

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

NATANAEL RODOLFO RIBEIRO SAKUNO

**ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA PELO MÉTODO DE EROSÃO
POTENCIAL EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SUL DE MINAS
GERAIS**

ALFENAS

2018

NATANAEL RODOLFO RIBEIRO SAKUNO

**ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA PELO MÉTODO DE EROSÃO
POTENCIAL EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SUL DE MINAS
GERAIS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela Universidade de Federal de Alfenas - UNIFAL-MG. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
(UNIFAL-MG)

Coorientador: Prof. Dr. Marx Leandro Naves Silva
(UFLA)

Colaborador: Dr. Sc. Velibor Spalevic (University of Montenegro)

ALFENAS

2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas / UNIFAL-MG
Programa de Pós-graduação – Ciências Ambientais
Rua Gabriel Monteiro da Silva, 714. Alfenas - MG CEP 37130-000
Fone: (35) 3701-9685 (Coordenação) / (35) 3701-9262 (Secretaria)
<http://www.unifal-mg.edu.br/ppgca/>



NATANAEL RODOLFO RIBEIRO SAKUNO

“Estimativa da Erosão Hídrica pelo Método de Erosão Potencial em uma Sub-bacia Hidrográfica do Sul de Minas Gerais”

A Banca julgadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de Concentração: Ciências Ambientais.

Aprovado em: 31 de agosto de 2018.

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura: 

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Instituição: UFLA

Assinatura: 

Prof. Dr. Breno Régis Santos
Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura: 

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico tudo isso à minha mãe, senhora miúda, mas forte na vontade, de onde herdei a bondade, o amor e a perseverança de quem enfrentou sozinha os percalços da vida para criar, estudar e formar três filhos.

À minhas irmãs que mesmo na distância se mostraram pessoas de confiança que levarei com carinho para vida toda. Caroline pelo apoio irrestrito, pelos conselhos e pelas tantas vezes que me disse juízo. À Gabriela pela orientação e carinho, pelas risadas e por me guiar e aconselhar com os mais pontuais, incisivos e sábios conselhos que levarei para vida.

Aos Professores Ronaldo Luiz Mincato e Marx Leandro Naves Silva, pelas orientações, amizade, disposição, apoio, paciência e conselhos.

A todos os professores do PPGCA, pelo que fizeram na caminhada, compartilhando seus conhecimentos, amizade e conselhos.

À Universidade Federal de Alfenas, pelos servidores, em especial a Denise, sempre disposta a ajudar.

Aos “*Jógrafos joseenses*” que mesmo à distância sempre foram amigos.

Aos amigos e colegas de laboratório, André, pela amizade, Augusto, por ajudar e enfrentar todos os percalços comigo e Rodrigo, pelo companheirismo e amizade.

Aos amigos da “Casa Nova”, Valdeci, grata amizade.

À Kamilla, pelo carinho, amor, companheirismo e amizade. Nada disso seria possível sem seu apoio e momentos felizes. Serei eternamente grato por todo ensinamento e desconstrução, que você seja sempre feliz e completa.

Ao Bruno e Alexandre, que me abrigaram e compartilharam morada e amizade.

E a todos aqueles que fizeram parte da minha jornada e que contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Ao meu pai, que partiu antes da conclusão dessa jornada.

Compadre meu Quelémem sempre diz que eu posso aquietar meu temer de consciência, que sendo bem-assistido, terríveis bons espíritos me protegem. Ipe! Com gosto... Como é de são efeito, ajudo com meu querer acreditar. Mas nem sempre posso. O senhor saiba: eu toda a minha vida pensei por mim, forro, sou nascido diferente. Eu sou eu mesmo. Divêrjo de todo mundo... **Eu quase que nada não sei. Mas desconfio de muita coisa.** O senhor concedendo, eu digo: para pensar longe, sou cão mestre - o senhor solte em minha frente uma idéia ligeira, e eu rastreio essa por fundo de todos os matos, amém! (2001, p. 31).

*“João Guimarães Rosa”
“Grande Sertão: Veredas”*

Estimativa da Erosão Hídrica pelo Método de Erosão Potencial em uma Sub-bacia Hidrográfica do sul de Minas Gerais

RESUMO

A erosão hídrica é o processo que mais afeta negativamente os solos tropicais brasileiros e causa perdas de solos agricultáveis e capacidade de suporte aos ecossistemas. Estimativas das perdas de solo por erosão hídrica são fundamentais para avaliar os impactos da produção de sedimentos a partir dos solos. Para tanto, melhorar as estimativas de perdas de solo pela adequação dos modelos para diferentes paisagens edafoclimáticas são necessárias para avaliações que reflitam as diferenças geográficas e climáticas das originais do método. Portanto, este estudo visou adaptar, aplicar e avaliar as potencialidades do Método de Erosão Potencial em Latossolos da Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús, Sul do Estado de Minas Gerais. Assim, foram processados em Sistemas de Informação Geográfica dados geológicos, topográficos, pedológicos, climáticos e de uso e ocupação do solo. Os dados foram comparados aos obtidos pela Equação Universal de Perdas de Solo Revisada. O resultado do coeficiente de intensidade de erosão, Z , foi de 0,28, indicando baixa intensidade de erosão. As perdas médias potenciais foram de $31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ pelo Método de Erosão Potencial e $36 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ pela Equação Universal de Perdas de Solo Revisada, ambas acima da TPS. A aplicação dos modelos e sua comparação indicou que o Método de Erosão Potencial apresentou desempenho preciso para o uso nas estimativas das taxas de erosão hídrica em solos tropicais.

Palavras-chave: Modelagem da erosão hídrica. Tolerância de perdas de solo. Solos tropicais.

Estimation of Water Erosion by Potential Erosion Method in a watershed of the South of Minas Gerais

ABSTRACT

Water erosion is the process that most negatively affects Brazilian tropical soils and causes soil losses from arable areas and capacity to support surrounding ecosystems. Estimates from soil loss caused by water erosion are fundamental to evaluate the impacts of sediment production from soils. In order to do so, improving soil loss estimates by adapting the models to different edaphoclimatic landscapes is necessary to obtain evaluations that reflect the geographic and climatic differences of the originals of the method. Therefore, this study aimed to adapt, apply and evaluate the potentialities of the Potential Erosion Method in Latosols of the Hydrographic Sub-basin of Ribeirão Caçús, South of the State of Minas Gerais. Thus, geological, topographic, pedological, climatic and land use and occupation data were processed in the Geographic Information Systems for relative Potential Erosion Method. The data was compared to the data that was obtained by the Revised Universal Equation of Soil Losses. The result of erosion intensity coefficient, Z , were 0.28, indicating low erosion intensity. Potential average losses were $31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ by the Potential Erosion Method and $36 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ by the Revised Universal Soil Loss Equation, both above of TPS. The application of the models and their comparison indicated that the Potential Erosion Method has good performance for use in estimating the water erosion rates in tropical soils.

Key words: Modeling of water erosion. Erosion Potential Method. Tropical soils.

LISTA DE FIGURAS

PARTE II

Figura 1 - Mapa de localização da Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús, Alfenas – MG	46
Figura 2 - Mapa de uso e ocupação do solo (A), Mapa de solos (B), Mapa da Intensidade de Erosão (C), Mapa de perdas de solo (EPM) (D).....	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

PARTE I

Tabela 1 -	Categorias de intensidade erosiva, intensidade da erosão, coeficiente e média de Z	21
Tabela 2 -	Relação entre o tipo de solo e o coeficiente médio de resistência do solo a erosão hídrica Y.....	22
Tabela 3 -	Feições erosivas da IntErO e coeficiente médio ϕ correspondente.....	23

PARTE II

Tabela 1 -	Equações e parâmetros utilizados para estimativa das perdas de solo pelo EPM.....	41
Tabela 2 -	Coeficiente de resistência do solo à erosão (Y) do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.....	42
Tabela 3 -	Categorias de intensidade erosiva, intensidade da erosão, coeficiente e média de Z.....	43
Tabela 4 -	Valores de coeficientes de cobertura e manejo do solo.....	43
Tabela 5 -	Formas possíveis de se adaptar os usos tropicais com os coeficientes X_a	44
Tabela 6 -	Entrada e saída de dados do modelo EPM no programa IntErO.....	47
Tabela 7 -	Perdas de solo pelo EPM e RUSLE.....	49
Tabela 8 -	Valores de coeficientes de uso do solo atribuídos para a RUSLE e o EPM.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FAO – <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>	A – Coeficiente de forma da bacia hidrográfica
FJP – Fundação João Pinheiro	O – Perímetro da bacia hidrográfica
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento	L_v – Comprimento do curso d’água principal
CwB – Tropical Mesotérmico	m – Coeficiente de desenvolvimento da bacia hidrográfica
UNFPA – <i>United Nations Population Fund</i>	B – Largura média da bacia hidrográfica
WEPP – <i>Water Erosion Prediction Project</i>	L_b – Largura da bacia hidrográfica
USLE – <i>Universal Soil Loss Equation</i>	a – Assimetria da bacia hidrográfica
RUSLE – <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>	F_v – Maior área em largura da bacia hidrográfica
EPM – <i>Erosion Potential Method</i>	F_m – Menor área em largura da bacia hidrográfica
IntErO – <i>Intensity of Erosion and Outflow</i>	G – Densidade de drenagem
CTC – Capacidade de troca catiônica	ΣL – Somatório do comprimento de toda a rede de drenagem
A – Perda de solo média	K_i – Coeficiente de sinuosidade
R – Fator erosividade das chuvas	L_m – Menor distância entre a nascente e a foz
K – Fator erodibilidade do solo	H_{sr} – Altitude média
LS – Fator topográfico	h – Altitude média de duas curvas de nível adjacentes
C – Fator cobertura do solo	f – Área entre duas curvas de nível adjacentes
P – Fator práticas conservacionistas	D – Diferença de elevação média
W_{yr} – Perda de solo média	H_{min} – Menor elevação da bacia hidrográfica
T – Coeficiente de temperatura	L_{sr} – Comprimento médio de duas linhas de contorno adjacentes
t_0 – Temperatura do ar	Δh – Equidistância entre as curvas de nível
H_{yr} – Precipitação média	
π – 3,14	
Z – Coeficiente de erosão	
F – Área da bacia hidrográfica	
Y – Fator pedológico/litológico	
X_a – Fator uso do solo	
φ – Fator de feições erosivas	
I_{sr} – Declividade média	

H_{leb} – Altura do nível de base da bacia hidrográfica
 H_{max} – Maior elevação da bacia hidrográfica
 R_u – Coeficiente de retenção
 G_{yr} – Produção anual de sedimentos
 U_p – período de incidência climática
 h_b – nível de chuva torrencial
 Q_{max} – vazão máxima da bacia hidrográfica
 S_1 – Coeficiente de permeabilidade
 S_2 – Coeficiente de cobertura vegetal
 W – Percolação de fluxo subsuperficial
 g – Aceleração gravitacional
 f_p - parte da bacia composta por rochas e solos de permeabilidade alta
 f_{pp} - parte da bacia composta por rochas e solos de permeabilidade média
 f_o - parte da bacia composta por rochas e solos de permeabilidade alta
 f_s - área da bacia composta por mata
 f_t - área da bacia composta por pastagens e culturas permanentes
 f_g - área da bacia comporta por culturas temporárias, e solos sem cobertura vegetal
UTM – Universal Transversa de Mercator
GD3 - Unidade de Planejamento do Entorno do Reservatório de Furnas
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFV – Universidade Federal de Viçosa
SIG – Sistema de Informação Geográfica
LVd1 – Latossolo Vermelho distrófico em relevo plano a suave ondulado
LVd2 - Latossolo Vermelho distrófico em relevo ondulado
LVd3 - Latossolo Vermelho distrófico em relevo forte ondulado
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
 A_q – Área média do trecho do curso d'água
 L_q – Comprimento da área de medição
 C_q – Coeficiente de correção
 T_q – Tempo
SIG – Sistema de Informação Geográfica
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDS – Mapa Digital de Solo
CBERS-4 – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
B2 – Banda 2
B4 – Banda 4

LISTA DE EQUAÇÕES

PARTE I

Equação 1 -	Equação da perda média de solo (G_{yr}).....	21
Equação 2 -	Equação do coeficiente de intensidade de erosão (Z)	21
Equação 3 -	Equação do coeficiente de cobertura vegetal (S_2).....	22
Equação 4 -	Equação do coeficiente de retenção de sedimentos (R_u).....	23
Equação 5 -	Equação da vazão máxima de escoamento (Q_{max}).....	23
Equação 6 -	Equação da forma da bacia (A).....	24
Equação 7 -	Equação do coeficiente de permeabilidade da bacia (S_1).....	24
Equação 8 -	Equação do volume de percolação de água no solo (w).....	24
Equação 9 -	Equação da densidade da drenagem (G).....	24
Equação 10 -	Equação da sinuosidade da bacia (K).....	24
Equação 11 -	Equação da altitude média da bacia (H_{sr}).....	24
Equação 12 -	Equação da diferença média de elevação (D).....	25
Equação 13 -	Equação da altitude média da base erosiva (H_{leb}).....	25
Equação 14 -	Equação da evolução da erosão no relevo (E_r).....	25
Equação 15 -	Equação da largura média da bacia (B).....	25

Equação 16 -	Equação da simetria da bacia (a).....	25
Equação 17 -	Equação do coeficiente de desenvolvimento da bacia (m).....	26
Equação 18 -	Equação do coeficiente de temperatura (T).....	27
Equação 19 -	Equação de perdas de solo média anual RUSLE.....	29
Equação 20 -	Equação da solerância de perdas de solo (TPS).....	30

SUMÁRIO

PARTE I	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. DEGRADAÇÃO E EROSÃO HÍDRICA	17
2.2. MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS	19
2.3. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA	19
2.4. MÉTODO DE EROSÃO POTENCIAL	20
2.5. FATORES CLIMÁTICOS	26
2.6. <i>SOFTWARE</i> INTERO	27
2.7. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLO REVISADA	28
2.8. GEOPROCESSAMENTO, SENSORIAMENTO REMOTO E SIG	29
2.9. TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO	30
3. JUSTIFICATIVAS	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
PARTE II	38

PARTE I

1. INTRODUÇÃO

O solo é composto por diversos corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva e ocupando a maior porção superficial das extensões continentais (EMBRAPA, 1999). O solo é responsável por mais de 95% da produção mundial de alimentos (FAO, 2015). Apesar de sua importância, o solo é uma frágil camada, que precisa de milhares de anos para que ocorra a pedogênese, que é suscetível às perdas e degradação por erosão e à redução da capacidade produtiva, dificultando o desenvolvimento de plantas e produção de alimentos e demais produtos demandados pela sociedade (SCHULTZ et al., 2014).

As demandas do agronegócio brasileiro aumentam a pressão sobre os recursos naturais, especialmente, solos e a água, que exige ações de preservação e conservação, visando a sustentabilidade agrícola. Para tanto, é necessário compreender o solo, seu comportamento, suas potencialidades, limitações e capacidade produtiva (SCHULTZ et al., 2014), já que, além de responsável pela produção de alimentos, o solo retém duas vezes mais carbono orgânico do que a vegetação (DYONISIO, 2010).

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (ONU) (IPCC, 2014), o impacto das mudanças climáticas pode provocar no solo, em razão da intensificação das precipitações, o aumento do escoamento superficial, agravando os processos erosivos, especialmente nas áreas que não consideram os atributos do solo e do meio para adoção de práticas de manejo conservacionistas. De acordo com Dechen et al. (2015), no Brasil são estimadas perdas de 616,5 milhões de toneladas de solo por ano, com um custo de US\$ 1,3 bilhão.

A erosão hídrica é um processo natural que influencia os processos geomorfológicos, em que os materiais erodidos são carreados e depositados, modificando a paisagem (EFTHIMIOU et al., 2016). A degradação dos solos pela erosão hídrica em áreas agrícolas, carentes de manejos conservacionistas, agravam a sustentabilidade da produção agrícola (YOUSEFI et al., 2014). Tal situação é mais crítica em regiões tropicais montanhosas, onde a alta intensidade pluviométrica associada à elevada declividade do terreno aumenta o escoamento superficial da água (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

Neste cenário, modelos para avaliação e mitigação dos impactos ambientais são indispensáveis, pois o crescimento do consumo de países emergentes e o crescimento demográfico demandarão aumento na oferta de alimentos em 50%, na de água, entre 35 e 60%,

e na de energia em 45% (UNFPA, 2017). Logo, os usos do solo deverão ser intensificados, que pode levar à expansão das fronteiras agrícolas. Isto exigirá medidas mitigadoras contra a degradação, além do aumento da produtividade dos solos. Além disto, no Brasil, 70% da energia elétrica é hidrelétrica (BRASIL, 2017), o que torna os estudos sobre erosão hídrica essenciais para definição e adoção de práticas de conservação dos solos e de mitigação dos efeitos de assoreamento dos corpos d'água (CARVALHO, 2008).

Os primeiros trabalhos sugeriram no final da década de 1950, mas a maior parte dos artigos científicos sobre a erosão hídrica no Brasil começaram a partir de 1990. Há, com isso, a necessidade de continuar os estudos dos métodos de avaliação da erosão hídrica (BARRETO; BARROS; SPAROVEK, 2008). Os estudos de modelagem da erosão hídrica são ferramentas úteis para avaliar as modificações e os impactos, ao longo do tempo, na produção, transporte e deposição de sedimentos (JORDAN et al., 2005; ALATORRE; BEGUERÍA; VICENTE-SERRANO, 2011).

O Método de Erosão Potencial (EPM) tem sido eficaz em estimar a erosão hídrica potencial em diversas áreas da Europa, Oriente Médio, Norte da África e, mais recentemente no do Brasil (KOUHPEIMA; HASHEMI; FEIZN, 2011; NYSSSEN et al., 2014; HAGHIZADEH; TEANG; GODARZI, 2009; ZIA ABADI; AHMADI, 2011; BAROVIC et al., 2015; SPALEVIC et al., 2013; VUJACIC et al., 2015; KOSTADINOV et al., 2006; SILVA, 2014, TAVARES et al., 2017)

A aplicação de modelos exige a validação dos dados potenciais obtidos e a comparação com modelos já consagrados permite avaliar sua efetividade. Neste contexto, Bertoni; Lombardi Neto e Benatti (1959) formularam a Equação Universal de Perdas de Solos (do inglês *Universal Soil Loss Equation* – USLE) e a Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (do inglês *Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE) são os métodos mais aplicados em pesquisas brasileiras de avaliação das perdas de solo e na estimativa de seus parâmetros (BARRETO; BARROS; SPAROVEK, 2008; RENARD et al, 1997). Olivetti et al. (2015) aplicaram a RUSLE para a estimativa da erosão hídrica na sub-bacia de Ribeirão Caçús, a partir da análise multitemporal do uso do solo por imagens de satélite, nos anos de 1986, 1996, 2006 e 2011, obtendo uma série histórica das perdas de solo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma síntese atualizada sobre a degradação dos solos e a erosão hídrica com o intuito de fornecer justificativas para o estudo do solo. Em seguida é apresentado como a modelagem permite quantificar e estimar as perdas e sua necessidade para estudos ambientais. Com isso, são apresentados diferentes métodos de estimativa da erosão hídrica, passando para apresentação, aprofundamento e discussão do Método de Erosão Potencial.

Sendo assim, é apresentado o software IntErO e suas potencialidades partindo de Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica.

2.1. DEGRADAÇÃO E EROSÃO HÍDRICA

Os solos tropicais são, em geral, de baixa fertilidade natural e sofrem pressão devido ao crescimento demográfico. Solos destinados às atividades agrícolas, que não adotam práticas conservacionistas tendem a ser mais degradados pela erosão hídrica e pelo uso indiscriminado de agrotóxicos. Logo, é fundamental elaborar planos de uso sustentável do solo e da água, para manter a qualidade dos recursos naturais para utilização agrícola, com vistas a combater a fome e a subnutrição no mundo (ARAÚJO; ANJOS; PEREIRA, 2009; RONQUIM, 2010).

A baixa fertilidade natural é agravada pela compactação, pela redução do teor de matéria orgânica, que é acentuada nos casos de queimada, pelo desmatamento, pela monocultura, pelo uso incorreto de agroquímicos e pelo lançamento indevido de resíduos de atividades antrópicas, agravando ainda mais a degradação do solo (CAPECHE et al., 2008; RONQUIM, 2010).

A partir dos anos de 1950 ocorreu a intensificação de atividades agrícolas no Brasil. Esse processo aumentou a produção. No entanto, houve também consequências negativas ao meio ambiente decorrentes da retirada de cobertura vegetal e a expansão das fronteiras agrícolas sem as devidas precauções para garantir a preservação do equilíbrio dinâmico dos recursos naturais, especialmente as matas nativas, os solos e a água (IBGE, 2006; HOFIG; MOURA; GIASSON, 2015).

Para este equilíbrio é necessário compreender as condições físicas, químicas e biológicas do local de cultivo, como os atributos da paisagem para que não haja esgotamento dos recursos naturais. O Brasil, neste cenário, está sujeito à uma dinâmica hídrica que intensifica a erosão hídrica, e acarretar a degradação dos solos. Portanto, é necessário

compreender os processos e estimar as perdas de solo que diferentes tipos de cultivares causam aos solos tropicais (CUNHA, 2012; AYER et al., 2015).

Os solos degradados são aqueles que sofreram processos erosivos e/ou transformações físicas e/ou químicas e/ou biológicas em razão de alterações exógenas, endógenas ou antrópicas. As consequências da degradação do solo podem ser caracterizadas pela diminuição da sua capacidade produtiva e de sustentação da biodiversidade dos ecossistemas. Os solos degradados agravam e diminuem a fertilidade pela remoção de nutrientes, matéria orgânica e pelas perdas de solo pela erosão hídrica (CAPECHE et al., 2008).

As consequências de solos degradados, além das perdas de áreas agrícolas e de ecossistemas terrestres, são o assoreamento dos corpos d'água e prejuízos à fauna e à flora pelas alterações nos ecossistemas aquáticos e, ainda, a diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios de produção de energia hidrelétrica (CARVALHO, 2008).

Fatores como o relevo acidentado, chuvas concentradas em poucos meses do ano, características do solo, como textura, consistência friável, baixo teor de matéria orgânica e baixa estabilidade de agregados, tendem a aumentar a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica (AVANZI et al., 2013).

Para caracterização de áreas com solos degradados pela erosão hídrica devem ser consideradas as causas. Para tanto, a análise dos fatores da área deve considerar o grau da degradação física, química e biológica dos solos por análises laboratoriais. Por fim, há a necessidade de averiguar as variações climáticas para estimativa da erosão hídrica.

A erosão hídrica é parte do ciclo hidrossedimentológico, que inicia no impacto da chuva e prossegue com o transporte e a deposição dos sedimentos. Ambos são influenciados pela intensidade da chuva, pelas características do solo, pela cobertura do solo e pela declividade do terreno (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A erosão ocorre devido ao impacto das gotas de chuva sobre o solo descoberto, provocando a desagregação dos primeiros centímetros do solo, a redução da infiltração da água e o aumento do escoamento superficial.

Dependendo da intensidade de escoamento o arraste do solo pode ocorrer superficialmente no terreno, em canais muito ou pouco profundos, abertos pela ação de transporte da água em forma de erosão laminar ou, subordinadamente, em sulcos, que concentram o escoamento d'água. Por último, há a deposição das partículas nas partes baixas do relevo, em rios, lagos, represas, açudes, terraços (CAPECHE et al., 2008).

2.2. MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

Sistemas Ambientais, segundo Christofolletti (1999), são entidades estruturadas segundo o funcionamento de seus elementos e sofrem alterações conforme a dinâmica evolutiva. Para que se possa aplicar um modelo como instrumento de análise é necessário o levantamento completo das características que o compõe, devido às variáveis relevantes aliadas ao fluxo de energia e matéria nos ecossistemas e geossistemas. Enquanto que ecossistemas possuem um caráter ecológico e se referem aos sistemas ambientais biológicos atuantes conforme os seres vivos que os compõe, os geossistemas agem como sistemas ambientais para as sociedades humanas, ou seja, são os elementos físicos e biológicos que os compõe, analisados sob uma perspectiva geográfica.

Assim, para compreender e modelar a erosão hídrica de uma bacia hidrográfica são necessárias as características pluviométricas, hidrológicas, topográficas e de uso e manejo. Ainda que haja uma inter-relação entre os fenômenos que norteiam seus aspectos estruturais, funcionais e dinâmicos, eles apresentam características intrínsecas próprias (CHRISTOFOLETTI, 1999).

2.3. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EROSÃO HÍDRICA

A avaliação da erosão hídrica visando soluções para as perdas de solo e demais impactos que a gera sempre foi um desafio para ciência. Os procedimentos de modelagem permitem estimar esses processos por métodos indiretos (GLOBEVNIK et al., 2003). Assim, é preciso considerar uma escala que envolva os parâmetros usados para estimativa e as bacias hidrográficas apresentam uma escala abrangente para avaliar o comportamento da erosão hídrica e as perdas de sedimentos (TUCCI, 1998).

Apesar da modelagem de sistemas ambientais não ser recente, os estudos que tratam da estimativa de perdas de solo em bacias hidrográficas iniciaram em meados do Século XX, (RODRÍGUEZ; SUÁREZ, 2010). No entanto, as estimativas iniciais consideravam apenas os aspectos qualitativos dos processos erosivos, porém, já subsidiavam o aprimoramento das técnicas, além da criação de banco de dados sobre o tema (AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2006).

As técnicas de predição da erosão tiveram início nos EUA, na década de 1940, quando foram formuladas as equações empíricas para quantificar perdas de solo (SMITH, 1941; BROWNING; PARISH; GLASS, 1947; ZINGG, 1950). Em 1946 passaram a considerar

aspectos pluviométricos nas estimativas, que resultaram na elaboração de uma equação para estimar, a nível global, as perdas de solo por erosão hídrica (MUSGRAVE, 1947).

Assim, em 1950 as equações culminaram na USLE, considerando os parâmetros naturais e antrópicos que influenciam as perdas de solo pela erosão hídrica. Essa equação foi revisada por Wischmeier e Smith (1978).

A adoção e aplicação da USLE foi extensiva, que permitiu definir parâmetros para a obtenção de dados e elaboração de modelos físicos e conceituais. Assim, diversos parâmetros de obtenção foram criados (RENARD et al., 1997; LAFLEN; MOLDENHAUSER, 2003; SANDER et al., 2005).

O grande responsável pelos estudos sobre erosão hídrica foi a agricultura moderna, que passou a exaurir o solo, afetando sua capacidade produtiva, já que o solo é responsável por suprir todas demandas de *commodities* agrícolas para humanidade (LOMBARDI NETO; BERTONI, 2012).

Diversos modelos vêm sendo empregados para avaliar a erosão, considerando os padrões de erosão, precipitação, temperatura, dentre outros. Entre os mais utilizados está a Equação Universal de Perdas do Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*), (RENARD et al., 1997), adaptado da USLE (WICHMEIER; SMITH, 1978), MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) (WILLIAMS; BERNDT, 1977), WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (LAFLEN et al., 1991), PSIAC (*Pacific Southwest Interagency Committee*) (HEYDARIAN, 1996; CLARK, 2001), SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2005), EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) (SHARPLEY; WILLIAMS, 1990), EUROSEM (*The European Soil Erosion Model*) (MORGAN; RICKSON, 1990), AGNPS (*Agricultural Non-Point Source Pollution*) (YOUNG et al., 1987), KINEROS (*Kinematic Erosion*) (GOODRICH et al., 2000), CASC2D (*Cascade Two-Dimensions*) (OGDEN, 1998), TOPMODEL (SZILAGYI; PARLANGE, 1999), HMS (*Hydrologic Model System*) (YU, 2000) e EPM (*Erosion Potential Method*) (GRAVILOVIC, 1988).

2.4. MÉTODO DE EROSÃO POTENCIAL

O Método de Erosão Potencial (EPM) é um modelo semiquantitativo empírico, que estima a perda de solo e a intensidade da erosão hídrica, a partir da determinação de fatores que influem diretamente na erosão em escala de bacias hidrográficas, como a

declividade do terreno, resistência do solo, erosão em campo, uso e manejo do solo, temperatura e precipitação (GAVRILOVIC, 1988).

O modelo aplicado inicialmente em regiões de clima temperado foi adaptado conceitualmente, na correlação das características do solo e uso e manejo, para aplicação em uma região de clima tropical (TAVARES et al., 2017). Em seu estudo foi realizado uma comparação das perdas obtidas pela EPM com a RUSLE, demonstrando uma correlação efetiva de áreas de perdas, com uma equivalência entre as áreas de maiores e de menores perdas, apesar das diferenças quantitativas entre os resultados obtidos pelos modelos.

Segundo De Vente (2005), o EPM é um método semiquantitativo baseado na combinação de procedimentos descritivos e quantitativos. No entanto, na comparação com outros modelos semiquantitativo, a EPM apresenta apenas três parâmetros qualitativos e descritivos: Resistência do solo, Proteção do solo e Dimensões da erosão na bacia.

O método de Gavrilovic (1962; 1972) é baseado em tabelas detalhadas com índices que simulam os processos de erosão hídrica com base em estudos exploratórios e análises laboratoriais (DRAGICEVIC; KARLEUSA; OZANIC, 2016).

A perda de solo média (G_{yr}) pelo Método de Erosão Potencial é obtida equação 1 (GAVRILOVIC, 1988).

$$G_{yr} = T \cdot H_{yr} \cdot \pi \sqrt{Z^3} \cdot R_u \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: G_{yr} = perda média de solo ($m^3 km^{-2} ano^{-1}$); T = coeficiente de temperatura (adimensional); H_{yr} = precipitação média ($mm ano^{-1}$); $\pi = 3,14$; Z = coeficiente de intensidade de erosão (adimensional); R_u = coeficiente de retenção de sedimentos (adimensional).

O coeficiente de intensidade de erosão (Z) é o parâmetro que revela a intensidade dos processos erosivos atuantes, de acordo com os fatores ativos expressos na equação 2 e categorizados conforme a Tabela 1.

$$Z = Y \cdot X_a \cdot (\varphi + \sqrt{I_{sr}}) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: Y = coeficiente de resistência do solo a erosão (adimensional); X_a = coeficiente de uso e manejo do solo (adimensional); φ = coeficiente de grau da erosão no terreno (adimensional); I_{sr} = declividade média do terreno (%).

Tabela 1: Categorias de intensidade erosiva, intensidade da erosão, coeficiente e média de Z .

Categorias	Intensidade da Erosão	Coefficiente de Erosão (Z)	Média de Z
I	Extremamente severa	$Z > 1,0$	$Z = 1,25$

II	Severa	0,71 < Z < 1,0	Z = 0,85
III	Moderada	0,41 < Z < 0,7	Z = 0,55
IV	Ligeira	0,20 < Z < 0,4	Z = 0,30
V	Não aparente	Z < 0,19	Z = 0,10

Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1988) e Yousefi et al. (2014).

Outro parâmetro é a resistência do solo a erosão (Y), que representa a integração entre a infiltração e a percolação da água, além da resistência estrutural à desagregação de partículas (LAL, 1998), variando conforme os tipos de solo e de manejo (SILVA et al., 2000). Os coeficientes variam de 0,25 a 2,00 e representam a resistência do solo à desagregação e à remoção de partículas, considerando a rocha parental do solo, dos quais advém as principais propriedades do solo, os nutrientes, a mineralogia de argila, a capacidade de troca catiônica (CTC), metais pesados, textura, salinidade, acidez, estrutura, potencial de encolhimento e dilatação, erodibilidade e espessura do solo (SCHULER et al., 2010).

O coeficiente de resistência do solo a erosão hídrica (Y) pode ser obtido de acordo com a adaptação e comparação com as características dos solos da área de estudo com os de solos de áreas onde o método já foi aplicado (Tabela 2).

Tabela 2: Relação entre o tipo de solo e o coeficiente médio de resistência do solo a erosão hídrica Y.

Pedologia / Litologia	Y
Areais, cascalhos e solos soltos	2,0
Solos pouco agregados	1,6
Solos derivados de relevo cárstico	1,2
Solos derivados de rochas sedimentares	1,1
Espodossolos e xisto degradado	1,0
Solos carbonáticos, ferruginosos e silicatos associados a matéria orgânica	0,9
Cambissolos e solos pouco espessos	0,8
Vertissolos e solos mal drenados	0,6
Solos aluviais bem estruturados	0,5
Afloramentos rochosos	0,25

Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1988).

O coeficiente de uso e manejo do solo é X_a , em que as áreas conservadas, não afetadas pela erosão, possuem os coeficientes baixos (ZORN; KOMAC, 2009; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). O coeficiente varia entre 0,05, para áreas de boa proteção e manejo e 1,00 para áreas sem proteção e manejo.

O coeficiente que representa a cobertura vegetal é o S_2 (equação 3).

$$S_2 = 0,6 \cdot f_s + 0,8 \cdot f_t + 1,0 \cdot f_g \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: S_2 = coeficientes de % cobertura vegetal variável de 0 a 1. f_s boa cobertura, f_t de média cobertura e f_g pouca ou nenhuma cobertura.

O coeficiente que mensura as feições erosivas é o ϕ , obtido pelo tipo de uso, cobertura do solo e o grau de densidade e intensidade da erosão. Varia de 0,10, boa proteção do solo, a 1,00, onde há má proteção do solo, com erosão severa, como sulcos, ravinas e voçorocas (Tabela 3).

Tabela 3: Feições erosivas da IntErO e coeficiente médio ϕ correspondente.

Tipo de erosão	ϕ
Áreas com processos erosivos severos	1,00
Erosão em sulcos pesada	0,90
Erosão em sulcos média	0,80
Erosão laminar pesada	0,70
Erosão laminar sem sinais visíveis	0,60
Erosão laminar média	0,50
Erosão laminar leve	0,30
Áreas com erosão nas margens dos cursos d'água	0,20
Áreas agrícolas sob erosão não aparente	0,15
Áreas protegidas por vegetação nativa	0,10

Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1988).

A rampa de fluxo de escoamento até a área de deposição é denominada comprimento de rampa (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A intensidade é correlacionada à exposição, direta ou indireta, do solo aos agentes climáticos e à declividade do terreno.

O coeficiente de erosão (Z) é a intensidade da erosão, separado em 5 categorias, as quais são atribuídos valores médios dos coeficientes de intensidade da erosão.

O coeficiente de retenção de sedimentos (R_u) é obtido pela equação 4.

$$R_u = (O \cdot D)^{0,5} / [0,25 (L_v \cdot 10)] \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: O = perímetro da bacia hidrográfica (km); D = altura média da base ao topo da bacia hidrográfica (m); L_v = comprimento do curso d'água principal da bacia (km).

A produção total de sedimentos (W_{yr}) é medida pela intensidade da vazão do escoamento superficial da água e é representada por (Q_{max}) e calculada pela equação 5.

$$Q_{max} = [A \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot w \cdot (\sqrt{2gDF})^{0,5}] \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: Q_{max} = vazão máxima de escoamento ($m^3 s^{-1}$); A = coeficiente de forma da bacia (adimensional); S_1 = coeficiente de permeabilidade (adimensional); S_2 = coeficiente de cobertura vegetal (adimensional); w = volume percolado de água no solo em m^3 ; $2gDF^{0,5}$ = energia cinética da chuva, em que: g = gravidade ($9,8 m s^{-2}$); D = altura média da base ao topo da bacia (m); “ F ” = área da bacia hidrográfica (km^2).

A forma da bacia (A) é a relação entre o seu perímetro (O) e o comprimento do principal curso d'água (L_v) (VILELLA; MATOS, 1975). O coeficiente (adimensional) varia de baixo, médio a alto índice de forma. Quanto menor a forma da bacia, menor é o risco de enchentes (DUARTE et al., 2007). O coeficiente A é obtido pela equação 6.

$$A = 0,195 \cdot O / L_v \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: O = comprimento do perímetro da bacia (km); L_v = comprimento do curso d'água principal (km).

O coeficiente de permeabilidade da bacia (S_1) varia de 0 a 1, conforme a estrutura do material parental dos solos e é calculado pela equação 7.

$$S_1 = 0,4 \cdot f_p + 0,7 \cdot f_{pp} + 1,0 \cdot f_o \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: f_p = rochas muito permeáveis (%) (calcário, areia e cascalho); f_{pp} = rochas medianamente permeáveis (%) (ardósias, margas e arenitos); f_o = rochas pouco permeáveis (%) (argila pesada).

O volume de percolação de água no solo (w) é calculado pela equação 8.

$$w = h_b \cdot (15,0 - 22,0 \cdot h_b - 0,3 \cdot \sqrt{L_v}) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: w = volume de percolação de água no solo; h_b = altura da lâmina de água em chuvas intensas (mm); L_v = comprimento do curso d'água principal (km).

A densidade da drenagem (G) fornece indicações da eficiência da drenagem na bacia hidrográfica e é calculada pela equação 9.

$$G = \sum L / F \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: G = densidade de drenagem (km); L = cursos d'água na bacia (km); F = área da bacia (km^2).

A sinuosidade da bacia (K) controla a velocidade do escoamento superficial de água, e é calculada pela equação 10.

$$K = L_v / L_m \quad (\text{Equação 10})$$

Em que: K = sinuosidade da bacia (adimensional); L_v = comprimento do curso d'água principal (km); L_m = menor distância entre montante e jusante, ou talvegue (km).

A altitude média é obtida pela equação 11.

$$H_{sr} = (\sum (h \cdot f)) / F \quad (\text{Equação 11})$$

Em que: H_{sr} = altitude média da bacia (m); h = altitude média entre curvas de nível (m); f = área entre as curvas de nível (km^2); F = área da bacia (km^2).

A diferença média de elevação (D) é dada pela equação 12.

$$D = H_{sr} - H_{min} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que: D = diferença média de elevação (m); H_{sr} = altitude média da bacia (m); H_{min} = menor altitude da bacia (m).

A altitude média da base erosiva no relevo (H_{leb}) é obtida pela equação 13.

$$H_{leb} = H_{max} - H_{min} \quad (\text{Equação 13})$$

Em que: H_{leb} = altitude média da base erosiva (m); H_{max} = altitude máxima da bacia (m); H_{min} = menor altitude da bacia (m).

A evolução da erosão no relevo (E_r) é obtida pela equação 14.

$$E_r = H_{leb} / \pi \cdot (\sqrt[4]{F}) \quad (\text{Equação 14})$$

Em que: E_r = força da erosão no relevo (adimensional); H_{leb} = altitude média da base erosiva (m); F = área da bacia (km^2).

Quanto ao relevo, o comprimento de rampa e a declividade do terreno, ou inclinação média (I_{sr}) são fatores que controlam o escoamento das águas nas encostas e a erosão laminar. (STEIN; PONÇANO; SAAD, 2003).

A largura média (B) da bacia é obtida pela equação 15.

$$B = F / L_b \quad (\text{Equação 15})$$

Em que: B = largura média da bacia (km); F = área da bacia (km^2); L_b = largura média da bacia através de linhas paralelas (km).

A simetria (a) da bacia é calculada pela equação 16.

$$a = (F_v - F_m) / 0,5 (F_v + F_m) \quad (\text{Equação 16})$$

Em que: a = (a) simetria da bacia (adimensional); F_v = maior área da bacia (km^2); F_m = menor área da bacia (km^2).

O coeficiente de desenvolvimento da bacia m (adimensional) é calculado pela equação 17.

$$m = O / \sqrt{\pi \cdot F} \quad (\text{Equação 17})$$

Em que: m = desenvolvimento da bacia (km) O = comprimento da bacia (km); F = área da bacia hidrográfica (km²).

No modelo EPM é utilizado o valor médio da declividade do terreno (I_{sr}) para expressar a intensidade do escoamento superficial e deposição de partículas do solo e é calculada pela soma dos valores de curvas e a partir da soma total do comprimento das linhas de contorno (curvas de nível), multiplicado pelo intervalo de contorno, ou equidistância entre curvas e dividida pela área de drenagem (SILVA et al., 2014).

Contudo, com o advento de novas tecnologias de geoprocessamento de dados espaciais capazes de identificar e calcular quantitativamente as feições do relevo é possível ajustar melhores formas de aplicação do fator declividade por meio de programas computacionais de SIG (JENSEN, 2009).

2.5. FATORES CLIMÁTICOS

O clima é um elemento determinante na modelagem da erosão no EPM, pois representa fatores ativos que influem diretamente na desagregação de partículas do solo. Oscilações de temperatura e de precipitação são os principais responsáveis pelos efeitos do processo de intemperismo químico e físico, principalmente em regiões de clima tropical (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A precipitação anual média (mm ano⁻¹) é utilizada para os cálculos do modelo EPM, pela relação direta com o processo de desagregação, transporte e deposição de sedimentos, dados sobre precipitação média anuais podem ser obtidos tanto na literatura quanto por análises e cálculos a partir de metodologias específicas.

Quanto aos aspectos climáticos no modelo EPM, são necessários parâmetros de entrada referentes não só a média da precipitação anual (H_{yr}), em mm, como a temperatura anual média do ar (t_0) em °C, período de incidência climática (U_p) e nível de chuva torrencial (h_b). O h_b é calculado pela análise de séries históricas de maior precipitação registrada para um determinado mês. Este procedimento é realizado para os doze meses do ano, em que, faz-se uma média destes valores obtendo-se um valor médio da série histórica de h_b em mm. Esses dados podem ser obtidos por Estações Pluviométricas, disponíveis na Agência Nacional de Águas (ANA).

Um dos principais fatores responsáveis pelo fenômeno de erosão hídrica é a precipitação e a temperatura, já que são fatores pluviométricos que determinam a desagregação de partículas pelo impacto das gotas de chuva. Quando há variações térmicas e de intensidade pluviométrica acarreta na escala do intemperismo físico e químico, agravados em regiões de clima tropical.

O coeficiente de temperatura (T) no modelo EPM é calculado pela equação 18 (GAVRILOVIC, 1988).

$$T = \sqrt{(t_0 / 10) + 0,1} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que: t_0 = média anual de temperatura do ar, ° C.

Informações mais precisas desses fatores são obtidas a partir da compilação de padrões climáticos que compreendem um período relativamente longo e uniforme de, no mínimo, três décadas consecutivas (*World Meteorological Organization - OMM*, 2016). Dados de estações pluviométricas são comumente utilizados na literatura em pesquisas sobre erosão hídrica (DE VENTE; POESEN, 2005).

2.6. SOFTWARE INTERO

O *software Intensity of Erosion and Outflow – IntErO*, foi desenvolvido para estimativa via computacional do potencial de produção de sedimentos por erosão hídrica numa bacia hidrográfica. As vantagens do uso desse aplicativo se devem à incapacidade de medir a área real da bacia hidrográfica manualmente em mapas. Já, o *software* faz a análise por computação gráfica para uma estimativa detalhada dos dados obtidos, além da facilidade e rapidez de obtenção dos dados. (HAGHIZADEH; TEANG; GODARZI, 2009; BAROVIC et al., 2015; SPALEVIC et al., 2013; VUJACIC et al., 2015).

Após a obtenção, os dados da bacia são inseridos e os resultados obtidos imediatamente, evitando os erros que ocorrem no tratamento manual dos dados e os resultados são obtidos com precisão. Outra vantagem é que o *software* rejeita dados ilógicos, alerta para erros e não permite cálculos com dados inconsistentes. (KOSTADINOV et al., 2006; KOUHPEIMA; HASHEMI; FEIZN, 2011).

Os dados necessários para estimativa de erosão no IntErO são os memos de Gavrilovic (1988), a partir dos quais foi elaborado o IntErO (SPALEVIC, 2011): 1) Mapa topográfico 1:50.000 para o cálculo das áreas da bacia hidrográfica, comprimento das curvas de nível, área da maior parte do rio, área da parte inferior do rio, comprimento natural do curso d'água principal, distância entre as curvas de nível; 2) Mapa geológico 1:100.000 para classificar a bacia quanto à permeabilidade à água em porcentagem, ou seja, áreas que consistem em:

materiais rochosos muito permeáveis (calcário, areia, cascalho), rochas moderadamente permeáveis (ardósias, margas, arenitos) e rochas de baixa permeabilidade (argila pesada, eruptivas compactos); 3) Mapa pedológico dos solos da bacia; 4) Dados do uso da terra em porcentagem, ou seja, área da bacia sob florestas degradadas/conservadas, sob gramíneas, solo exposto etc.; 5) Dados meteorológicos: Altura das chuvas intensas em m, valor pluviométrico máximo de todos os meses, temperatura média do ar anual, em °C e precipitação média anual, em mm.

Após a inserção dos dados, caso não haja erros lógicos, é gerada uma tabela com os resultados, com informações para análise por especialistas em erosão hídrica, que permite avaliar a bacia estudada (NYSSSEN et al., 2014).

2.7. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLO REVISADA

A RUSLE (RENARD et al., 1997) foi aprimorada a partir da USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978) com o desenvolvimento tecnológico e a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto (SR) e métodos geoestatísticos modernos para a estimativa das perdas de solo. Com esse aprimoramento, devido à fácil adaptação a diferentes condições geográficas e climáticas, permitiu que fosse amplamente difundido.

A RUSLE expressa a relação entre os fatores (WISCHMEIER; SMITH, 1978): 1) Erosividade da chuva (R), por meio dos índices de precipitação e de escoamento superficial, sendo a capacidade de causar a erosão na superfície do solo; 2) Erodibilidade do solo (K), suscetibilidade do solo em sofrer a erosão hídrica considerando suas propriedades físicas, químicas e biológicas; 3) Fator topográfico (LS), representa a razão de perdas de solos num comprimento de rampa qualquer em campo, comparada à perda num comprimento de rampa padrão de 22,13 m, em condições idênticas e o fator S é a razão de perdas de solos em um determinado declive e a perda correspondente em um declive com 9% de inclinação em condições idênticas; 4) Uso e manejo do solo (C), que simula a taxa de perdas de solo com cobertura e manejo específico de uma determinada área comparada à outra área com as mesmas condições, porém com solo exposto e 5) Práticas conservacionistas (P), que determina a redução ou não da erosão hídrica, de acordo com as práticas agrícolas sustentáveis em relação as práticas com ausência de manejos conservacionistas.

A RUSLE, de Renard et al. (1997), é expressa pela equação 19:

$$A: R * K * LS * C * P \quad (\text{Equação 19})$$

Em que: A = perda de solo média anual, em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; R = fator erosividade da chuva, em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; K = fator erodibilidade do solo, em $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; LS = fator topográfico, adimensional; C = fator uso e manejo do solo, adimensional e P = fator práticas conservacionistas, adimensional.

2.8. GEOPROCESSAMENTO, SENSORIAMENTO REMOTO E SIG

O geoprocessamento consiste em um conjunto de ferramentas para criar, manipular e armazenar dados referenciados. Quando georreferenciados, os dados são processados em meio computacional, subsidiando análises qualitativas e quantitativas. O meio técnico que estrutura o geoprocessamento permite a aceleração e melhoria da qualidade dos mapeamentos temáticos, desde que haja controles de campo e precisão dos dados (YUAN et al., 2005).

No geoprocessamento, os SIG agregam *hardware* e *software*, que permitem análises e geram informação espacial. Caso a tríade SIG, SR e geoestatística esteja alinhada conforme o interesse do pesquisador, é possível gerar dados de suporte às ações de planejamento e gestão territorial. A aplicabilidade de um SIG é multidisciplinar, abrangendo diversas áreas do conhecimento (BURROUG; McDONNELL, 1998).

Olivetti et al. (2015) realizaram a modelagem espaço-temporal da erosão hídrica em Latossolos da sub-bacia do Ribeirão Caçús, no Município de Alfenas, sul de Minas Gerais a partir de mapas de uso e ocupação obtidos de imagens de SR em 1986, 1996, 2006 e 2011. Com isso, a análise multitemporal permitiu o acompanhamento da evolução dos processos de transformação do meio natural, que podem subsidiar ações ambientais mitigadores e de conservação dos recursos naturais.

A aplicação do SR é fundamental para avaliar e estimar os possíveis danos ambientais, pois alia ferramentas de abordagem da superfície terrestre de forma conjunta e sistemática. Essa ferramenta aliada a modelos matemáticos de predição das taxas de erosão hídrica e às demais tecnologias de geoprocessamento, como por exemplo SIG, permitem compreender a evolução dos processos erosivos (JENSEN, 2009).

Este quadro se repete devido à crescente facilidade de uso do SR na obtenção de informações imprescindíveis na aceleração e redução dos custos de obtenção de informação geográfica, especialmente, frente aos métodos de mapeamento tradicionais (ESPINDOLA et al., 2012).

Em relação as técnicas de SR, Yang (2010) ressalta sua importância para análise espacial de bacias hidrográficas, afirmando que possuem a inerente habilidade de prover

informação temporal e espacial sobre a superfície terrestre e representam, atualmente, uma das melhores formas para monitorar a degradação da cobertura superficial de uma bacia de drenagem.

2.9. TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO

Os solos são caracterizados conforme suas propriedades biológicas, físicas, químicas e morfológicas, que podem ser degradadas conforme as variações do clima e/ou no uso e manejo inadequado de terras agrícolas. As classes de solos podem ser avaliadas conforme seu limite suportável de deterioração, considerando os atributos do solo.

A Tolerância de Perda de Solo (TPS) é frequentemente associada como um parâmetro sustentável do solo em relação às estimativas do potencial de perda de solo em escala de bacias hidrográficas. O método de Bertol e Almeida (2000) é o mais aplicado no Brasil devido maior quantidade de atributos utilizados (Equação 20).

$$TPS = h \cdot r_a \cdot m \cdot p \cdot 1.000^{-1} \quad (\text{Equação 20})$$

Em que: TPS = Tolerância de Perda de Solo (mm ano^{-1}); h = profundidade efetiva do solo (mm) (máximo 1.000 mm); r_a = relação textural entre os horizontes B e A e do teor de argila do horizonte A; m = matéria orgânica na camada de 0 - 20 cm; p = fator de permeabilidade do solo; 1.000^{-1} = constante do período de tempo necessário para desgastar uma camada de solo de 1.000 mm de profundidade.

3. JUSTIFICATIVAS

A região Sul de Minas Gerais é responsável pelo segundo maior Produto Interno Bruto da agropecuária estadual (12,9%) (FJP, 2014). Assim, fomentar as análises de qualidade dos solos e seus impactos fornece dados essenciais para a manutenção da produção e ou aumento da produtividade agrícola, a partir de manejos sustentáveis, uma vez que os manejos tradicionais, em geral adotados nas atividades agrícolas, causam a dilapidação desse capital natural, além de contaminar e diminuir a oferta de água.

Vale ressaltar que a maior parte dos solos destinados às atividades agrícolas no Sul de Minas são os Latossolos, que no Município de Alfenas, são, em geral, Latossolos Vermelhos distróficos, de textura argilosa, fase cerrado, com relevos planos e suaves ondulados (UFV et al., 2010). Em áreas restritas há a ocorrência de Latossolos Amarelos, Gleissolos, Cambissolos e Latossolos fase floresta sempre verde (BRASIL, 1962; ALFENAS, 2006).

Diante deste panorama, a estimativa da erosão hídrica permite a obtenção de dados qualitativos, que permitem a proposição de cenários para mitigação da erosão. A Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús é propícia a obtenção de dados para definição de ações conservacionistas, sejam elas visando sustentabilidade agrícola e/ou para definir práticas de manejo conservacionistas, que contribuam para melhorar a produtividade agrícola sem prejuízos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, H. M. R. et al. Avaliação de terras e sua importância para o planejamento racional do uso. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 24, n. 220, p. 82-93, 2003.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Principais Modelos para Estimar as Perdas de Solo em Áreas Agrícolas. In: PRUSKI, F. F. **Conservação do Solo e da Água**. 2. ed. rev. e ampl. Viçosa: Editora UFV, cap. 4, p. 74-107, 2006.

ARNOLD, J.G. et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: part I model development. *J. Am. Water Resources Association*, Middleburg, v. 34, p. 73–89, 1998.

ARAÚJO, J.L.; ANJOS, L.H.C.; PEREIRA, M.G. Atributos do solo e distinção de pedoambientes para a agricultura na terra indígena mbya em Ubatuba (SP). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.33, n.6, Nov/Dez, 2009.

AVANZI, J. C. et al. 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.

AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L.N. Erosão hídrica em latossolos vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.45, n2, p.180-191, 2015.

BARRETO, A. G. O. P.; BARROS, M. G. E.; SPAROVEK, G. Bibliometria, História e Geografia da Pesquisa Brasileira em Erosão Acelerada do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2443-2460, 2008.

BAROVIC, G. et al. Estimation of sediment yield using the Intero Model in the S1-5 watershed of the Shirindareh River Basin, Iran. **The Journal "Agriculture & Forestry"**, Podgorica, v. 61, p. 233-243, 2015.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. ANSWERS. A model for watershed planning. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.4, p.938-944, 1980.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p. 657-668, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2012. v. 1. 360p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman. 685 p, 2013.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético 2013: Ano base 2012**. Ministério de Minas e Energia, 283p, 2013.

BROWNING, G. M.; PARISH, C. L; GLASS, J. A. A method for determining the use and limitations of rotation and conservation practices in the control of soil erosion in Iowa. **Journal American Society Agronomy**, Madison, v. 39, p. 65-73, 1947.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographic Information Systems**. New York: Oxford University Press, 333p, 1998.

CAPECHE, C.L. et al. Degradação do solo e da água: impactos da erosão e estratégias de controle. In SRL Tavares. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. p. 105-132, 2008.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed., Rio de Janeiro, Interciência, 600p, 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CLARK, K. B. **An Estimate of Sediment Yield for Two Small Sub-Catchment in a Geographic Information System**. Ph.D. thesis, University of New Mexico, 2001.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento safra brasileira grãos, v.2 - Safra 2014/15, n.6 - Sexto Levantamento, Brasília, p. 1-103, mar. 2015.

CUNHA, C.M.L.; PINTON, L. G. Avaliação da capacidade de uso das terras na bacia hidrográfica do córrego do Cavalheiro – Analândia, SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v.31, n.3. p. 459-471, 2012.

DECHEN, S.C.F. et al. 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.

DE ESPINDOLA, G. M. et al. Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, Georgia, v. 32, p. 240-252, 2012.

DE VENITE, J., POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. **Earth-Science Reviews**, v. 1-2, n. 71, p. 95-125, Leuven, 2005.

DYONISIO, H. A. F. Erosão hídrica: suscetibilidade do solo. **Revista Eletrônica Thesis**, São Paulo, v. 13, p. 15-25, abr., 2010.

EFTHIMIOU, N.; LYKOUDI, E.; PANAGOULIA, D.; KARAVITIS, C. Assessment of soil Susceptibility to Erosion using the EPM and RUSLE Models: the case of Venetikos River Catchment. **Global NEST Journal**, Mitilene, v. 18, p. 164-179, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011. 230p.

FJP. Fundação João Pinheiro. Produto Interno Bruto das Regiões de Planejamento de Minas Gerais. **Informativo CEI**, Belo Horizonte: FJP, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food and production. Roma: FAO. 2005. 95p.

GALINDO, I.C.L.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 95-100, 1989.

GAVRILOVIC, Z. Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RIVER REGIME HYDRAULICS RESEARCH LIMITED, Wallingford, Oxon UK. p. 411-422, 1988.

GLOBEVNIK, L. et al. Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. In: DE BOER, D. et al. **Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques**. Wallingford: IAHS Publication, 2003. v. 279. 224-233 pp.

GOODRICH, D. C. et al. Landscape indicator interface with hydrologic models. Washington: **Environment Protection Agency**. 57p, 2000.

HAGHIZADEH, A.; TEANG SHUI, L.; GODARZI, E. Forecasting sediment with Erosion Potential Method with emphasis on land use changes at basin. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, Oklahoma, v. 14, p. 1-12, 2009.

HEYDARIAN, S. A. **Assessment of erosion in mountain regions**. Proceedings of 17th Asian Conference on Remote Sensing, 4–8 November, Sri Lanka, 1996.

HOFIG, P.; MOURA, N.S.V.; GIASSON, E. Aptidão agrícola das terras em Cerro Grande do Sul/RS. **Boletim Gaúcho de Geografia**, Porto Alegre, v.42, n.1, p.352-368, 2015.

IPCC, **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.

- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**, p.357-410. In: Ed. JENSEN; JOHN R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese. 2009. 672 p.
- JOHNSON, L. C. Soil loss tolerance: Fact or myth? **Journal of Soil and Water Conservation**, n. 42, v. 3, p.155-160, 1987.
- JORDAN, G. et al. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balatom basin (Hungary). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.108, n.2, p.119– 133, 2005.
- KNISEL, W. G. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. **Washington: USDA Conservation**, Research Report, 89 p, 1980.
- KOSTADINOV, S. et al. Soil erosion in Serbia and Montenegro. In: Boardman, J., Poesen, J. (Ed.) **Soil erosion in Europe**. John Wiley & Sons, Ltd., p. 271-277, 2006.
- KOUHPEIMA, A.; HASHEMI, S. A. A.; FEIZN, S. A study on the efficiency of Erosion Potential Model (EPM) using reservoir sediments. **Elixir International Journal**, n. 38, p. 4135-4139, 2011.
- LAFLEN, J. M. et al. A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, p.34-38, 1991.
- LAFLEN, J. M.; MOLDENHAUSER, W. C. Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story. **World Association of Soil and Water Conservation**, 2003.
- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas (Boletim Técnico, 28), 12 p., 1975.
- MORGAN, R. P. C. et al. The EUROSEM model. **Springer Verlag**, London, 373–382, 1998.
- MUSGRAVE, G. W. The quantitative evaluation of factors in water erosion – a first approximation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 2, n.3, p.133- 138, 1947.
- NEITSCH, S.L. et al. SWAT User Manual, Version. **Grassland Soil and Water Research Laboratory**, Temple, Texas, USA, 2005.
- NYSSSEN, J. et al. Twentieth century land resilience in Montenegro and consequent hydrological response. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 4, p. 336-349, 2014.
- OGDEN, F. J. CASC2D Reference manual. Storrs: **Department of Civil and Environmental Engineering**/University of Connecticut, 83p, 1998.
- OLIVEIRA, A. H. et al. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal terra dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.4, p. 1259-1267, 2012.

OLIVETTI, D. et al. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the South of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia (UFPA)**, Lavras, v.39, p. 58-67, 2015.

PRUSKI, F. F. Prejuízos Decorrentes da Erosão Hídrica e Tolerância de Perdas de Solo. In: PRUSKI, F. F. **Conservação do Solo e da Água**. 2. ed. rev. e ampl., Viçosa: Editora UFV, 2006. cap. 2, p. 24-39.

RENARD, K. G. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, **Agriculture Handbook**, v. 703, 1997.

RODRÍGUEZ, J. L. C.; SUÁREZ, M. C. G. Historical review of topographical factor, *LS*, of water erosion models. **Aqua-LAC**, v. 2, n. 2, p. 56-61, 2010.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas: 26 p. 2010.

SANDER, G. C. et al. Mathematical soils erosion modeling. **Water interactions with energy, environment, food and agriculture**. UNESCO, v. 2, 2005.

SCHULTZ, N. et al. O conhecimento dos solos. In: Solos e Sociedade. BOLETIM INFORMATIVO, n. 3, v. 39, 2014. **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS)**, p. 26- 51, 2014.

SILVA, R. M.; CELSO, A.G.S.; SILVA, A. M. Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in the Tapacurá Catchment, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, Paraíba, Brazil, v. 8, n.1, p. 75-82, 2014.

SMITH, D. D. Interpretation of soil conservation data for field use. **Agriculture Engineering**, Pavia, v. 22, n. 5, p. 173-175, 1941.

SPALEVIC, V. et al. Assessment of soil erosion in the Lipnica Watershed, Polimlje, Montenegro. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC AGRICULTURAL SYMPOSIUM, 50. Agrosym. 2014. P. 723-729.

SPALEVIC, V. et al. Prediction of the soil erosion intensity from the river basin Navotinski, Polimlje (northeast Montenegro). **The Journal "Agriculture & Forestry"**, Podgorica, v. 59, n. 2, p. 9-20, 2013.

SPALEVIC, V. 2011. **Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje**. 260f. Tese (Doutorado) - Faculty of Agriculture of the University of Belgrade, Serbia, 2011.

SPALEVIC, V., et al. Application of Computer-Graphic Methods in Studying the Discharge and Soil Erosion Intensity - I Programme "Drainage Basins". **Agriculture and Forestry**, Podgorica, v. 46, n. 1, p. 219-36, 2000.

SPALEVIC, V. et al. Soil Erosion Intensity and Runoff on the Djuricka River Basin (North of Montenegro). **Malaysian Journal of Soil Science**, Serdang, v. 17, p. 49-68, 2013.

SZILAGYI, J.; PARLANGE, M.B. A geomorphology-based semi-distributed watershed model. **Advances in Water Resources**, v.23, p.177-187, 1999.

TAVARES, S. R. L. **Áreas Degradadas: Conceitos e Caracterização do Problema**. In: Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. p. 105-132, 2008.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. ed. 2. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1998. 678p.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p.

UNFPA. Fundo de Populações das Nações Unidas. **Relatório sobre a Situação da População Mundial**. Nova York, 2013. 137p.

VUJACIC, D. et al. Calculation of runoff and sediment yield in the Pisevska Rijeka watershed, Polimlje, Montenegro. **The Journal "Agriculture & Forestry"**, Podgorica, v. 61, n. 2, p. 225-234, 2015.

WILLIAMS, J.R.; BERNDT, H.D. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds. Soil erosion: Prediction and control. **Soil Conservation**, Amsterdã, v. 21, p. 217-225, 1977.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. **Supersedes Agriculture Handbook**. Washington, United States Department of Agriculture, 67p, 1978.

YANG, F.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T. A pre-screened and normalized multiple endmember spectral mixture analysis for mapping impervious surface area in Lake Kasumigaura Basin, Japan. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 65, n. 5, p. 479-490, sept. 2010.

YOUNG, R. A. et al. AGNPS – Agricultural Non-Point Source Pollution Model – A watershed analysis tool. United States Department of Agriculture, **Conservation Research Report**. Washington: USDA, v.35, p.1-80, 1987.

YOUSEFI, S. et al. An Estimation of Sediment by Using Erosion Potential Method and Geographic Information Systems in Chamgardalan Watershed: A Case Study of Ilam Province, Iran. **Geodynamics Research International Bulletin - GRIB**, v. 2, n. 2, p. 01-05, 2014.

YU, Z. Assessing the response of su grid hudrologic processes to atmospheric forcing with a hydrologic model system. **Global and Planetary Change**, v.25, p.1-17, 2000.

YUAN, F. et al. Land cover classification and change analysis of the twin cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, Minnesota, v. 98, n. 2-3, p. 317-328, 2005.

ZIA ABADI, L.; AHMADI, H. Comparison of EPM and geomorphology methods for erosion and sediment yield assessment in Kasilian Watershed, Mazandaran Province, Iran. **Desert**, v. 16, n. 2, p. 100-108, 2011.

ZINGG, A. W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. **Agriculture Engineering**, Pavia, v. 21, n. 2, p. 59-64, 1950.

PARTE II

1 Adaptação e aplicação do método de erosão potencial para solos tropicais

2

3

Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils

4

5 **ABSTRACT** - Water erosion is the process that most negatively affects Brazilian tropical soils
6 and causes soil losses from arable areas and capacity to support surrounding ecosystems.
7 Estimates from soil loss caused by water erosion are fundamental to evaluate the impacts of
8 sediment production from soils. In order to do so, improving soil loss estimates by adapting the
9 models to different edaphoclimatic landscapes is necessary to obtain evaluations that reflect the
10 geographic and climatic differences of the originals of the method. Therefore, this study aimed
11 to adapt, apply and evaluate the potentialities of the Potential Erosion Method in Latosols of
12 the Hydrographic Sub-basin of Ribeirão Caçús, South of the State of Minas Gerais. Thus,
13 geological, topographic, pedological, climatic and land use and occupation data were processed
14 in the Geographic Information Systems for relative Potential Erosion Method. The data was
15 compared to the data that was obtained by the Revised Universal Equation of Soil Losses. The
16 result of erosion intensity coefficient, Z, were 0.28, indicating low erosion intensity. Potential
17 average losses were 31 Mg ha⁻¹ year⁻¹ by the Potential Erosion Method and 36 Mg ha⁻¹ year⁻¹
18 by the Revised Universal Soil Loss Equation, both above of TPS. The application of the models
19 and their comparison indicated that the Potential Erosion Method has good performance for use
20 in estimating the water erosion rates in tropical soils.

21 **Key words:** Modeling of water erosion. Erosion Potential Method. Tropical soils.

22

23 **RESUMO** - A erosão hídrica é o processo que mais afeta negativamente os solos tropicais
24 brasileiros e causa perdas de solos agricultáveis e capacidade de suporte aos ecossistemas.

25 Estimativas das perdas de solo por erosão hídrica são fundamentais para avaliar os impactos da
26 produção de sedimentos a partir dos solos. Para tanto, melhorar as estimativas de perdas de solo
27 pela adequação dos modelos para diferentes paisagens edafoclimáticas são necessárias para
28 avaliações que reflitam as diferenças geográficas e climáticas originais do método. Portanto,
29 este estudo visou adaptar, aplicar e avaliar as potencialidades do Método de Erosão Potencial
30 em Latossolos da Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús, Sul do Estado de Minas Gerais.
31 Assim, foram processados em Sistemas de Informação Geográfica dados geológicos,
32 topográficos, pedológicos, climáticos e de uso e ocupação do solo. Os dados foram comparados
33 aos obtidos pela Equação Universal de Perdas de Solo Revisada. O resultado do coeficiente de
34 intensidade de erosão, Z, foi de 0,28, indicando baixa intensidade de erosão. As perdas médias
35 potenciais foram de 31 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ pelo Método de Erosão Potencial e 36 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ pela
36 Equação Universal de Perdas de Solo Revisada, ambas acima da TPS. A aplicação dos modelos
37 e sua comparação indicou que o Método de Erosão Potencial apresentou desempenho preciso
38 para o uso nas estimativas das taxas de erosão hídrica em solos tropicais.

39 **Palavras-chave:** Modelagem da erosão hídrica. Tolerância de perdas de solo. Solos tropicais.

40

INTRODUÇÃO

41 A erosão hídrica é a principal causa de degradação dos solos, especialmente, em regiões
42 tropicais. O problema é acentuado pelas mudanças climáticas, pela intensificação das
43 precipitações e o aumento do escoamento superficial, especialmente nas áreas que não
44 consideram os atributos do solo e do meio para definição e adoção de práticas de manejo
45 conservacionistas (LIMA *et al.*, 2015). No Brasil, são estimadas perdas de 616,5 milhões de
46 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de solo por ano, com custo de US\$ 1,3 bilhão (DECHEN *et al.*, 2015).

47 Modelos para avaliação e mitigação dos impactos ambientais são indispensáveis diante
48 do crescimento demográfico e do consumo de alimentos, água e energia. Assim, os estudos
49 sobre erosão hídrica subsidiam a conservação do solo e da água a partir de eventuais medidas

50 mitigadoras de recuperação, reparação, restauração dos impactos ambientais provocados pela
51 erosão hídrica (SANTOS *et al.*, 2017).

52 As estimativas das perdas, todavia, devem ser comparadas com os limites de Tolerância
53 de Perdas de Solo (TPS) para verificar se as perdas afetam a sustentabilidade agrícola em longo
54 prazo. Conceitualmente, a TPS corresponde às taxas de formação dos solos e, portanto, a
55 sustentabilidade só é possível caso as perdas não superem essas taxas. No entanto, a obtenção
56 do limite da TPS é ainda controversa, devido às dificuldades de quantificar de forma precisa os
57 fatores e processos envolvidos na formação do solo. No Brasil, o cálculo da TPS de Bertol e
58 Almeida (2000) é o mais utilizado devido considerar a maior variedade de propriedades do solo
59 que refletem a sua formação. Assim, os cálculos da TPS são complementares as estimativas das
60 taxas de erosão e permitem uma avaliação eficaz dos estágios de degradação dos solos. Por
61 outro lado, mesmo as áreas com perdas abaixo da TPS precisam de melhorias nas práticas de
62 manejo para redução de suas perdas (FAO-ITPS, 2015), pois, mesmo as baixas perdas são
63 acumulativas e em longo prazo se tornam insustentáveis.

64 A aplicação e comparação com modelos já consagrados permite avaliar a efetividade de
65 métodos de estimativas e, neste contexto, a Equação Universal de Perdas de Solos Revisada,
66 do inglês *Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE, é o mais aplicado para obtenção de
67 estimativas e de seus parâmetros no Brasil (BARRETTO; BARROS; SPAROVEK, 2008;
68 RENARD *et al.*, 1997; OLIVETTI *et al.*, 2015).

69 O EPM (*Erosion Potential Method*) (GAVRILOVIC, 1988) é um método pouco difundido
70 na América e mais utilizado na Europa, no Oriente Médio e no Norte da África (KOUHPEIMA;
71 HASHEMI; FEIZN, 2011; NYSSSEN *et al.*, 2014; SPALEVIC *et al.*, 2013; VUJACIC *et al.*,
72 2015; NIKOLIC *et al.*, 2018). No Brasil, o uso é recente (SILVA *et al.*, 2014; TAVARES *et al.*,
73 2017), devido a não adequação do método às condições edafoclimáticas tropicais.

74 Este estudo visou adaptar o EPM para estimar as perdas de solo por erosão hídrica em
75 solos tropicais e aplicar na sub-bacia do Ribeirão Caçús, no Município de Alfenas, sul de Minas
76 Gerais.

77 MATERIAIS E MÉTODOS

78 O EPM estima a perda média de solo ($\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) a partir de variáveis e coeficientes
79 que representam as características físicas e o uso e manejo do solo, temperatura, precipitação,
80 declividade do terreno, resistência do solo à erosão e feições erosivas em escala de bacia
81 hidrográfica. Cada coeficiente é obtido das equações da tabela 1 (GAVRILOVIC, 1988).

82 Os parâmetros que precisam ser adequados aos solos tropicais são relativos às condições
83 edafoclimáticas originais do método, desenvolvido para os Balcãs.

84 **Tabela 1** - Equações e parâmetros utilizados para estimativa das perdas de solo pelo EPM

Equação	Fórmula	Parâmetros
I	$W_{yr} = T \cdot H_{yr} \cdot \pi \cdot \sqrt[2]{Z^3} \cdot R_u$	W_{yr} = Erosão anual ($\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) T = Coeficiente de temperatura (Adm) H_{yr} = Precipitação anual média (mm ano^{-1}) Z = Coeficiente de erosão (Adm) R_u = Coeficiente de retenção (Adm).
II	$T = \sqrt[2]{\frac{t_0}{10}} + 0,1$	t_0 = Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C ano}^{-1}$) Y = Coeficiente de erodibilidade (Adm)
III	$Z = Y \cdot X_a \cdot (\varphi + \sqrt[2]{I_{sr}})$	X_a = Uso e manejo do solo (Adm) φ = Erosão observada em campo (Adm) I_{sr} = Declividade média (%)
IV	$R_u = \frac{(O \cdot D)^{0,5}}{0,25 \cdot (L_v \cdot 10)}$	O = Comprimento da bacia (km) D = Diferença de elevação da bacia (m) L_v = Comprimento do córrego principal (km)
V	$Q_{max} = A \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot w \cdot \sqrt[2]{2 \cdot g \cdot D \cdot F}$	Q_{max} = Vazão máxima de escoamento ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) A = Coeficiente de forma da bacia ($\text{Adm}^{(*)}$) f_g = Pouca ou nenhuma cobertura vegetal (%) $2gDF^{0,5}$ = Energia cinética da chuva ($\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
VI	$S_1 = 0,4 \cdot f_p + 0,7 \cdot f_{pp} + 1,0 \cdot f_0$	f_p = Rochas muito permeáveis (%) f_{pp} = Rochas medianamente permeáveis (%) f_0 = Rochas pouco permeáveis (%)
VII	$S_2 = 0,6 \cdot f_s + 0,8 \cdot f_t + 1,0 \cdot f_g$	f_s = Densa cobertura vegetal (%) f_t = Média cobertura vegetal (%)
VIII	$w = h_b \cdot (15,0 - 22,0 \cdot h_b - 0,3 \cdot \sqrt[2]{L_v})$	L_v = Curso d'água principal (km) w = Percolação de água (m) h_b = Média da lâmina em chuvas intensas (mm)

85 Adm: Adimensional. Fonte: Adaptada de Gavrilovic (1988).

86

87 **Adaptação do método para os solos tropicais**

88 As tabelas de índices que simulam os processos de erosão hídrica foram ajustadas à
 89 realidade dos solos tropicais. Para a resistência do solo à erosão, Y, o EPM integra os processos
 90 de infiltração e percolação da água, além da resistência estrutural à desagregação de partículas
 91 e varia de 0,20 a 2,00 pela consideração do material parental (Tabela 2), conforme os tipos de
 92 solo e de manejo (SILVA *et al.*, 2014).

93 Os Latossolos são característicos de climas quentes e úmidos, tropicais, com teores
 94 elevados de argilas de baixa atividade. Apresentam baixa fertilidade natural e são
 95 moderadamente ácidos, com perfil de até 20 m de espessura. No Brasil recobrem 38,73% do
 96 território e 56,30% da região Sudeste (EMBRAPA, 2006).

97 **Tabela 2** - Coeficiente de resistência do solo à erosão (Y) do Sistema Brasileiro de Classificação
 98 dos Solos

Gavrilovic (1988)		Autores		
Litologia e solos relacionados	Y	Material parental	Solos originados ¹	Y
Afloramentos rochosos	0,25	Afloramentos rochosos		0,25
Solos aluviais bem estruturados	0,50	Sedimentos aluviais	G, O, E, S, F	0,50
Vertissolos e solos mal drenados	0,6	Rochas básicas e ultrabásicas, Anfíbolitos, Argilitos, Xistos	L, P, N, M	0,60
			C, R	0,70
Cambissolos e solos pouco espessos	0,8	Granitos, Gnaisses e Migmatitos	L*, P*, S*, N, T*	0,80
Solos carbonáticos, ferruginosos e silicatos associados a matéria orgânica	0,9		C*, R*, F*, T	0,90
Espodossolos e xisto degradado	1,0			
Solos derivados de rochas sedimentares	1,1	Calcários, Mármore e Evaporitos	L, V	1,20
Solos derivados de relevo cárstico	1,2			
Solos pouco agregados	1,6		E, C	1,50
Areais, cascalhos e solos soltos	2,0	Arenitos quartzosos, Siltitos e Quartzitos	R*, T*, C*	2,00

99 Notas: *Presença de areia quartzosa. G: Gleissolos; O: Organossolos; E: Espodossolos; S: Planossolos;
 100 F: Plintossolos; L: Latossolos; P: Argissolos; N: Nitossolos; M: Chernossolos; C: Cambissolos; R:
 101 Neossolos; T: Luvissolos; V: Vertissolos.
 102

103 O coeficiente Z, intensidade dos processos de erosão (Tabela 3), considera a temperatura
 104 média do ar (°C ano⁻¹), os coeficientes de resistência do solo à erosão, uso e manejo do solo,

105 erosão observada em campo e declividade média (%) para definir qual intensidade da erosão
106 em escala de sub-bacia.

107 **Tabela 3** - Categorias de intensidade erosiva, intensidade da erosão, coeficiente e média de Z

Categorias	Intensidade da Erosão	Coeficiente de Erosão (Z)	Média de Z
I	Extremamente severa	$Z > 1,0$	$Z = 1,25$
II	Severa	$0,71 < Z < 1,0$	$Z = 0,85$
III	Moderada	$0,41 < Z < 0,7$	$Z = 0,55$
IV	Ligeira	$0,20 < Z < 0,4$	$Z = 0,30$
V	Não aparente	$Z < 0,19$	$Z = 0,10$

108 Fonte: Adaptado de Gavrilovic (1988) e Yousefi et al. (2014).

109

110 **Coeficiente de cobertura e manejo do solo (x_a)**

111 O coeficiente de uso e manejo do solo, X_a , representa as áreas conservadas, menos
112 suscetíveis à erosão e com baixos coeficientes. Varia de 0,05, para áreas protegidas e manejo
113 conservacionista a 1,00, para solos expostos.

114 Fanetti e Vezzoli (2007) sugeriram alteração na categorização do coeficiente de proteção
115 do solo, X_a , com base em diferentes categorias de uso da terra (Tabela 4). Considerou as áreas
116 urbanas como de erosão potencial, atribuindo-lhes um valor maior que zero. Incluíram variáveis
117 de urbanização, bem como os tipos de vegetação.

118 **Tabela 4** - Valores de coeficientes de cobertura e manejo do solo

Fanetti e Vezzoli (2007)	
Tipos de uso	X_a
Urbanização dispersa	0,05
Baixa urbanização	0,10
Urbanização descontinuada	0,15
Urbanização contínua	0,18
Urbanização densa	0,20
Florestas	0,40
Campos e pastagens entre florestas	0,50
Pastagens e campos	0,60

119 Fonte: Fanetti e Vezzoli (2007)

120

121 A análise dos parâmetros ϕ , Y e X_a do EPM foi determinante da magnitude dos valores
 122 médios de perdas de solo. Pequenas oscilações nos valores resultam em alterações significativas
 123 nas estimativas de perdas de solo.

124 Para definição do coeficiente X_a (Tabela 5) foram considerados os usos potenciais e usuais
 125 brasileiros e a sensibilidade do parâmetro. A atribuição do coeficiente deve considerar o grau
 126 de desenvolvimento do cultivo e não apenas seus estágios fenológicos. Pois, as diversas etapas
 127 de desenvolvimento agrícola no EPM devem ser consideradas na média de perdas de solo anual.

128 **Tabela 5** - Formas possíveis de se adaptar os usos tropicais com os coeficientes X_a

Gavrilovic (1988)	X_a	Autores	X_a
Solo exposto	1,00	Solo exposto	0,90 – 1,00
Lavouras	0,90	Culturas temporárias	0,80 – 0,90
		Culturas temporárias com manejo	0,70 – 0,80
Pomares	0,70	Culturas permanentes	0,60 - 0,70
		Culturas permanentes com manejo	0,50 – 0,60
Pastagem	0,60	Pastagem	0,40 - 0,50
		Campos	0,30 - 0,40
Campos	0,40	Mata degradada	0,20 – 0,30
Florestas degradadas	0,60	Mata pouco degradada	0,05 – 0,20
Florestas bem adensadas	0,05	Mata nativa	0,05

129

130 Dentre as culturas temporárias em solos tropicais, temos, arroz, feijão, milho, mandioca,
 131 soja e cana-de-açúcar. São cultivos agrícolas que podem ser utilizados como culturas de rotação
 132 para o preparo do solo para culturas permanentes. Já as culturas permanentes cultivadas são:
 133 laranja, banana, cacau, café e coco, dentre outros. Esses cultivos mantêm sua estrutura aérea
 134 durante vários anos.

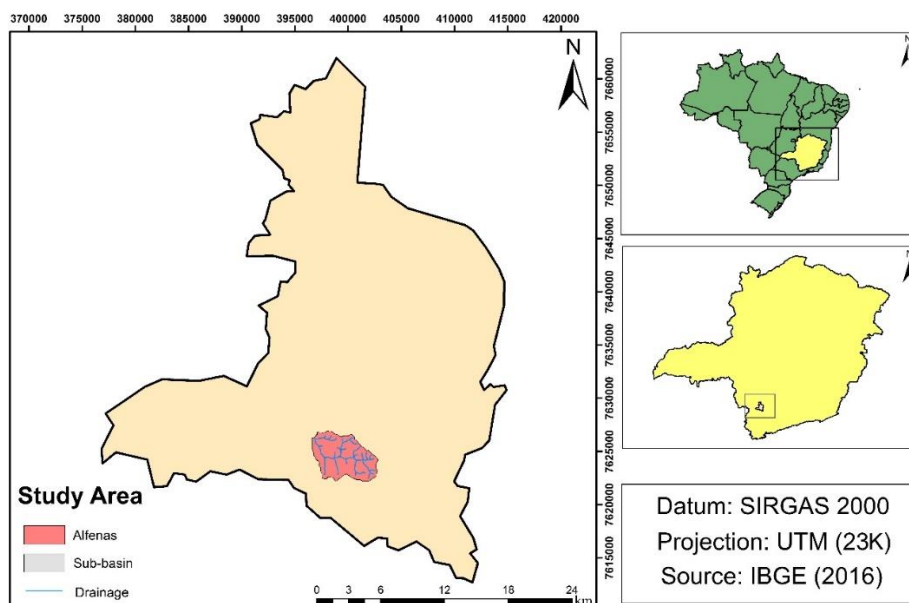
135 **Aplicação do Método de Erosão Potencial**

136 A sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús (Figura 1) foi selecionada devido à aplicação
 137 prévia da RUSLE (OLIVETTI *et al.*, 2015), para comparar a aplicação do EPM com um
 138 trabalho independente. A sub-bacia ocupa 2.080 ha, entre 21° 26' a 21° 29' S e 45° 56' a 46°
 139 00' W no planalto sul de Minas Gerais e faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. O

140 clima é Tropical Mesotérmico (CwB) (SPAROVEK; VAN LIER; DOURADO NETO, 2007).
141 O arcabouço geológico é formado por biotita gnaisses e granada biotita gnaisses
142 polideformados proterozoicos na unidade fisiográfica mares de morros.

143 As características geoespaciais da sub-bacia foram obtidos a partir: Carta Topográfica do
144 Município de Alfenas (FOLHA SF 23-1-1-3) (IBGE, 1970), na escala de 1:50.000 em formato
145 digital; Mapa digital de elevação (MDE), na escala de 1:50.000 para o cálculo das áreas da
146 bacia hidrográfica, comprimento das curvas de nível, área da maior parte do rio, área da parte
147 inferior do rio, comprimento natural do curso d'água principal, distância entre as curvas de
148 nível; Mapa geológico 1:100.000 para classificar a bacia quanto à permeabilidade à água em
149 porcentagem, ou seja, áreas que consistem em: materiais rochosos muito permeáveis,
150 moderadamente permeáveis e de baixa permeabilidade (UFRJ; CPRM, 2010); Mapa Digital de
151 Solos (MDS) a partir das classes de declividade da Embrapa (2006) e do Mapa de Solos do
152 Estado de Minas Gerais, 1:650.000 da UFV et al. (2010) (MCBRATNEY *et al.*, 2003); Dados
153 do uso da terra em porcentagem a partir de cenas escolhidas para determinação dos usos do solo
154 pelo satélite Landsat-8 de 2016 na órbita 219, ponto 75 e CBERS-4 de 2016, na órbita 159 e
155 ponto 123. As bandas multiespectrais com a pancromática das imagens foram fusionadas para
156 aumentar a resolução espacial, no Landsat-8, de 30 m (bandas multiespectrais) para 15 m (banda
157 pancromática) e no CBERS-4 de 10 m para 5 m; Dados meteorológicos: Altura das chuvas
158 intensas em m, valor pluviométrico máximo de todos os meses, temperatura média anual do ar,
159 em ° C e precipitação média anual, em mm. Este valor foi calculado a partir da média de chuvas
160 anuais intensas, acima de 70 mm, no período de 24 h, da série de 1981 – 2016, das Estações
161 Pluviométricas de Alfenas e Machado.

162 **Figura 1** - Mapa de localização da Sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Caçús, Alfenas - MG



163

164

165 Após a aquisição e processamento dos dados, foi elaborado o Modelo Digital de Elevação
 166 (MDE), pelas curvas de nível da carta topográfica e a criação do mapa de pontos de topos
 167 altimétricos. O MDE subsidiou a geração do mapa de declividade da área, a partir das classes
 168 de relevo da Embrapa (2006), em porcentagem, para obtenção da declividade média. A partir
 169 do mapa de declividade foi obtido o MDS (Figura 2) em que a definição das classes de solos
 170 foi baseada na declividade associada aos solos da área (MCBRATNEY *et al.*, 2003).

171 Para a declividade média da área, I_{sr} , foram considerados o tamanho e a área entre as
 172 curvas de nível. São considerados ainda a maior e a menor altitude, a equidistância entre as
 173 curvas e os valores da mais alta a mais baixa curva da bacia.

174 O coeficiente de uso e manejo do solo, X_a , foi obtido da adaptação dos coeficientes de
 175 Gavrilovic (1988), para o uso e ocupação do solo. As estimativas das perdas de solo são feitas
 176 pelo IntErO (*Intensity of Erosion and Outflow*) com o algoritmo do EPM (SPADEVIC, 2013).

177 Para comparação dos resultados os dados também foram calculados em SIG a partir de
 178 arquivos das equações do EPM, produzindo a espacialização das perdas de solo.

179

RESULTADOS E DISCUSSÃO

180 A tabela 6 sintetiza os valores de entrada e saída do IntErO, a partir dos dados de 2016.

181 **Tabela 6** - Entrada e saída de dados do modelo EPM no programa IntErO

Entrada de dados				Resultados			
Área da sub-bacia	F	20,8	km ²	Forma da sub-bacia	A	0,69	Adm ^(*)
Perímetro	O	24,96	km	Desenvolvimento	m	0,44	Adm
Rio principal	L _v	7,09	km	Largura média	B	4,99	km
Menor distância	L _m	5,95	km	(A) simetria do córrego	a	0,13	Adm
Tributários de I e II classe	∑L	29,91	km	Densidade da drenagem	G	1,44	Adm
Largura média em linhas paralelas	L _b	4,17	km	Sinuosidade do córrego	K	1,19	Adm
Maior área da sub-bacia (L _v)	F _v	11,09	km ²	Altitude média	H _{sr}	843	m
Menor área da sub-bacia (L _v)	F _m	9,71	km ²	Comprimento de rampa	D	69,61	m
Altitude da primeira cota de nível	h ₀	770	m	Inclinação média	I _{sr}	13,22	%
Altitude mínima	H _{min}	765	m	Altura da base erosiva	H _{leb}	160	m
Altitude máxima	H _{max}	960	m	Erosão no relevo	E _r	23,91	Adm
Lâmina em chuvas intensas	h _b	82,5	mm	Permeabilidade	S ₁	0,77	Adm
Temperatura média anual do ar	t _o	22	°C	Cobertura vegetal	S ₂	0,77	Adm
Precipitação média anual	H _{yr}	1500	mm	Percolação de água	W	1,02	m ³
Área com permeabilidade média	f _{pp}	0,78	Adm	Chuvas intensas	2gDF ^{0,5}	168	m ³ km ⁻² s ⁻¹
Área sob boa cobertura vegetal	f _s	0,3	Adm	Temperatura	T	1,52	Adm
Área sob cultivo agrícola	f _t	0,54	Adm	Vazão máxima	Q _{max}	69,83	m ³ s ⁻¹
Área sem cobertura vegetal	f _g	0,16	Adm	Erosão (intensidade)	Z	0,289	Adm
Resistência do solo a erosão	Y	0,8	Adm	Perda total de solo	W _{yr}	23118	m ³ ano ⁻¹
Uso e cobertura do solo	X _a	0,47	Adm	Retenção de sedimentos	R _u	0,154	Adm
Erosão observada em campo	φ	0,41	Adm	Perda real de solo	G	3565	m ³ ano ⁻¹
				Perda média de solo	G _{yr}	171	m ³ km ⁻² ano ⁻¹

182 Adm^(*): Adimensional.

183

184 A área da sub-bacia, F, é 20,80 km², com perímetro, O, de 24,96 km, altitude mínima,

185 H_{min}, de 765 m e máxima, H_{max}, de 960 m. O comprimento do córrego principal, L_v, é 7,09 km,

186 com largura média de 10 m e a menor distância entre montante e jusante, L_m, é 5,95 km. O

187 coeficiente de forma, A, é 0,69, que representa uma sub-bacia com baixa propensão a enchentes

188 e inundações. A precipitação média anual é de 1.500 mm, que favorece a erosão hídrica. O

189 potencial energético do fluxo de água durante as chuvas intensas, (2gDF)^{1/2}, foi 168 m km⁻¹ s⁻¹

190 e a vazão máxima no exutório do rio, Q_{max}, foi de 69,83 m³ s⁻¹.

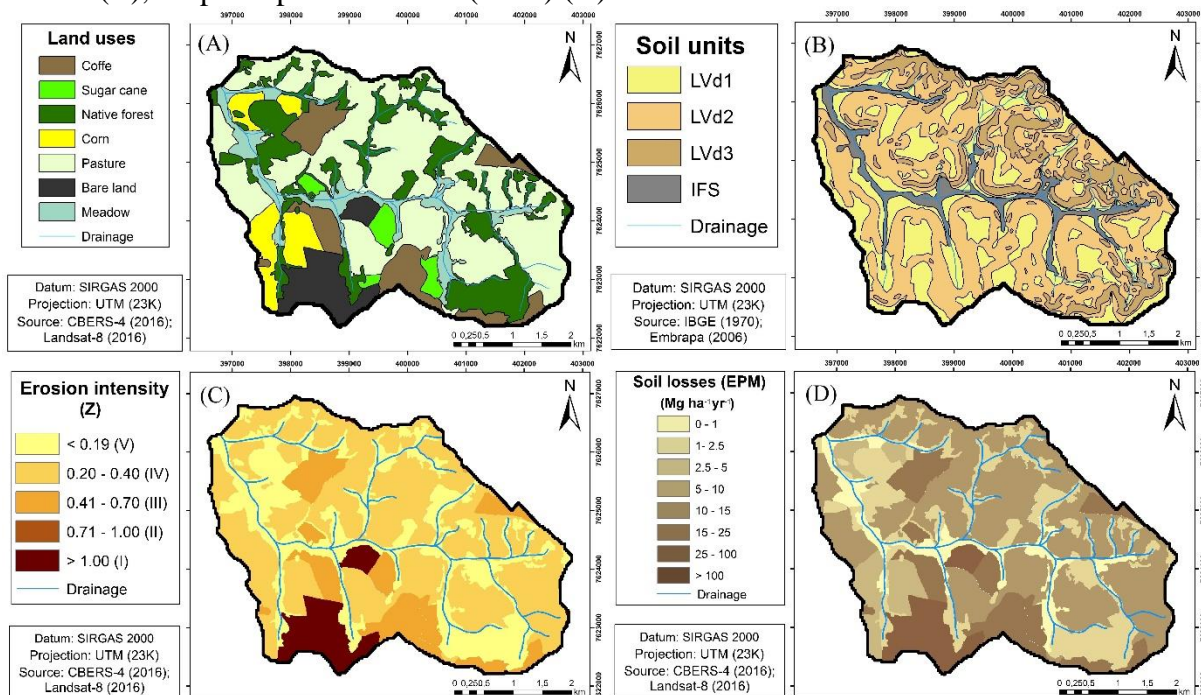
191 Quanto à permeabilidade do substrato rochoso, 78% da sub-bacia é de média

192 permeabilidade e 22% de pouca permeabilidade. A declividade média da sub-bacia, I_{sr}, foi de

193 13,22%, que indica a prevalência do relevo ondulado.

194 A diferença de detalhamento também foi sensível no mapeamento do uso e ocupação.
 195 Pois, Olivetti *et al.* (2015) usaram o Landsat-5 de 30 m, menor do que a de 5 m obtida pelo
 196 fusinamento das bandas no CBERS-4 ou de 15 m, com o Landsat-8, neste estudo.

197 **Figura 2** - Mapa de uso e ocupação do solo (A), Mapa de solos (B), Mapa da Intensidade de
 198 Erosão (C), Mapa de perdas de solo (EPM) (D)



199
 200 Notas: LVd1: Latossolo Vermelho distrófico nos relevos plano e suave ondulado; LVd2:
 201 ondulado; LVd3: forte ondulado; SIV (IFS): Solos Indiscriminados de Várzea.
 202

203 O coeficiente de permeabilidade, S_1 , e o coeficiente de cobertura vegetal, S_2 , foram de
 204 0,77 e de 0,77, respectivamente, ou seja, não foram identificadas áreas impermeáveis. O
 205 coeficiente S_2 indica uma boa proteção do solo (Tabela 4). As perdas totais de solo, W_{yr} , da área
 206 foram ide $23.118 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e o valor obtido por SIG (Figura 2) foi de $19.488,86 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ (Tabela
 207 7). A diferença entre os cálculos pelo EPM e por SIG foram insignificantes.

208 A quantidade de sedimentos retidos, em 1 ano, calculados pelo coeficiente de retenção,
 209 R_u , foi 0,154. A partir desse índice é calculado a perda total, W_{yr} , que, multiplicada pelo
 210 coeficiente de retenção, resulta na perda real, G_{yr} . Depois, multiplicado pela área da sub-bacia
 211 é obtida a espacialização das perdas em $\text{m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Para transformar em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi

212 necessário converter km^2 em ha e volume em massa, considerando a densidade média do solo
 213 de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$, para comparar com os dados obtidos pela RUSLE.

214 **Tabela 7 - Perdas de solo pelo EPM e RUSLE**

Uso	Área em ha	$W_{\text{yr}} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$	$G_{\text{yr}} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$	$\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (EPM)	$\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RUSLE)	Contribuição EPM (%)	Contribuição RUSLE (%)
Café	204,11	2.899,90	446,58	3,97	1,72	12,66	4,73
Cana-de-açúcar	56,46	518,73	79,88	0,89	2,85	2,84	7,83
Solo Exposto	138,10	11.264,71	1.734,76	19,34	26,05	61,72	71,64
Milho	132,36	1.461,61	225,09	2,41	3,42	7,69	9,40
SIV	182,55	-	-	-	-	-	-
Mata Nativa	427,99	27,87	4,29	0,04	0,89	0,13	2,44
Pastagem	939,43	3.316,04	510,67	4,69	1,43	14,96	3,96
Total	2.080,00	19.488,86	3.001,27	31,34	36,36	100	100

215
 216 As taxas de perdas de solo indicam uso e manejo do solo com práticas de plantio
 217 conservacionista e espaçamento adensado. Quanto ao uso, o coeficiente X_a foi de 0,47, com
 218 44% de pastagens, 30% de matas nativas, 10% de café, 6% de milho, 7% de solo exposto e 3%
 219 de cana-de-açúcar (Figura 2). Logo, as ações antrópicas não possuem caráter deletério e as
 220 elevadas taxas de permeabilidade do solo são indicativas de preservação e a própria declividade
 221 média não é fator impeditivo do uso e ocupação do solo.

222 O fator K, na RUSLE, corresponde ao coeficiente de resistência do solo, Y, na EPM.
 223 Logo, o K representa a erodibilidade dos solos e, no caso, a área de Solos Indiscriminados de
 224 Várzea (SIV), por ser áreas de deposição de sedimentos não entra nos cálculos de perdas de
 225 solo. Para a obtenção do coeficiente Y foi feita a poligonização manual de SIV, que aliado ao
 226 melhoramento da resolução espacial das imagens, permitiu espacializar a distribuição das
 227 perdas (Figura 2).

228 Em relação as taxas de perdas de solo, as estimativas pela RUSLE e EPM são em geral
 229 coincidentes e identificam igualmente as áreas com menores e maiores perdas. Todavia, as
 230 estimativas pelo EPM são, em geral, menores do que as da RUSLE, exceto para o café e a
 231 pastagem. Isto, devido às dificuldades de obter dados de C e P na RUSLE a partir de parcelas

232 experimentais e, portanto, as estimativas são feitas considerando as características físicas e de
233 uso e manejo diversos de outras áreas.

234 Na comparação entre as perdas de solo pelo EPM e RUSLE, a média foi de 31,34 Mg ha⁻¹
235 ano⁻¹ para o EPM e de 36,36 Mg ha⁻¹ano⁻¹ para a RUSLE. Essa diferença é devido ao maior
236 detalhamento dos parâmetros do EPM.

237 No EPM há um coeficiente numérico da erosão visível, ϕ , não considerado na RUSLE.
238 O coeficiente obtido foi 0,41, correspondente a 44% da sub-bacia sob erosão laminar sem sinais
239 visíveis; 30% de áreas protegidas por vegetação nativa; 9% da sub-bacia sob erosão laminar
240 média; 6% da sub-bacia sob erosão laminar pesada; 2% da sub-bacia sob erosão laminar leve e
241 6% da sub-bacia com áreas agrícolas sob erosão não aparente.

242 Há uma discussão sobre o uso do coeficiente ϕ nos cálculos de perdas de solo. Pois, no
243 EPM resulta em variação para as perdas totais. Pois, ϕ é usado no cálculo da intensidade de
244 erosão, coeficiente Z. Dessa forma, ϕ altera significativamente as perdas anuais médias, quando
245 considerada a sua média nos cálculos (DRAGIČEVIĆ; KARLEUŠA; OŽANIĆ, 2017).
246 Todavia, apesar de arbitrário sua utilização no EPM, ele aumenta a sensibilidade da modelagem.
247 Contudo, esse parâmetro normalmente não é utilizado em métodos similares de avaliação da
248 produção de sedimentos (KOUHPEIMA; HASHEMI; FEIZN, 2011; DRAGIČEVIĆ;
249 KARLEUŠA; OŽANIĆ, 2016).

250 As áreas de mata nativa apresentaram perdas de solo similares em ambos modelos. Isto,
251 devido à atribuição de valores próximos para os fatores naturais. Os solos expostos
252 apresentaram as maiores estimativas de perdas de solo, com taxas acima do limite de tolerância
253 de perdas de solo (TPS), em ambos os casos, porém, menores no EPM, já que considera no seu
254 cálculo o valor médio do coeficiente de feições erosivas, ϕ . O cultivo do milho também
255 apresentou taxas de perdas de solo similares pelos métodos, porém abaixo da TPS, que ilustra
256 que os cultivos com manejo conservacionista não afetam a sustentabilidade dos solos.

257 Para a Pastagem e o Café foram estimadas taxas de perdas distintas nos métodos,
 258 respectivamente, 4,69 para pastagem pelo EPM e 1,43 pela RUSLE e 3,97 para o café na EPM
 259 e 1,72 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para RUSLE. Para estimar as perdas de solo na Pastagem na RUSLE foram
 260 atribuídos valores de C inferiores ao X_a do EPM. Mesmo considerando o fator P elevado, o
 261 baixo valor do fator C reduziu as estimativas pela RUSLE. Já para a Cana-de-açúcar foram
 262 obtidas perdas menores no EPM devido ao φ menor em relação ao P da RUSLE.

263 O coeficiente Z de 0,28 reflete a abundância de feições erosivas no terreno e indica que a
 264 sub-bacia pertence à categoria de intensidade de erosão IV ou ligeira. Todavia, a intensidade de
 265 erosão ficou pronunciada nas áreas de uso intensivo, com X_a próximo de 1,0, como os solos
 266 expostos.

267 Os dois métodos mostram perdas equivalentes quando considerados os usos e manejos.
 268 Pois, ambos consideram coeficientes e parâmetros, que embora diferentes, representam fatores
 269 relacionados ao uso e manejo. A lista de coeficientes de uso e manejo, determinantes para
 270 espacialização das perdas estão na tabela 8.

271 **Tabela 8** - Valores de coeficientes de uso do solo atribuídos para a RUSLE e o EPM

Uso do solo	RUSLE		EPM	
	C	P	X _a	φ
Café	0,09	0,50	0,60	0,50
Cana-de-açúcar	0,10	1,00	0,80	0,30
Solo Exposto	1,00	1,00	1,00	1,00
Milho	0,12	0,01	0,70	0,15
Mata Nativa	0,02	0,01	0,05	0,01
Pastagem	0,08	1,00	0,50	0,50

272 *C: Uso e manejo do solo, P: Práticas conservacionistas, X_a: Uso e manejo do solo, φ: Feições
 273 erosivas
 274

275 É notável é a relação indireta entre os parâmetros de práticas conservacionistas, P, e
 276 feições erosivas, φ, na aplicação dos modelos. Diversos autores desconsideram esses
 277 parâmetros (BAHADUR, 2009). Todavia, há valores tabelados para a inclusão desses
 278 parâmetros nos cálculos. No caso, para o C, foi obtido de Olivetti *et al.* (2015).

279 De forma genérica, o X_a , do EPM corresponde ao C da RUSLE, mas não é possível
280 estabelecer comparação idêntica ao ϕ , de feições erosivas. Mas, há uma relação entre eles,
281 enquanto o P representa as práticas conservacionistas, que reflete a maior ou menor propensão
282 à erosão, o ϕ também representa áreas mais ou menos suscetíveis à erosão. Assim, tanto para
283 pastagem, como para cana-de-açúcar e solo exposto na RUSLE foi atribuído o valor máximo
284 de P (1,00) (OLIVETTI *et al.*, 2015), que eleva as perdas de solo nas áreas desses cultivos.

285 O EPM se caracteriza pelo elevado grau de confiabilidade no cálculo da produção,
286 transporte e acumulação de sedimentos. O método estima de forma rápida e eficaz as taxas
287 erosão potenciais e de produção de sedimentos em escala de bacias hidrográficas. A precisão
288 das estimativas obtidas depende de experiência e conhecimento do pesquisador na
289 determinação e obtenção dos fatores e parâmetros utilizados nos cálculos das taxas de erosão
290 (DRAGIČEVIĆ; KARLEUŠA; OŽANIĆ, 2017; BAHADUR, 2009; NYSSSEN *et al.*, 2014).

291 O método de Gavrilovic é vantajoso, pois pode ser aplicado em áreas com carência de
292 dados físicos e edafoclimáticos e de pesquisas prévias sobre as taxas de erosão. Como tal, o
293 método fornece uma estimativa não apenas da quantidade de produção e transporte de
294 sedimentos, mas também da intensidade de erosão resultante.

295 Amorim *et al.* (2010) avaliaram as estimativas de perdas de solos por diversos métodos e
296 concluíram que os erros associados as estimativas são maiores para as menores taxas de perdas
297 e menores para as maiores. Por outro lado, os estudos indicam que mesmo as áreas com perdas
298 abaixo da TPS precisam de melhorias constantes do manejo para reduzir as taxas de perdas,
299 conforme recomendando pela FAO-ITPS (2015).

300 A aplicação do método deve considerar a resposta derivada da mudança em cada
301 parâmetro individual, sensibilidade e contribuição nos resultados obtidos com o método, caso
302 adequado os parâmetros, o EPM é uma ferramenta eficaz para o planejamento socioeconômico

303 e ambiental e para proposição de políticas conservacionistas de uso e ocupação da terra em
304 regiões tropicais.

305 CONCLUSÕES

306 1. O Método de Erosão Potencial é menos oneroso por ser conceitual, eficaz para sub-bacias
307 com limitações de dados.

308 2. Apesar da aplicação do Método de Erosão Potencial não ter sido validada por métodos
309 geoestatísticos ou parcela experimental, sua aplicação, simultânea à Equação Universal de
310 Perdas de Solo Revisada, mostrou que o método foi efetivo em apontar as áreas com perdas de
311 solo pela erosão hídrica acima dos limites de Tolerância de Perdas de Solo em regiões tropicais.

312 REFERÊNCIAS

313 AMORIM, R. S. S. *et al.* Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica
314 USLE, RUSLE E WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia**
315 **Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1046-1049, 2010.

316 BARRETTO, A. G. O. P.; BARROS, M. G. E.; SPAROVEK, G. Bibliometria, História e
317 Geografia da Pesquisa Brasileira em Erosão Acelerada do Solo. **Revista Brasileira de Ciência**
318 **do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2443-2460, 2008.

319 BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos
320 do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.3, p. 657-668,
321 2000.

322 BAHADUR, K. C. K. Mapping Soil Erosion Susceptibility Using Remote Sensing and GIS: A
323 Case of the Upper Name Wa Watershed, **Environmental Geology**, v. 55, n. 1, p. 695–705,
324 2009.

325 EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de**
326 **Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

- 327 DECHEN, S.C.F. *et al.* Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de
328 cobertura do solo. **Bragantia**, v.74, n.2, p. 224-233, 2015.
- 329 DRAGIČEVIĆ, N.; KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. A Review of the Gavrilović Method
330 (Erosion Potential Method) Application. **Gradevinar**, v. 9, n. 68, p. 715-725, 2016.
- 331 DRAGIČEVIĆ, N. KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. Erosion Potential Method (Gavrilović
332 Method) Sensitivity Analysis. **Soil and Water Research**, v.12, n. 1, p. 51–59, 2017.
- 333 FANETTI, D., VEZZOLI, L.: Sediment input and evolution of lacustrine deltas: the Breggia
334 and Greggio rivers case study (lake Como, Italy). **Quaternary International**, 173–174 p.
335 113-124, 2007.
- 336 FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO-ITPS.
337 **Status of world’s soil resources**. FAO-ITPS-GSP Main Report, p. 125-127, 2015
- 338 GAVRILOVIC, Z. Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating
339 Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams. *In:*
340 INTERNATIONAL CONFERENCE ON RIVER REGIME HYDRAULICS RESEARCH
341 LIMITED, p. 411-422, 1988.
- 342 IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Carta Topográfica do Município de**
343 **Alfenas (FOLHA SF 23-1-1-3)**. Ed. 1, 1970.
- 344 KOUHPEIMA, A.; HASHEMI, S. A. A.; FEIZN, S. A study on the efficiency of Erosion
345 Potential Model (EPM) using reservoir sediments. **Elixir International Journal**, n. 38, p.
346 4135-4139, 2011.
- 347 LIMA, C. A. *et al.* Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento
348 superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**. v. 46, n. 4, p. 697-706, 2015.
- 349 MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping.
350 **Geoderma**, v. 117, n. 1, p. 3-52, 2003.

- 351 NIKOLIC, G. *et al.* Variability of Soil Erosion Intensity Due to Vegetation Cover Changes:
352 Case Study of Orahovacka Rijeka, Montenegro. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici**, 47,
353 2018.
- 354 NYSSSEN, J. *et al.* Twentieth century land resilience in Montenegro and consequent
355 hydrological response. **Land Degradation and Development**, v. 35, n. 4, p. 336-349, 2014.
- 356 OLIVETTI, D. *et al.* Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol
357 (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the South of Minas
358 Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.39, p. 58-67, 2015.
- 359 RENARD, K. G. *et al.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning
360 With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture,
361 **Agriculture Handbook**, v. 703, 1997.
- 362 SANTOS, J. C. N. *et al.* Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions
363 of low connectivity. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 48, n. 1, p. 49-58, 2017
- 364 SILVA, R. M.; CELSO, A.G.S.; SILVA, A. M. Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in
365 the Tapacurá Catchment, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8,
366 n.1, p. 75-82, 2014.
- 367 SPALEVIC, V. *et al.* Prediction of the soil erosion intensity from the river basin Navotinski,
368 Polimlje (northeast Montenegro). **Agriculture and Forestry**, v. 59, n. 2, p. 9-20, 2013.
- 369 SPAROVEK, G.; VAN LIER, Q. J.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Köppen climate
370 classification: a case study for Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 257-
371 266, 2007.
- 372 TAVARES, A. S. *et al.* Modelos de Erosão Hídrica e Tolerância das Perdas de Solo em
373 Latossolos Distróficos no Sul de Minas Gerais. **Revista do Departamento de Geografia**,
374 Volume Especial – Eixo 12, p. 268-277, 2017.

- 375 UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos
376 Minerais. **Mapa Geológico da Folha Alfenas (SF-23-V-D-II)**. Escala 1:100.000. 2010.
- 377 UFV - CETEC - UFLA - FEAM. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Escala
378 1:650:000. Fundação Estadual do Meio Ambiente, 49p., 2010
- 379 VUJACIC, D. *et al.* Calculation of runoff and sediment yield in the Pisevska Rijeka watershed,
380 Polimlje, Montenegro. **Agriculture e Forestry**, v. 61, n. 2, p. 225-234, 2015.
- 381 WISCHMEIER, W. H; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**. A guide to
382 conservation planning. 1th.Washington: United States Department of Agriculture. Supersedes
383 Agriculture Handbook. 1978. 58p.
- 384 YOUSEFI, S. *et al.* An Estimation of Sediment by Using Erosion Potential Method and
385 Geographic Information Systems in Chamgardalan Watershed: A Case Study of Ilam Province,
386 Iran. **Geodynamics Research International Bulletin - GRIB**, v. 2, n. 2, p. 01-05, 2014.