

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE USO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS DIARIOS NA ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTO EM TALUDES DE PILHAS DE ESTÉRIL COM DIFERENTES ABATIMENTOS DE TALUDE

*Bibiana Niederauer Soares¹; Keila Cristina Fernandes de Oliveira Dourado²; Francisco Antunes
Guimarães Rodrigues³; André Ferreira Rodrigues⁴.*

Abstract: This study evaluated the impact of rainfall data temporal resolution on sediment yield estimates in waste rock pile slopes using the RUSLE model. Two data sets were considered: daily series from two nearby stations located in a mining area in the Quadrilátero Ferrífero, and 10-minute interval data from station 314480502A (CEMADEN). The study area included 10 m high slopes with three typical slope geometries: 1V:1H, 1V:1.5H, and 1V:2H. RUSLE parameters were defined based on regional data and technical literature. The K factor was derived from Ferreira (2025), LS was calculated using Morgan's equation (2005), and R was estimated via the EI₃₀ rainfall erosivity index, using empirical equations calibrated for Sete Lagoas (MG). Results showed that using high-resolution rainfall data (10 min) led to sediment yield estimates approximately 32% higher than those using daily data. Additionally, flatter slopes (1V:2H) reduced sediment yield by up to 5% compared to steeper ones (1V:1H). These findings highlight the importance of detailed rainfall monitoring and the use of less steep slopes as effective erosion control strategies in mining waste pile design.

Resumo: Este estudo avaliou o impacto da resolução temporal dos dados pluviométricos na estimativa da produção de sedimentos em taludes de pilhas de estéril utilizando a equação RUSLE. Foram considerados dois conjuntos de dados: séries diárias de duas estações próximas, localizadas em área de mineração localizada no quadrilátero ferrífero, e dados com resolução de 10 minutos da

1) Bibiana Niederauer Soares, (55) 99956-7811, Bibianans@gmail.com

2) Keila Cristina Fernandes de Oliveira Dourado, Keila.oliveira@vale.com

3) Francisco Antunes Guimarães Rodrigues, Francisco.rodrigues@progen.com.br

4) André Ferreira Rodrigues, Afrodigues@chr.ufmg.br

estação 314480502A, disponibilizados pelo CEMADEN. A área de estudo considerou taludes com alturas de 10 m e três geometrias típicas de abatimento: 1V:1H, 1V:1,5H e 1V:2H. Os fatores da equação RUSLE foram definidos conforme dados regionais e literatura técnica, sendo adotado o valor de K obtido por Ferreira (2025). O fator LS foi calculado com base na equação de Morgan (2005), e o fator R foi estimado por meio do índice de erosividade EI_{30} , utilizando equações ajustadas para a região de Sete Lagoas (MG). Os resultados mostraram que os dados com maior resolução temporal (10 min) resultaram em estimativas de perda de solo cerca de 32% superiores às obtidas com dados diários. Também se observou que geometrias com menor declividade (1V:2H) reduziram a produção de sedimento em até 5% em comparação a taludes mais íngremes (1V:1H). Os resultados reforçam a importância do uso de dados pluviométricos detalhados e da adoção de taludes com menor inclinação em projetos de controle de erosão em áreas mineradas.

Palavras-Chave – erosividade da chuva, pilha de estéril, RUSLE.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é um dos principais processos de degradação do solo, especialmente em áreas mineradas, onde grandes volumes de material inconsolidado são expostos à ação das chuvas. A Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE (Renard et al., 1997) é amplamente utilizada na estimativa da perda de solo por erosão, sendo aplicada em diversas escalas espaciais. Todavia, esta metodologia é feita e amplamente difundida para áreas agrícolas e escala de bacias hidrográficas, tendo pouco, ou quase nenhuma aplicação, em pequenas bacias minerárias. A simplicidade do modelo RUSLE, bem como a clareza dos parâmetros, torna-o interessante para aplicação e planejamento de processos erosivos e transporte de sedimentos em áreas minerárias, principalmente quando pilhas de estéril estão envolvidas. Porém, antes de sua transferência de áreas agrícolas para áreas minerárias, deve-se avaliar a sensibilidade das variáveis da equação às novas condições. Neste sentido, o presente estudo busca avaliar o impacto da resolução temporal dos dados pluviométricos na estimativa da produção de sedimentos em taludes de pilhas de estéril, utilizando como base a equação RUSLE.

Hoje diversos estudos apontam como o uso de dados pluviométricos com uma maior resolução temporal são impactantes nas avaliações de produção de sedimento. Estudos como o de Piccarreta, Lazzari e Bentivenga (2024) concluem que dados com resolução inferior a 10 min são essenciais para estimativas acuradas de erosividade. Segundo Fischer, Winterrath e Auerswald (2018), trazem que a

estimativa de perda de solo é subestimada consideravelmente quando se usa dados pluviométricos que tenham seu intervalo de tempo maiores que 30 minutos. Ademais, pesquisas como a Sodnomdarjaa et al. (2023) identificaram que erosividade da chuva foi identificada como o fator mais dominante na erosão do solo nas regiões estudadas, que neste caso incluem áreas de usos diversos, incluindo áreas de mineração. Entretanto, em sua grande parte, estes estudos não são aplicados a áreas minerárias. Deste modo, a fim de avaliar o impacto das diferentes resoluções disponíveis, e tendo em vista a disponibilidade de dados do material de pilha de estéril (FERREIRA, 2025), considerando a geometria taludes típicos de pilhas de estéril: 1V:1H, 1V:1,5H e 1V:2H, buscamos avaliar quanto este refinamento na resolução temporal dos dados pluviométricos pode impactar nos valores de produção de sedimento nas áreas de mineração. Além disto outro ponto avaliado se refere as conformações de abatimentos típicos dos taludes e seus impactos na produção de sedimento.

Para isso, foram considerados dois conjuntos distintos de dados pluviométricos. O primeiro conjunto foi composto por séries temporais diárias, oriundas das estações pluviométricas localizadas em área de mineração localizadas no quadrilátero ferrífero. O segundo conjunto corresponde aos dados de alta resolução (monitoramento a cada 10 minutos) obtidos da estação 314480502A, operada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN. A comparação entre essas diferentes resoluções temporais permitiu avaliar a sensibilidade da equação RUSLE ao detalhamento dos dados de precipitação. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o impacto de diferentes resoluções temporais no monitoramento da precipitação na produção de sedimentos em taludes de pilha de estéril, fornecendo, assim, subsídios e informações sobre a necessidade da instalação ou aprimoramento do sistema de monitoramento para o devido planejamento dos processos hidrosedimentológicos em áreas de mineração.

METODOLOGIA

A estimativa da produção de sedimento foi realizada por meio da RUSLE (t/ha·ano) (Renard et al., 1997) (1), onde os parâmetros de: fator de cobertura do solo (C) e fator de práticas conservacionistas (P), ambos adimensionais, estão sendo considerados iguais a 1,0 por não haver cobertura vegetal nestas áreas e o estéril se encontrar em sua maioria totalmente expostos as intemperes. Deste modo, se faz necessário discretizar mais três itens da equação de RUSLE.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

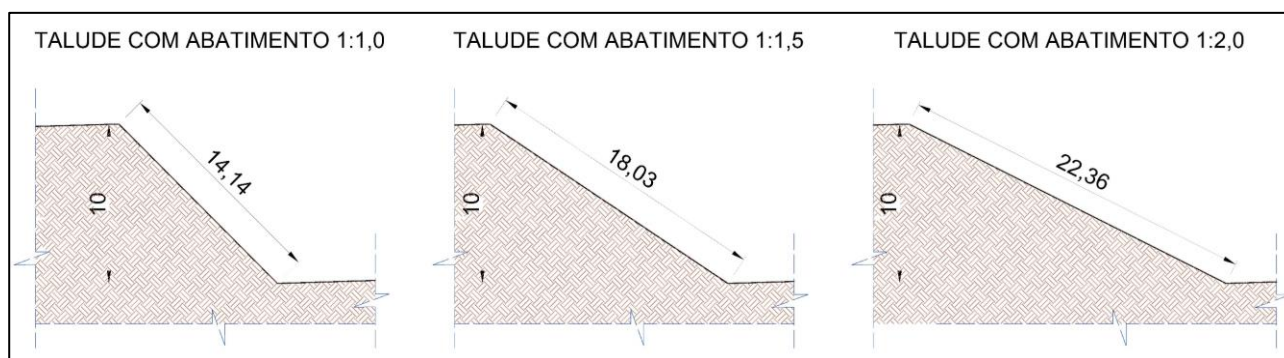
Onde:

- **A** = perda média anual de solo (t/ha·ano);
- **R** = fator de erosividade da chuva (MJ·mm/(ha·h·ano));
- **K** = fator de erodibilidade do solo (t·ha·h/(ha·MJ·mm));
- **LS** = fator topográfico (adimensional);
- **C** = fator de cobertura do solo (adimensional);
- **P** = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Para o fator de erodibilidade do solo (**K**), foi utilizado o valor de 0,0478 ((t·ha·h)/(ha·MJ·mm)) obtido por Ferreira (2025) durante a caracterização do material de pilha de uma unidade minerária da mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Para o fator topográfico (**LS**), adimensional, foi utilizado a equação de Morgan (2005) (2), aplicada a três configurações geométricas de taludes típicos de pilhas de estéril: 1V:1H, 1V:1,5H e 1V:2H, onde foi considerado a altura destes taludes como sendo sempre de 10 m, como conta na. O parâmetro “s” se refere a declividade do talude (m/m). Já o parâmetro “l” retrata o comprimento da rampa (m). As dimensões do talude avaliado se encontram na Figura 1.

Figura 1– variação do abatimento nos taludes avaliados.



$$LS = (22l)0,5 \cdot (0,065 + 0,045s + 0,0065s^2) \quad (2)$$

Por fim, o fator **R** (MJ·mm/(ha·h·ano)) foi obtido a partir do somatório dos dados mensais do índice de erosividade (**El₃₀**), o qual foi calculado para cada dia, assim obtendo-se o fator de erosividade mensal da precipitação observada em cada mês. Foram utilizados os dados pluviométricos de fevereiro de 2015 a outubro de 2021, sendo essas séries temporais as que haviam a consistência no monitoramento e nas informações disponíveis para as três estações avaliadas, sendo

elas: duas estações localizadas em área de mineração localizadas no quadrilátero ferrífero e estação 314480502A (CEMADEN), a qual se encontra próxima a área de estudo.

Para a obtenção do fator de erosividade para os dados da estação 314480502A (CEMADEN), os quais possuem dados pluviométricos monitorados com uma resolução de 10 minutos, foram utilizadas as equações apresentadas por Alves et al. (2022) para o cálculo da erosividade diária da chuva (EI_{30}). O processo envolveu as seguintes etapas, onde inicialmente, determinou-se a energia cinética por milímetro de chuva em cada intervalo de 10 minutos, por meio da Equação (3), em que i_d representa a intensidade da chuva no intervalo de 10 minutos, expressa em mm/h.

$$k_{ed} = 0,29 \cdot [1 - 0,72 \cdot \exp(-0,082 \cdot i_d)] \quad (3)$$

A energia cinética total de cada subintervalo foi então calculada pela multiplicação de k_{ed} pela altura de precipitação do intervalo (P_d), em mm, conforme a Equação (4):

$$E_d = k_{ed} \cdot P_d \quad (4)$$

Somando-se os valores de E_d de todos os intervalos erosivos do evento, obteve-se a energia cinética total da chuva (KE), dada pela Equação (5):

$$KE = \sum_{d=1}^n E_d \quad (5)$$

Com KE calculado, o índice de erosividade EI_{30} foi determinado pelo produto entre essa energia e a intensidade máxima de 30 minutos do evento, como mostra a Equação (6):

$$EI_{30} = KE \cdot I_{30} \quad (6)$$

Já para os dados monitorados nas estações localizadas em área de mineração, onde havia apenas dados com discretização diária, o valor de EI_{30} foi determinada com base na equação empírica (7) desenvolvida por Marques et al. (1997) para a cidade de Sete Lagoas (MG), geograficamente próxima da área de estudo.

$$EI30=25,3+43,35 \cdot MFI+0,232 \cdot MFI^2 \quad (7)$$

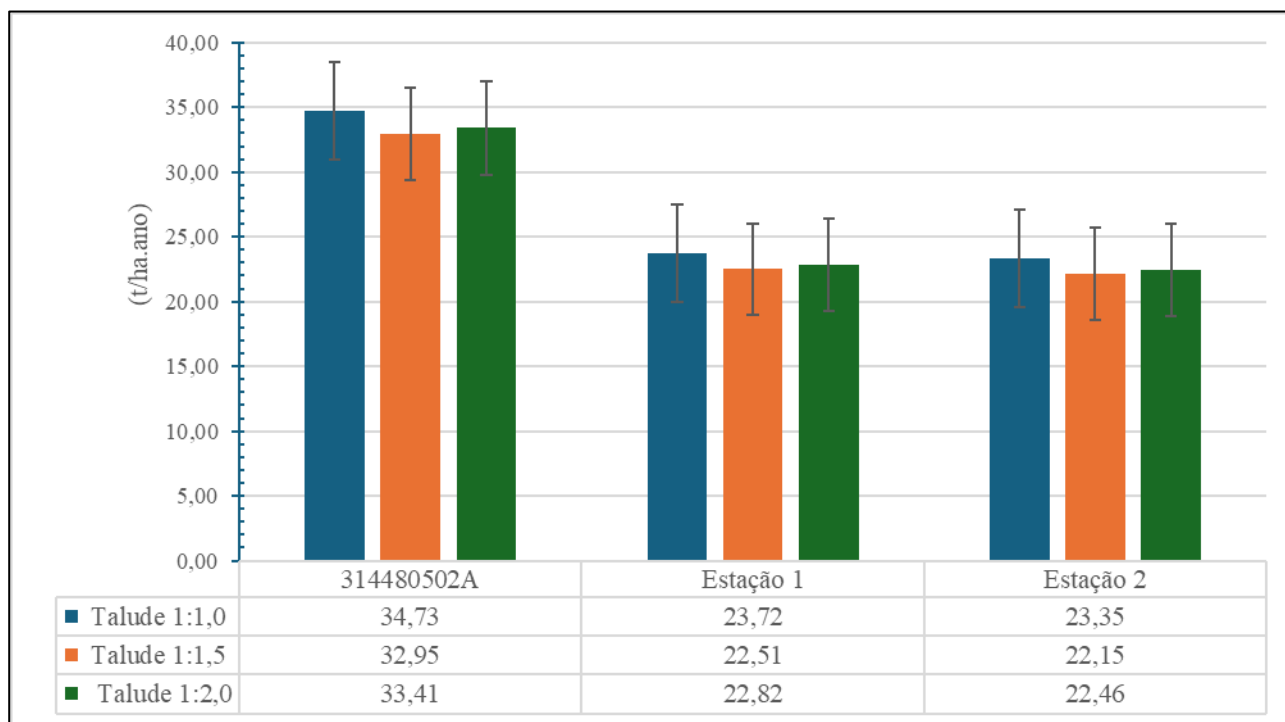
O parâmetro **MFI** é o índice de Fournier Modificado, que pode ser obtido através da Equação (8). Em seus parâmetros conta-se com sendo p_i a precipitação do mês e P a precipitação anual total, ambos em mm.

$$MFI = p_i^2 / P \quad (8)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da produção de sedimento com base na RUSLE, na série temporal analisada, evidenciou diferenças significativas entre os valores obtidos a partir dos dados pluviométricos com resolução de 10 minutos (CEMADEN - estação 314480502A) e aqueles derivados de dados com resolução diária. Pode-se observar na Figura 2 que os valores de produção de sedimento gerados com os dados do CEMADEN são aproximadamente 32% maiores que os valores de sedimento estimados com dados diários. Além disso, nota-se que a configuração de taludes de declividades mais acentuadas propiciam uma produção de sedimento menor, gerando uma diferença próxima de 5% quando comparamos taludes mais íngremes com os mais abatidos. Os menores valores de produção de sedimentos para o talude 1V:1,5H indicam que a relação do comprimento de rampa (L) e declividade (S) atingem a menor proporção, i.e., a menor contribuição para geração de sedimentos. Os maiores valores para o 1V:2H e 1V:1H indicam o maior peso do comprimento do escoamento e da declividade, respectivamente.

Figura 2– variação do abatimento nos taludes avaliados.



Essa constatação traz algumas implicações que valem a discussão. No setor da mineração, a incerteza associada à produção de sedimentos é elevada tanto no contexto de projetos de estruturas para contenção de sedimentos, quanto para o planejamento e gestão de pilhas. Por mais que exista uma necessidade iminente de conhecimento das características de erodibilidade do estéril e/ou rejeito, bem como da forma de disposição e compactação nas pilhas nos processos de desprendimento e transporte de partículas, o devido conhecimento da Erosividade da chuva também é de suma importância, uma vez que a chuva é a força motriz dos processos erosivos, causando desprendimento de partículas e formação de escoamento superficial direto (MATTHEWS; PANAGOS; VERSTRAETEN, 2022). Os resultados indicam que ao considerar a precipitação monitorada em um passo diário, até 20 t/ha.ano de subestimativa na produção podem ser esperadas. Tal discrepância gera impactos, por exemplo, no dimensionamento das estruturas de contenção e no planejamento de dragagens. Isso indica que as áreas de mineração precisam investir em redes de monitoramento de precipitação com maior refinamento da escala temporal.

Todavia, o presente trabalho é uma iniciativa na avaliação da aplicação da RUSLE e de seus diferentes parâmetros na análise de produção de sedimentos em áreas de mineração. Estudos futuros precisam avançar na caracterização do rejeito/estéril, na avaliação dos processos de desprendimento de partículas e transporte em escalas laboratoriais e de campo, avaliar as diferentes características geotécnicas (e.g., grau compactação e declividade do talude) e da precipitação (e.g., intensidade, duração e frequência) na produção de sedimentos, bem como monitorar essa produção em campo para validação dos modelos a serem desenvolvidos.

CONCLUSÕES

O estudo evidenciou que a resolução temporal dos dados pluviométricos impacta significativamente na estimativa da produção de sedimentos pela equação RUSLE. Dados com resolução de 10 minutos resultaram em valores mais elevados de perda de solo, indicando maior sensibilidade aos eventos intensos de chuva. Além disso, taludes com uma relação V:H mais ponderada (e.g., 1:1,5) apresentaram menor geração de sedimento, reforçando sua importância como medida de controle erosivo. Assim, recomenda-se o uso de dados pluviométricos detalhados e geometrias menos abatidas em projetos de Pilhas de Estéril.

REFERÊNCIAS

ALVES, G. J.; MELLO, C. R.; GUO, L.; THEBALDI, M. S. *Natural disaster in the mountainous region of Rio de Janeiro state, Brazil: Assessment of the daily rainfall erosivity as an early warning index*. International Soil and Water Conservation Research, v. 10, p. 547-556, 2022.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1997. (Agriculture Handbook, n. 703).

FERREIRA, Daniel Luiz Teixeira. *Proposta de método para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril e verificação da eficiência do uso de cal como revestimento de proteção*. 2025. 126 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion and Conservation*. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

MARQUES, J. J. G. S. M. et al. *Rainfall erosivity indices, soil losses and erodibility factor for two soils from the cerrado region — first approximation*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, p. 427–434, 1997.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. *Rainfall erosivity in Brazil: a review*. Catena, v. 100, p. 139–147, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>

CEMADEN. (2025). *Dados pluviométricos da estação 314480502A – Belo Horizonte/MG*. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em <https://www.cemaden.gov.br>

PICCARRETA, Marco; LAZZARI, Maurizio; BENTIVENGA, Mario. *The influence in rainfall erosivity calculation by using different temporal resolution in Mediterranean area*. Science of The Total Environment, v. 906, e167411, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37769721/>. Acesso em: 22 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167411>.

FISCHER, Franziska K.; WINTERRATH, Tanja; AUERSWALD, Karl. *Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data*. Hydrology and Earth System Sciences, Katlenburg-Lindau, v. 22, n. 12, p. 6505-6518, 2018. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/22/6505/2018/>. Acesso em: 22 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018>.

SODNOMDARJAA, E. et al. *Assessment of soil loss using RUSLE around Mongolian mining sites: a case study on soil erosion at the Baganuur lignite and Erdenet copper-molybdenum mines*. Environmental Earth Sciences, v. 82, n. 230, 27 abr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10897-0>

MATTHEWS, Francis; PANAGOS, Panos; VERSTRAETEN, Gert. *Simulating event-scale rainfall erosivity across European climatic regions*. CATENA, v. 213, jun. 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa VALE S.A., pelo financiamento desse projeto, e ao seu corpo técnico pelo empenho em disponibilizar dados e informações que tornaram possível a realização desta pesquisa e das demais análises que vêm sendo conduzidas em busca de diretrizes mais sólidas para o manejo de sedimentos em área de mineração.