Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>

Uso de Técnicas de Geoprocessamento para Estudo da Erosão Hídrica Laminar em Microbacia Hidrográfica do Sudoeste do Paraná

Ana Paula VANSAN¹, Julio Caetano TOMAZONI² ¹Prefeitura Municipal de Cascavel. Rua Pernambuco, 1900 – Centro – CEP 85810-021 – Cascavel – PR. E-mail: anavansan@gmail.com ²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Francisco Beltrão. Linha Santa Bárbara, s/n – CEP 85601-970 – Caixa Postal 135 – Francisco Beltrão – PR. E-mail: caetano@utfpr.edu.br

Artigo submetido em 22/03/2020 e aceito em 31/05/2020

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a erosão hídrica laminar do solo, por meio da Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (RUSLE) na microbacia hidrográfica do rio São José, localizada no município de Francisco Beltrão (PR). A perda de solo média anual (A) foi determinada através da RUSLE para os anos 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017 utilizando-se técnicas de geoprocessamento com o auxílio do *software* ArcGis 10.0. O fator erosividade da chuva (R) foi determinado utilizando-se dados pluviométricos correspondentes ao período de 1974 a 2016, sendo determinado em 11521,26 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. O fator erodibilidade do solo (K) foi obtido através da análise de amostras de solo coletadas *in loco* (0,03018 t.ha.h/ha.MJ.mm, 0,02771 t.ha.h/ha.MJ.mm e 0,02342 t.ha.h/ha.MJ.mm). O fator topográfico (LS) foi estimado por meio dos dados altimétricos e hidrográficos da microbacia. Os fatores de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas do solo (P) foram determinados por meio da caracterização multitemporal do uso e ocupação do solo, através de imagens de satélite. O potencial natural de erosão (PNE) foi determinado pela multiplicação dos fatores R, K e LS, com mais da metade da área total da microbacia com PNE muito forte. A estimativa de perda de solo (A) foi determinada pela multiplicação do PNE pelos fatores C e P com predominância da classe denominada baixa (0 a 10 t/ha/ano) denotando a redução das taxas de erosão por meio dos fatores C e P, auxiliando na proteção do solo diante do processo erosivo.

Palavras-chave: Erosão do solo; Equação Universal de Perdas de Solo Revisada; Geoprocessamento; *Software*.

Use of Geoprocessing Techniques to Study Laminar Water Erosion in Watershed of Southwest Paraná

ABSTRACT

The objective of this work is evaluate the soil erosion by the Universal Equation of Soil Losses Revised (RUSLE) in the São José river basin, located in the municipality of Francisco Beltrão (PR). The average annual soil loss (A) was determined through RUSLE for the years 2000, 2005, 2009, 2015 and 2017 using geoprocessing techniques with ArcGis 10.0 software. Rainfall erosivity (R) was determined using rainfall data from 1974 to 2016, being determined at 11521.26 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.year⁻¹. The soil erodibility factor (K) was obtained through the analysis of soil samples collected on the spot (0,03018 t.ha.h/ha.MJ.mm, 0,02771 t.ha.h/ha.MJ.mm e 0,02342 t.ha.h/ha.MJ.mm). The topographic factor (LS) was estimated by the altimetric and hydrographic data of the basin. Soil use and management (C) and soil conservation (P) were determined through multitemporal characterization of land use and occupation, using satellite images. The natural erosion potential (NEP) was determined by multiplying the R, K and LS factors, with more than half of the total area of the watershed with very strong PNE. The soil loss estimate (A) was determined by multiplying the NEP by factors C and P with predominance of the class called low (0 to 10 t/ha/year) denoting the reduction of erosion rates through factors C and P, helping to protect the soil from the erosion process.

Key words: Soil Erosion; Watershed, Revised Universal Soil Loss Equation, Geoprocessing, Software.

Introdução

O crescimento das áreas urbanas e a expansão de atividades econômicas, em especial as agrícolas,

de maneira desordenada tem influenciado negativamente a dinâmica física ambiental, principalmente no que diz respeito a vegetação,

drenagem, relevo e solos, ocasionando um aumento da suscetibilidade erosiva (Trindade e Rodrigues, 2016).

A modificação da vegetação e os efeitos das atividades econômicas não planejadas previamente alteram a paisagem natural e degradam o solo em uma velocidade superior à de renovação do meio ambiente (Moraes, 2016).

Para planejar ações conservacionistas a fim de conter a degradação ambiental se faz necessário compreender a capacidade erosiva das chuvas, a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica, além dos demais fatores que influenciam na erosão (Bagio, 2016).

O processo erosivo é constituído pela degradação, transporte e deposição de partículas de solo ocasionados por diferentes agentes, tais como a água e o vento, bem como seu uso e ocupação. A perda de solo que ocorre através das chuvas pode carrear a camada superior do solo, que concentra os maiores teores de matéria orgânica e atividade biológica, expondo uma subsuperfície menos fértil e sem as características originais. Quanto mais nivelada e menos rugosa a superfície do solo, maiores são as perdas por erosão, favorecendo a degradação superficial e facilitando seu transporte pelas chuvas (Tavares Filho, 2016; Jesuz e Cabral, 2019).

A erosão hídrica é causada pela chuva e pela enxurrada associada a ela, ocorrendo o desprendimento de material particular do solo e seu transporte. Tem maior incidência em áreas com índice pluviométrico elevado, com chuvas intensas e/ou com volume elevado, com declives muito inclinados e/ou longos, propiciando a formação de enxurradas, com cobertura vegetal reduzida, ocasionando maior impacto das gotas de chuva no solo (Tavares Filho, 2016).

As bacias hidrográficas destacam-se como um recorte espacial de interesse em relação aos estudos de suscetibilidade erosiva, afinal seu relevo modifica-se ao longo do tempo por meio de processos erosivos naturais, intensificando-se com o uso inadequado do solo (Oliveira e Leite, 2018).

Nas bacias hidrográficas o processo erosivo, além causar assoreamento, acaba levando aos

corpos hídricos sedimentos e nutrientes, podendo ocasionar poluição da água por excesso de nutrientes (eutrofização) e contaminação tóxica por metais pesados e agrotóxicos em geral (Jesuz e Cabral, 2019).

Para a mensuração da perda de solo através de erosão hídrica laminar há uma diversidade de modelos matemáticos determinísticos que podem ser empregados, envolvendo a modelagem de parâmetros ambientais e dos processos dinâmicos envolvidos. A modelagem para a análise dos efeitos do uso do solo e dos processos hidrossedimentológicos tem a capacidade de integrar um conjunto de parâmetros e procedimentos de simulação que consegue assemelhar-se as condições reais, auxiliando no entendimento da situação atual da área onde for aplicada, bem como no planejamento de ações preventivas (Moraes, 2016).

Dessa forma, o presente estudo buscou avaliar a erosão hídrica laminar do solo, por meio da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) na microbacia hidrográfica do rio São José, localizada no município de Francisco Beltrão, na região Sudoeste do Estado do Paraná. A compreensão dessas relações contribuirá com medidas que possibilitem o uso do solo em conformidade com os aspectos naturais do ambiente hídrico, diminuindo a quantidade de material sedimentado hidrotransportado e os impactos ambientais, possibilitando um processo integrado de monitoramento e gestão ambiental em bacias hidrográficas, utilizando-se o geoprocessamento.

Material e Métodos

A microbacia hidrográfica do rio São José está localizada no município de Francisco Beltrão, na região Sudoeste do estado do Paraná. Esta possui área de 981,65 ha, estando inserida essencialmente em área rural, contendo em geral lavouras e pastagens (Figura 1).

Figura1 – Localização da microbacia hidrográfica do rio São José no município de Francisco Beltrão PR.

O estudo da erosão laminar da microbacia hidrográfica do rio São José foi estimada por meio da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*) (Renard et al., 1997), baseada no modelo da Equação Universal de Perdas de Solo (*Universal Soil Loss Equation – USLE*) (Wischmeier e Smith, 1978), expressa pela Equação 1:

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

Na qual:

A = Perda de solo média anual por unidade de área e de tempo, em $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$;

R = Fator de erosividade das chuvas, em $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$;

K = Fator de erodibilidade do solo, em $\text{ton} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$;

L = Fator de comprimento da vertente, adimensional;

S = Fator de declividade da vertente, adimensional;

C = Fator de uso e manejo do solo, adimensional;

P = Fator de práticas conservacionistas do solo, adimensional.

Erosividade da chuva (R)

Para a determinação do fator erosividade da chuva (R) foram utilizados como base dados pluviométricos do município de Francisco Beltrão – PR para o período de 1974 a 2016 obtidos junto ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) (2017) referentes à estação de código 02653012, latitude 26.05 S, longitude 53.04 W e altitude de 650 m.

Para estimar a erosividade da chuva foi utilizada a equação proposta por Waltrick (2010), sendo que a Equação 2 foi proposta para a região onde localiza-se o município de Francisco Beltrão.

$$Y = 146,86 + 55,20X \quad (2)$$

Em que:

Y = variável dependente que resulta no EI₃₀ mensal, e a soma dos EI₃₀ mensais ao longo dos 12 meses resulta no EI₃₀ anual;

X = variável independente determinada através da Equação 3 adaptada por Lombardi Neto (1977) *apud* Waltrick, (2010).

$$Rc = \frac{p^2}{P} \quad (3)$$

Onde:

Rc = coeficiente de relação da chuva;

p = precipitação médiamensal (mm);

P = precipitação média anual (mm).

Os cálculos do fator de erosividade da chuva (R) foram realizados em planilha eletrônica no *software* Microsoft Excel, onde foram inseridos os dados pluviométricos médios mensais correspondentes ao período de 1974 a 2016. Posteriormente, o valor final da erosividade das

chuvas foi inserido no ArcGis 10.0 por meio da ferramenta “*reclassify*”, sendo conferido o valor a cada uma das áreas que contemplam os tipos de solo que compõe a microbacia por meio do “*raster calculator*”.

Erodibilidade do solo (K)

Para a estimativa do fator de erodibilidade do solo (K) foram verificados quais os tipos de solo presentes na microbacia hidrográfica do rio São José. Dessa forma, o mapa da microbacia foi sobreposto ao mapa de solos do Estado do Paraná elaborado pela EMBRAPA (2008), constatando-se a existência na microbacia do Latossolo Vermelho Distroférrico, Nitossolo Vermelho Eutroférrico e da associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico + Nitossolo Vermelho Eutroférrico Típico + Chernossolo Háplico Órtico Saprolítico.

Com base nos tipos de solos encontrados na microbacia em estudo foram definidos os pontos de coleta de amostras de solo em campo, sendo estas coletadas em uma faixa de profundidade de 0 a 30 cm a partir da superfície do solo, sendo que cada uma foi composta pelo quarteamento de cinco amostras de aproximadamente 1 Kg coletadas em seu entorno. As amostras já quarteadas foram encaminhadas para o Laboratório de Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)/Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Câmpus Pato Branco, para a realização das análises granulométricas e físico-químicas do solo.

A partir dos dados obtidos com as análises das amostras de solo da microbacia, foi estimada a erodibilidade para cada um dos tipos de solo a partir do método indireto apresentado por Denardin (1990), abaixo descrito na Equação 4:

$$K = (7,48 \cdot 10^{-6} M + 4,48059 \cdot 10^{-3} P) - (6,31175 \cdot 10^{-2} DMP + 1,039657 \cdot 10^{-2} R) \quad (4)$$

Na qual:

M = (areia fina+silte).[(areia fina+silte)+areia grossa]; P = valor da permeabilidade do solo, sendo este: 1 – muito baixa, 2 – baixa, 3 – baixa a moderada, 4 – moderada, 5 – moderada a rápida, 6 – rápida, sendo adotado o valor 3 para os solos Latossolo Vermelho Distroférrico e Nitossolo Vermelho Eutroférrico e o valor 4 para a associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico + Nitossolo Vermelho Eutroférrico Típico + Chernossolo Háplico Órtico Saprolítico;

DMP = diâmetro médio ponderado das partículas de solo (mm), definido pela Equação 5;

R = [areia grossa.(teor de matéria orgânica/100)].

$$DMP = \frac{[(0,65 \cdot \text{areia grossa}) + (0,15 \cdot \text{areia fina}) + (0,0117 \cdot \text{silte}) + (0,00024 \cdot \text{argila})]}{100} \quad (5)$$

Os valores de erodibilidade do solo encontrados para cada um dos tipos de solo foram inseridos no ArcGis 10.0 por meio da ferramenta “*reclassify*”,

sendo conferido o valor a cada uma das áreas que contemplam os tipos de solo que compõe a microbacia por meio do “*raster calculator*”.

Fator topográfico (LS)

Diferentemente da USLE, na RUSLE permite-se seccionar a encosta, permitindo sua representatividade em relação a declividades irregulares, cujas podem ser côncava, convexa ou complexa. Em grande parte das aplicações, isto leva a uma melhora na estimativa do efeito topográfico sobre as perdas de solo do que quando considera-se apenas um plano, como na USLE, gerando maior precisão nos valores de perdas de solo (Amorim, 2004).

O fator topográfico (LS) pode ser calculado por meio da Equação 6 proposta por Wischmeier (1978) e Smith (1978).

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m \cdot (65,41 \cdot \sin^2 \alpha + 4,56 \cdot \sin \alpha + 0,065) \quad (6)$$

Onde:

L = comprimento da encosta, em metros;

m = coeficiente dependente da declividade, equivalente ao valor de 0,5 para declividade maior ou igual a 5%, 0,4 para declividade de 3,5 a 4,5%, 0,3 para declividade entre 1 a 3% e de 0,2 para declividade menor que 1%;

α = declividade da encosta, em graus.

A determinação do fator topográfico foi adaptada por Bertoni (2012) e Lombardi Neto (2012) baseada em dados de perdas de solo dos principais tipos de solo encontrados no Estado de São Paulo e observações de talhões por dez anos, possibilitando a quantificação das perdas médias de solo para variados graus de declividade e comprimento de rampa, conforme apresentado na Equação 7 (Pasquatto, 2016).

$$LS = 0,0984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (7)$$

Sendo:

C = comprimento de rampa, em metros;

D = grau de declividade, em porcentagem.

A matriz de declividade em porcentagem foi gerada com base no modelo digital de elevação (MDE) por meio do comando “*slope*”, inserido na ferramenta “*surface*” do “*spatial analyst tools*”.

Para obtenção da matriz do fator topográfico (LS) foram multiplicadas a constante 0,0984, o comprimento de rampa de 100 metros da microbacia em estudo elevado a 0,63 e a matriz de declividade em porcentagem elevada a 1,18 utilizando-se o comando “*raster calculator*”, contido na ferramenta “*map algebra*” do “*spatial analyst tools*”.

Fator de uso e manejo do solo (C)

A caracterização do uso e ocupação do solo da microbacia hidrográfica do rio São José foi realizada através do software ArcGis 10.0, utilizando-se as imagens dos satélites CBERS 4 (2017 e 2015), CBERS 2B (2009), CBERS 2 (2005) e Landsat 5 (2000), pelo método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança (MAXVER) para as classes: solo exposto (solo exposto, estradas e edificações), pastagem, agricultura e vegetação arbórea.

Foram utilizadas imagens dos anos 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017 para verificar a variação do uso e ocupação do solo no período.

Devido à ausência de informações referentes aos períodos de plantio e colheita das culturas desenvolvidas na área da microbacia, bem como a carência de dados para determinar-se a relação entre a perda de solo em determinado tipo de cobertura e de manejo do solo e a perda de solo de uma área mantida descoberta e preparada convencionalmente na direção do declive (SLR), não foi possível a quantificação do fator de uso e manejo do solo (C). Dessa forma, para a determinação do fator de uso e manejo do solo foram adotados valores já apresentados na literatura, tais como os de Fujihara (2002), Galdino (2012) e Silva et al. (2010), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de uso e ocupação do solo e seus respectivos valores do fator C para a microbacia do rio São José.

Classes de uso e ocupação do solo	Fator C	Bibliografia
Solo Exposto	1,00	FUJIHARA (2002)
Pastagem	0,07	GALDINO (2012)
Agricultura	0,0821	FUJIHARA (2002)
Vegetação arbórea	0,0004	SILVA et al. (2010)

Fator de práticas conservacionistas do solo (P)

Na determinação do fator de práticas conservacionistas do solo (P) foi constatada a

inexistência de práticas conservacionistas implementadas na área da microbacia para solo exposto, sendo então atribuído o valor 1 (um) ao fator P, sendo as áreas de solo exposto, compostas por áreas de solo exposto, estradas, edificações e lavoura em pousio. Para a área de vegetação arbórea o valor de P foi especificado como sendo de vegetação primária, com valor de 0,01. Quanto às áreas de pastagem e agricultura, por se tratarem de áreas de lavoura de plantio direto e pastagem plantadas em nível, foi adotado o valor de 0,5 (Bertoni e Lombardi Neto, 2012; Tomazoni, 2003).

Determinação do potencial natural de erosão (PNE)

Para a determinação do potencial natural de erosão foram multiplicados no ArcGis 10.0 os mapas de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K) e fator topográfico (LS), gerando assim o mapa do potencial natural de erosão (PNE) da microbacia hidrográfica do rio São José. Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma de atividades para a determinação do PNE.

Figura 2 – Fluxograma para a determinação do potencial natural de erosão (PNE)

Estimativa de perda de solo (A)

Para a determinação da estimativa de perda de solo foram multiplicados no ArcGis 10.0 o mapa do potencial natural de erosão (PNE) pelos mapas do fator de uso e manejo do solo (C) e do fator de

práticas conservacionistas do solo (P), sendo gerados então mapas da estimativa de perda de solo (A) da microbacia hidrográfica do rio São José para os anos 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017. Na Figura 3 apresenta-se o fluxograma de atividades para a determinação estimativa de perda de solo.

Figura 3 – Fluxograma para a determinação da estimativa de perda de solo (A)

Resultados e discussões

Fator erosividade da chuva (R)

Os valores de precipitação média mensal de erosividade da chuva calculados e seus respectivos somatórios são apresentados na Tabela 2 abaixo.

O fator erosividade média anual da microbacia foi determinado em 11521,26 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. No boletim técnico publicado em julho de 2011, referente a erosividade de chuvas no estado do Paraná, Waltrick et al. (2011) apresentam erosividade média anual para o município de

Francisco Beltrão – PR de 11896 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, valor muito aproximado ao estimado no presente estudo.

Tabela 2 – Precipitação média e erosividade da chuva mensal, no período de 1974 a 2016, para o município de Francisco Beltrão – PR

Mês	Precipitação média mensal (mm)	Erosividade da chuva mensal (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .ano ⁻¹)
Janeiro	188,8	1108,56
Fevereiro	173	954,33
Março	141,8	689,34
Abril	167,6	904,71
Maio	186,5	1085,27
Junho	167,3	902
Julho	137,7	658,43
Agosto	111,1	479,87
Setembro	165,2	883,16
Outubro	251,7	1856,09
Novembro	178,1	1002,64
Dezembro	177,5	996,88
Total	2046	11521,26

O levantamento dos índices pluviométricos da microbacia demonstraram que em relação à sazonalidade da erosividade causada pelas chuvas na área de estudo a primavera é a estação mais chuvosa e com a maior erosividade do solo, precedida do outono e do verão, onde o inverno a estação com menor erosividade do solo. O mês de outubro apresentou a maior precipitação média mensal (251,7mm), com o maior fator de erosividade da chuva anual (1856,09 MJ/ha.mm/a),

enquanto o mês de agosto tem a menor precipitação média mensal (111,1 mm), com menor fator de erosividade da chuva (479,87 MJ/ha.mm/a).

Fator de erodibilidade do solo (K)

Os resultados das análises laboratoriais realizadas nas amostras coletas na microbacia são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das análises de solo para as amostras da microbacia do rio São José

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Grossa (%)	Matéria Orgânica (%)
1	66	25,2	5,8	3	1,742
2	59	31,4	6,9	2,7	2,68
3	53	37,7	6,6	2,7	2,144
4	40	36,2	13,8	10	3,753
5	50	36,8	9,5	3,7	2,814
6	69	22,4	7,3	1,3	2,144
7	58	31	8,2	2,8	2,948
8	48	38,1	9,1	4,8	2,144
9	52	34,3	9,9	3,8	2,68
10	59	26,6	10,2	4,2	2,144

Os valores de fator de erodibilidade obtidos para cada um dos tipos de solo presentes na

microbacia apresentados na Tabela 4 e sua distribuição espacial na Figura 4.

Figura 4 – Mapa do fator de erodibilidade do solo

Tabela 4 – Fator de erodibilidade para os tipos de solo presentes na microbacia hidrográfica do rio São José

Tipo de Solo	Erodibilidade do Solo (ton.ha.h.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	Área (ha)	Área (%)
Latossolo Vermelho Distroférrico Típico	0,02771	203,79	20,76
Nitossolo Vermelho Eutroférrico Chernossólico	0,02342	245,57	25,02
Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico + Nitossolo Vermelho Eutroférrico Típico + Chernossolo Háplico Órtico Saprolítico	0,03018	532,29	54,22

A associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico + Nitossolo Vermelho Eutroférrico Típico + Chernossolo Háplico Órtico Saprolítico foi o tipo de solo que apresentou o maior fator de erodibilidade, com 0,03018 t.ha.h/ha.MJ.mm, correspondendo a 54,22% da área total da microbacia. Isso se deve aos Neossolos possuírem matriz argilosa quimicamente ativa por ser um material de baixa maturidade e pequena profundidade, resultando em uma alta suscetibilidade a erosão.

O Latossolo Vermelho Distroférrico típico foi o solo com o segundo maior fator de erodibilidade com 0,02771 t.ha.h/ha.MJ.mm, localizado em área equivalente a 20,76% da área

total da microbacia. Os Latossolos em estado natural possuem alta resistência a erosão, porém quando são utilizados para cultivo sua suscetibilidade à erosão pode aumentar devido a declividade, comprimento da pendente, periodicidade de uso e cultura e tipo de manejo.

O Nitossolo Vermelho Eutroférrico Chernossólico apresentou a menor suscetibilidade a erosão, com um fator K de 0,02342 t.ha.h/ha.MJ.mm, estando presente em 25,02% da área total da microbacia, o que ocorre devido aos Nitossolos serem solos profundos, que contém argila de baixa atividade ou de caráter alítico, de composição caulínítico-oxídica e de horizontes mal diferenciados e limites difusos.

Na literatura são apresentados valores para Neossolos situam-se na faixa de 0,0196, 0,0362 e 0,0554 (t.ha.h/ha.MJ.mm) de acordo com Pasquatto (2016), Moraes (2017) e Sales (2017) e Oliveira (2018) e Leite (2018), sendo que o valor calculado para a associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico + Nitossolo Vermelho Eutroférico Típico + Chernossolo Háptico Órtico Saprólítico encontra-se entre esta faixa.

Nos estudos realizados por Oliveira (2018) e Leite (2018), Moraes (2017) e Sales (2017) e Pasquatto (2016) foram determinados valores para o fator K referente ao Latossolo de 0,0354, 0,0264 e 0,0138 (t.ha.h/ha.MJ.mm), respectivamente. Assim sendo, o valor calculado no presente trabalho apresenta-se coerente com os valores dos estudos acima citados.

Para o Nitossolo Vermelho são apresentados valores do fator K de 0,0412 e 0,0137 (t.ha.h/ha.MJ.mm) de acordo com os estudos realizados por Oliveira (2018) e Leite (2018) e Pasquatto (2016), respectivamente, estando o valor calculado no presente trabalho em consonância com os estudos citados.

Observando-se os valores encontrados na literatura e os valores calculados no presente estudo para o fator K, bem como os resultados das análises físicas do solo (Tabela 3) que indicam percentuais elevados de argila em todas as amostras verifica-se que os solos encontrados na microbacia hidrográfica do córrego São José possuem baixa suscetibilidade a erosão.

Fator topográfico (LS)

Na Tabela 5 são apresentados os valores de fator topográfico determinados para a microbacia e a respectiva área ocupada, enquanto que na Figura 5 são apresentados os valores do fator topográfico e sua localização.

Os intervalos com os fatores topográficos classificados em moderado (2,1 – 5) e moderadamente forte (5,1 – 10) ocupam as maiores áreas dentro da microbacia hidrográfica, correspondendo a 32,65% e 38,70% do total, respectivamente, demonstrando que grande parte da microbacia hidrográfica possui tendência moderada ao processo erosivo através do fator topográfico.

As classes com os menores valores de fator topográfico, com intervalos de 0 – 1 (muito baixo) e de 1,1 – 2 (baixo) possuem valores pouco representativos em relação a área total da microbacia, sendo estes 5,18% e 8,05%, respectivamente.

A classe de fator topográfico denominada forte (10,1 – 50) ocupa 15,42% em relação a área total, enquanto a classe muito forte (> 50) não ocorre na microbacia hidrográfica do rio São José. Dessa forma, as áreas com maior suscetibilidade a erosão por meio do fator topográfico correspondem juntas a pouco mais de 1/7 do total.

Tabela 5 – Fator topográfico para os tipos de solo presentes na microbacia hidrográfica do rio São José

Fator Topográfico (LS) (Fornelos e Neves, 2007)	Área ocupada (ha)	Percentual correspondente à área total (%)
0 – 1 (Muito baixo)	50,80	5,18
1,1 – 2 (Baixo)	79,05	8,05
2,1 – 5 (Moderado)	320,50	32,65
5,1 – 10 (Moderadamente forte)	379,90	38,70
10,1 – 50 (Forte)	151,40	15,42
> 50 (Muito forte)	0	0
Total	981,65	100

Figura 5 – Mapa do fator topográfico para a microbacia de hidrográfica do rio São José.

Fator uso e manejo do solo (C)

No ano 2000 a vegetação arbórea ocupava a maior porção da microbacia, sendo esta aproximadamente de 37,8% da área total, possuindo um fator C de 0,0004 que denota nessa área uma maior resistência do solo ao processo erosivo devido a sua proteção pela vegetação, reduzindo o impacto das gotas de chuva sobre o solo. A agricultura ocupava a segunda maior área, correspondendo a 34,08% do total, com um valor de C de 0,0821, considerado um valor elevado, pois demonstra a pequena proteção que o solo possuía ao impacto das gotas de chuva em áreas de cultivo agrícola. O solo exposto correspondia a terceira maior área, com aproximados 26,46% do total e fator C de 1, sendo o maior fator dentre todos os identificados na microbacia em estudo. A pastagem ocupava a menor área dentro da microbacia, sendo 0,017% do total, com um fator C de 0,007, um pouco menor que o valor das áreas de agricultura, pois oferece um pouco mais de resistência ao processo de erosão do solo que estas.

Para o ano de 2005, houve um aumento nas áreas de agricultura, que passaram a ocupar a maior

porção da microbacia, sendo esta de 46,05% da área total. Enquanto isso, as áreas de vegetação arbórea tiveram uma diminuição de 3,03%, consequentemente diminuindo as áreas com proteção ao processo erosivo do solo e aumento das áreas mais suscetíveis à erosão.

O ano de 2009 teve um incremento na área de vegetação arbórea de 19,69% e a área de agricultura um declínio de 22,27% aumentando consideravelmente as áreas com maior resistência ao processo erosivo do solo com relação ao ano de 2005.

Em 2015 houve uma redução na área de vegetação arbórea de 4,35% da área total, enquanto as áreas de agricultura e pastagem tiveram um aumento de 0,56% e 12,25% respectivamente, favorecendo a ocorrência do processo erosivo laminar na microbacia.

Para o ano de 2017 são representados espacialmente dentro da microbacia hidrográfica os valores do fator C na Figura 6. A área correspondente a vegetação arbórea teve uma nova redução, sendo esta de aproximadamente 4,73%, ao mesmo tempo que as áreas de agricultura e

pastagem tiveram um acréscimo de 3,06% e 4,68%, reduzindo ainda mais as áreas com menor suscetibilidade a erosão na microbacia.

Por meio da análise multitemporal das classes de uso e ocupação do solo observou-se que o ano de 2017 apresentou os menores valores de C, enquanto o ano 2000 os maiores valores. Mesmo com a diminuição da vegetação arbórea em relação aos anos de 2009 e 2015, 2017 tem menores valores de C devido a diminuição considerável das áreas de solo exposto. Já o ano 2000 tem maiores valores por possuir a segunda menor área de vegetação arbórea dentro do período analisado, além de a maior área de solo exposto e a segunda maior área de agricultura em relação aos demais anos.

Para a microbacia hidrográfica do córrego São José o menor valor de C é o das áreas com vegetação arbórea, devendo-se ao fato a vegetação contribuir com o amortecimento das gotas de chuva antes destas entrarem em contato com o solo, bem como suas raízes favorecerem a infiltração da água no solo, auxiliando na estabilidade de encostas, evitando o escoamento superficial.

As áreas de pastagem e agricultura apresentaram o segundo e terceiro maiores valores de C encontrados na microbacia, por estas classes de uso e ocupação do solo possuírem menor

proteção ao impacto das gotas de chuva no solo e as áreas de cultivo agrícola sofrerem compactação superficial do solo através da mecanização agrícola, reduzindo a infiltração da água no solo e favorecendo a erosão e o escoamento superficial do solo.

O maior valor do fator C é correspondente as áreas de solo exposto, que englobam solo exposto, estradas e edificações, que por possuírem solo sem qualquer cobertura oferecem menor resistência ao impacto das chuvas, favorecendo o processo de erosão.

Fator práticas conservacionistas do solo (P)

O fator práticas conservacionistas do solo (P) teve seu valor determinado em 1 para as áreas de solo exposto devido a nestas não serem adotadas práticas conservacionistas do solo. As áreas de pastagem e agricultura, por se tratarem de áreas de plantio direto, tiveram o valor do fator P adotado como sendo 0,5, enquanto que para as áreas de vegetação arbórea foi atribuído o valor de P em 0,01 (Bertoni e Lombardi Neto, 2012; Tomazoni, 2003).

Figura 6 – Mapa do uso e manejo do solo para o ano de 2017

Determinação do potencial natural de erosão (PNE)

O mapa do potencial natural de erosão (PNE), apresentado na Figura 7, foi determinado para a microbacia hidrográfica do rio São José por meio da multiplicação do mapa de erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K) e fator topográfico (LS), sendo apresentadas na Tabela 6 as classes de potencial natural de erosão conforme proposto por Silva (2008) e suas correspondentes áreas dentro da microbacia.

Na microbacia hidrográfica do rio São José, 7,05% da área total apresenta potencial natural de erosão classificado como fraco, sendo esta porção

localizada em áreas com comprimento de vertente e declividade menores, em conjunto com solos com fator erodibilidade do solo menor. Mais da metade da área total da microbacia, 54,28% possui potencial natural de erosão muito forte devido a possuírem fator topográfico mais elevado, em combinação com solos com erodibilidade mais elevada. As classes de potencial natural de erosão moderado e forte correspondem a aproximadamente um terço da área total da microbacia, com 11,13% e 27,54%. Dessa forma, analisando os valores encontrados, a microbacia possui um potencial natural de erosão muito forte, por possuir fator erosividade da chuva relativamente alto.

Tabela 6 –Potencial natural de erosão da microbacia hidrográfica do rio São José

Classes de potencial natural de erosão (t/ha/ano)	Área ocupada (ha)	Percentual correspondente à área total (%)
0 – 400 (Fraco)	69,17	7,05
400 – 800 (Moderado)	109,31	11,13
800 – 1600 (Forte)	270,32	27,54
> 1600 (Muito forte)	532,85	54,28
Total	981,65	100

Figura 7 – Mapa do potencial natural de erosão da microbacia de hidrográfica do rio São José

Determinação da perda de solo média anual (A)

As classes de perda de solo média anual do solo foram determinadas conforme a classificação Foodand Agriculture Organization (FAO) (1967), sendo estas: nenhuma ou ligeira (0 – 10 t/ha/ano), moderada (10 – 50 t/ha/ano), alta (50 – 100) e muito alta (> 100 t/ha/ano). A Tabela 7 apresenta

as classes de perda de solo média anual e suas respectivas áreas na microbacia hidrográfica para os anos 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017. O mapa da perda de solo média anual determinada para a microbacia hidrográfica para o ano de 2017 encontra-se apresentado na Figura 8.

Tabela 7 – Classes de perda de solo média anual para a microbacia hidrográfica do rio São José

Classes de perda de solo média anual(t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Área ocupada (%)				
	2000	2005	2009	2015	2017
0 – 10	38,85	36,47	55,35	53,71	47,15
10 – 50	10,71	15,38	8,39	10,99	17,36
50 – 100	14,47	19,20	9,44	12,12	17,59
> 100	35,97	28,95	26,82	23,18	17,90
Total	100	100	100	100	100

Figura 8 – Mapa da perda de solo média anual para o ano de 2017

A partir dos dados apresentados na Tabela 7 verifica-se que classe de perda de solo denominada nenhuma ou ligeira (0 – 10 t/ha/ano) representa para os anos de 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017 38,85%, 36,47%, 55,35%, 53,71% e 47,15%,

respectivamente, enquanto que o potencial natural de erosão para a classe denominada fraco (0 – 400 t/ha/ano) compõe apenas 7,05% da área total (Tabela 6). Esta diferença significativa entre o potencial natural de erosão e a perda de solo média

anual denota a redução das taxas de erosão por meio dos fatores uso e manejo (C) e práticas conservacionistas do solo (P), auxiliando na proteção do solo diante do processo erosivo.

Os fatores de uso e manejo (C) e de práticas conservacionistas do solo (P) foram os que influenciaram diretamente a diminuição das taxas de erosão inicialmente calculadas no potencial natural de erosão. As áreas de vegetação arbórea foram as que mais contribuíram para a diminuição das taxas de erosão por possuírem o menor fator C ($C = 0,0004$) e fator P ($P = 0,01$) a maior área de abrangência dentro da microbacia, auxiliando na redução dos impactos das gotas de chuva sobre o solo e na absorção da água pelo solo, diminuindo a sedimentação das partículas do solo e o escoamento superficial.

As áreas de pastagem e agricultura, que possuem os valores intermediários para o fator C (0,07 e 0,0821, respectivamente) e de 0,5 para o fator P, apresentaram os valores de perda de solo média intermediários. As classes de perda de solo moderada (10 – 50 t/ha/ano) e alta (50 – 100) corresponderam a 10,71 e 14,47%, 15,38 e 19,20%, 8,39 e 9,44%, 10,99 e 12,12%, 17,36 e 17,59%, respectivamente, para o período estudado.

O uso e ocupação do solo que promoveu as maiores taxas de erosão foi o solo exposto, com os maiores valores de perda de solo média para todos os anos analisados. Isso se deve ao solo exposto apresentar o maior fator C ($C=1,00$) dentre os tipos de uso e ocupação do solo constatados na microbacia hidrográfica, por possuir pouca resistência a erodibilidade do solo. A classe de perda de solo muito alta (> 100 t/ha/ano) corresponde a 35,97%, 28,95%, 26,82%, 23,18% e 17,90% da área total da microbacia para os anos 2000, 2005, 2009, 2015 e 2017, respectivamente, tendo uma diminuição significativa dentro do período, em consonância com a diminuição das áreas de solo exposto de 2000 a 2017.

Conclusões

A estimativa da erosão hídrica laminar do solo na microbacia hidrográfica do rio São José através da RUSLE por meio de técnicas de geoprocessamento, mostrou-se eficaz para a determinação da perda de solo média anual, bem como dos fatores que a compõe.

O fator de erosividade da chuva encontrado para a microbacia é considerado alto, sendo que o fator topográfico de mais da metade de sua área total é classificado entre moderado, moderadamente forte e forte, acarretando em um potencial natural de erosão da microbacia muito forte.

A perda de solo média anual para a microbacia hidrográfica do rio São José teve predominância da classe denominada baixa, indicando a microbacia de baixa suscetibilidade à erosão.

A diferença significativa entre o potencial natural de erosão e a perda de solo média anual encontrados para a microbacia denotam a redução das taxas de erosão por meio dos fatores uso e manejo (C) e práticas conservacionistas do solo (P), auxiliando na proteção do solo diante do processo erosivo.

Por meio dos dados obtidos, observa-se que o potencial natural de erosão (PNE), composto pelos fatores erosividade da chuva, erodibilidade do solo e topográfico, correspondentes aos aspectos físicos da microbacia hidrográfica tem menor influência na suscetibilidade a erosão que os fatores de uso e manejo e práticas conservacionistas do solo.

Dessa forma, para que haja um efetivo controle e diminuição do processo erosivo laminar na microbacia é necessário que haja uma adequação no uso e ocupação do solo, em consonância com seu potencial natural de erosão, que auxilie na proteção da camada superficial do solo, diminuindo o impacto das gotas de chuva em sua superfície e auxiliando na infiltração de água e redução do escoamento laminar deste, além da associação de práticas conservacionistas do solo.

Assim sendo, o presente estudo traz contribuições quanto ao geoprocessamento como ferramenta para a análise da erosão hídrica laminar em bacias hidrográficas, por meio de sua sistematização em *software* de sistema de informações geográficas, além de auxiliar no uso e ocupação adequada do solo na microbacia hidrográfica do rio São José.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Pato Branco (PR), por me permitir a realização do mestrado e das pesquisas.

Referências

- Amorim, R.S.S., 2004. Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras. Tese (Doutorado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa.
- Bagio, B. 2016. Erosão Hídrica em Diferentes Comprimentos de Declive em Solo Descoberto. Dissertação (Mestrado). Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F., 2012. Conservação do solo, 8 ed. Editora Ícone, São Paulo.

- Denardin, J.E., 1990. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Tese (Doutorado). Piracicaba, Universidade de São Paulo.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2008. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná. Mapa. Escala 1:600.000.
- ESRI, 2010. ArcGis 10.0 for Desktop. Redlands, California. Environmental Systems Research Institute.
- FAO. Food and Agriculture Organization, 1967. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Cuadernos de Fomento Agropecuario da Organización de las Naciones Unidas., n. 81, Roma.
- Fornelos, L.F., Neves, S.M.A.S., 2007. Uso de modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. Revista Brasileira de Cartografia, n.59/01, p. 25-33.
- Fujihara, A.K., 2002. Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento. Dissertação (Mestrado). Piracicaba, Universidade de São Paulo.
- Galdino, S., 2012. Estimativa da perda de terra sob pastagens cultivadas em solos arenosos da bacia hidrográfica do Alto Taquari – MS/MT. Tese (Doutorado). Campinas, Universidade Estadual de Campinas.
- IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná, 2017. Estações meteorológicas do Paraná. Disponível: http://www.iapar.br/arquivos/Imagem/monitoramento/Medias_Historicas/Francisco_Beltrao.htm. Acesso: 15 abr. 2017.
- Jesuz, C.R., Cabral, I.L.L., 2019. Análise da erosão laminar em áreas com uso agrícola e pastagem: bacia hidrográfica do rio Tenente Amaral – MT. Geosul, v. 34, n. 72, p. 254-279. Disponível: <http://doi.org/10.5007/19825153.2019v34n72p254>. Acesso: 6 abr. 2020.
- Lombardi Neto, F., 1977. Rainfall erosivity – its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil. Tese (Mestrado). West Lafayette, Purdue University.
- Moraes, I.C., 2016. Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica MEUPS e WEPP: contribuição em bacias hidrográficas. Tese (Doutorado). Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.
- Morais, R.C.S., Sales, M.C.L., 2017. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. Caderno de Geografia, v.27, Número Especial 1. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n1esp1p84>. Acesso: 6 abr. 2020.
- Oliveira, W.F., Leite, M.E., 2018. Perda de solo por erosão hídrica em bacia hidrográfica: o caso da área de drenagem da barragem do rio Juramento, no norte do estado de Minas Gerais. Caminhos de Geografia, v. 19, n. 67, p. 16-37. Disponível: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG196702>. Acesso: 6 abr. 2020.
- Pasquatto, M.C., 2016. Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água e no processo erosivo da bacia de captação do rio Barro Preto, Coronel Vivida (PR). Dissertação (Mestrado). Pato Branco, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. 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 703.
- Silva, A.M., 2008. Potencial Natural de Erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 8(1), p. 5-14.
- Tavares Filho, J., 2016. Física e conservação do solo e água. Editora Edue, Londrina.
- Trindade, S.P., Rodrigues, R. Á, 2016. Uso do solo na microbacia do Ribeirão Samambaia e sua relação com a suscetibilidade à erosão laminar. Revista Geografia Acadêmica. Boa Vista, v.10, n.1, p. 163-181.
- Tomazoni, J.C., 2003. Morfodinâmica e transporte fluvial no Sudoeste do estado do Paraná por método de levantamento de microbacias hidrográficas através de geoprocessamento. Tese (Doutorado). Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- Waltrick, P.C., 2010. Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El Nino” e “La Niña” e estimativa para cenários climáticos futuros. Dissertação (Mestrado). Curitiba, Universidade Federal do Paraná.
- Waltrick, P.C., Machado, M.A.M., Oliveira, D., Grimm, A.M., Dieckow, J., 2011. Erosividade de chuvas no Estado do Paraná: Atualização e influência dos eventos “El Niño” e “La Niña”. SBCS-NEP. Boletim técnico, 01. Curitiba, 20 p.