

Predição da erosão hídrica em uma bacia hidrográfica situada no sudeste brasileiro

Guilherme Henrique Expedito Lense¹

Fernanda Almeida Bócoli²

Rodrigo Santos Moreira³

Ronaldo Luiz Mincato⁴

Resumo

A modelagem da erosão hídrica é uma forma rápida e precisa de estimar o potencial erosivo em bacias hidrográficas. Entre os modelos, temos a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) que apresenta uma estrutura simples, com baixo custo de implementação e pode ser usada com informações prontamente disponíveis, contribuindo para o planejamento de práticas de conservação do solo. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi aplicar a RUSLE para estimar a erosão hídrica na bacia hidrográfica do Córrego da Laje afluente direto do reservatório da Usina Hidroelétrica de Furnas, situada no Sul de Minas Gerais, região do sudeste brasileiro. Nessa região a erosão hídrica é um grave problema que tem provocado o assoreamento do reservatório hidrelétrico e a depreciação da qualidade da água. As perdas de solo foram calculadas em Sistema de Informações Geográficas com base nas características topográficas, edafoclimáticas, na cobertura do solo e nas práticas de manejo. A perda de solo média da bacia hidrográfica foi de 26,80 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ com predomínio de taxas erosivas de alta intensidade (> 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Considerando as classes de uso da bacia, a geração de sedimentos foi maior nas áreas de pastagem (35,87 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e nas áreas com cultivo de milho (32,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Como as áreas com erosão severa estão distribuídas em toda a extensão da bacia hidrográfica, deve ser adotado um amplo plano de mitigação da erosão hídrica a fim de reduzir os danos ambientais do processo.

Palavras-chave: Conservação do solo. Cobertura do solo. RUSLE.

Introdução

A erosão hídrica é o principal processo de degradação dos solos tropicais, gerando impactos ambientais negativos, como a redução do potencial produtivo do solo, perda da microbiota do solo e emissão de gases de efeito estufa (DECHEN *et al.*, 2015). Na região do entorno da Usina Hidroelétrica de Furnas (UHF), no sul de Minas Gerais, a mitigação da erosão é um dos maiores desafios para a gestão sustentável da área (IGAM, 2013).

Além de provocar o assoreamento do reservatório hidrelétrico da UHF, reduzindo seu tempo de vida útil, a erosão hídrica também causa a depreciação da qualidade da água e a contaminação com fertilizantes minerais, uma vez que a maioria dos sedimentos erodidos que atingem os cursos hídricos

1 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG). Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. guilherme.lense@unifal-mg.edu.br. Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700, Centro, 37130-000, Alfenas, Minas Gerais, Brasil.

2 Universidade Federal de Lavras (UFLA), mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. fernanda.muz@hotmail.com.

3 Instituto Agrônomo de Campinas. Doutor em Agricultura Tropical e Subtropical. rodrigossagro@yahoo.com.br.

4 UNIFAL-MG. Professor no Instituto de Ciências da Natureza. ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br.

da região são providos de áreas com cultivos agrícolas (IGAM, 2013). Dessa forma, são necessárias medidas eficazes de conservação do solo para controlar a erosão hídrica na região da UHF.

A modelagem é uma forma rápida e precisa de avaliar quantitativamente e qualitativamente o potencial erosivo. Essa técnica pode ser usada para projetar e direcionar medidas eficazes de conservação do solo e da água (OLIVEIRA *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2019). Além disso, a aplicação da modelagem melhora a interpretação dos processos de erosão do solo e facilita o entendimento da dinâmica do ecossistema (ALEWELL *et al.*, 2019).

Entre os primeiros modelos desenvolvidos para avaliar as taxas erosivas, tem-se a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e, mais tarde, sua versão aprimorada, a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) (RENARD *et al.*, 1997). A RUSLE apresenta uma estrutura simples, com baixo custo de implementação e pode ser usada com informações prontamente disponíveis. Por essas razões, este modelo é o método mais utilizado em todo o mundo em escala de bacia hidrográfica (RENSCHLERA; MANNAERTS; DIEKKRÜGER, 1999; GANASRI; RAMESH, 2016).

A combinação da RUSLE com Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto facilita sua utilização e fornece um diagnóstico sobre a distribuição espacial da erosão hídrica. O SIG permite reagrupar, sobrepor vários mapas temáticos e aplicar equações matemáticas de diferentes fatores erosivos. Usando imagens de satélite, modelos digitais de elevação do terreno e outros dados, o SIG pode gerar resultados efetivos de forma simples e barata (HAIDARA *et al.*, 2019). Esses resultados contribuem significativamente para o planejamento de práticas de conservação do solo, controle da erosão e gerenciamento de áreas afetadas pelo processo erosivo (PRASANNAKUMAR *et al.*, 2012).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi aplicar a Equação Universal de Perda de Solo Revisada para quantificar a erosão hídrica na bacia hidrográfica do Córrego da Laje, afluente direto do reservatório da Usina Hidroelétrica de Furnas. O estudo permitirá identificar as áreas mais suscetíveis à erosão, a fim de contribuir para a adoção do manejo conservacionista do solo.

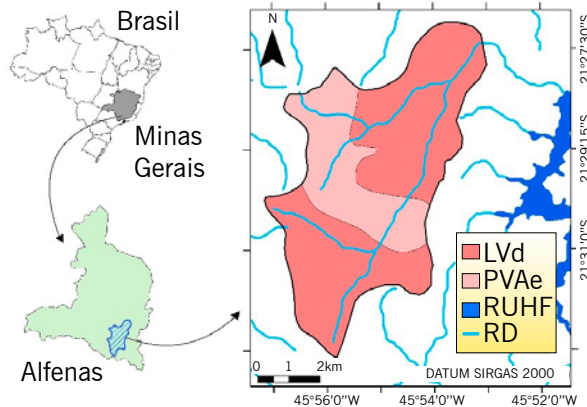
Material e métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Córrego da Laje apresenta uma área de 3.951,30 ha, situada no município de Alfenas, sul de Minas Gerais, região sudeste do Brasil, nas coordenadas 45°57'7" a 45°54'3" O e 21°26'59" a 21°32'54" S (FIGURA 1). O clima da área segundo a classificação de Köppen é Tropical Mesotérmico (Cwb), com inverno seco e verão temperado. A precipitação média anual é de 1.500 mm e a temperatura média anual de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013; INMET, 2019). Os solos da bacia hidrográfica são Latossolos Vermelhos distróficos - LVd (71 %) e Argissolo Vermelho-Amarelos eutróficos - PVAe (29 %). O mapa digital de solos foi elaborado com base no mapa de solos do estado de Minas Gerais (UFV *et al.*, 2010) (FIGURA 1).

O mapa de uso e ocupação do solo (FIGURA 2A) foi elaborado com base em imagens do satélite Landsat-8 Operational Land Imager (OLI), órbita/ponto 219/75, selecionadas na Divisão de Geração de Imagens (INPE, 2019) na data de 29 de maio de 2019, bem como em imagens de alta resolução da ferramenta Basemap (ESRI, 2015). A bacia hidrográfica estava ocupada por: milho - 1.120,74 ha (28,4 %), pastagem - 1.085,25 ha (27,47 %), cafeicultura - 911,93 ha (23,08 %), mata nativa - 701,46 ha (17,75 %), eucalipto - 72,84 ha (1,8 %), benfeitorias 31,65 ha (0,8 %) e drenagem - 27,43 ha (0,7 %).

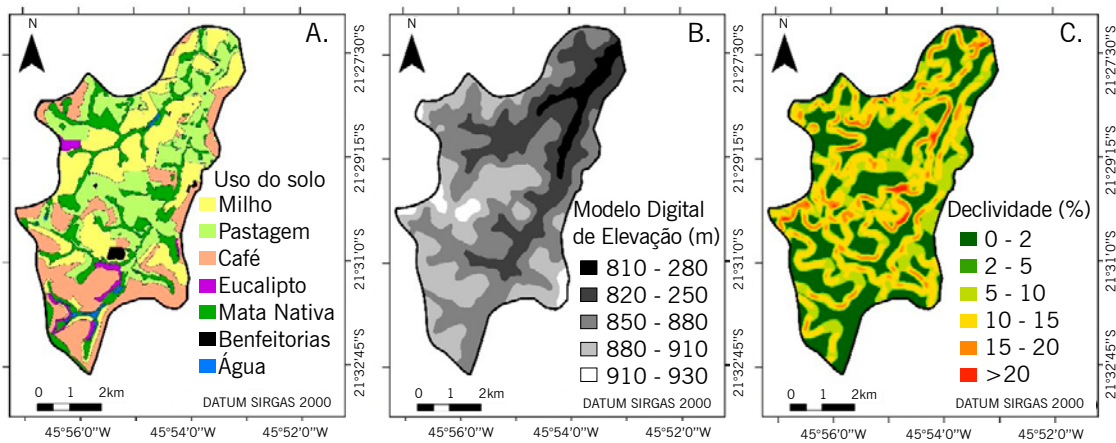
Figura 1 – Localização e mapa digital de solos da Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje, Alfenas, sul de Minas Gerais, Brasil.



Notas: LVD = Latossolos Vermelhos distróficos, PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelos eutróficos, RUHF = Reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas, RD = Rede de Drenagem.

Fonte: Elaboração dos autores (2020).

Figura 2 – Mapa de uso do solo (A) Modelo Digital de Elevação (B) e Mapa de Declividade (C) da Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje, Alfenas, sul de Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Elaboração dos autores (2020).

Na bacia hidrográfica, as altitudes variaram de 810 m a 930 m (FIGURA 2B). O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi extraído das curvas de nível do estado de Minas Gerais (SISEMA, 2019). A partir do MDE, foi elaborado o Mapa de Declividade. Na bacia hidrográfica predominou o relevo ondulado, com declividade média de 6,9 % (FIGURA 2C).

Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE)

A RUSLE estima a taxa de erosão hídrica conforme a Equação 1 (RENARD *et al.*, 1997).

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

Em que: A é a perda de solo média anual em $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; R é o fator erosividade da chuva em $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; K é o fator erodibilidade do solo em $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; LS é o fator topográfico, pela relação entre o comprimento (L) e a declividade da rampa (S); C é o fator uso e manejo do solo; P é o fator práticas conservacionistas, ambos adimensionais.

O fator R representa o potencial das precipitações pluviométricas em desagregar o solo e promover a erosão hídrica. O parâmetro foi obtido a partir do Mapa de Erosividade do Sul de Minas Gerais desenvolvido por Aquino *et al.* (2012). Quanto à resistência do solo ao processo erosivo (K), seus valores foram determinados para cada tipo de solo presente na bacia hidrográfica, com base nos valores relatados na literatura especializada (BESKOW *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

O fator LS é um parâmetro essencial para quantificar as perdas de solo devido à influência topográfica na velocidade do escoamento superficial (BESKOW *et al.*, 2009). O fator LS foi calculado utilizando a Equação 2, proposta por Moore e Burch (1986).

$$LS = \left(\frac{FA \cdot 10}{22,13} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\sin(S)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (2)$$

Em que: LS é o fator topográfico, adimensional; FA é o acúmulo de fluxo expresso como o número de células da grade do MDE; S é a declividade da bacia hidrográfica em graus e 10 é a resolução espacial do MDE em metros.

O fator C relaciona os efeitos da cobertura vegetal sobre as perdas de solo. O parâmetro varia de 0 a 1, valores mais altos representam menor cobertura vegetal e maior desagregação dos solos ao impacto das chuvas e escoamento superficial (OLIVEIRA *et al.*, 2014). O fator C foi calculado conforme Durigon *et al.* (2014), utilizando o Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas - NDVI (EQUAÇÃO 3).

$$C = \frac{-NDVI + 1}{2} \quad (3)$$

Em que: C é o fator de cobertura do solo e NDVI é o Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas, ambos adimensionais.

O NDVI é um indicador da cobertura vegetal do solo que varia de -1 a +1, com maiores valores atribuídos a áreas de maior vegetação. O índice é calculado utilizando a Equação 4 (TUCKER, 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

Em que: NIR e RED são bandas espectrais de infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

O NDVI foi calculado a partir das bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo) da imagem do Landsat-8 Operational Land Imager (OLI), usada no mapeamento de uso de solo da bacia.

Por fim, tem-se o fator P que varia de 0 a 1 e seu resultado representa o efeito das práticas de manejo do solo sobre as taxas erosivas. O fator P foi calculado usando a declividade como a propriedade determinante na adoção de práticas de conservação do solo (SILVA *et al.*, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2016). Para declividades menores que 5 % o valor de P foi de 0,6 e em declividades maiores que 20 % o valor de P foi igual a 1. Em declividades entre 5 % a 20 %, o valor de P é calculado conforme Equação 5.

$$P = 0,69947 - 0,08911 \cdot s + 0,01184 \cdot s^2 - 0,000335 \cdot s^3 \quad (5)$$

Em que: P é o fator de práticas conservacionistas, adimensional, e s é a declividade em %.

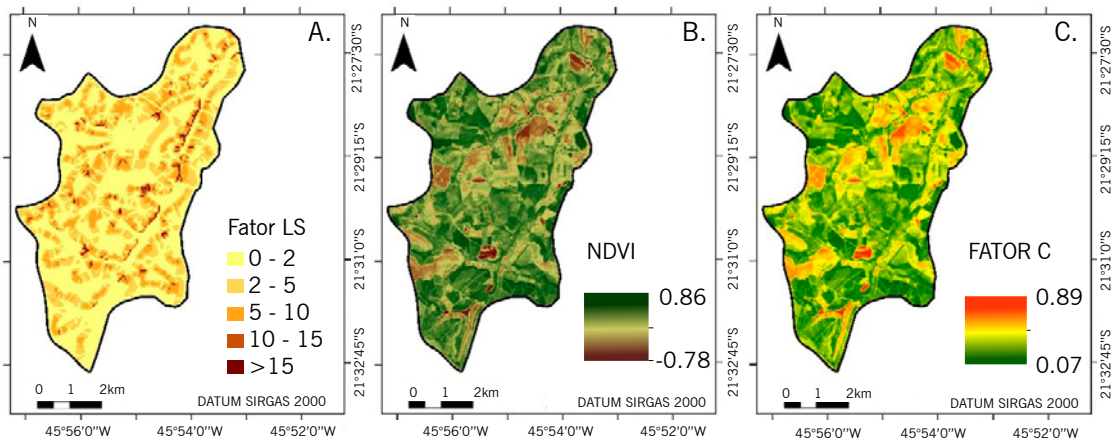
As etapas da modelagem, o tratamento e a espacialização dos dados, assim como a confecção dos mapas de uso e classes solo, MDE e declividade, foram realizadas usando o software ArcMap 10.3 (ESRI, 2015).

Resultados e discussão

Na Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje, a erosividade das chuvas foi de $6.500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (AQUINO *et al.*, 2012). Considerando a classificação proposta por Foster *et al.* (1981), a bacia apresentou a classe de erosividade alta. O fator K foi adaptado de Sá *et al.* (2004) e Mendes Júnior *et al.* (2018) com valores de 0,033 e 0,019 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para os PVAe e LVD, respectivamente. Devido às características pedológicas, os PVAe são mais propensos à erosão que os LVD.

Os maiores valores de LS foram observados nas áreas de elevada declividade, em que a velocidade do escoamento superficial é maior (FIGURA 3A). Em cerca de 4 % da bacia hidrográfica, os valores de LS foram maiores que 10 e essas áreas podem ser consideradas de alta vulnerabilidade à erosão. Portanto as práticas de conservação do solo devem ser implantadas prioritariamente nessas áreas, a fim de reduzir o ganho de energia do escoamento superficial devido à topografia (BESKOW *et al.*, 2009; STEINMETZ *et al.*, 2018).

Figura 3 – Fator topográfico - LS (3A), NDVI (3B) e Fator de Cobertura do solo - C (3C) da Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje, Alfenas, sul de Minas Gerais, Brasil.



Notas: NDVI: Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas; Fator LS, NDVI, Fator C: adimensionais.

Fonte: Elaboração dos autores (2020).

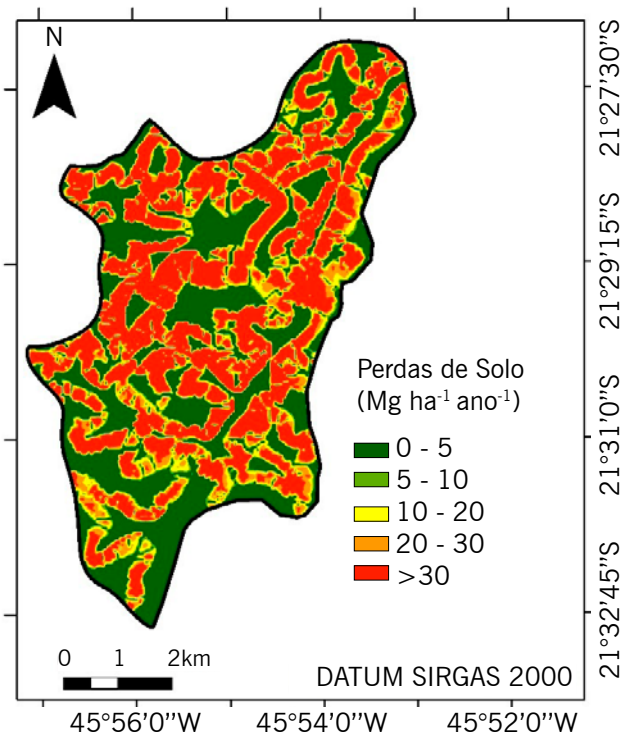
Os resultados do NDVI foram maiores nas áreas de alta densidade vegetal e menores nos locais com solo exposto e áreas com ausência de solo (água e benfeitorias) (FIGURA 3B). Quanto ao fator C, este é normalizado entre os valores 0 e 1 e inversamente proporcional ao NDVI, dessa forma, as áreas de maior cobertura vegetal apresentaram menor valor do fator C (FIGURA 3C).

Vale ressaltar que a determinação do fator C a partir do NDVI permite uma representação mais precisa quando comparada a métodos baseados em valores relatados na literatura especializada,

que muitas vezes foram desenvolvidos para regiões diferentes da área de estudo. Além disso, com a utilização do NDVI em ambiente SIG, o fator C é calculado célula a célula ao longo de toda a área, representando de forma mais realista a heterogeneidade da cobertura vegetal.

A RUSLE estimou a perda de solo média da bacia hidrográfica do Córrego da Laje em 26,80 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ com predomínio de taxas erosivas de alta intensidade (> 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), segundo a classificação proposta por Avanzi *et al.* (2013). As áreas com erosão intensa se concentraram principalmente nos locais com maior declividade e, conseqüentemente, maiores valores do fator LS (FIGURA 4).

Figura 4 – Perdas de solo na Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje, Alfenas, sul de Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Elaboração dos autores (2020).

Os maiores valores de perda de solo foram observados nas áreas de pastagem (35,87 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), devido à degradação e nas áreas com cultivo de milho (32,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) devido à exposição do solo na época de semeadura. Nas demais classes de uso de solo, as perdas de solo variaram de 15,00 a 20,40 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, o que foi proporcionado pela maior densidade vegetal e menor valor do fator C. As áreas cobertas com água e benfeitorias não foram consideradas na estimativa da erosão hídrica por não participarem da geração de sedimentos. Mendes Júnior *et al.* (2018) e Tavares *et al.* (2019), ao modelarem a erosão hídrica em uma sub-bacia do Córrego da Laje, com cultivo predominante de café sobre práticas conservacionistas, observaram taxas erosivas bem inferiores aos resultados do presente trabalho, demonstrando a importância das práticas de manejo do solo sobre as perdas de solo.

Quanto à erosão hídrica em cada tipo de solo, a geração de sedimentos foi maior para os PVAe (39,80 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) em relação aos LVd (23,70 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) devido a maior erodibilidade (K). Tal resultado revela a importância dos atributos intrínsecos do solo em relação à proteção natural contra a erosão hídrica (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Como as áreas com elevadas perdas de solo ($> 15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) estão distribuídas em toda a extensão da bacia hidrográfica, deve ser adotado um amplo plano de mitigação da erosão hídrica, visando à introdução de práticas conservacionistas. Entre essas práticas podem ser citadas aquelas destinadas a melhorar a cobertura do solo, como o plantio direto nas áreas de milho, o manejo da vegetação entrelinha na cafeicultura e a recuperação das pastagens degradadas. Nos locais de elevada declividade podem ser introduzidos cultivos em nível e terraços, a fim de minimizar a velocidade do escoamento.

Os resultados da modelagem são uma importante ferramenta para o planejamento da adoção de práticas conservacionistas direcionadas na bacia hidrográfica do Córrego da Laje, com o intuito de reduzir os danos diretos da erosão hídrica, como perda de nutrientes e matéria orgânica do solo, e os indiretos, como o assoreamento do Córrego da Laje e do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas.

Conclusão

A Equação Universal de Perda de Solo Revisada identificou as áreas com maiores taxas erosivas na Bacia Hidrográfica do Córrego da Laje em declives acentuados e nos locais com baixa cobertura vegetal, como no cultivo de milho ($32,05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e em pastagens degradadas ($35,87 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Ficou evidenciado que deverá ser adotado um amplo plano de mitigação da erosão hídrica, visando à introdução de práticas conservacionistas, a fim de reduzir os danos ambientais do processo.

Agradecimentos

Especialmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela bolsa de estudos ofertada ao primeiro autor; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento ao estudo - Código Financeiro 001.

Prediction of water erosion in a watershed located in southeastern Brazil

Abstract

Water erosion modeling is a fast and accurate way to estimate erosion potential in watersheds. Among the models, we have the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) which has a simple structure, low implementation cost and can be used with readily available information, contributing to the planning of soil conservation practices. In this context, the objective of the work was to apply RUSLE to estimate water erosion in the Córrego da Laje watershed affluent directly from the reservoir of the Furnas Hydroelectric Plant, located in the south of Minas Gerais, a region of southeastern Brazil. In this region, water erosion is a serious problem that has caused the silting up of the hydroelectric reservoir and the depreciation of water quality. Soil losses were calculated in Geographic Information System based on topographic, edaphoclimatic characteristics, soil cover, and management practices. The average soil loss of the watershed was $26.80 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ with the predominance of high-intensity erosive rates ($> 15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). Considering the basin use classes, sediment generation was higher in pasture areas ($35.87 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), and in areas under maize cultivation ($32.05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). As areas with severe erosion are distributed throughout the watershed, a comprehensive water erosion mitigation plan should be adopted to reduce the environmental damage of the process.

Keywords: Soil conservation. Soil coverage. RUSLE.

Referências

- ALEWELL, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; PANAGOS, P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdã, v. 7, n. 3, p. 203-225, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlim, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; MELLO, C. R.; AVANZI, J. C. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542012000500006>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; NORTON, L. D.; BESKOW, S.; MARTINS, S. G. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 427-434, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542013000500006>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdã, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARAES, M. F.; MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0363>. Acesso em: 06 jun. 2019.
- DURIGON, V. L.; CARVALHO, D. F.; ANTUNES, M. A. H.; OLIVEIRA, P. T. S.; FERNANDES, M. M. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 35, n. 2, p. 441-453, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute - Inc. **ARCGIS Professional GIS for the desktop version 10.3**. Redlands, Califórnia, EUA, Software, 2015. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/get-started/quick-start-guides/arcgis-desktopquick-start-guide.htm>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- FOSTER, G. R.; MCCCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981. Disponível em: <http://www.jswnonline.org/content/36/6/355.short>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Amsterdã, v. 7, n. 6, p. 953-961, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>. Acesso em: 20 dez. 2019.

Haidara, I.; Tahri, M.; Maanan, M.; Hakdaoui, M. Efficiency of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to detect soil erosion vulnerability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 354, n. 1, p. 113853, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.011>. Acesso em: 06 jun. 2019.

IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas**. Instituto Mineiro de Gestão das Águas; Alago - Fupai. Belo Horizonte: IGAM, 2013. 305p

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações pluviométricas convencionais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 10 dez. 2019.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Divisão de Geração de Imagens (DIDGI)**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

MEDEIROS, G. O. R.; GIAROLLA, A.; SAMPAIO, G.; MARINHO, M. A. Estimates of Annual Soil Loss Rates in the State of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0150497, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20150497>. Acesso 10 nov. 2019.

Mendes Júnior, H.; TAVARES, A. S.; SANTOS JÚNIOR, W. R.; SILVA, M. L. N.; SANTOS, B. R.; MINCATO, R. L. Water Erosion in Oxisols under Coffee Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170093, 2018. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20170093>. Acesso 10 nov. 2019.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length slope factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America**, Washington, v. 50, n. 5, p. 1294-1298, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>. Acesso 30 nov. 2019.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; DURÃES, M. F.; SILVA, A. M. Soil erosion vulnerability in the verde river basin, southern Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 3, p. 262-269, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000300006>. Acesso 30 nov. 2019.

PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; ABINOD, S.; GEETHA, N. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. **Geoscience Frontiers**, Amsterdã, v. 3, n. 2, p. 209-215, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>. Acesso 10 nov. 2019.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIER, 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: United States Department of Agriculture, 1997. 384p.

RENSCHLERA, C. S.; MANNAERTS, C.; DIEKKRÜGER, B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain. **Catena**, Amsterdã, v. 34, n. 4, p. 209-225, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00117-9). Acesso 10 dez. 2019.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N.; MASSAROTO, J. A.; MARQUES, J. J. G. S. M. Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 691-699, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700011>. Acesso 10 dez. 2019.

SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000200006>. Acesso 10 dez. 2019.

SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2019. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso 05 dez. 2019.

STEINMETZ, A. A.; CASSALHO, F.; CALDEIRA, T. L.; OLIVEIRA, V. A.; BESKOW, S.; TIMM, L. C. Assessment of soil loss vulnerability in data-scarce watersheds in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n. 6, p. 575-587, 2018. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018426022818>. Acesso 08 jan. 2020.

TAVARES, A. S.; SPALEVIC, V.; AVANZI, J. C.; NOGUEIRA, D. A.; SILVA, M. L. N.; MINCATO, R. L. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin in southern Minas Gerais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 555-572, 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p555>. Acesso 08 jan. 2020.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdã, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Acesso 08 jan. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>. Acesso 08 nov. 2020.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning**. Washington DC: USDA, 1978. 537p.

WANG, X.; XUE, B.; YAO, S.; YANG, H.; GU, Z.; YANG, B.; ZHANG, M.; ZHU, Y. ¹³⁷Cs estimates of soil erosion rates in a small catchment on a channelized river floodplain in the lower reaches of Yangtze River, China. **Journal of Environmental Radioactivity**, Amsterdam, v. 208, n. 1, p. 106008, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106008>. Acesso em: 06 jun. 2019.

Submetido: 08/01/2020

Aceito: 10/06/2020