassamani@gmail.com, 27 33352853

2) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória, lizandra.bf@gmail.com, 27 33352853

3) Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória, diogo.buarque@gmail.com, 27 33352853

transporte de sedimentos de forma distribuída e contínua. Esses modelos possuem um módulo hidrológico em sua estrutura e utilizam uma equação para o cálculo de perda de solo/produção de sedimentos. Como exemplos de modelos hidrossedimentológicos tem-se o Soil Water Assessment Tool (SWAT, Arnold *et al.*, 1998), o Water Availability in Semi-Arid environments (WASA-SED, Mueller *et al.*, 2010) e o Modelo de Grandes Bacias (MGB-SED, Buarque, 2015). O MGB-SED possui poucos parâmetros, necessita de poucos dados de entrada e teve bons resultados em aplicações como na bacia do rio Madeira (Buarque, 2015), na bacia do rio Doce (Fagundes, 2018; Fagundes *et al.*, 2020) e na bacia Amazônica (Föeger *et al.*, 2019).

A RUSLE (Renard *et al.*, 1997), MUSLE (Williams, 1975), USLE-M (Kinnell e Risse, 1998), MUST (Williams, 1995) e MMF (Morgan *et al.*, 1984) são alguns exemplos de equações utilizadas para estimar a perda de solo/produção de sedimentos. Entre essas equações, as que podem ser utilizadas em um passo de tempo diário, de fácil aplicação e sem a necessidade de muitos parâmetros, tem-se a MUSLE, utilizada em modelos como o SWAT e MGB-SED, a MUST, que pode ser utilizada pelo modelo MGB-SED e a USLE-M, já utilizada no modelo AGNPS.

Observa-se, então, que diversas equações de perda de solo têm potencial para aplicações na modelagem distribuída em grandes bacias (> 1000 km<sup>2</sup>), mas avaliações do uso destas equações para modelagem nessa escala, considerando simulação contínua e com limitação de dados, podem ser consideradas escassas. Neste sentido, este trabalho apresenta uma comparação do desempenho das equações de perda de solo USLE-M, MUST e MUSLE para a modelagem da geração de sedimentos em uma grande bacia com o uso do modelo MGB-SED (Buarque, 2015; Föeger, 2019).

## 2 - ÁREA DE ESTUDO

Para avaliar o uso de diferentes equações para estimativa da geração de sedimentos com o modelo MGB-SED foi considerada a bacia do rio Doce (Figura 1), localizada na região Sudeste do Brasil e com área de drenagem de aproximadamente 86.715 km<sup>2</sup>, sendo 86% pertencente ao Estado de Minas Gerais e 14% ao Estado do Espírito Santo (PIRH, 2010).

O rio Doce é um dos mais importantes do país e sua bacia produz uma grande quantidade de sedimentos. Cerca de 58% da sua área da bacia possui forte susceptibilidade a erosão e 30% uma susceptibilidade média. Apesar de não possuir a maior área de drenagem dentre as bacias brasileiras com grandes fluxos de sedimentos, próximo à sua foz observa-se a maior concentração média de sedimentos em suspensão entre as grandes bacias hidrográficas brasileiras (Lima *et al.*, 2005).

## 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 - MODELO MGB-SED E APLICAÇÃO

O modelo aplicado neste trabalho foi o MGB-SED (Buarque, 2015; Föeger, 2019; Fagundes, 2018), que é um modelo de geração de transporte de sedimentos acoplado ao Modelo Hidrológico

de Grandes Bacias (MGB) (Collischonn, 2001). O MGB é um modelo do tipo chuva-vazão distribuído desenvolvido para grandes bacias hidrográficas, que adota a discretização da bacia em minibacias e o conceito de Unidade de Resposta Hidrológica (Buarque, 2015). A propagação de vazões em rios foi simulada por meio do método Inercial (Pontes *et al.*, 2017). Este estudo adotou o mapa de URHs da América do Sul desenvolvido por Fan *et al.* (2015)



Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.

O MGB-SED utiliza a equação da MUSLE para estimar a geração de sedimentos na bacia. Para este estudo, foi incluída no modelo a opção de simulação da geração de sedimentos pela equação MUST, que é uma adaptação da equação da MUSLE, e USLE-M. Para esta última, foi realizada uma alteração no modelo MGB-SED, inserindo a equação associada a um fator SDR para o cálculo da produção de sedimentos. As equações MUSLE e MUST podem ser escrita de forma geral como:

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

onde *Sed* [t/dia] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo, *Q<sub>sup</sub>* [mm/ha] é o volume de escoamento superficial, *qp* [m<sup>3</sup>/s] é a taxa de pico do escoamento superficial, *A* [ha] é a área superficial, e *K* [0,013.t.m<sup>2</sup>.ha./m<sup>3</sup>.t.cm], *C* [-], *P* [-] e *LS* [-] são os fatores erodibilidade do solo, cobertura e manejo do solo, práticas conservacionistas e topográfico, respectivamente. A MUSLE adota  $\alpha = 11,48$  e  $\beta = 0,56$ , enquanto a MUST considera  $\alpha = 2,5$  e  $\beta = 0,50$ . A USLE-M é dada por:

$$Sed = Q_r \cdot EI_{30} \cdot K_{UM} \cdot C_{UM} \cdot P_{UM} \cdot LS \cdot SDR \quad (2)$$

onde *K<sub>um</sub>* [t.h.ha<sup>-1</sup>.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>], *C<sub>um</sub>* [-] e *P<sub>um</sub>* [-] são os fatores erodibilidade do solo, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas, respectivamente, *Q<sub>r</sub>* [-] é o coeficiente de escoamento dado pela relação *Q<sub>e</sub>/P<sub>e</sub>*, sendo *Q<sub>e</sub>* [mm] o escoamento superficial e *P<sub>e</sub>* [mm] a precipitação, *EI<sub>30</sub>* é o fator de Erosividade, onde *E* [MJ/ha], é a energia cinética da chuva e *I30* [mm/h] o índice de intensidade máxima da chuva com duração de 30 minutos.

O módulo hidrológico foi calibrado no período entre 1990 a 2014 e validado no período de 1970 a 1989, e para analisar a eficiência na calibração foram utilizadas 3 estatísticas de desempenho de modelo: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos (ENSLog); e erro relativo de volume total (PBIAS) dos hidrogramas. No módulo de sedimentos não foi realizada calibração a fim de analisar qual das equações propostas apresentaria um melhor resultado sem interferência de calibração. Para uma avaliação da eficiência deste módulo foram considerados os parâmetros estatísticos: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro de volume (PBIAS).

### 3.2 - DADOS UTILIZADOS

O MDE utilizado para a discretização da bacia foi o do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), disponibilizado pelo Grupo Consultivo sobre Pesquisa Agrícola Internacional, com resolução espacial de 90 metros. Para a simulação hidrológica foram utilizados dados diários de chuva e vazão da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo 101 estações pluviométricas e 62 fluviométricas com dados no período de 1970 a 2014. Também foram utilizados dados de clima de 9 estações provenientes do INMET (normais climatológicas) no período de 1970 a 2014. Para a modelagem de sedimentos, foram utilizadas 26 estações (Figura 1) de monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) da ANA, possuindo média de quatro medições anuais com dados no período de 1990 a 2014, e a estação Fazenda Ouro Fino (Figura 1), cujos dados foram fornecidos pela Companhia de Energia de Minas Gerais (CEMIG), contendo uma medição diária durante a estação chuvosa e de quatro a dez medições nos meses da estação seca e com dados no período de 1990 a 2012.

Os valores de porcentagens de argila, silte, areia e carbono orgânico utilizados para calcular o parâmetro  $K$ , bem como os valores dos parâmetros  $P$  e  $C$  da MUSLE e MUST foram os mesmos adotado por Fagundes et al., 2020. Os parâmetros  $K_{UM}$  e  $C_{UM}$  da USLE-M foram estimados seguindo proposta de Kinnell e Risse (1998). Como o modelo trabalha com passo de tempo diário, a erosividade diária da chuva foi estimada seguindo metodologia proposta por Richardson *et al.* (1983) a partir de dados de chuva da ANA, e o SDR conforme proposto por Lenhart *et al.* (2005).

## 4 - RESULTADOS

Os resultados do módulo hidrológico mostraram um comportamento similar entre dados observados e simulados e valores altos dos coeficientes estatísticos, considerando-os como satisfatórios. Foram gerados resultados diários de concentrações de sólidos suspensos (CSS) e descargas sólidas (DS) obtidos com as equações MUSLE, MUST e USLE-M, para as 27 estações selecionadas. Na análise estatística, para os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), foram considerados satisfatórios os ajustes com valores acima de 0,50. Para o PBIAS, foram considerados satisfatórios as estações com erro menor que 60,0.

Na simulação com a equação da MUSLE, 33,3% das estações obteve  $R^2$  acima de 0,50 para CSS e para as DS esse percentual foi de 66,7%. Com a MUST esse percentual foi de 26,0% para CSS e de 70,4% para DS, enquanto que com a USLE-M, foi 29,6% para CSS e 59,3% para DS. As estatísticas do coeficiente de Pearson apresentaram resultados melhores. Tanto para a MUSLE, como para a MUST, 63,0 % das estações apresentaram ajustes satisfatórios para CSS. Para a DS, os percentuais foram de 77,8% com a MUST e de 67% com a MUSLE. Com a USLE-M, cerca de 55,6 % das estações apresentaram resultados satisfatórios para CSS e 70,4 % para DS.

A avaliação dos resultados para o coeficiente PBIAS mostrou que, na MUSLE, ao analisar CSS, quase 52% das estações apresentaram ajustes satisfatórios e, para as DS, 44,4%. Com a MUST, 74,1 % das estações com valores de ajustes considerados satisfatórios para as duas variáveis. Com USLE-M apenas 18,52 % das estações com valores satisfatórios para o ajuste de CSS e 26,00% para a DS.

Como exemplo, nas Figura 2 e Figura 3 são apresentados os valores de CSS observadas e simuladas pelo modelo MGB-SED. Verifica-se que os resultados das DS simuladas apresentaram um melhor ajuste dos resultados do modelo com os dados observados do que os resultados de CSS, o que pode ser explicado pela diluição da desta com a vazão. Os resultados obtidos com a equação da MUSLE apresentaram valores maiores que os dados observados. Já a USLE-M tendeu a subestimar os valores observados. A MUST não apresentou um comportamento padrão.

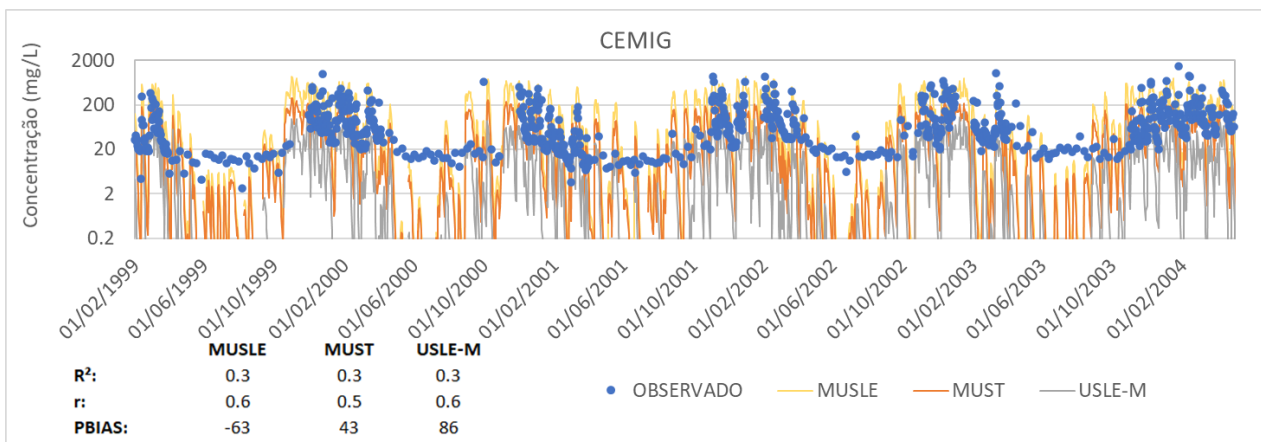


Figura 2 – Comparação entre as CSS observadas e simuladas na estação da CEMIG.

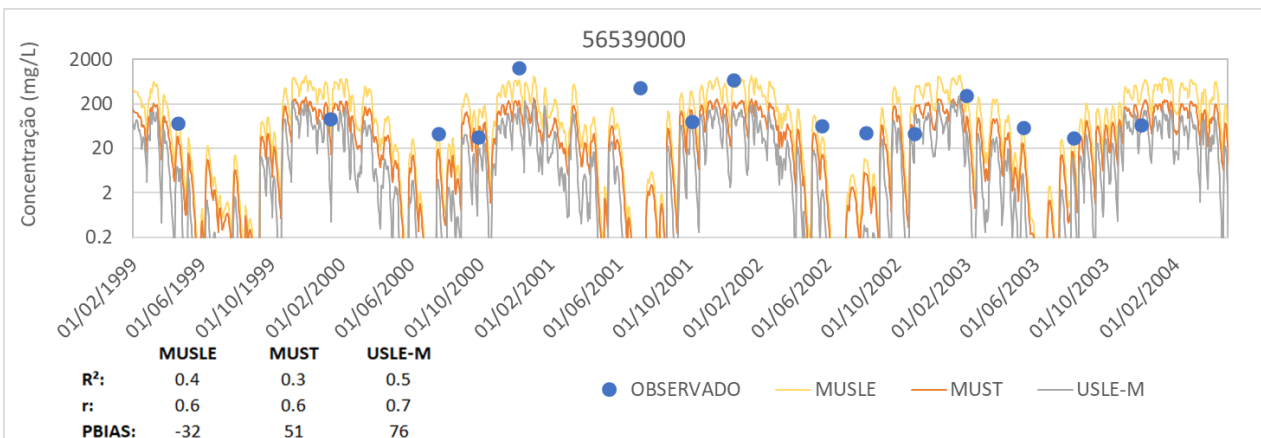


Figura 3 – Comparação entre as CSS observadas e simuladas na estação da 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante).

Da Figura 4-a a Figura 6-a são representadas as distribuições espaciais das Sed específicas (t/ano/km<sup>2</sup>) geradas em cada minibacia e lançada à rede de drenagem, enquanto que da Figura 4-b a Figura 6-b são apresentadas as distribuições espaciais das DSS transportadas pelos rios.

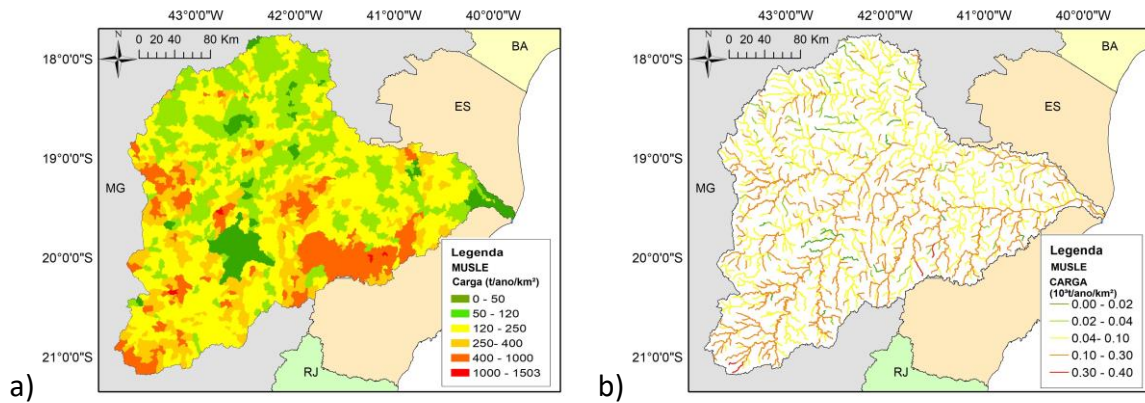


Figura 4 – Simulação com a MUSLE: (a) Sed média anual específica por minibacia (b) DSS média anual específica por trecho de rio

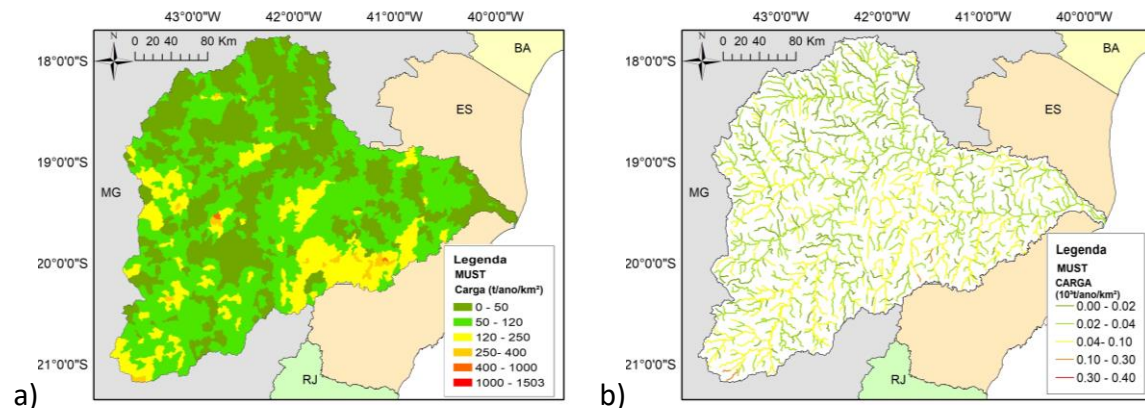


Figura 5 – Simulação com a MUST: a) Sed média anual específica por minibacia (b) DSS média anual específica por trecho de rio

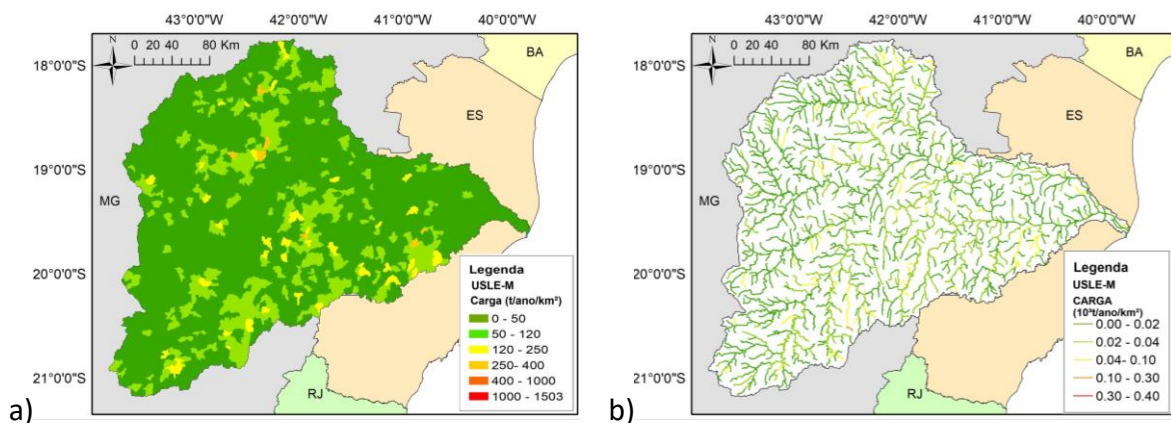


Figura 6 – Simulação com a USLE-M: a) Sed média anual específica por minibacia (b) DSS média anual específica por trecho de rio

Os resultados nas estações avaliadas indicaram uma boa concordância entre as simulações e as observações de CSS com as equações avaliadas, mostrando potencial para representar a dinâmica temporal dos sedimentos. Porém, no período seco o modelo tende a não manter uma concentração residual nos rios (ver Figuras 3 e 4), as quais são devidos a processos como ressuspensão, erosão de margens e outros não representados nesta modelagem.

Apesar da diferença de valores, o comportamento dos resultados do modelo com as três equações foi similar, geralmente com os mesmos locais de maior produção de sedimentos, como na região próxima ao rio Caratinga. Esses resultados encontrados foram semelhantes aos apresentados por Fagundes et al. (2020), onde os maiores valores de produção de sedimentos específica ocorreram predominantemente nas bacias do rio Piracicaba, Caratinga e Suaçuí Grande. No entanto, uma calibração do módulo de sedimentos com as equações testadas permitirá uma melhor avaliação dos resultados, especialmente de forma distribuída na bacia.

## 5 - CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que a MUSLE tende a superestimar a produção de sedimentos, a USLE-M a subestimar os mesmos, e a MUST não apresentou um padrão definido, ora subestimando, ora superestimando esses valores. A USLE-M subestimou principalmente os valores mais baixos, estimando-os próximos de zero.

Numa avaliação global, baseada nos indicadores estatísticos estudados, os resultados encontrados pela MUST apresentaram melhor desempenho quando comparado aos modelos MUSLE e USLE-M. Apesar dessa diferença entre as equações, todas elas foram capazes de representar a variabilidade temporal dos sedimentos em suspensão ao longo do rio Doce e a sua dinâmica de sedimentos. No entanto, considerando que a diferença entre a MUSLE e a MUST está nos valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , uma calibração destes parâmetros (Fagundes et al., 2020) poderá melhorar os resultados, bem como calibração do SDR da USLE-M, o será a próxima etapa deste estudo.

**AGRADECIMENTOS** a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo - FAPES pelo apoio financeiro a este trabalho.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUARQUE, D. C. Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira. Tese. 2015.

COLLICHONN, W.; TUCCI, C. E. Simulação Hidrológica de grandes bacias. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 6, pp. 15-35. 2001.

DE VENTE, J.; POESEN, J.; ARABKHEDRI, M.; VERSTRAETEN, G. 2007. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography*. 2007.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Distribuição Espacial da Erosão Potencial e Atual do Solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.21 n.4. 677-685. 2016.

FAGUNDES, H. O. Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto. Porto Alegre, 2018.

FAGUNDES, H.O.; PAIVA, R. C. D. P.; FAN, F. F.; BUARQUE, D.C.; ANDRADE, A.C.S.A. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. *Catena*. 2020.

FOEGER, L. B. Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com propagação inercial de vazão: estudo de caso da bacia do rio madeira. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2019.

KINNELL, P.I.A.; RISSE, L.M. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *American Soil Science Society Journal*, 62, 1662–1672. 1998.

LENHART. T.; VAN ROMPAEY. A.; STEEGEN, A.; FOHRER, N.; FREDE. H-G. AND GOVERS, G. Considering spatial distribution and deposition of sediment in lumped and semi-distributed models. *Hydrol. Process*. 19, 785-794. 2005.

LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, N. DE O.; VIEIRA, M. R.; SILVA, E. M. Suspended Sediment Fluxes in the Large River Basins of Brazil. 291. IAHS-AISH Publication, pp. 355e363, 2005.

MORGAN, R.P.C.; MORGAN, D.D.V.; FINNEY, H.J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *J. Agric. Eng. Res*. 1984.

MUELLER, E. N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE G. Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model. *Geoscientific Model Development*, v. 3, n. 1, p. 275-291, 2010.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro 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.

PIRH. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Relatório Final-Volume I. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.

RICHARDSON, C. W.; FOSTER, G. R.; WRIGHT, D.A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. *Soil and Water Division of ASAE*. 1983.

WEN, X.; ZHEN, L. Soil Erosion Control Practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review. *Environmental Development*. 2020. ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.;

WILLIAMS, J. R. Chapter 25. The EPIC Model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. p. 909-1000, 1995.

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.

WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment – part 1: model development. *Water Resour. Assoc*. 1998.