

Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG)

Estimates of soil vulnerability to water erosion in the Rio das Mortes hydrographic basin, Brazil

Jaíza Ribeiro Mota e Silva¹, Jéssica Assaid Martins Rodrigues², Luiz Fernando Coutinho de Oliveira³, Marcelo Viola⁴

RESUMO: A erosão hídrica é uma das maiores causas de degradação dos solos no mundo, sendo responsável por perdas de solo superiores às taxas naturais de reposição. Objetivou-se estimar a distribuição espacial do potencial anual médio de perda de solo na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG), com a finalidade de identificar as áreas mais susceptíveis à erosão hídrica e fornecer subsídio para a gestão dos recursos naturais na região. Para isso, foi aplicado o modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) implementado em ambiente SIG. O fator erosividade da chuva foi obtido com base em um modelo geográfico multivariado desenvolvido para o Brasil; o fator cobertura e manejo do solo foi derivado do mapa de uso do solo do Brasil; o fator erodibilidade do solo foi obtido pelo mapa de solos de Minas Gerais; e o fator topográfico foi obtido pelo modelo digital de elevação. Os mapas dos fatores foram combinados por meio de álgebra de mapas, originando o mapa de vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica. Observou-se que 45,20% dos solos da bacia hidrográfica estudada apresentaram “Ligeira” vulnerabilidade à erosão hídrica. No entanto, 50,28% da área da bacia apresentaram perda de solo superior a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹, o que indica a existência de áreas altamente susceptíveis à erosão hídrica e evidencia a necessidade de implementação de melhorias no manejo e práticas conservacionistas do solo.

Palavras-chave: Manejo de bacias hidrográficas. Processo erosivo. RUSLE. SIG.

ABSTRACT: Water erosion is one of the major causes of soil degradation, causing soil losses higher than natural replacement rates. The spatial distribution of the average annual land loss in the Rio das Mortes MG Brazil, hydrographic basin is estimated, whilst the most susceptible areas to water erosion are identified to manage the region's natural resources. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model within the SIG environment was applied. Rain erosion factor, based on a multivariate geographic model developed for Brazil, was obtained; soil coverage and management factor were retrieved from the Brazil soil usage map; the soil erosion factor was obtained by the soil map of Minas Gerais; the topographic factor was determined by the digital elevation model. Maps of factors were determined by map algebra which produced the map of soil vulnerability to water erosion. Further, 45.20% of soils of the hydrographic basin under analysis featured 'slight' vulnerability to water erosion. However, 50.28% of the basin area showed a loss of soil which was greater than 10 t ha⁻¹ year⁻¹. The above revealed areas highly susceptible to water erosion and evidenced the need for implementation of improvements in soil management and conservation practices.

Keywords: Erosive process. GIS. Management of hydrographic basin. RUSLE.

Autor correspondente:

Jaíza Ribeiro Mota e Silva - jaizamota@hotmail.com

Recebido em: 12/09/2019

Aceito em: 28/02/2020

INTRODUÇÃO

A degradação ambiental origina processos erosivos que tornam os solos menos produtivos e o ambiente desequilibrado, portanto, o controle e o monitoramento da erosão são essenciais para o estabelecimento de qualquer uso do solo (XAVIER *et al.*, 2010).

A erosão é entendida como um processo de desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo, tendo como principais agentes o vento e a água, sendo influenciada por vários fatores, de forma e magnitude variáveis, conforme o local de ocorrência. Dentre os principais fatores destacam-se o solo, o embasamento geológico, as condições climáticas, a topografia e a cobertura e manejo do solo (SILVA *et al.*, 2010).

¹ Doutoranda em Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (UFLA), Lavras (MG), Brasil.

² Doutoranda em Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (UFLA), Lavras (MG), Brasil

³ Doutor em Engenharia Agrícola, Professor Titular e Subchefe do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras (MG), Brasil.

⁴ Doutor em Recursos Hídricos, Professor Adjunto e Coordenador do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras (MG), Brasil.

Geralmente, os processos erosivos naturais são compensados pela formação de solos, ou manto de intemperismo, porém a atuação antrópica altera este estado de equilíbrio e intensifica a erosão, principalmente pelo manejo inadequado do solo, comprometendo a qualidade ambiental (KHALI ISSA *et al.*, 2016).

A acelerada taxa de erosão do solo é amplamente reconhecida como um problema global, sendo a avaliação das perdas de solo fundamental para a adoção de práticas que visam minimizar a degradação do solo, como recuperação da cobertura vegetal, rotação de culturas, controle de queimadas, entre outros (CATEN *et al.*, 2012).

A erosão hídrica é uma das maiores causas de degradação dos solos no mundo, sendo responsável por perdas de solo superiores às taxas naturais de reposição (NEEDELMAN, 2013).

O solo, quando desprovido de cobertura vegetal, sofre deterioração em função do impacto das gotas da chuva sobre a sua superfície. Ademais, a falta de cobertura do solo resulta em aumento da velocidade de escoamento superficial da água da chuva, que irá transportar as partículas desprendidas do solo, resultando em perdas (CARVALHO *et al.*, 2012).

Como consequência da erosão hídrica, advém a perda de produtividade, o assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos, a perda de biodiversidade, perdas econômicas, entre outros (CERDAN *et al.*, 2010; GRAVES *et al.*, 2015; MELLO *et al.*, 2015).

O estudo da erosão dos solos se torna importante, pois o conhecimento antecipado do potencial de erosão do solo em uma área pré-estabelecida pode direcionar a atividade humana no sentido de um uso e manejo sustentável dos recursos naturais (AQUINO *et al.*, 2007). Isso pode ser viabilizado pelo uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), visto que esta ferramenta facilita a utilização e a compilação de dados especializados do meio físico e socioeconômico, e favorece o diagnóstico e a caracterização de territórios de interesse.

O modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), versão revisada do modelo USLE (*Universal Soil Loss Equation*), é um modelo paramétrico já testado e validado em diferentes condições (KUMAR *et al.*, 2014; TANG *et al.*, 2015; NAPOLI *et al.*, 2016; BENCHETTOUH *et al.*, 2017; WEI *et al.*, 2018; TOUBAL *et al.*, 2018; FAYAS *et al.*, 2019; FANG *et al.*, 2019). Considerado um modelo simples, a RUSLE permite estimar a erosão hídrica com base na interação entre os fatores erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topográfico, cobertura e manejo do solo, a partir da utilização de ferramentas SIG.

Diante do exposto, objetivou-se estimar a distribuição espacial do potencial anual médio de perda de solos na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG), com a finalidade de identificar as áreas mais susceptíveis à erosão hídrica e fornecer subsídio para a gestão dos recursos naturais na região.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio das Mortes está localizada no Sul do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 20°40'S e 21°40'S e 43°40'W e 45°20'W, em altitude variando entre 818 e 1.403 metros, com área de drenagem correspondente a 6.609,49 km (Figuras 1 e 2).

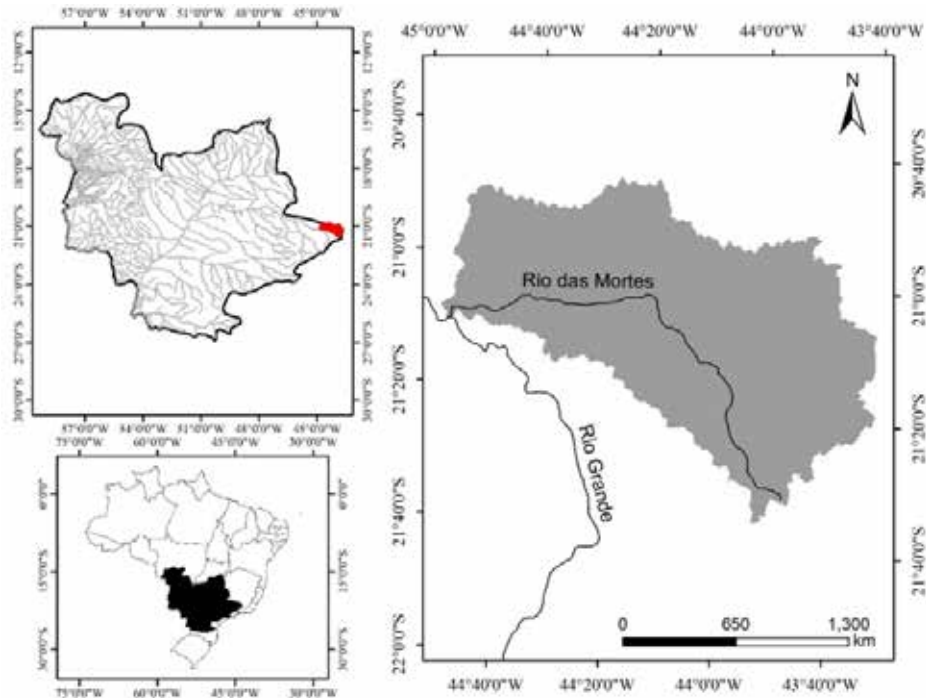


Figura 1. Bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

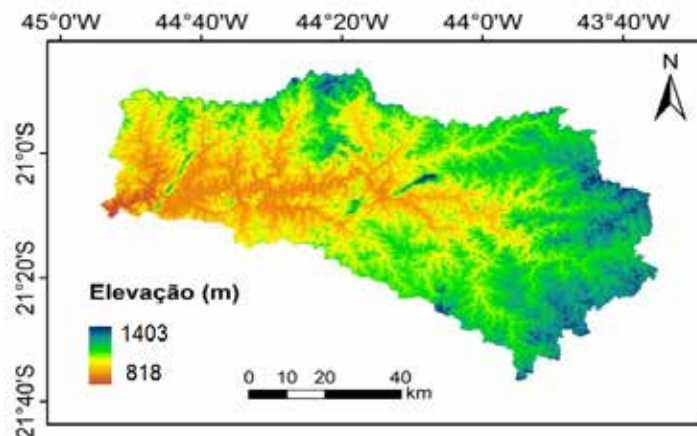


Figura 2. Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

A bacia hidrográfica do Rio das Mortes pertence à bacia do Rio Grande, integrando a Unidade de Planejamento e Gestão e Recursos Hídricos GD2. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cwa, com pluviosidade média anual de 1.400 mm e temperatura média anual de 18,5 °C (SÁ JÚNIOR *et al.*, 2012).

2.2 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO REVISADA (RUSLE)

Para estimar a perda média anual de solo na bacia do Rio das Mortes utilizou-se a RUSLE implementada em ambiente SIG. A equação é baseada nos principais fatores que impactam a erosão do solo (Equação 1), gerados individualmente na forma de mapas trabalhados em formato *raster*, em uma resolução espacial de 30 m, os quais foram combinados pixel a pixel, a partir da aplicação de álgebra de mapas (OZSOY *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014; PANAGOS *et al.*, 2015).

$$A = R \times K \times LS \times CP \quad (1)$$

Em que A é a perda anual de solo por unidade de área ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), R é o fator erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), K é fator erodibilidade do solo ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS é o fator topográfico (adimensional), C é o fator cobertura e manejo do solo (adimensional) e P é o fator práticas conservacionistas (adimensional).

O fator R expressa o potencial natural da chuva de causar erosão, sendo definido como o produto entre a energia cinética total da chuva e sua intensidade máxima em duração de 30 minutos (EI30) (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Para aplicação da RUSLE, é recomendado usar o valor médio do índice EI30 calculado a partir de séries históricas de precipitação de no mínimo 20 anos. Porém, como registros de pluviógrafos são escassos ou inexistentes em algumas localidades, costuma-se estimar o fator R adotando como referência estações pluviométricas cuja relação entre os valores médios mensais de R e os respectivos índices de *Fournier* modificado médio (MFI) esteja disponível (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Em vista disso, o mapa do fator R foi elaborado com base em um modelo geográfico multivariado desenvolvido por Mello *et al.* (2013) para as regiões geográficas brasileiras, o qual estima o fator R em função da latitude, longitude e a altitude de cada uma das células da bacia hidrográfica, extraídas a partir do modelo digital de elevação (Equação 2).

$$R = -399433 + 420.49 \times A - 78,296 \times LA - 0.01784 \times A^2 - 1594.04 \times LA^2 + 195.84 \times LO^2 + 17.77 \times LO \times A - 1716.27 \times LA \times LO + 0.1851 \times LO^2 \times A + 0.0001002 \times LO^2 \times A^2 + 1,389 \times LO^2 \times LA^2 + 0.01364 \times LA^2 \times LO^3 \quad (2)$$

122

Em que R é o fator erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), A é a altitude (m), LA é a latitude e LO é a longitude (ambos em graus decimais negativos).

A base para a determinação do fator K adotado neste trabalho foi o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, na escala de 1:500.000, elaborado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM, 2010) (Figura 3). Os valores do fator K foram obtidos na literatura, em estudos com os mesmos tipos de solo (Tabela 1).

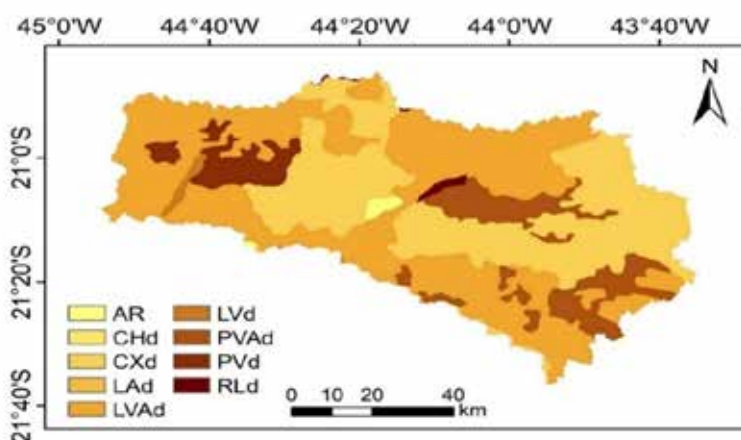


Figura 3. Mapa de solos da bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

Tabela 1. Erodibilidade do solo na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

Tipo de solo		Área (%)	K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Fonte
Afloramento Rochoso	AR	0,610	0	
Cambissolo Húmico distrófico	CHd	0,045	0,0433	Manningel <i>et al.</i> (2002)
Cambissolo Háplico distrófico	CXd	35,244	0,0237	Reatto <i>et al.</i> (2000)
Latossolo Amarelo distrófico	LAd	0,002	0,0280	Borges <i>et al.</i> (2012)
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	IVAd	48,150	0,0171	Reatto <i>et al.</i> (2000)
Latossolo Vermelho distrófico	LVd	0,672	0,0061	Manningel <i>et al.</i> (2002)
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	PVAd	10,160	0,0270	Sá <i>et al.</i> (2004)
Argissolo Vermelho distrófico	PVd	4,601	0,0550	Demarchi; Zimback (2014)
Neossolo Litólico distrófico	RLd	0,516	0,0569	Castro <i>et al.</i> (2011)

O fator LS é essencial na quantificação da perda de solo por erosão hídrica, estando relacionado à declividade do terreno (S) e ao comprimento de encosta (L). Quanto maior a inclinação e o comprimento do terreno, maior será a perda de solo.

Para estimar o fator LS foi empregada a metodologia proposta por Moore e Burch (1986) e Engel (2003) (Equação 3), a qual utiliza o modelo digital de elevação combinado a procedimentos de cálculo via *Raster Calculator Tool*, no ArcGIS.

$$LS = \left(\frac{FA \times CS}{22,13} \right)^{0,4} \times \left(\frac{\text{sen}(S)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (3) \quad 123$$

Em que FA é o fluxo acumulado, CS é o tamanho da célula do modelo digital de elevação (m) e S é a declividade (m).

O modelo utilizado para mapear a bacia do Rio das Mortes foi proveniente de imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e apresenta resolução de 30 m.

O fator de cobertura e manejo do solo (C) expressa a relação entre a perda de solo em uma determinada área, sob determinado manejo e a perda em uma área equivalente, considerando o mesmo tipo de solo, a mesma declividade e erosividade, todavia, com o solo descoberto por um período de 2 anos. O fator C varia de 0 a 1, valor próximo a 1 representa áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, sendo, portanto, mais vulneráveis à erosão hídrica.

O mapa de cobertura e manejo do solo foi derivado do mapa de uso do solo do Brasil na escala 1:500.000, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). Foram consideradas seis classes de uso do solo: solo exposto, área urbana, agricultura, pastagem, mata e água (Figura 4).

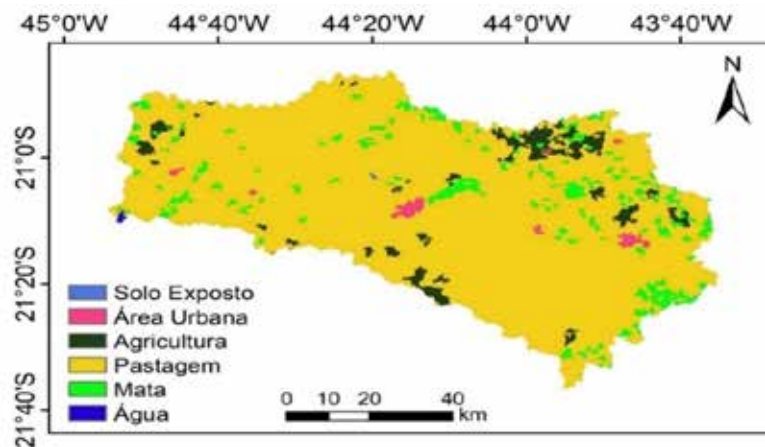


Figura 4. Mapa de cobertura e manejo do solo na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

Os valores do fator C foram obtidos na literatura, em estudos com as mesmas condições de uso e cobertura de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Cobertura e manejo do solo na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG)

Uso do solo	Área (%)	C	Fonte
Solo exposto	0,025	1,00	
Área urbana	0,876	0,00	
Agricultura	4,177	0,29	Beskow <i>et al.</i> (2009)
Pastagem	88,670	0,09	Ozsoy <i>et al.</i> (2012)
Mata	6,179	0,01	Beskow <i>et al.</i> (2009)
Água	0,073	0,00	

Como em grande parte da área de estudo não são adotadas práticas de conservação do solo, o fator P foi considerado 1 para toda a bacia, conforme descrito por Beskow *et al.* (2009), Vemu e Pinnamaneni (2011), Silva, Montenegro e Santos (2012), Oliveira *et al.* (2014), Dias e Silva (2015) e Durães, Mello e Beskow (2016), em estudos semelhantes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso de geotecnologias associado com modelos matemáticos permite explorar a dinâmica hidrológica e hidráulica das bacias hidrográficas (CORREIA *et al.*, 2015). A definição de decisões baseada nos resultados destes métodos possibilita a minimização dos impactos ambientais oriundos da ocupação desordenada das bacias hidrográficas. Na Figura 5 estão apresentados os mapas dos fatores R, K, LS e CP para a bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

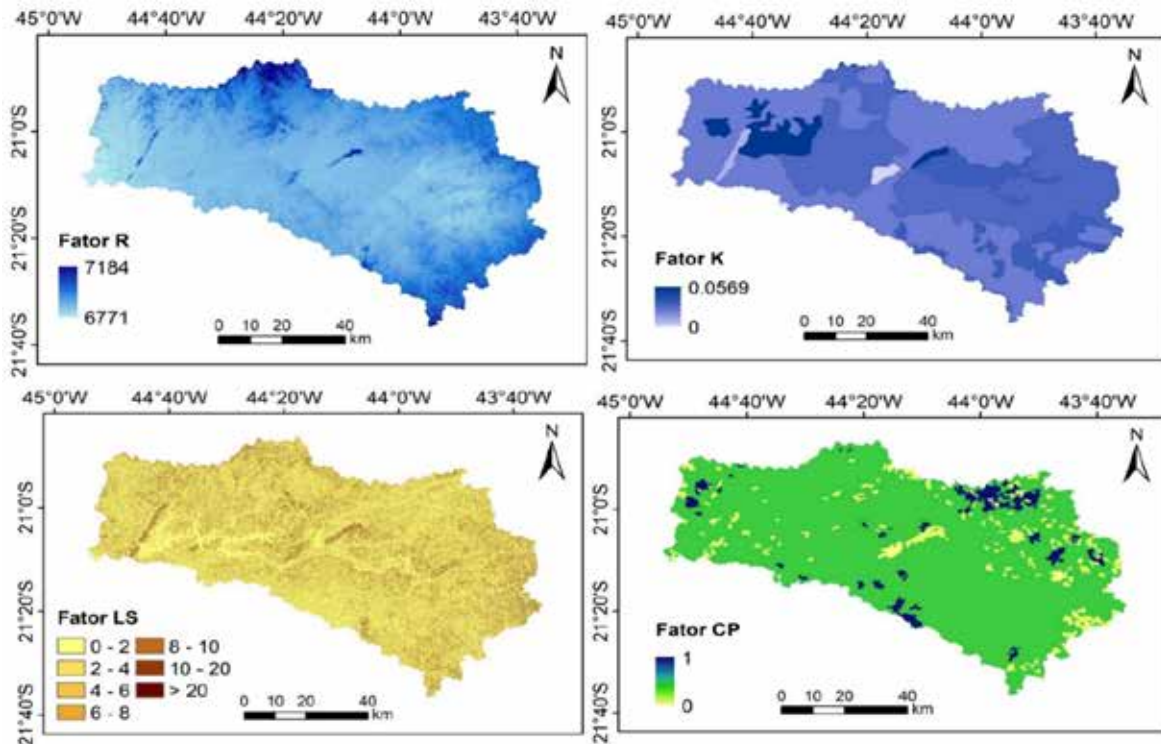


Figura 5. Mapa dos fatores R, K, LS e CP para a bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

Observou-se que a erosividade da chuva (Fator R) na bacia variou entre 6.771 e 7.184 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, próximo ao visto em estudos semelhantes na região. Aquino *et al.* (2012), utilizando a classificação proposta por Foster *et al.* (1981), definiram a erosividade da chuva para a região Sul de Minas Gerais, que possui variação de 5.145 a 7.776 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, como “alta”. Dessa forma, também se pode classificar a erosividade da chuva na bacia do Rio das Mortes como “alta”.

A variação da erosividade da chuva observada neste estudo foi maior que os valores definidos por Silva *et al.* (2009) e Mantovani *et al.* (2018) em estudos semelhantes na região de Lavras, correspondentes a 4.865 e 4.745,29 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. No entanto, Mello *et al.* (2012) e Rodrigues *et al.* (2017) observaram índices médios variando de 6.000 a 8.000 e de 6.805 a 7.684 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, em bacias localizadas no Sul de Minas Gerais. Além disso, Mello *et al.* (2007) verificaram índices médios de erosividade dentro do Estado de Minas Gerais variando de 5.000 a mais de 12.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

A alteração da erodibilidade é um reflexo das unidades pedológicas prevalentes na área da bacia hidrográfica. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), os Latossolos, por serem solos geralmente profundos, coesos, com alto grau de estabilidade e alta porosidade e permeabilidade, possuem baixa erodibilidade, sendo mais resistentes à erosão hídrica.

A erodibilidade do solo (Fator K) na bacia variou entre 0,0000 e 0,0569 t h MJ⁻¹ mm⁻¹. Tendo em vista que o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (K = 0,0171) predomina em grande parte da bacia (48,15%), os solos da bacia hidrográfica do Rio das Mortes podem ser considerados como solos de “baixa” erodibilidade, apresentando, portanto, baixa susceptibilidade à erosão hídrica.

Em estudos semelhantes na região, Silva *et al.* (2009) (Latossolo Vermelho distroférico típico), Rodrigues *et al.* (2017) (Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico) e Mantovani *et al.* (2018) (Latosolo) constataram que os Latossolos apresentaram menor perda de solo, corroborando os resultados deste estudo.

O fator LS representa a contribuição do escoamento superficial no processo de erosão hídrica. A declividade e o comprimento de rampa são os fatores que regulam o escoamento de água nas encostas, incidindo a erosão laminar pelo declive. O processo de erosão linear também ocorre quando o comprimento de rampa e ondulações das vertentes coletoras de fluxos concentra e aumenta o escoamento pluvial (STEIN *et al.*, 2003). Quanto maior o valor de LS, maior a susceptibilidade à perda de solo por erosão hídrica.

Observou-se a seguinte distribuição do fator LS na bacia (Figura 5): 0 - 2 representa uma área de 3.756,77 km², o que corresponde a 56,839% da área total da bacia; 2 - 4 representa uma área de 879,66 km², o que corresponde a 13,309% da área total da bacia; 4 - 6 representa uma área de 685,93 km², o que corresponde a 10,378% da área total da bacia; 6 - 8 representa uma área de 450,50 km², o que corresponde a 6,816% da área total da bacia; 8 - 10 representa uma área de 282,10 km², o que corresponde a 4,268% da área total da bacia; 10 - 20 representa uma área de 446,60 km², o que corresponde a 6,757% da área total da bacia; e 107,93 km² possui fator LS > 20, o que corresponde a 1,633% da área total da bacia.

A distribuição espacial do fator LS mostrou que grande parte da bacia (56,839%) apresenta valores de LS inferiores a 2, apontando baixa influência do fator para a ocorrência de processos erosivos na bacia. Pelos resultados obtidos pode-se observar que 91,61% da área da bacia apresentaram valores de LS inferiores a 10. Resultado semelhante foi observado por Oliveira *et al.* (2014) e por Rodrigues *et al.* (2017), avaliando a vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia do Rio Verde e na bacia do Rio Cervo, sendo os valores obtidos iguais a 93 e 92%, respectivamente.

Para Weill e Sparovek (2008) e Freitas *et al.* (2012) a cobertura do solo é o componente mais importante no controle da erosão hídrica. A vegetação existente em determinada área pode influenciar de forma considerável a agregação do solo e a resistência à desagregação (COSTA JÚNIOR *et al.*, 2011). Além de proteger o solo contra a perda de material, o uso adequado e a cobertura vegetal o protegem direta e indiretamente contra os efeitos modificadores das formas do relevo (KAWAKUBO *et al.*, 2005).

Observou-se que a pastagem representa a principal classe de uso do solo na região estudada, ocupando 88,67% da área da bacia. Tal atividade ocasiona, principalmente, supressão da vegetação nativa e compactação do solo devido ao pastoreio dos animais, de forma que; essa alteração da cobertura vegetal rompe o estado de equilíbrio dinâmico e acelera os processos erosivos.

No entanto, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes (IGAM, 2014), predominam na região as pastagens plantadas, e, como o fator C para pastagem (0,09) pode ser considerado baixo, infere-se que 88,67% dos solos da bacia possuem uso com baixa vulnerabilidade à erosão hídrica.

Avanzi *et al.* (2013) analisando o processo de erosão hídrica em uma bacia reflorestada notaram que em áreas destinadas ao plantio de eucalipto há evidências de maiores níveis de perda de solo do que em áreas com vegetação de Mata Atlântica, o que reforça o papel da cobertura nativa na conservação do solo.

A partir da álgebra de mapas aplicada aos fatores da RUSLE obteve-se a distribuição espacial do potencial anual médio de perda de solos na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (Figura 6). Devido às limitações da RUSLE, os valores não podem ser interpretados quantitativamente, os mesmos devem ser interpretados de forma qualitativa (DURÃES; MELLO, 2014; BARBOSA *et al.*, 2015). Dessa forma, para a análise dos resultados foi adotada a classificação proposta por Beskow *et al.* (2009) (Tabela 3).

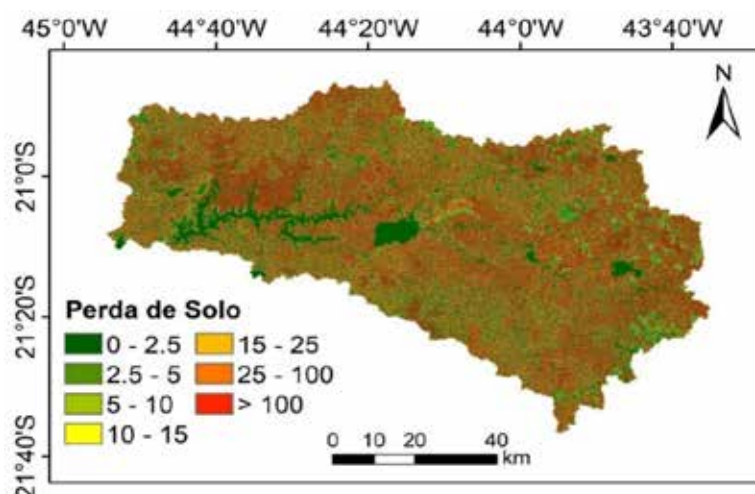


Figura 6. Perda de solo (ton ha⁻¹ ano⁻¹) na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG).

Tabela 3. Classificação da vulnerabilidade dos solos à erosão

Perda de Solo (ton ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Área (km ²)	Área (%)	Vulnerabilidade
0,0 - 2,5	2.987,49	45,20	Ligeira
2,5 - 5,0	118,97	1,80	Ligeira a Moderada
5,0 - 10,0	179,78	2,72	Moderada
10,0 - 15,0	160,61	2,43	Moderada a Alta
15,0 - 25,0	315,27	4,77	Alta
25,0 - 100,0	1.826,86	27,64	Muito Alta
> 100,0	1.020,51	15,44	Extremamente Alta

Observou-se que na maior parte de bacia, 45,20%, há predomínio da classe de vulnerabilidade “Ligeira”. Isso está relacionado aos baixos valores de erodibilidade do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, que ocupa grande parte da área da bacia, e também aos baixos valores de LS e CP, que apontam baixa vulnerabilidade à ocorrência de processo erosivo na bacia.

No entanto, 50,28% da área da bacia apresentaram perda de solo superior a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹, o que indica a existência de áreas altamente susceptíveis à erosão hídrica e evidencia a necessidade de implementação de melhorias no manejo e práticas conservacionistas do solo, como recuperação da cobertura vegetal, rotação de culturas, controle de queimadas, entre outros.

Corroborando os resultados do presente trabalho, Durães e Mello (2016), estimando a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica na bacia do rio Sapucaí (MG), observaram que na maior parte da bacia (42,12%) houve predomínio da classe de vulnerabilidade “Ligeira” e que 44,87% da área da bacia apresentaram perda de solo superior a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da RUSLE integrada ao uso de SIG mostrou-se eficaz na avaliação da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica, servindo como um instrumento para fornecer subsídio para a gestão dos recursos naturais na região.

Os resultados mostraram que, de modo geral, os solos da bacia apresentam ligeira vulnerabilidade à erosão hídrica. No entanto, verificou-se a necessidade de implementação de melhorias no manejo e práticas conservacionistas do solo, como recuperação da cobertura vegetal, rotação de culturas, controle de queimadas, entre outros, com o propósito de reduzir a vulnerabilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelas bolsas e pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

AQUINO, D. N. *et al.* A aplicação da USLE e SIG na estimativa da perda de solos em uma microbacia hidrográfica do semiárido do estado do Ceará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. *Anais [...]* Mato Grosso do Sul: CONBEA, 2007.

AQUINO, R.; 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**, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542012000500006>.

AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N. S.; 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**, v. 37, n. 5, p. 427-434, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542013000500006>.

BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F.; MIOTO, C. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 38, p. 170-179, 2015.

BENCHETTOUTH, A.; KOURI, A.; JEBARI, S. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2875-6>.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014. 355p.

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**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>.

BORGES, K. M. R.; JÚNIOR, O. A. C.; MARTINS, E. S.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F. Vulnerabilidade natural: a perda de solo da bacia do rio Carinhanha (MG/BA) usando uma abordagem qualitativa da equação universal de perda de solos. **GEOgraphia**, v. 14, n. 27, 2012. DOI: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2012.v14i27.a13636>.

128 CARVALHO, M. A. R.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; CARVALHO, L. C. C. Erosion losses from runoff: interaction of soil cover and erosion control practice. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 6, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000600013>

CASTRO, W. J.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. F. C.; RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de Solos do Cerrado Goiano. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 4, n. 2, p. 305-320, 2011.

CATEN, A.; MINELLA, J. P. G.; MADRUGA, P. R. A. Disintensification of land use and its relation with soil erosion. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000900012>

CERDAN, O.; GOVERS, G.; BISSONNAIS, Y.; OOST, K. VAN; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F. J. P. M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M. J.; DOSTAL, T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. **Geomorphology**, v. 122, p. 167-177, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 6, p. 1183-1202, 2015.

COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e $\delta^{13}C$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1241-1252, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400017>.

DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p102-114>.

DIAS, E. R.; SILVA, R. M. Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena - Paraíba. **Caminhos de Geografia**, v. 16, n. 54, p. 192-204, 2015.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Hydrosedimentologic disturbance index applied to watersheds of Minas Gerais state. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 38, n. 1, p. 61-67, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000100007>.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 677-685, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016121182.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Sediment yield in Paraopeba river basin - MG, Brazil. **International Journal of River Basin Management**, v. 14, n. 4, p. 367-377, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1159571>.

ENGEL, B. **Estimating soil erosion using RUSLE - Using Arcview**. Purdue University, 2003. Disponível em: <http://pasture.ecn.purdue.edu/~engelb/agen526/gisrusle/gisrusle.html>. Acesso em: 01 mar. 2016.

FANG, G.; YUAN, T.; ZHANG, Y.; WEN, X.; LIN, R. Integrated study on soil erosion using RUSLE and GIS in Yangtze River Basin of Jiangsu Province (China). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4331-2>.

FAYAS, C. M.; ABEYSINGHA, N. S.; NIRMANEE, K. G. S.; SAMARATUNGA, D.; MALLAWATANTRI, A. Soil loss estimation using rusle model to prioritize erosion control in KELANI river basin in Sri Lanka. **International Soil and Water Conservation Research**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>.

FOSTER, G. R.; McCOOL, 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**, v. 36, p. 355-359, 1981. Disponível em: https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/linkfiles/USLE%20Unit%20conversions.pdf. Acesso em: 07 jun. 2019.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solos-do-estado-de-minas-gerais>. Acesso em: 01 mar. 2019.

FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CASTRO, N. E. A.; CARDOSO, D. P.; DIAS, A. C.; CARVALHO, G. J. Modelagem da proteção do solo por plantas de cobertura no sul de Minas Gerais. **Agroambiente**, v. 6, n. 2, p. 117-123, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i2.706>.

GRAVES, A. R.; MORRIS, J.; DEEKS, L. K.; RICKSON, R. J.; KIBBLEWHITE, M. G.; HARRIS, J. A.; FAREWELL, T. S.; TRUCKLE, I. The total costs of soil degradation in England and Wales. **Ecological Economics**, v. 119, p. 399-413, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento do Uso do Solo no Brasil, para o ano 2000**. Disponível em: http://maps.lapig.iesa.ufg.br/?layers=pa_br_uso_solo_500_ibge. Acesso em: 30 abr. 2019.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes**. Belo Horizonte: IGAM, 2014. Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/images/CERH_MG/2.C%20C3%A2maras_T%20C3%A9cnicas/CTIL_18-21/83%20AA_RE/Item_3_-_14.Proposta_de_enquadramento_GD2-ilovepdf-compressed_1.pdf. Acesso em: 23 jan. 2020.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais** [...] Goiânia, 2005.

- KHALI ISSA, L.; BEN HAMMAN LECH-HAB, K.; RAISSOUNI, A.; EL ARRIM, A. Quantitative Mapping of Soil Erosion Risk Using GIS/USLE Approach at the Kalaya Watershed (North Western Morocco). **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 7, n. 8, p. 2778-2795, 2016. Disponível em: https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N8/291-JMES-2151-Khali%20Issa.pdf. Acesso em: 07 jun. 2019.
- KUMAR, A.; DEVI, M.; DESHMUKH, B. Integrated remote sensing and geographic information system based RUSLE modelling for estimation of soil loss in western Himalaya, India. **Water Resources Management**, v. 28, n. 10, p. 3307-3317, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0680-5>.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>.
- MANTOVANI, V. A.; AMORIM, J. S.; RODRIGUES, A. F.; JUNQUEIRA, R.; CARVALHO, R. N.; OLIVEIRA, A. S. Estimativas da taxa de entrega de sedimentos e áreas suscetíveis à erosão em uma bacia hidrográfica no sul de Minas Gerais - Brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 2, p. 1-10, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v16i2.5061>.
- MELLO, C. R.; SÁ, M. A. C.; CURTI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M. Erosividade mensal e anual no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 537-545, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400012>.
- MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURTI, N.; YANAGI, S. N. M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 1, p. 53-59, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542012000100007>
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.009>.
- MELLO, C. R.; ÁVILA, L. F.; VIOLA, M. R.; CURTI, N.; NORTON, L. D. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 12, p. 8683-8698, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4033-3>.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Modeling erosion and deposition: Topographic effects. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 6, p. 1624-1640, 1986.
- MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3. ed. BlackWell, 2005. 304p.
- NAPOLI, M.; CECCHI, S.; ORLANDINI, S.; MUGNAI, G.; ZANCHI, C. A. Simulation of field-measured soil loss in Mediterranean hilly areas (Chianti, Italy) with RUSLE. **Catena**, v. 145, p. 246-256, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.018>.
- NEEDELMAN, B. A. What are Soils? **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 3, p. 2, 2013.
- OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; DURÃES, M. F.; SILVA, A. M. Soil erosion vulnerability in the Verde River Basin, Southern Minas Gerais. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 38, n. 3, p. 262-269, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000300006>.
- OZSOY, G.; AKSOY, E.; DIRIM, M. S.; TUMSAVAS, Z. Determination of Soil Erosion Risk in the Mustafakemalpaşa River Basin, Turkey, Using the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographic Information System, and Remote Sensing. **Environmental Management**, v. 50, n. 4, p. 679-694, 2012. DOI: [10.1007/s00267-012-9904-8](https://doi.org/10.1007/s00267-012-9904-8).

- PANAGOS, P.; BORRELI, P.; POESEN, J.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; MEUSBURGER, K.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 438-447, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- REATTO, A.; SPERA, S. T.; CORREIA, J. R.; MARTINS, E. S.; BLOISE, G. L. F.; SILVA, A. V. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Olaria - DF**. Escala 1:300.000. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/564735>. Acesso em: 07 jun. 2019.
- 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)**. Agriculture Handbook. Washington, DC: USDA 1997. v. 703, 384p.
- RODRIGUES, J. A. M.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; RODRIGUES, M. C. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Cervo - MG. **Geociências**, v. 36, n. 3, p. 531-542, 2017. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/12477>. Acesso em: 07 jun. 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**, v. 39, n. 7, p. 691-699, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700011>.
- SÁ JUNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brasil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 108, p. 1-7, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>.
- SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1811-1820, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600029>.
- SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; NORTON, L. D.; AVANZI, J. C.; OLIVEIRA, A. H.; LIMA, G. C.; LEITE, F. P. Water erosion modeling in a watershed under forest cultivation through the USLE model. *In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, SOIL SOLUTIONS FOR A CHANGING WORLD. Proceedings [...]*. Brisbane, Australia, August 2010. Disponível em: <https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0614.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2019.
- SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. **Natural Hazards**, v. 62, n. 3, p. 953-970, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0128-2>.
- STEIN, D. P.; PONÇANO, W. L.; SAAD, A. R. Erosão na bacia do rio Santo Anastácio, oeste do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 22, n. 2, p. 143-162, 2003.
- TANG, Q.; XU, Y.; BENNET, S. J.; LI, Y. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 4, p. 1715-1724, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3523-z>.
- TOUBAL, A. K.; ACHITE, M.; OUILLON, S.; DEHNI, A. Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the WadiSahouat basin, North-West of Algeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>.
- VEMU, S.; PINNAMANENI, U. B. Estimation of spatial patterns of soil erosion using remote sensing and GIS: a case study of Indravaticachment. **Natural Hazards**, v. 59, n. 3, p. 1299-1315, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9832-6>.

WEI, Q.; QIANKUN, G.; WENHONG, C.; ZHE, Y.; QINGHONG, Y.; ZHIJIE, S.; FENLI, Z. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed. **Soil and Tillage Research**, v. 182, p. 10-24, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.004>.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 801-814, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034>.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agriculture Handbook. Washington, DC: USDA, 1978. v. 537, 58p.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar da Bacia do Rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, p. 51-60, 2010.

ZHANG, H.; YANG, Q.; LI, R.; LIU, Q.; MOORE, D.; HE, P.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 177-188, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.027>.