

Impactos da resolução espacial de modelos digitais de superfície no cálculo da perda de solo através da EUPS em ambiente urbano

Caio Arlanche Petri
Vandoir Bourscheidt

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar/DCAm
CEP 13565-905 – São Carlos - SP, Brasil
caioarlanchepetri@gmail.com; vandoir@ufscar.br

Abstract. Erosion caused by natural land cover removal is a problem that many cities have been facing in the last few years. This paper compared different methods used to estimate soil loss caused by erosion in an urban area, with emphasis on digital surface models resolution impact on the resulting soil loss. The universal soil loss equation (USLE) was applied on two different topographic data sources: (a) elevation model based on 1:10.000 traditional topographic maps of the region; and (b) digital surface model (DSM) generated by unmanned aerial vehicle (UAV). Additionally, stakes were inserted into the ground, calculating soil loss by observing changes in one year of monitoring. Results show that all methods indicate substantial soil loss, but with a notable difference between the two categories of topographic data used for USLE application. UAV DSM resulted in significantly smaller values compared to traditional topographic maps. On the other hand, UAV DSM soil loss estimates are relatively farther to the stakes method. Additionally, they suggest that it is possible to apply the USLE (with the appropriate approach) even for very high resolution elevation models.

Palavras-chave: erosion, UAV, universal soil loss equation, VANT, erosão, equação universal de perdas de solo.

1. Introdução

São diversos os problemas ambientais enfrentados pela população que vive nas áreas urbanas: ilhas de calor, baixa qualidade do ar, enchentes, alteração de corpos hídricos e até mesmo a contaminação do solo. A erosão, associada principalmente com alterações de grande impacto no solo, causa alterações também em corpos hídricos pela deposição de sedimentos. Mas, como um processo natural formador da paisagem, ela não tende a causar alterações significativas a ponto de prejudicar a qualidade de vida humana abruptamente. Aliada às alterações de cobertura da terra provocadas por ações humanas, porém, a erosão pode ser acelerada. Neste contexto, pode provocar rápida movimentação de terras, alterando significativamente a paisagem e a segurança de seu entorno (PEDRO e LORANDI, 2004).

A aceleração do crescimento das cidades pode, eventualmente, criar regiões com grande quantidade de solo exposto, locais onde a erosão pode se tornar incontrolável, com facilidade, em um curto prazo. Nesses casos, a remoção de cobertura vegetal deve ser analisada com cuidado por empreendedores e pelos órgãos responsáveis (ARAUJO et al, 2005). Para manter a segurança e qualidade ambiental, a legislação ambiental regula a utilização de áreas declivosas tanto em área urbana quanto rural. Porém, em casos específicos, áreas com declives aceitáveis para a ocupação de acordo com a lei podem desenvolver grandes processos erosivos, dependendo da alteração promovida e das características físicas do solo.

Com a crescente demanda por soluções para impactos ambientais como a erosão, aumentaram as tecnologias disponíveis para a mensuração de tais ocorrências nas últimas décadas. Modelos numéricos para a estimativa da perda de solo existem desde a década de 1930, e se consolidaram com a criação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) na década de 1970 (RENARD et al, 1997). Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), relativamente mais recentes, se consolidaram em uma ferramenta para o auxílio na tomada de decisão por profissionais da área ambiental, inclusive para a visualização espacial mais precisa da EUPS (SILVA et al, 2013).

A disponibilidade de imagens capturadas por satélites também cresceu consideravelmente nos últimos anos, apresentando produtos com boa precisão e acesso facilitado ao usuário.

Porém, para os produtos de alta resolução, condição necessária para estudos em escalas detalhadas, ainda existem limitações em disponibilidade e valor de mercado para sua obtenção. Em ocasiões como essa, o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) tem se tornado uma opção mais econômica (EISENBEISS, 2011). Com vantagens na facilidade de uso e no mercado crescente da fotogrametria com VANTs, a tecnologia compensa seu maior defeito – a área de cobertura do voo – quando o estudo é localizado em pequenas regiões.

No presente estudo, comparamos os resultados da aplicação da EUPS com o uso de modelos digitais de terreno obtidos através de cartas topográficas na escala 1:10.000 integradas com coleta de pontos por GPS; e também pelo levantamento de um modelo digital de superfície (MDS) por VANT. Os resultados obtidos com os dois métodos foram ainda comparados com uma estimativa de movimentação de solo pela inserção de estacas no terreno, com monitoramento de um ano.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

A área escolhida para o estudo se localiza no município de Jundiaí – SP (Figura 1), sendo ela um terreno que teve sua cobertura vegetal removida há cerca de dez anos, sofrendo ainda um procedimento de terraplanagem com retirada de solo após o desmatamento. Desde então, processos erosivos vêm sendo observados na área.

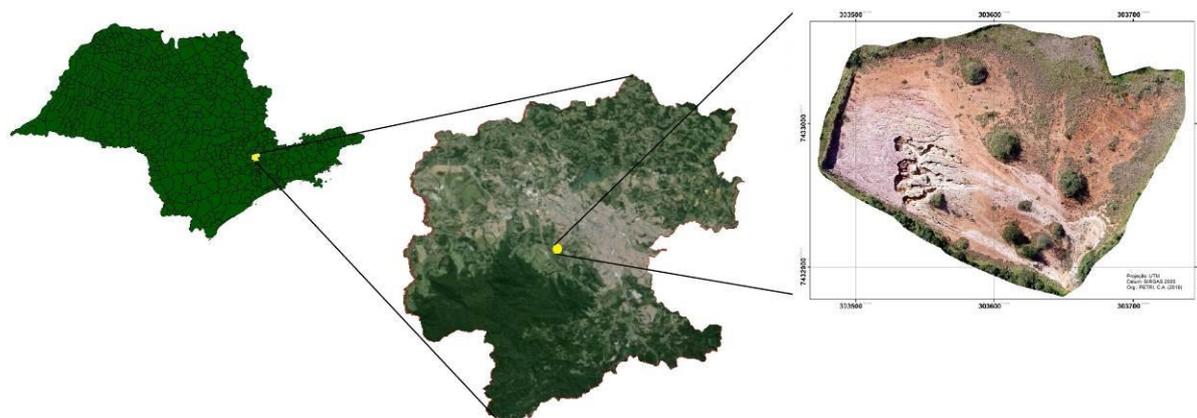


Figura 1: Área de estudo localizada no município de Jundiaí - SP.

2.2 Monitoramento com Estacas

Para a obtenção de uma estimativa da movimentação de solo realizada em campo, estacas foram instaladas pela extensão da área de estudo. A observação dos valores das estacas em um monitoramento bimestral, junto com a marcação de suas posições por GPS, permitiu que fosse elaborado um mapa interpolado para os valores acumulados ao longo de um ano. A metodologia é uma adaptação dos trabalhos de Zaimes et al (2004) e Wolman (1959) para o estudo de um terreno com erosão laminar e por ravinas. No total, dez estacas foram posicionadas de forma a cobrir a área mais afetada pela erosão (Figura 2).

As anotações de variação das estacas, em centímetros, foram convertidas para ton/ha.ano para então serem utilizadas nas interpolações, a fim de comparar os resultados com a EUPS. O peso de solo não deformado utilizado para a conversão é de $1.125 \text{ kg}^{\text{m}^{-3}}$.

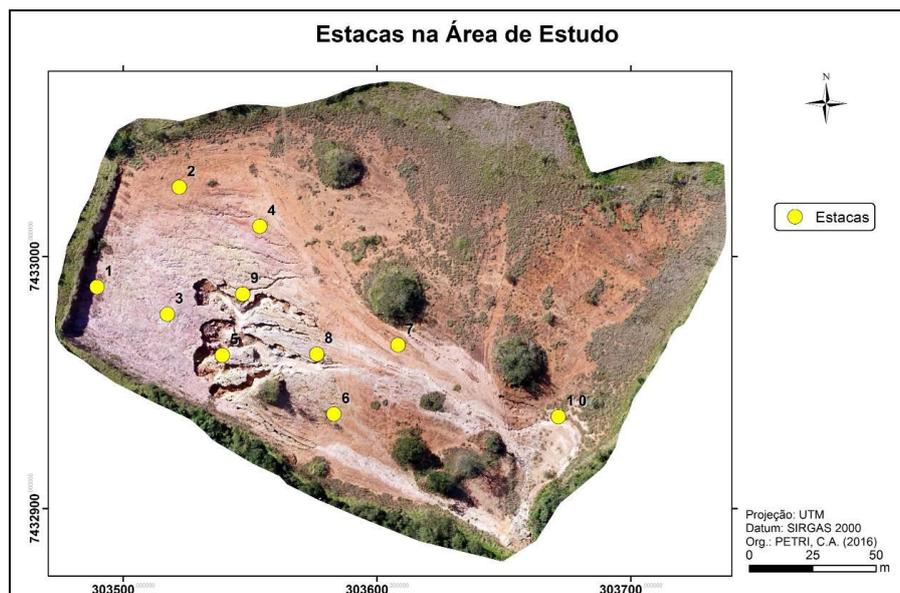


Figura 2: Locais de instalação de estacas para monitoramento da perda de solo.

2.3 Cálculo dos Fatores da EUPS

A EUPS (WISCHMEIER e SMITH, 1978), já consolidada em diversos estudos, é definida por:

$$E = R * K * LS * CP \quad (1)$$

Onde:

E: Representa o valor de erosão a ser calculado, em T/(ha.ano);

R: Fator de erodibilidade da chuva, considerando valores pluviométricos regionais, em MJ.mm/ha.h.ano;

K: Fator de erodibilidade do solo, considerando o tipo de solo presente na área de estudo, em t.ha.h/ha.MJ.mm;

LS: Fator topográfico, considerando a declividade do terreno e o comprimento de rampa;

CP: Fator de cobertura do solo e práticas conservacionistas, considerando para o cálculo o tipo da cobertura, produtiva ou não.

Para determinar o valor de R, foram utilizadas espacializações interpoladas de dados pontuais de precipitação (CEMADEN, 2016). A média das chuvas mensais foi então extraída para a área de estudo, e os valores foram inseridos na expressão proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992):

$$R = 68,730 * (p^2/P)^{0,84} \quad (2)$$

Onde:

R: Média mensal do índice de erosão em MJ.mm/ha.h.ano;

p: Precipitação média mensal em milímetro;

P: Precipitação média anual em milímetro.

Para o cálculo do fator K, foi utilizada uma combinação de um mapa de pedologia do estado de São Paulo em escala 1:750.000 (IAC, 2002) com uma análise tátil-visual realizada com amostras de solo da área de estudo (MACHADO e MACHADO, 2001), para definir o tipo de solo principal e a dinâmica de texturas presentes, respectivamente. Posteriormente, o valor de coeficiente K foi adotado de acordo com o levantamento de Mannigel et al (2002).

O fator LS foi calculado utilizando duas diferentes abordagens: uma baseada em cartas topográficas em integração com pontos GPS, e outra baseada em um modelo de superfície obtido por VANT.

Para a primeira abordagem, uma carta em escala 1:10.00 foi integrada à pontos marcados por GPS em campo, a fim de reproduzir as características topográficas da área não evidenciadas na carta. A camada de elevação foi então convertida em declividade (S) e comprimento de rampa (L).

A expressão de Desmet e Govers (1996) foi utilizada para o cálculo do fator de comprimento de rampa:

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}]}{[D^{m+2} x_{i,j}^m (22,13)^m]} \quad (3)$$

Onde:

$L_{i,j}$: fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j);

$A_{i,j-in}$: área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) (m^2);

D: tamanho da grade de células (m);

$X_{i,j}$: valor da direção de fluxo;

m: coeficiente que assume os valores: 0,5, se $s \geq 5\%$; 0,4, se $3\% \leq s < 5\%$; 0,3, se $1\% \leq s < 3\%$; e 0,2, se $s < 1\%$ (s é o grau de declividade).

Para o cálculo do fator de declividade, foi utilizada a seguinte expressão (WISCHMEIER e SMITH, 1978):

$$S = 0,00654s^2 + 0,0456s + 0,065 \quad (4)$$

Onde s é igual à declividade obtida para cada pixel, em porcentagem.

Por último, o fator CP foi obtido pela criação do mapa de cobertura do solo para a área de estudo e seu entorno. Os coeficientes atribuídos a cada uso neste trabalho foram os mesmos utilizados por Stein et al (1987). Destaca-se que o segundo levantamento, realizado com VANT, permitiu a elaboração da classificação de cobertura do solo de forma detalhada, originando o fator CP aplicado nas duas abordagens da equação.

2.4 Levantamento e Processamento dos Dados com VANT

O levantamento por VANT foi realizado para obter um modelo digital de superfície (MDS) da área de estudo com alta resolução espacial, que foi posteriormente integrado ao fator LS da EUPS. O procedimento de coleta dos dados se deu pelo mapeamento de todo o terreno com fotografias aéreas capturadas na altitude de 44 metros, com sobreposição frontal de 70% e sobreposição lateral de 60%. A área coberta pelo mapeamento foi de 6,37 hectares, num total de 219 fotografias. O software de processamento utilizado foi o *Drone Deploy*, onde os dados são carregados e processados na nuvem, e os resultados georreferenciados podem ser baixados para o posterior tratamento em ambiente SIG.

Para ajustar os valores de altitude do MDS, foi necessário o cálculo de uma diferença média entre o valor relativo de altitude do modelo e medições por GPS em campo (altitude geométrica). Destaca-se que não foi usado aparelho GPS de precisão e que as altitudes aferidas apresentam variabilidade. No entanto, como este procedimento apenas utiliza a altitude como um fator de escala sobre o MDS, espera-se que esta variabilidade não afete os resultados. Além disso, para fins de aplicação na EUPS, o principal fator dos modelos utilizado é a relatividade entre diferentes altitudes – a declividade – e o comprimento de rampa, fatores estes que não sofrem alteração frente ao procedimento citado.

Os procedimentos de tratamento do modelo de superfície obtido pelo *Drone Deploy* foram a aplicação, com uso do software ArcGIS 10.2, da função “*focal statistics*”, que suaviza o modelo com base na média de altitude encontrada em pixels vizinhos; e da função “*fill*”, que realiza um preenchimento uniforme da superfície do raster. O mapa hipsométrico gerado através dos dados coletados pelo VANT é mostrado na Figura 3.

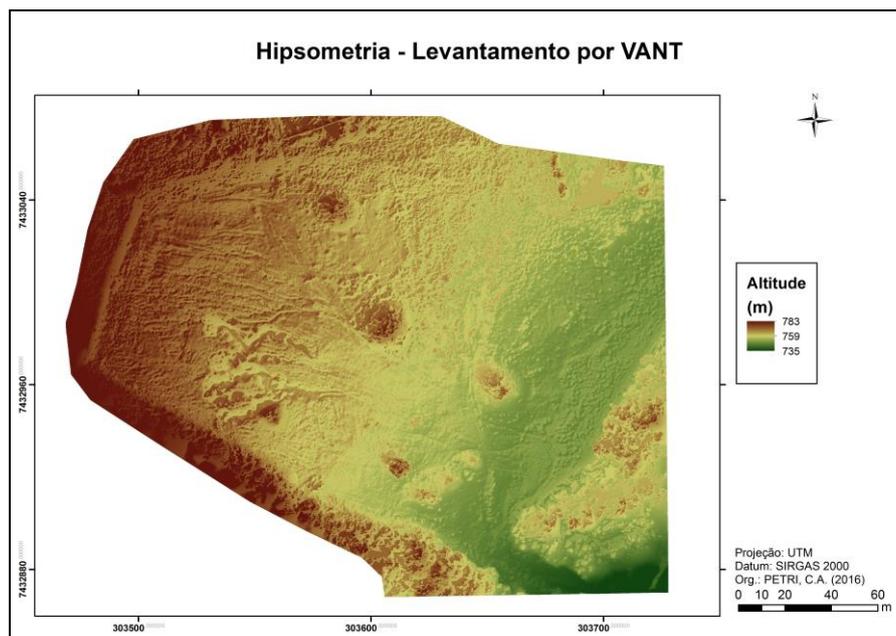


Figura 3: Mapa hipsométrico gerado pelos dados obtidos com VANT.

3. Resultados e Discussão

3.1 Estimativa da Perda de Solo com Estacas

O monitoramento com estacas inseridas no terreno resultou em uma estimativa da perda de solo para a área de estudo no período de um ano. Conforme as anotações coletadas em campo sobre a variação de altura, um mapa interpolado foi elaborado, representando a perda ou acumulação de solo anual (Figura 4). As áreas com deposição se concentram na parte baixa do terreno, conforme esperado. A perda de solo média medida para a área de estudo foi de 40,5 ton/ha.ano. Em rebaixamento do terreno, o valor corresponde a $3,60 \text{ cm.m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$.

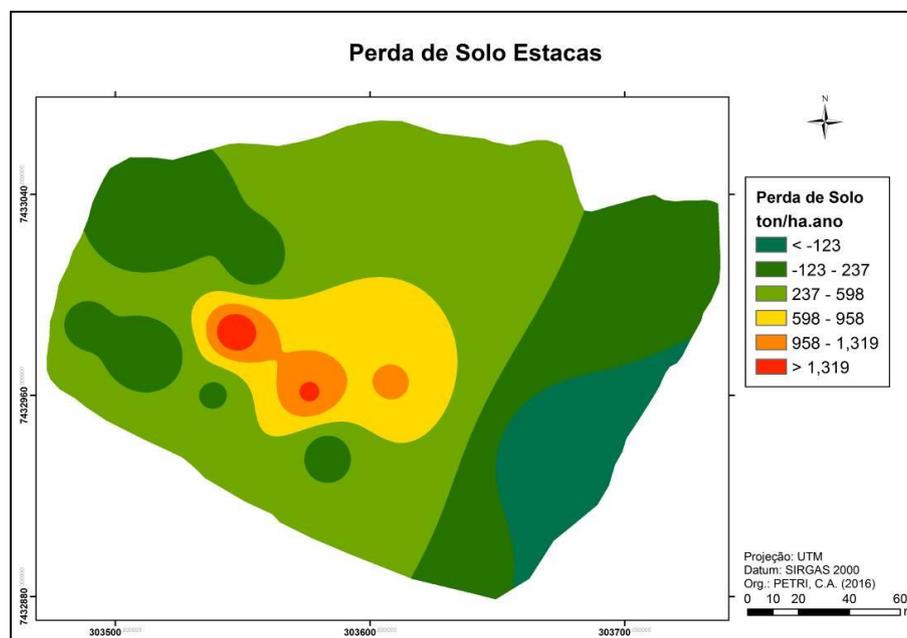


Figura 4: Interpolação da perda de solo monitorada por estacas.

3.2 Estimativas da Perda de Solo com a EUPS

Para a EUPS, foram obtidos dois resultados: um para a utilização do modelo de terreno baseado em carta topográfica com integração de pontos GPS, e outro para o modelo baseado em mapeamento com VANT. Para a aplicação com carta topográfica em escala 1:10.000 e pontos GPS, a perda de solo média para a área de estudo foi de 46,06 ton/ha.ano (Figura 5).

Tal estimativa significa um rebaixamento médio de $4,09 \text{ cm.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$. Já para a aplicação utilizando levantamento por VANT, a perda de solo média para a área de estudo foi de $12,1 \text{ ton/ha.ano}$ (Figura 6). Em rebaixamento do terreno, tal estimativa representa um valor de $1,08 \text{ cm.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$.

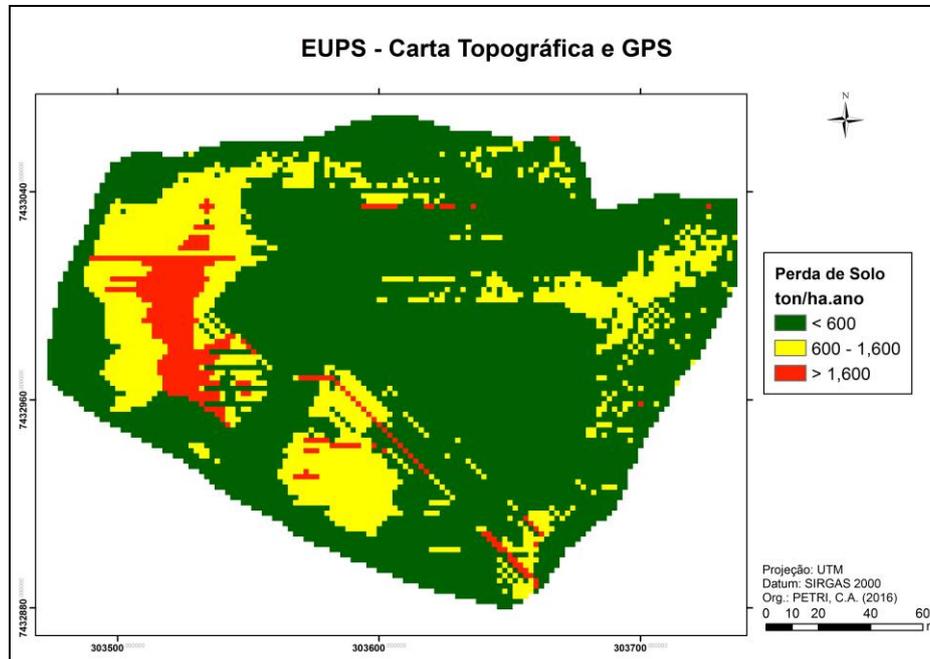


Figura 5: Estimativa de perda de solo anual pela EUPS para o fator LS derivado de carta topográfica e pontos GPS.

O levantamento com VANT originou um modelo de terreno com resolução de 7 cm. O nível de detalhamento obtido permitiu uma classificação de cobertura do solo detalhada, tendo sido dividido em vegetação e solo exposto, com coeficientes de CP de 0,0007 e 1, respectivamente (STEIN et al, 1987).

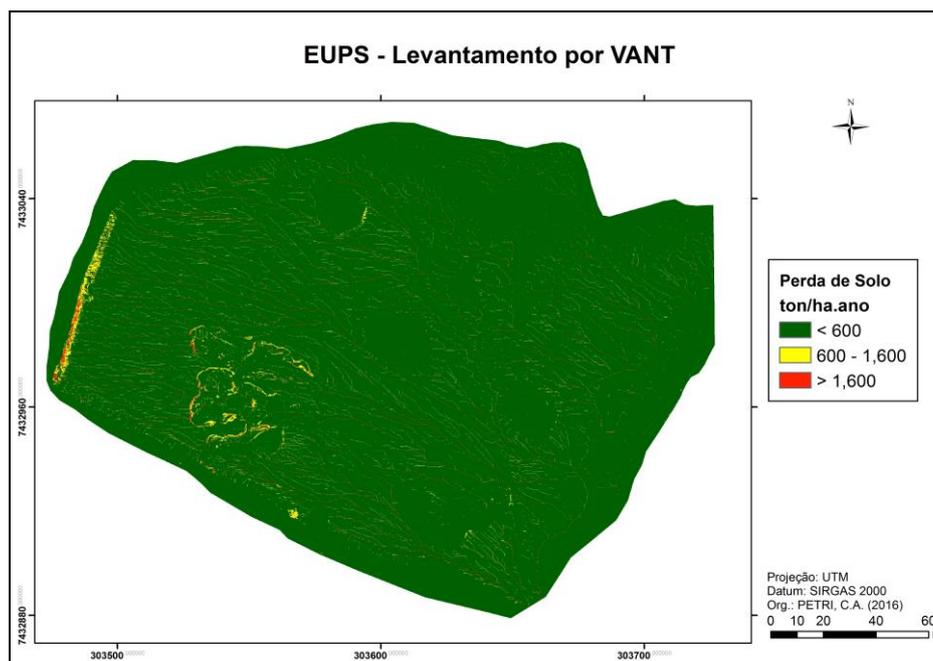


Figura 6: Estimativa da perda de solo anual pela EUPS para o fator LS derivado de levantamento com VANT.

4. Conclusões

Avaliando os resultados obtidos, observa-se a importância do correto uso e manejo do solo, mesmo em áreas urbanizadas. A perda de solo observada através da análise visual é confirmada de forma satisfatória pelas técnicas aplicadas. Para confirmar as perdas de solo locais, as estacas forneceram um importante diagnóstico, evidenciando a necessidade de intervenção para mitigação de impactos. Tal método ainda forneceu uma base simples para comparação dos resultados da EUPS.

Dentre as aplicações da EUPS, é evidente o aumento de precisão obtido com o levantamento por VANT, destacando o método como uma tecnologia emergente em diagnósticos ambientais. Os valores resultantes da equação com carta topográfica apresentam uma perda de solo mais elevada, originada de um modelo de terreno com resolução menos precisa para a escala de estudo desenvolvida. Mesmo assim, tais resultados destacam a necessidade de estudos específicos sobre a influência da resolução do modelo de terreno utilizado, mesmo em grandes extensões territoriais.

A terceira estimativa (VANT) mostra uma perda de solo menor, porém ainda muito significativa para a área de estudo. Sua relação com os valores das estacas sugere que o modelo de terreno de alta resolução criou um afastamento dos valores determinados pela EUPS com a erosão real, assumindo, é claro, que este equacionamento esteja correto nestas condições. De forma complementar, destaca-se a importância do aprofundamento em todos os fatores da equação, com o maior nível de detalhe possível. Uma análise de perfil do solo, por exemplo, pode fornecer valores de K (erodibilidade) variáveis dentro da região estudada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento do trabalho de pesquisa (IC Processo 2015/00705-0).

Referências Bibliográficas

Araujo, G.H.S; Almeida, J.R; Guerra, A.J.T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 320 p., 2005.

Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba, Livroceres, 392 p., 1985.

Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais). **Mapa interativo**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

Desmet, P.J.J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996.

Eisenbeiss, Z.H. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. **Photogrammetric Week 2011**. p. 135-145, 2011

Instituto Agrônomo de Campinas. **Pedologia do Estado de São Paulo**. Disponível em:<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/serviceTranslator/rest/getXml/Geoserver_WMS/G_PedologicoIAC/1435666706895/wms>. Acesso em: 16 abr. 2016.

Machado, S.L; Machado, M.F. **Mecânica dos Solos I: Conceitos Introdutórios**. Material didático relativo à disciplina de mecânica dos solos. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica. Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais (Setor de Geotecnia). 2001.

Mannigel, A. R.; Carvalho, M. P.; Moreti, D.; Medeiros, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

Pedro, G.F; Lorandi, R. Potencial Natural de Erosão na Área Periurbana de São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 1, p. 28-33, 2004.

Renard, K.G; Foster, G.R; Weesies, G.A; Mccool, D.K; Yoder, D.C. **Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: USDA. 384p., 1997.

Silva, E. P. Da; Coutinho, R. Q.; Lima Filho, M. De; Neumann, V. H.; Lima, R. P. Avaliação do Processo Evolutivo e da Dinâmica Erosiva: um Estudo de Caso no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho – PE/Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 23, n.1, p. 53-75, 2013.

Stein, D. P.; Donzelli, P. L.; Gimenez, A. F. Ponçano, W. L. Lombardi Neto, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na Bacia do Peixe-Parapanema. **Anais do IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão - Marília**, SP. p. 105-135, 1987.

Wischmeier, W.H; Smith, D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington: USDA. **Agricultural Handbook**, n. 537, 58 p., 1978.

Wolman, M.G. Factors Influencing Erosion of a Cohesive River Bank. **American Journal of Science**. v. 257, n. 3, p. 204-216, 1959.

Zaimes, G.N; Schultz, R.C; Isenhart, T.M. Stream Bank Erosion Adjacent to Riparian Forest Buffers, Row-crop Fields, and Continuously-grazed Pastures Along Bear Creek in Central Iowa. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 59, n.1, p.19-27, 2004.