

Artigo Técnico

Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG

Spatial distribution of the potential and current soil erosion for the Sapucaí River Basin, MG, Brazil

Matheus Fonseca Durães¹, Carlos Rogério de Mello²

RESUMO

Este estudo avalia a distribuição espacial do potencial natural e atual do solo à erosão hídrica na Bacia do Rio Sapucaí, sul de Minas Gerais, utilizando a equação universal de perda de solos revisada, através de modelagem cartográfica, para a obtenção da erosão potencial (EP) e da erosão atual (EA). Os resultados indicaram que a EP para a Bacia do Rio Sapucaí variou de "Muito forte", na sua região de cabeceira (Serra da Mantiqueira), a "Fraca", nas áreas com topografia mais suavizada e menor erosividade da chuva. Em relação à EA, mais de 55,17 % da Bacia do Rio Sapucaí apresenta perdas de solo abaixo de 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹, significando baixo potencial atual de erosão. A identificação de áreas de risco associadas à erosão acelerada, realizadas neste estudo, fornecem subsídios fundamentais para medidas associadas ao manejo, conservação e planejamento do uso do solo.

Palavras-chave: erosão hídrica; equação universal de perdas de solos revisada; mapeamento; uso do solo.

ABSTRACT

This study was carried out with the purpose to assess the natural and current soil erosion for the Sapucaí river basin using the revised universal soil loss equation (RUSLE) through cartographic modeling to obtain the natural soil erosion potential (EP) and the current soil erosion (EA). Results have indicated that the Sapucaí river basin has soils with EP varying from "Very strong", in its headwater region (Mantiqueira Range) to "Weak" potential, in areas with smoothing topography and smaller rainfall erosivity. Regarding EA, more than 55.17 % of the basin area present soil losses smaller than 10 t.ha⁻¹.year⁻¹, meaning low current soil erosion vulnerability. The identification of accelerated soil erosion areas, obtained by this study, can be very useful for supporting soil conservation management and planning.

Keywords: water erosion; revised universal soil loss equation; mapping; land use.

INTRODUÇÃO

A erosão acelerada do solo tem sido largamente reconhecida como um problema ambiental no que tange à ocupação do solo para práticas agropecuárias e florestais, afetando sua capacidade produtiva. O processo erosivo proporciona redução da porosidade do solo, assim como da sua capacidade de retenção e infiltração de água, com consequente aumento do escoamento superficial, do transporte de sedimentos e assoreamento de corpos hídricos.

Segundo Pandey, Chowdary e Mal (2007), para um adequado manejo da bacia hidrográfica, visando à sustentabilidade dos recursos naturais, é necessário que se tenha informações espacializadas sobre o potencial erosivo dos solos e a produção e o transporte de sedimentos. Contudo, modelar o processo erosivo do solo é uma tarefa difícil

em função das complexas interações dos fatores ativos e passivos que influenciam esse processo.

Na tentativa de explicá-lo, diversos esforços têm sido feitos para desenvolver e aprimorar modelos para predição de perdas de solo, que variam desde equações empíricas, como a equação universal de perda de solo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) e sua versão revisada (RUSLE) (Renard *et al.*, 1997) até os mais sofisticados, como *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (Nearing; LANE; LOPES, 1994), atualmente geo-WEPP. Esses últimos podem ser fisicamente mais eficientes do que os modelos empíricos, mas geralmente necessitam de vários dados de entrada, para os quais, na maioria das vezes, não há informações facilmente disponíveis. Além disso, são computacionalmente mais trabalhosos, particularmente no que se refere ao potencial

¹Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Professor do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Curitiba (PR), Brasil.

²Doutor em Ciência do Solo pela UFLA. Professor do Departamento de Engenharia da UFLA - Lavras (MG), Brasil.

Endereço para correspondência: Matheus Fonseca Durães - Universidade Federal do Paraná, Rua dos Funcionários, 1540 - Juvevê - 80035-050 - Curitiba (PR), Brasil - E-mail: duraes@ufpr.br

Recebido: 27/07/13 - **Aceito:** 19/02/16 - **Reg. ABES:** 121182

erosivo do solo em média e em grande escala, tal como numa grande bacia hidrográfica (Wang *et al.*, 2009).

Por outro lado, a USLE tem sido extensivamente utilizada em diferentes escalas, principalmente pela simplicidade de sua formulação (Hui *et al.*, 2010; Beskow *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009; Pan; ZHANG; ZHAO, 2005), contudo, ainda apresenta limitações, e nesse sentido a RUSLE apresenta-se como uma ferramenta útil para esse tipo de avaliação. Sua avaliação resulta de diversos fatores que influenciam o processo erosivo, os quais são: erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), uso e manejo do solo (C), práticas conservacionistas (P) e topografia (LS), esse último representado pelos efeitos do comprimento de rampa (L) e da declividade (S).

Como todos os fatores da equação podem ser espacializados, tem sido comum o uso do geoprocessamento na avaliação da susceptibilidade do solo à erosão. Assim, as ferramentas associadas a um sistema de informações geográficas (SIG) podem facilitar especialmente a obtenção dos fatores topográficos através da derivação de um modelo digital de elevação (MDE), como mostram Wang *et al.* (2009), Bartsch *et al.* (2002) e Cerri *et al.* (2001). Com o uso do SIG, pode-se compreender a complexidade de uma bacia hidrográfica pela sua discretização em unidades menores, mais homogêneas, facilitando o entendimento do processo erosivo.

A Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí consiste de uma unidade de planejamento e gestão ambiental fundamental dentro do estado de Minas Gerais, drenando diretamente para o reservatório de Furnas, no Rio Grande. Portanto, é de suma importância que estudos dessa natureza sejam desenvolvidos com o propósito de subsidiar o manejo, a gestão e o planejamento dos recursos naturais devido à importância estratégica dessa bacia para a economia do estado de Minas Gerais e do Brasil, dado o seu potencial hidro-energético.

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho determinar a erosão potencial e a erosão atual do solo à erosão hídrica para a Bacia do Rio Sapucaí, localizada no sul de Minas Gerais, aplicando a RUSLE combinada a um SIG.

METODOLOGIA

Caracterização geral da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais

O Rio Sapucaí é o principal afluente da margem esquerda do Rio Grande, e drena uma área de 8.882 km², considerando a sua seção fluviométrica de Careaçú (código ANA: 61410000). Essa bacia hidrográfica está localizada na região sul de Minas Gerais (Figura 1), na amplitude de coordenadas -22° 33' 16" S e -22° 53' 8,5" S de latitude e de -45° 42' 5,5" W e -45° 44' 7,1" W de longitude.

A Bacia do Rio Sapucaí drena para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas, com capacidade de produção de energia em torno de 1.216 MW (FURNAS, 2013), enfatizando assim sua importância no cenário nacional, no que tange à matriz energética, onde alterações no uso do solo nas mesmas pode comprometer a capacidade geradora e hidrológica do reservatório da referida usina.

Os solos predominantes na bacia (Figura 2A), de acordo com FEAM (2010) são: Latossolos (32,04%), Cambissolos (56,38%), Argissolos (0,72%) e Neossolo Flúvico (10,87%). Na Figura 2B está apresentado o mapa de uso atual do solo da Bacia do Rio Sapucaí, obtido a partir da classificação e interpretação de imagens de 2006 do sensor SRTM.

Estruturação da equação universal de perda de solos revisada a um sistema de informações geográficas para aplicação em bacias hidrográficas

A RUSLE foi estruturada em um ambiente SIG, gerando-se camadas individuais (mapas) para cada fator da RUSLE, com uma resolução

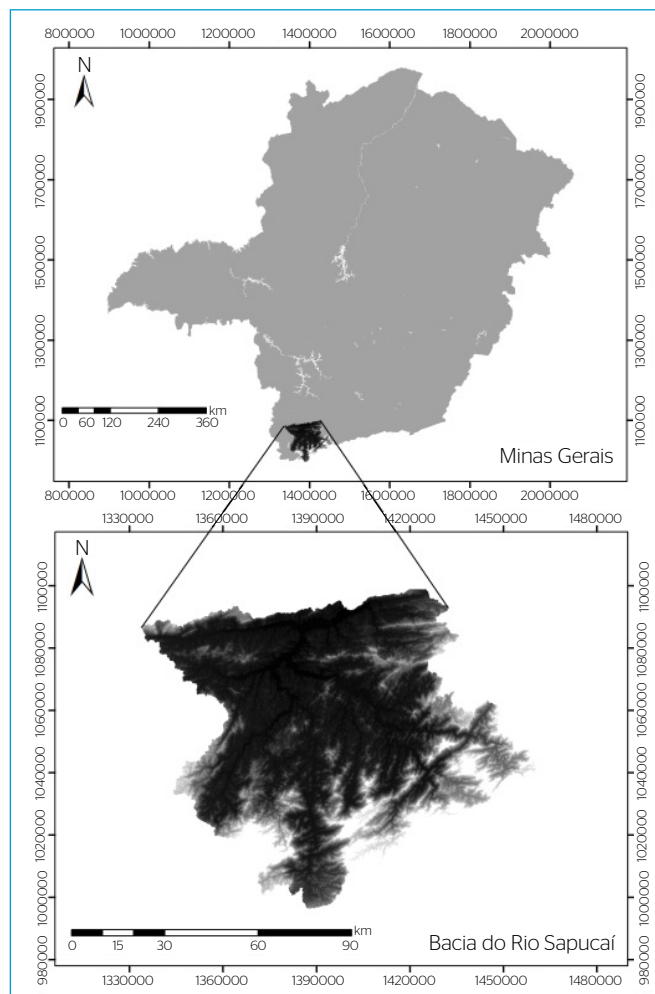


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, sul de Minas Gerais e respectivo modelo digital de elevação.

espacial de 30 m, permitindo a espacialização e obtenção dos parâmetros por células.

A USLE originalmente foi desenvolvida para estimar a taxa média anual de perda de solo e aplicada em nível de parcelas de perda de solo padrão (Wischmeier & Smith, 1978). Com o advento dos SIG, também tem sido aplicada em nível de bacia hidrográfica, buscando-se desenvolver mapas com a identificação de áreas mais susceptíveis à erosão hídrica, e os resultados obtidos indicam sua capacidade de modelar áreas complexas, consistindo uma ferramenta bastante útil ao planejamento em escala de bacia hidrográfica (Hui *et al.*, 2010; Beskow *et al.*, 2009; Lufafa *et al.*, 2003, Mati *et al.*, 2000). Sua expressão consiste de uma combinação linear dos fatores que caracterizam a erosão (Wischmeier & Smith, 1978), conforme a Equação 1:

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

em que:

A = taxa anual média de erosão do solo por unidade de área ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$),

R = fator erosividade média anual das chuvas ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$),

K = fator erodibilidade dos solos ($t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$),

LS = fator topográfico, obtido a partir do comprimento de rampa (L) e da declividade (S),

C = fator de cobertura do solo e P é o fator de práticas conservacionistas.

Para a aplicação da RUSLE, utiliza-se a erosividade média anual da chuva, uma vez que essa, no formato da Equação 1, deve ser aplicada para estimativa da taxa média anual de perda de solos e não para eventos individuais de precipitação (Kinnell, 2014).

Como no Brasil há escassez de dados oriundos de pluviógrafos para cálculo da erosividade (R) com base em eventos individuais de precipitação, visando à geração de mapas, diversos autores têm utilizado dados pluviométricos (diários), cuja disponibilidade é muito superior. Para isso, relações entre os valores médios mensais de R e os respectivos índices de Fournier modificado médio (MFI) são necessárias, o que pode ser desenvolvido para locais com disponibilidade de séries históricas oriundas de pluviogramas. Essas relações são, então, extrapoladas para locais onde existem apenas dados oriundos de pluviômetros. O índice MFI é calculado com base em dados de precipitações médias mensais e anual, oriundos de pelo menos dez anos consecutivos de dados (Renard & Freimund, 1994), ou seja, pode-se calcular esse índice para uma grande quantidade de estações pluviométricas e estimar os respectivos valores de R com base na relação R x MFI mais adequada.

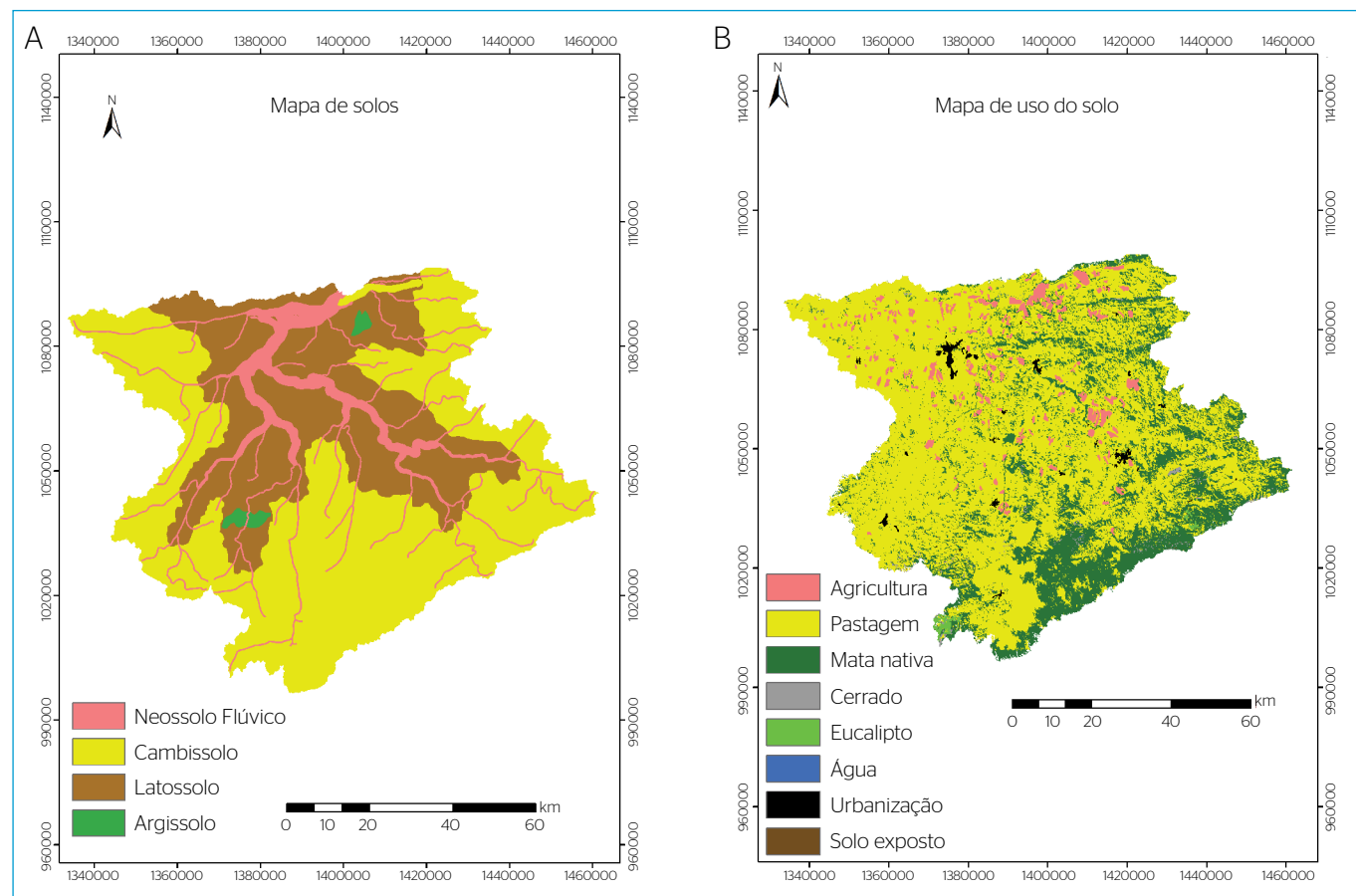


Figura 2 - Mapas de solos (A) e de uso atual do solo (B) para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais.

Contudo, mesmo na condição destacada anteriormente, o mapa de erosividade anual para uma bacia hidrográfica pode não apresentar a distribuição espacial necessária e muitas das vezes, valores únicos de R têm sido usados para caracterizar toda uma bacia hidrográfica. Assim, neste estudo, foi utilizado um modelo estatístico multivariado, desenvolvido por Mello *et al.* (2013), no qual propõe-se estimar a erosividade média anual (R) como função da latitude, longitude e altitude de cada uma das células da bacia hidrográfica. Dessa forma, é possível caracterizar a erosividade da chuva de forma distribuída, algo que não vem sendo aplicado em trabalhos cujo objetivo é gerar mapas de perda de solo potencial em bacias hidrográficas. O modelo para estimativa da erosividade média anual, para a região Sudeste do Brasil, é o seguinte (Equação 2):

$$R = -399433 + 420,49 \times A - 78296 \times LA - 0,0178 \times A^2 - 1594,04 \times LA^2 + 195,84 \times LO^2 + 17,77 \times LO \times A - 1716,27 \times LA \times LO + 0,1851 \times LO^2 \times A + 1,002 \times 10^{-5} \times LO^2 \times A^2 + 1,389 \times LO^2 \times LA^2 + 0,01364 \times LA^2 \times LO^2 \quad (2)$$

em que:

A = altitude (m);

LA = latitude, em graus decimais negativos e

LO = longitude, em graus decimais negativos.

A erodibilidade do solo representa sua susceptibilidade à erosão, ou seja, a facilidade com que as partículas do solo são deslocadas pelo impacto direto de gotas. Os valores do fator K aplicados a este estudo e as respectivas citações, estão apresentados na Tabela 1.

De acordo com Nisar *et al.* (2000), o efeito do comprimento do declive e seu gradiente na intensidade do processo erosivo (fator topográfico LS) pode ser determinado com auxílio de um SIG e em escala de bacias hidrográficas aplicando-se o modelo digital de elevação combinado a algoritmos para obtenção do comprimento e da declividade de forma distribuída. No presente estudo, foi utilizado o método proposto por Engel (2003), no qual utiliza-se o procedimento de cálculo do fator LS proposto por Moore e Bruch (1986) via *Raster Calculator Tool* do programa ArcGIS, sendo representado pela Equação 3:

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

em que:

Tabela 1 - Erodibilidade das classes de solos de ocorrência nas bacias hidrográficas em estudo.

Classe de solos	K (t.h.MJ ¹ .mm ¹)	Fonte
Argissolos	0,029	Marques <i>et al.</i> (1997)
Cambissolos	0,060	Chaves (1994)
Latossolos	0,018	Silva <i>et al.</i> (1997)
Neossolos Flúvicos	0,031	Bloise <i>et al.</i> (2001)

FA = acúmulo de fluxo ou área de contribuição,

CS = tamanho da célula do modelo digital de elevação, correspondente a 30 metros de resolução espacial da imagem de acúmulo de fluxo, e

S = declividade em radianos calculada para cada *pixel*.

O valor do denominador do segundo membro da Equação 3 refere-se ao seno do ângulo que corresponde à declividade da parcela padrão de onde inicialmente foi derivado o fator LS (9 cm.m⁻¹). Esse procedimento de cálculo do fator LS é o que é usado no modelo RUSLE (Engel, 2003).

Para a erosão potencial (EP), os fatores C e P são considerados iguais a 1, uma vez que a EP representa a interação dos fatores naturais do meio físico intervenientes no processo erosivo, correspondendo às perdas de solo simuladas pela RUSLE, desconsiderando qualquer tipo de cobertura vegetal e de interferência antrópica (LANZA, 2011).

A EP, quando apresentada de forma cartográfica, permite uma clara interpretação do risco de erosão numa bacia hidrográfica em função das características do meio físico. Sua estimativa pode colaborar para um ordenamento do uso e ocupação de áreas potencialmente susceptíveis à erosão, evitando-se assim desastres tais como enchentes e deslizamentos de terra, além de melhores subsídios para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura.

Para a estimativa da erosão atual (EA), foram atribuídos valores de CP em função do tipo de ocupação e do porte da cobertura vegetal. Para corpos d' água e áreas urbanas, o valor de CP é nulo e para solos totalmente expostos é igual a 1. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de CP aplicados ao estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapeamento dos fatores da equação universal de perda de solos revisada para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais

A erosividade das chuvas para a Bacia do Rio Sapucaí variou de 6.918 a 13.021 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹, valores dentro da faixa daqueles obtidos por

Tabela 2 - Fator CP da equação universal de perda de solos revisada para as condições de cobertura e uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais.

Cobertura e uso do solo	Fator CP	Fonte
Agricultura	0,25	Bertoni e Lombardi Neto (2005)
Pastagem	0,025	Silva (2004)
Floresta	0,00013	Martins <i>et al.</i> (2010)
Cerrado	0,042	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
Eucalipto	0,0026	Martins <i>et al.</i> (2010)
Corpos hídricos e urbanização	0,00	
Solo exposto	1,00	

Mello *et al.* (2012), os quais observaram valores superiores a 12.000 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹ para a região da Serra da Mantiqueira e entre 6.000 e 8.000 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹ para as áreas vizinhas à Bacia do Rio Sapucaí (sul de Minas Gerais), a partir de dados vinculados a chuvas individuais monitoradas por estações automáticas nos últimos 6 anos. Esse comportamento indica que o efeito orográfico pode ser determinante para o comportamento da erosividade da chuva na bacia.

Ao analisar o trabalho de Mello *et al.* (2013), observam-se valores de erosividade superiores a 10.000 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹ para as regiões serranas do Sudeste do Brasil e entre 5.000 e 10.000 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹ para outras áreas do sul de Minas Gerais, permitindo classificar seu comportamento na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí como “Alta” e “Muito alta”, essa última especialmente junto à Serra da Mantiqueira.

Na Figura 3, respectivamente, A, B e C, estão apresentadas a distribuição espacial da erosividade média anual da chuva, bem como os mapas de erodibilidade do solo e do fator LS para a Bacia do Rio Sapucaí. O mapa da Figura 3A demonstra a boa aplicabilidade do modelo proposto por Mello *et al.* (2013), possibilitando o mapeamento da erosividade da chuva em células com 30 m, permitindo um detalhamento espacial da mesma na Bacia do Rio Sapucaí. Esse método ainda não tinha sido aplicado a estudos sobre mapeamento da erosão, os quais têm considerado a erosividade média na bacia, conforme se observa nos trabalhos de Hui *et al.* (2010) e Beskow *et al.* (2009), conduzindo a estimativas menos precisas do comportamento da erosão do solo, especialmente nas áreas de cabeceira, onde esperam-se valores mais elevados de erosividade da chuva.

Os resultados associados ao fator LS indicam que seus valores variaram de 0 a 89 para a Bacia do Rio Sapucaí. Pode ser observado

na Figura 3C que os menores valores desse fator estão distribuídos nas áreas de menor altitude, sendo os maiores encontrados nas áreas de maior altitude. Tais resultados, utilizando a metodologia proposta por Moore e Burch (1986), são mais significativos do que outros métodos principalmente na determinação de quebras existentes entre as unidades de relevo das bacias, fornecendo pixel a pixel, esse fator ao longo das vertentes. Ainda nesse contexto, Minella, Merten e Ruhoff (2010) mostraram que a base teórica para determinação do fator LS pela metodologia de Moore e Burch (1986) é feita pela incorporação da teoria da potência unitária do escoamento, segundo a qual a água na superfície do solo apresenta energia capaz de desagregar e transportar partículas de solo quando essas se movem no sentido do declive.

Estimativa da erosão potencial do solo e erosão atual do solo para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais

Os mapas associados à distribuição espacial da EP e da EA estão apresentados na Figura 4 (A e B, respectivamente). Aplicando-se a classificação adaptada de Valério Filho (1994), na Bacia do Rio Sapucaí a EP variou de “muito forte” a “fraca”, sendo que nas áreas de menor altitude a predominância foi da classe “fraca”, enquanto, nas áreas de maior altitude, teve-se a predominância da classe “muito forte”. Nessas últimas, contribuíram para a classificação “muito forte” tanto a erosividade acima de 10.000 MJ.ha⁻¹.mm⁻¹.ano⁻¹ quanto o fator LS (Figura 3). É importante destacar que a distribuição espacial da erosividade (Figura 3A) permitiu avaliar o quanto esse fator é significativo para essa classificação, e isso não seria possível sem a metodologia apresentada, uma vez que apenas um valor médio seria aplicado e não sua distribuição célula a célula.

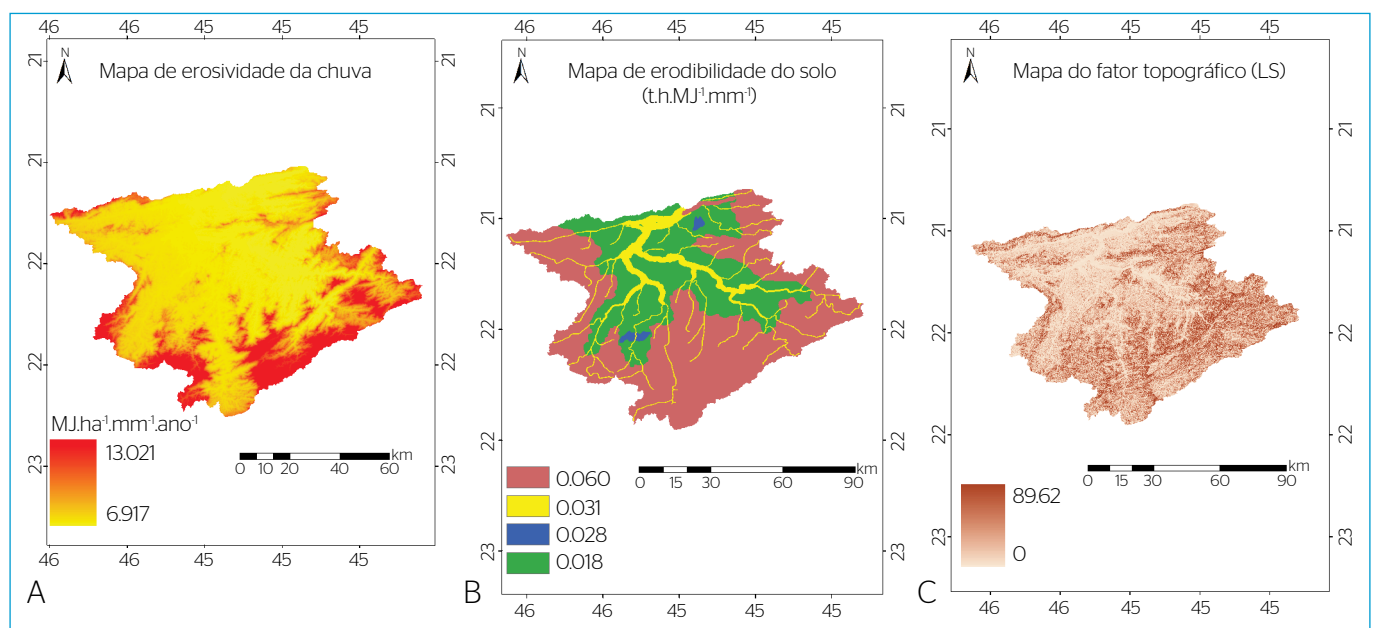


Figura 3 - Distribuição espacial da erosividade da chuva (A), da erodibilidade dos solos (B) e do fator LS (C) para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Minas Gerais.

O valor de EP na classe “muito forte” na Bacia do Rio Sapucaí pode ser explicado ainda pelo tipo de solo, onde a classe dos Cambissolos ocupa mais de 56% da área da bacia, significando alta erodibilidade, gerando aumento da EP. Essa maior vulnerabilidade dos solos com horizonte B incipiente à erosão hídrica está associado à sua textura franca, com alta concentração de silte, o que pode produzir selamento da superfície em solos expostos, o que reduz a sua capacidade de infiltração de água e gera maior escoamento superficial.

Diante do exposto, observa-se que as condições geomorfológicas da Bacia do Rio Sapucaí, traduzidas pelo comportamento da topografia, potencial erosivo das chuvas e vulnerabilidade dos solos à erosão, são altamente favoráveis à ocorrência da erosão hídrica. Isso significa que o uso do solo é determinístico nessas circunstâncias e deve ser analisado de forma a manter o mínimo de exposição possível do solo ao impacto direto de chuvas intensas, as quais são comuns na região.

A EA representa as perdas de solo por erosão hídrica considerando a EP e as condições atuais de uso do solo e práticas culturais, ou seja, os valores de CP. Devido às considerações já mencionadas sobre a aplicação da RUSLE em grandes áreas, os resultados são interpretados de forma qualitativa do potencial de ocorrência da erosão. Diante disso,

Beskow *et al.* (2009) apresentou uma chave de interpretação das perdas de solo, a qual foi aplicada por Durães (2013) e Avanzi *et al.* (2013) e está apresentada na Tabela 3.

Esse tipo de classificação do potencial de perda de solos, associado a um SIG, permite analisar o grau de impacto que determinada atividade pode acarretar no comportamento da erosão do solo na bacia, resultando, principalmente para as áreas agrícolas, em perdas de solo cultiváveis e de nutrientes, assoreamento de corpos hídricos, dentre outros problemas. Dessa forma, a caracterização das áreas mais

Tabela 3 - Classificação de classes de erosão atual proposto por Beskow *et al.* (2009) e sua distribuição percentual na Bacia do Rio Sapucaí, Minas Gerais.

Valores de perda de solo (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Classes de interpretação	% de área da bacia
0 - 2,5	Ligeira	42,12
2,5 - 5	Ligeira a moderada	5,82
5 - 10	Moderada	7,19
10 - 15	Moderada a alta	5,45
15 - 25	Alta	7,76
25 - 100	Muito alta	22,59
>100	Extremamente alta	9,07

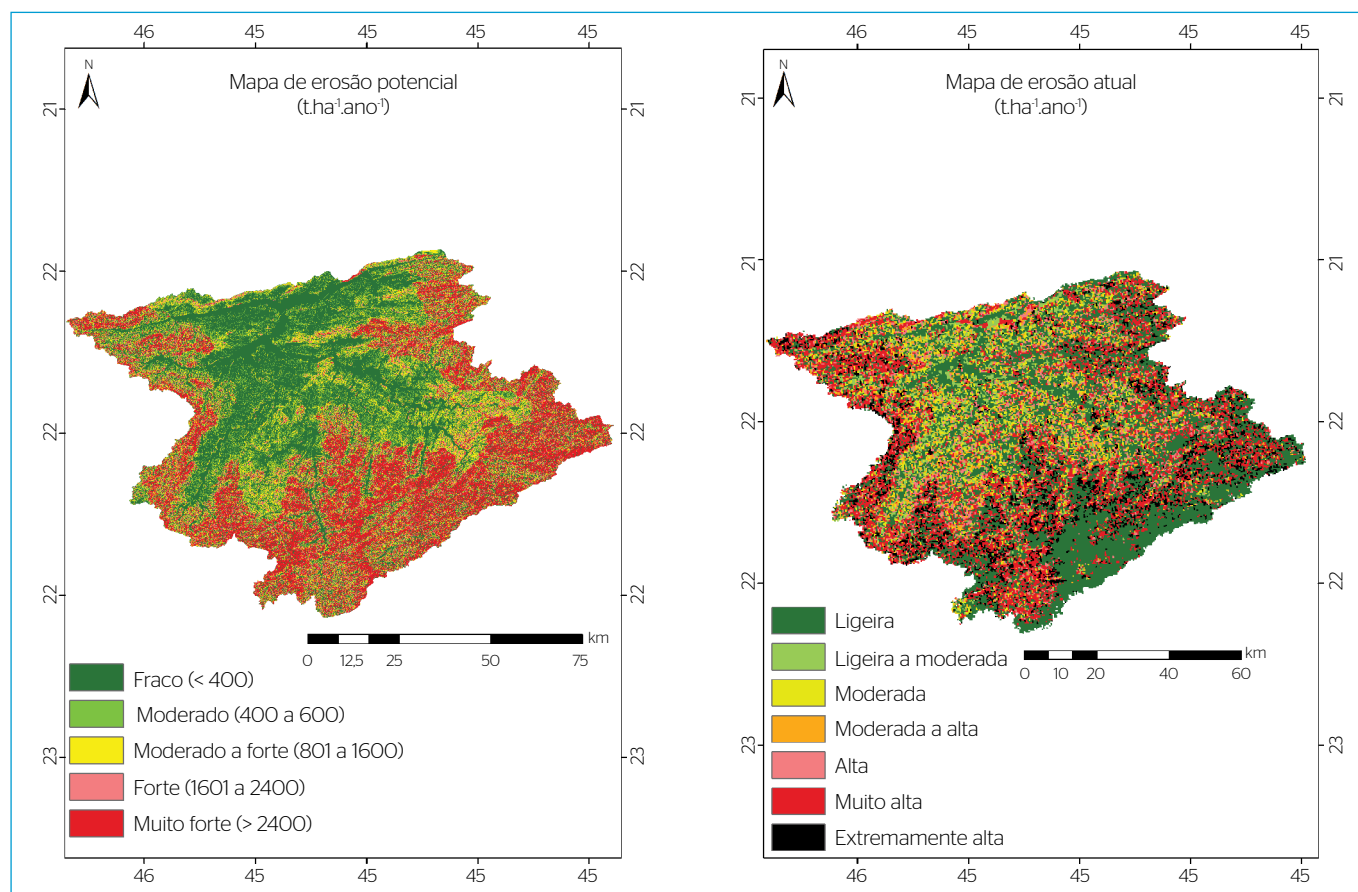


Figura 4 - Mapas da erosão potencial (A) e de erosão atual (B) para a Bacia do Rio Sapucaí, Minas Gerais.

sensíveis contribui como um instrumento de manejo importante, norteando o uso do solo e seus possíveis impactos (Durães, 2013).

Em termos gerais, na Bacia do Rio Sapucaí, observa-se o predomínio das classes “Ligeira” e “Muito alta”, sendo a primeira em áreas de mata nativa, com predomínio de Mata Atlântica e a segunda em áreas destinadas a pastagens, sendo que essas últimas, segundo Viola *et al.* (2013), se encontram degradadas.

A cabeceira da Bacia do Rio Sapucaí, na Serra da Mantiqueira, onde está localizada a região de Mata Atlântica mais importante do sul de Minas Gerais, muito embora apresente elevada EP (Figura 4A), devido às suas características geomorfológicas, apresenta uma EA classificada como “Ligeira”. Isso demonstra que o uso do solo nessa região é adequado, e que as áreas de mata nativa são fundamentais para o equilíbrio ambiental em regiões de cabeceira, as quais apresentam solos rasos, combinados a topografias íngremes e efeito orográfico sobre o regime pluvial, gerando eventos de precipitação mais concentrados e intensos, especialmente pela proteção do solo contra impacto de gotas e consequente redução dos problemas relacionados à erosão e ao deslizamento de encostas.

Avanzi *et al.* (2013) analisaram o processo de erosão hídrica em uma bacia experimental florestada e perceberam que, em geral, as áreas destinadas ao cultivo de eucalipto mostraram perdas de solo maiores do que as áreas de Mata Atlântica, o que demonstra a necessidade de um esforço para aproximar as taxas de erosão para próximo dos valores na mata nativa.

Ainda caracterizando o sistema Mata Atlântica, Martins *et al.* (2010) avaliaram o fator cobertura e manejo do solo, e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em Mata Atlântica, nos tabuleiros costeiros do estado do Espírito Santo. Observaram que as perdas de solo médias nos diferentes sistemas avaliados apresentaram uma amplitude de 0,04 a 25,55 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para o sistema Mata Atlântica e solo descoberto, respectivamente. As menores perdas de solo médias foram observadas no sistema Mata Atlântica, independente das classes de solo estudadas, explicadas por outros aspectos, como a interceptação das gotas de chuva pelo dossel da mata, que possui extrato vertical muito diversificado, refletindo no bom índice do fator C nesse sistema. Esse fato resultou em uma maior proteção do solo, com formação de uma camada com maiores teores de matéria orgânica e por consequência melhor estruturação do solo e maior permeabilidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Beutler *et al.* (2003) e Albuquerque, Lombardi Neto e Srinivasan (2001).

Nas áreas onde a EA foi classificada como “Muito alta”, verifica-se o predomínio de pastagem e também plantios degradados de eucalipto.

Essas áreas, embora apresentem menor erosividade em relação à região de cabeceira e fator LS mais baixo, possuem elevado EP, o que indica que se não forem adequadamente manejadas, podem apresentar processos erosivos importantes. Tais áreas correspondem a 22,59% da área da bacia (Tabela 3), sendo, portanto, significativas e indicativas de que a bacia possui uma situação atual consideravelmente antropizada.

Em relação ao plantio de eucalipto, Oliveira *et al.* (2013) mostraram que as perdas de solo para esse cultivo, quando o cultivo mínimo foi adotado, tendem a ser menores do que os valores toleráveis, contudo, ressalta-se a necessidade de cuidados adicionais para Argissolos, principalmente os relacionados com o preparo do solo, os quais, para a Bacia do Rio Sapucaí, apresentaram-se degradados.

Em termos gerais, na Bacia do Rio Sapucaí, as perdas de solo abaixo de 10 t.ha⁻¹.ano⁻¹ se apresentam em 55,13% de toda a área e as classes “muito alta” e “extremamente alta” correspondem a 22,59 e 9,07%, respectivamente.

CONCLUSÕES

A RUSLE pode ser utilizada para estimativa da EP em grandes bacias, quando adaptada a um SIG, o qual se mostrou eficiente na integração dos dados para identificação e caracterização das áreas mais suscetíveis à erosão, com rapidez na geração de resultados.

As metodologias empregadas para estimar os fatores LS e R apresentaram bons resultados nos valores obtidos, sobretudo na sua espacialização, que permitiu uma melhor interpretação das classes de erosão.

A EP da Bacia do Rio Sapucaí variou de “Muito forte” nas áreas de cabeceira da bacia a “Frac”, nas áreas com relevo mais suavizado.

A EA foi predominantemente enquadrada na classe “ligeira”, principalmente na região da Serra da Mantiqueira.

As áreas mais críticas quanto ao EP estão associadas às maiores altitudes, assim como à erosividade das chuvas, demonstrando que a metodologia para estimativa dessa última variável representa um avanço no desenvolvimento de mapas de vulnerabilidade à erosão.

Os mapas de EP e EA permitem a identificação e análise das áreas de risco à erosão acelerada, fornecendo subsídios para medidas de planejamento e conservação do solo e da água na Bacia do Rio Sapucaí.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. (2001) Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole sem Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 1, p. 121-128.

AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; NORTON, L.D.; BESKOW, S.; MARTINS, S.G. (2013) Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 5, p. 427-434.

- Bartsch, K.P.; VAN Miegroet, H.; Boettinger, J.; DOBROWOLSKI, J.P. (2002) Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp William, Utah. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 57, n. 1, p. 29-37.
- BERTONI, J. & LOMBARD NETO, F.L. (2005) *Conservação do solo*. 5 ed. São Paulo: Ed. Ícone. 355p.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. (2009) Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, v. 79, n. 1, p. 49-59.
- BEUTLER, J.F.; BERTOL, I.; VEIGA, M.; WILDNER, L.P. (2003) Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 3, p. 509-517.
- Bloise, G.L.F.; Carvalho Junior, O.A.; Reatto, A.; GUIMARÃES, R.F.; Martins, E.S.; Carvalho, A.P.F. (2001) *Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da bacia do Olaria-DF*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 14. Planaltina: Embrapa Cerrados. 33 p.
- Cerri, C.E.P.; Dematte, J.A.M.; Ballester, M.V.R.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; ROOSE, E. (2001) GIS Erosion Risk assessment of the Piracicaba river basin, Southeastern Brazil. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, v. 38, n. 3, p. 157-171.
- CHAVES, H.M.L. (1994) *Estimativa da erosão atual e potencial no vale do São Francisco*: relatório final de consultoria. Brasília: CODEVASF. 35 p.
- COPASA - COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS. (2010) *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí: diagnóstico e prognóstico*. Belo Horizonte: COPASA. 257 p.
- DURÃES, M.F. (2013) *Desenvolvimento do índice de perturbação hidrossedimentológica: aplicação nas bacias hidrográficas dos rios Paraopeba e Sapucaí, MG*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ENGEL, B. (2003) *Estimating soil erosion using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) using ArcView*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268419218_Estimating_soil_erosion_using_RUSLE_Revised_Universal_Soil_Loss_Equation_using_ArcView>. Acesso em: 25 maio 2012.
- FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; RAMOS, V.M. (2006) Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - equação universal de perdas de solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba PI-MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 7, n. 2, p. 73-85.
- FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. (2010) *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: FEAM. 49 p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 27 out. 2012.
- FURNAS (2013) *Relatório de Sustentabilidade 2013*. Rio de Janeiro: FURNAS. 135 p.
- HUI, L.; XIAOLING, C.; LIM, K.J.; XIAOBIN, C.; SAGONG, M. (2010) Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi province, China, using USLE, GIS and RS. *Journal of Earth Science*, v. 21, n. 6, p. 941-953.
- KINNELL, P.I.A. (2014) Applying the Q_rEI_{30} index with the USLE modeling environment. *Hydrological Processes*, v. 28, n. 3, p. 591-598.
- LANZA, D.S. (2011) *Diagnóstico da erosão laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- LUFABA, A.; TENYWA, M.M.; ISABIRYE, M.; MAJALIWA, M.J.G.; WOOMER, P.L. (2003) Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based universal soil loss model. *Agricultural Systems*, v. 76, n. 3, p. 883-894.
- MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; SÁ, M.A.C. (1997) Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p. 447-456.
- MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; AVANZI, J.C.; CURI, N.; FONSECA, S. (2010) Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em Mata Atlântica nos Tabuleiros Costeiros do estado do Espírito Santo. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 517-526.
- MATI, B.M.; MORGAN, R.P.C.; GICHUKI, F.N.; QUINTON, J.N.; BREWER, T.R.; LINIGER, H.P. (2000) Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the upper Ewaso Ng'iro north basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 2, n. 2, p. 78-86.
- MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N.; YANAGI, S.N.M. (2012) Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, southeast Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 36, n. 1, p. 53-59.
- MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; BESKOW, S.; NORTON, L.D. (2013) Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. *Geoderma*, v. 202-203, p. 88-102.
- MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; RUHOFF, A.L. (2010) Utilização de métodos de representação espacial para cálculo do fator topográfico na equação universal de perda de solo revisada em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 4, p. 1455-1462.
- MOORE, I.D. & BURCH, G.J. (1986) Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the American Society Agricultural and Biological Engineers*, v. 29, n. 6, p. 1624-1630.
- Nearing, M.A.; Lane, L.J.; Lopes, V.L. (1994) Modeling Soil Erosion. In: LAL, R. (Ed.) *Soil erosion: research methods*. Delray Beach: St. Lucie Press. p. 127-135.
- Nisar AHAMED, T.R.; GOPAL RAO, K.; MURTHY, J.S.R. (2000) Fuzzy class membership approach to soil erosion modeling. *Agricultural Systems*, v. 63, n. 2, p. 97-110.

- OLIVEIRA, A.H.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; AVANZI, J.C.; KLINKE NETO, G.; ARAÚJO, E.F. (2013) Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 2, p. 159-169.
- Pan, J.J.; Zhang, T.L.; Zhao, Q.G. (2005) Dynamics of soil erosion in Xingguo County, China, determined using remote sensing and GIS. *Pedosphere*, v. 15, n. 3, p. 356-362.
- PANDEY, A.; CHOWDARY, V.M.; MAL, B.C. (2007) Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS e remote sensing. *Water Resources Management*, v. 21, p. 729-746.
- Renard, K.G. & Freimund, J.R. (1994) Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, v. 157, n. 1-4, p. 287-306.
- 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)*. Agriculture Handbook Number 703. Washington: USDA. 404 p.
- SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUAX, P.; CURTI, N.; LIMA, J.M. (1997) Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p. 131-137.
- SILVA, V.C. (2004) Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 34, n. 3, p. 147-159.
- VALÉRIO FILHO, M. (1994) Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: FERREIRA, M.E.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) *Solos altamente suscetíveis à erosão*. Jaboticabal: FCAV. p. 223-242.
- VIOLA, M.; MELLO, C.; BESKOW, S.; NORTON, L. (2013) Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande river basin, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, p. 1639-1652.
- Wang, G.; Hapuarachchi, P.; Ishidaira, H.; KIEM, A.S.; TAKEUCHI, K. (2009) Estimation of soil erosion and sediment yield during individual rainstorms at catchment scale. *Water Resources Management*, v. 23, N. 8, p. 1447-1465.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook No 537. Washington: U.S. Department of Agriculture. 58 p.