

AVALIAÇÃO DE PERDA DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JUNDIAÍ

Palavras-Chave: Perda de Solo, MUSLE, Calibração

Autores/as:

Mateus Guilherme Vivarelli, FECFAU, UNICAMP

Prof. Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim (orientador), FECFAU, UNICAMP

Luis Fernando Murillo Bermúdez, FECFAU, UNICAMP

Introdução

O transporte de sedimentos em ambientes fluviais constitui um dos principais desafios na gestão sustentável dos recursos hídricos, com implicações diretas sobre a qualidade da água, a vida útil de reservatórios, a navegabilidade de rios e a ocorrência de enchentes.

Em regiões com uso intensivo do solo e elevada variabilidade pluviométrica, como muitas bacias hidrográficas brasileiras, o processo de erosão e consequente aporte de sedimentos aos corpos d'água tende a se intensificar. Neste contexto, o desenvolvimento e a aplicação de modelos hidrossedimentológicos tornam-se fundamentais para subsidiar ações de planejamento territorial, conservação do solo e recuperação ambiental.

Para a obtenção de perdas do solo é possível usar distintos métodos, entre eles está a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) que pode ser escrita na forma $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$, onde A é a quantidade de solo erodida (t/ano), R e K são fatores relacionados às chuvas e erodibilidade do local estudado, LS é relacionado à declividade e C e P ao uso do solo (Wischmeier, 1959).

A USLE possui duas versões mais atualizadas, a versão revisada (RUSLE) e a modificada (MUSLE). A principal diferença entre as duas está no período em que analisam a perda de solo: enquanto a equação RUSLE se baseia em perdas de solo anuais (Renard et al., 1997), a versão modificada estuda as perdas em eventos específicos de chuva (Williams, 1975).

A equação MUSLE apresenta ampla difusão, exemplo disso podem ser nomeamos nos estudos realizados em Aracruz, ES (Avanzi et al., 2008); na bacia do Rio Cunha, SC (Hoppen, E.; Salvador, C.; Michel, G., 2019) no Brasil; e no rio Tekeze, na Etiópia (Reda, Y.; Moges, A.; Kendie, H., 2024); e na bacia de Krueng Peuto, na Indonésia (Azmeri et al, 2024).

Na equação MUSLE, o fator relacionado às chuvas deve ser calibrado de acordo com a localização do estudo; dessa maneira, são utilizados dados hidrossedimentológicos e pluviiais locais para ajustar a equação. Assim, é necessário calcular os fatores α e β de acordo com condições fisiográficas e hidrológicas das bacias, uma vez que são fatores muito variáveis (Sadeghi et al., 2007; Chaves, 2010). Com esses fatores inadequados, a equação modificada pode levar a estimativas grosseiramente errôneas do aporte de sedimentos.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar a perda do solo usando a MUSLE e verificar a necessidade de calibração dos parâmetros da equação no intuito de estimativas mais precisas quando comparadas com dados observados.

Metodologia

Para a calibração inicial, feita com a região alta do rio Jundiaí, a bacia hidrográfica foi delimitada a partir do ponto de monitoramento hidrossedimentológico (Figura 1) onde foram obtidos valores de descarga líquida (Q) e sólida em suspensão (DSS) a partir de dados de turbidez para 17 eventos de chuva entre 2018 e 2020 (Murillo-Bermúdez et al. 2021; Murillo-Bermúdez e Sotero; 2022).

A equação da MUSLE é apresentada no Eq. (1) a seguir:

$$Y = \alpha \cdot (D \cdot qp)^\beta \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde: Y é a produção de sedimentos em determinado evento (unidade: t); α e β são coeficientes de ajuste do modelo (adimensionais); D é o volume de escoamento superficial do evento (m³); qp é a vazão de pico do evento (m³ s⁻¹); K é a erodibilidade média dos solos da bacia (t h MJ⁻¹ mm⁻¹); LS é fator de comprimento de rampa e declividade das vertentes da bacia (adimensional); C é o fator médio de uso e manejo do solo da bacia (adimensional); e P é o fator de práticas conservacionistas (adimensional).

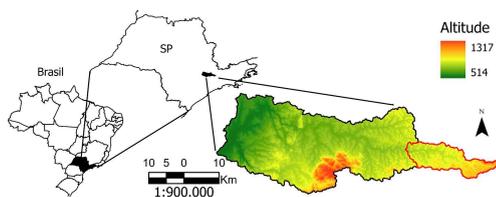


Figura 1: Mapa de localização da bacia do rio Jundiá, com a parte alta delimitada em vermelho.

Para o cálculo do fator LS, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*) e o Sistema para Análises Geocientíficas Automatizadas (*System for Automated Geoscientific Analyses - SAGA*) no software QGIS, que calcula o fator LS com base no método de Moore (Moore et al., 1991).

Para obter os coeficientes K e C , foram utilizados mapas pedológicos e de uso de solo apresentados no Plano de Bacias (Consórcio Profill-Rhama, 2020) comparados com referências bibliográficas anteriores sobre estudos hidrossedimentológicos que usam estes fatores. O coeficiente P , ligado a ações de conservação, foi considerado 1 ao longo de toda a bacia devido a ausência de zonas ativas de preservação na região.

Para os valores de D e Qp , foram usados os dados do Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo, escolhendo 17 eventos de altas precipitações entre 2018 e 2020. A partir destes dados foi possível realizar a calibração dos parâmetros (α) e (β) comparando os valores estimados pela MUSLE com observações de DSS medida durante os eventos analisados.

Com a mesma abordagem da MUSLE, estimou-se a perda do solo na totalidade da bacia do Jundiá, usando como parâmetros (α) e (β) da equação três formas distintas: os valores originais propostos por (Williams, 1975), parâmetros calibrados para a parte alta do rio Jundiá e parâmetros calibrados a partir da comparação com os valores observados de 10 medições de DSS. Destaca-se que estas medições

foram realizadas com amostradores manuais e não monitoram completamente os eventos, desta forma, foi implementada uma curva chave de sedimentos para estimar os valores de DSS para cada intervalo de tempo.

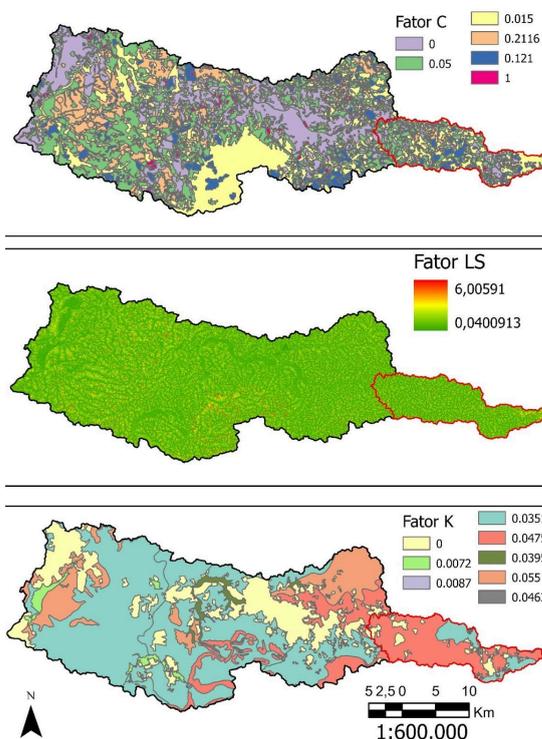


Figura 2: Fator C, LS e K para a bacia do rio Jundiá, com a parte alta delimitada em vermelho.

Resultados e Discussão

A partir dos dados de D e qp de cada um dos eventos selecionados e da relação entre a descarga sólida em suspensão e a média dos fatores da equação MUSLE foram obtidos os coeficientes calibrados. Um resumo dos parâmetros usados para o cálculo da perda de solo com os coeficientes originais e calibrados é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores médios usados para a aplicação da MUSLE no Alto Jundiá

| Fatores | Originais | Calibrados |
|----------|-----------|------------|
| α | 11,8 | 0,277 |
| β | 0,56 | 0,807 |
| K | | 0,031 |
| LS | | 0,536 |
| C | | 0,267 |
| P | | 1,000 |

Na Figura 3 são apresentadas as perdas de sedimentos observadas e simuladas com o método MUSLE com os coeficientes propostos originalmente e calibrados para a bacia analisada, evidencia-se que o processo de calibração contribuiu em resultados mais próximos estatisticamente do que a produção de sedimentos sem a calibração.

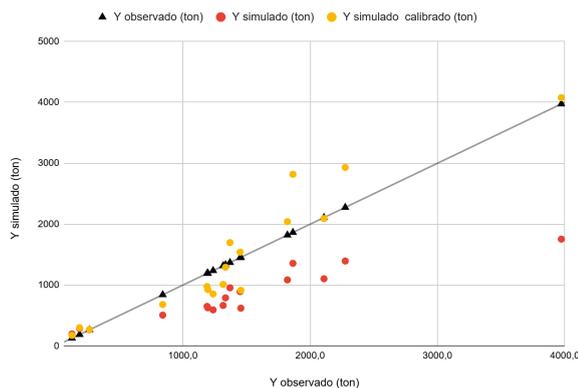


Figura 3: Relação entre a produção de sedimentos simulada e observada para a parte alta do rio Jundiá.

Em função dos dados dos eventos da bacia do Jundiá não apresentarem eventos bem definidos, a calibração calculada resultou em coeficientes fora dos intervalos esperados; assim, foi criada uma última calibração utilizando os melhores parâmetros dentro do intervalo esperado para os coeficientes α e β . As calibrações obtidas estão obtidas na Tabela 4.

Tabela 2: Fatores médios usados para a aplicação da MUSLE no Jundiá

| Fatores | Originais | Calibração Alto Jundiá | Calibração Jundiá |
|----------|-----------|------------------------|-------------------|
| α | 11,8 | 0,277 | 0,0385 |
| β | 0,56 | 0,807 | 0,8 |
| K | | 0,033 | |
| LS | | 0,544 | |
| C | | 0,114 | |
| P | | 1,000 | |

A Figura 4 mostra as perdas de sedimentos calculadas para a bacia do Jundiá com diferentes parâmetros da equação MUSLE: os fatores originais, a calibração para o alto do Jundiá e a calibração para a totalidade da bacia.

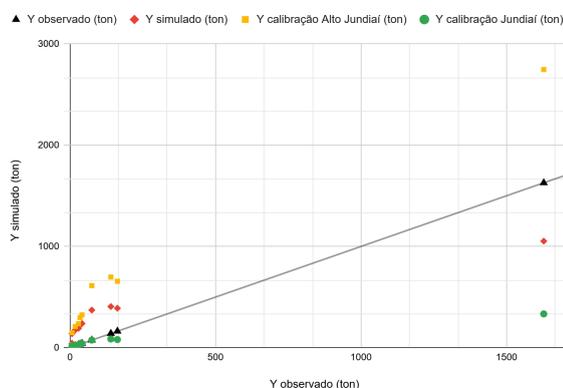


Figura 4: Relação entre a produção de sedimentos simulada e observada para o rio Jundiá.

A calibração final realizada para a totalidade da bacia do rio Jundiá, ajustada com base nos intervalos esperados para os coeficientes α e β , apresentou resultados mais condizentes com os padrões da literatura e com os processos erosivos observados na região. Embora os dados de campo disponíveis não tenham permitido um monitoramento completo dos eventos de chuva, a adaptação dos coeficientes possibilitaram simulações mais coerentes com a dinâmica hidrossedimentológica da bacia.

Mesmo assim, percebe-se que o desvio do simulado com o observado é maior do que o encontrado no alto do Jundiá, e que o aumento da área estudada torna o comportamento hidrossedimentológico mais complexo, diminuindo a precisão do método MUSLE devido à simplificação das características em fatores médios para o cálculo do resultado.

Conclusões

A aplicação da equação MUSLE na bacia hidrográfica do rio Jundiá evidenciou a importância da calibração dos parâmetros α e β para estimativas mais realistas da produção de sedimentos. Os resultados mostraram que o uso dos coeficientes originais propostos por Williams (1975) gerou discrepâncias significativas em relação aos dados observados, enquanto os valores calibrados, especialmente para o alto Jundiá, proporcionaram estimativas mais próximas da realidade hidrossedimentológica local.

A ampliação da análise para a totalidade da bacia demonstrou desafios adicionais, sobretudo pela qualidade e abrangência dos dados disponíveis, além da existência de diversos pontos de represamento de sedimentos, como barramentos, criando locais de deposição (desconexão) de sedimentos. A equação MUSLE não incorpora estas dinâmicas, sendo uma limitação importante desta abordagem e do próprio processo de calibração.

Os resultados obtidos demonstram a importância fundamental da calibração dos coeficientes da equação MUSLE para a estimativa mais precisa da produção de sedimentos. Mesmo com os parâmetros calibrados, evidencia-se a complexidade do comportamento hidrossedimentológico relacionada aos erros apresentados em ambos locais de estudo.

Dessa forma, conclui-se que, sempre que possível, deve-se priorizar a coleta de dados hidrossedimentológicos locais para a calibração dos modelos, uma vez que o uso exclusivo de parâmetros generalizados pode comprometer a acurácia das estimativas de perda de solo e de produção de sedimentos.

Referências bibliográficas

AVANZI, J. C.; et al. 2008 Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 6, p. 563-569. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000600001>. Acesso em: janeiro de 2025.

AZMERI, et al. 2024. Interphase modeling of sedimentation rate using the GIS-based modified universal soil loss equation. *Applied Geomatics*, v. 16, p. 1057–1068. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12518-024-00599-y>. Acesso em: janeiro de 2025.

CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA. Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2020 a 2035: Relatório Final. Piracicaba (SP), 712 P, 2020.

HOPPEN, E.; SALVADOR, C.; MICHEL, G. 2019. Aplicação da MUSLE considerando diferentes métodos de cálculo do fator topográfico LS. In: XXIII SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5833>. Acesso em: janeiro de 2025.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991. DOI: 10.1002/hyp.3360050103.

MURILLO-BERMÚDEZ, L. F., MARTIM, A. L. S. S., POLETO, C., & FILHO, J. G. D. (2021). Correlation of turbidity and suspended sediment concentration in natural water flow using alternative data of water treatment plant, case of study in the upper Jundiá river, Brazil. *International Journal of River Basin Management*, 21(2), 233–241. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1961794>

MURILLO-BERMÚDEZ, L. F. M., & MARTIN, A. L. S. S. (2022). Avaliação qualitativa do efeito de histereses entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão no rio Jundiá, SP. *Proceedings Of...*, 56–60. <https://doi.org/10.20396/iwisdw.n1.2022.4793>

REDA, Y.; MOGES, A.; KENDIE, H. 2024. Application of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the prediction of sediment yield in Agewmariam experimental watershed, Tekeze River basin, Northern Ethiopia. *Heliyon*, v. 10, n. 15, e35052. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35052>. Acesso em: janeiro de 2025.

RENARD, K. G. et al. 1997. Predicting soil erosion by

water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, DC: United States Government Printing,

RUBIANO, C., HENRIQUE, & ANA PAULA CAMELO. (2011). Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 1431–1439. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000400037>.

SADEGHU, S. H. R., GHOLAMI, L., DARVISHAN, A. K., & SAEIDI, P. (2014). A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 365-375. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.866239>

WISCHMEIER, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a Universal Soil Equation. *Proceedings Soil Science Society of America*, Madison, v. 23, p. 246-249.

WILLIAMS, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Washington, DC: ARS-S, Southern Region, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture. v. 40, p. 244.