

Estimativas de perda de solo em ambiente SIG utilizando diferentes fontes de dados topográficos

Estimates of soil loss in a GIS environment using different sources of topographic data

Peterson Ricardo Fiorio^{1(*)}
Pedro Paulo da Silva Barros²
Julio Storion de Oliveira³
Marcos Rafael Nanni⁴

Resumo

O estudo da erosão, por meio de ferramentas de geoprocessamento já é uma realidade, uma vez que minimiza o tempo necessário para se obterem dados para modelagem e tomada de decisão que ajudem na conservação dos solos e preservação ambiental. Contudo, a qualidade dos dados, bem como suas diversas características, como por exemplo as diversas resoluções de dados topográficos, devem ser observadas para que se encontrem valores de perda de solo que se aproximem ao máximo da realidade. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a utilização de quatro fontes de dados altimétricos para se estimar a perda de solo em Sistemas de Informações Geográficas. As fontes de altimetria foram: carta planialtimétrica 1:10.000, carta planialtimétrica 1:50.000, modelo numérico de terreno *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER GDEM), modelo numérico de terreno *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), sendo o primeiro e segundo tomados como referência por representarem a superfície mais detalhadamente. Para tanto usou-se a Equação Universal da Perda de Solo Revisada programada no SIG/SPRING pela da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL). Pode ser verificado que, dependendo do dado altimétrico utilizado, os valores estimados de perda de solo foram discrepantes

-
- 1 Dr.; Engenheiro Agrônomo; Professor do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Universidade de São Paulo, USP; Endereço: Avenida Pádua Dias, 11, Caixa Postal: 09, CEP: 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; E-mail: fiorio@usp.br (*) Autor para correspondência.
 - 2 MSc.; Engenheiro Agrônomo; Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Universidade de São Paulo, USP; Endereço: Avenida Pádua Dias, 11, Caixa Postal: 09, CEP: 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; E-mail: pedropaulo76@gmail.com
 - 3 MSc.; Engenheiro Agrônomo; Professor Auxiliar Mestre - Centro Universitário de Rio Preto - UNIRP; Endereço: Rua Ivete Gabriel Atique, 45 - Boa Vista, CEP: 15025-400, São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil; E-mail: juliostorion@unirp.edu.br
 - 4 Dr.; Engenheiro Agrônomo; Professor do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, UEM; Endereço: Avenida Colombo, 5790 - Jardim Universitario, CEP: 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil; E-mail: mrnanni@uem.br

Recebido para publicação em 15/10/2014 e aceito em 02/10/2015

em relação à referência, mostrando que, quando se utilizam sistemas SIG para previsão de erosão, deve-se indicar em qual escala se encontrou tal estimativa.

Palavras-chave: SIG; perda de solo; RUSLE.

Abstract

The study of erosion through geoprocessing tools is already a reality, since it minimizes the time required to obtain data for modeling and decision-making in order to help soil conservation and environmental preservation. However, the quality of data as well as its various features, such as the various resolutions of topographic data, must be observed to find soil loss values that are accurate to reality. This study aimed to evaluate the use of four sources of elevation data to estimate soil loss in Geographic Information Systems (GIS). Sources of altimetry were: letter planialtimetric1: 10.000, planialtimetric letter 1: 50.000, numerical terrain model Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) terrain model number, the first and second taken as reference for representing the surface more precisely. Therefore, it was used the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) programmed in GIS/SPRING through GIS Spatial Language for Algebraic Geoprocessing. The results demonstrated that depending on the altimetry data used, the estimated values of soil loss can be discrepant regarding the reference data, showing that when using GIS systems for erosion prediction one should indicate at which scale such estimate was found.

Key words: GIS; soil loss; RUSLE

Introdução

O uso inadequado do solo contribui para a degradação ambiental, uma vez que permite o estabelecimento de intenso processo erosivo, causando o empobrecimento dos solos e a poluição dos recursos hídricos. Os processos erosivos são naturais, contudo o planejamento inadequado do uso do solo pode agravar essa situação.

A ação antrópica é uma das principais razões para que os solos diminuam sua capacidade produtiva, reduzindo a produtividade das culturas e causando danos irreversíveis ao meio ambiente. *International Soil Reference and Information Centre/ United*

Nations Environment Programme (ISRIC/ UNEP) desenvolveu um estudo, tendo como um dos colaboradores a Embrapa Solos, e indicou que 15% das terras já foram severamente degradadas e 70% desse total corresponde às perdas da camada superficial do solo (HERNANI et al., 2002).

Os primeiros modelos matemáticos surgiram na década de 40. A “Universal Soil Loss Equation” (USLE), modelo que estima a perda de solo por erosão hídrica, foi desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978). Posteriormente, foi adaptada e criada a “Revised Universal Soil Loss Equation” (RUSLE), modelo de base empírica que calcula a erosão do solo pelos de valores

determinados por índices que representam os principais fatores, tais como chuva, solo, topografia e uso do solo (RENARD et al., 1997). De acordo com Galdino e Weill (2011), as estruturas das equações da RUSLE e USLE são idênticas; o que as distingue é a maneira como são determinados os fatores da equação. O monitoramento da erosão em grandes extensões de área é um processo custoso, assim o geoprocessamento torna-se uma ferramenta útil para estimar a perda de solos em bacias hidrográficas.

De acordo com Mingoti (2009), a análise dos fatores que ocasionam a erodibilidade do solo, de forma rápida, é essencial para ações que visam à melhoria do ambiente e do planejamento. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornam-se ferramentas necessárias e importantes para a análise da erodibilidade. De forma rápida e consistente, permite a análise de muitos dados, realiza operações analíticas, sobrepõe e cruza informações, portanto possibilita a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídas.

Os dados de precipitação, cobertura e manejo dos solos e, principalmente, informações topográficas, quando se estima a perda de solos, permitem obter informações valiosas para tomadas de decisão de forma rápida e com baixo custo. Porém, o uso inadequado, bem como a qualidade desses dados, podem gerar respostas distintas que não condizem com a realidade.

Uddin et al. (2014) comparam a utilização de imagens de alta e média resolução com o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e *Object-Based Image Analysis* (OBIA), com o objetivo de identificar potenciais áreas de erosão e deduziram que a escolha diferencia conforme a variabilidade espacial, homogênea ou

heterogênea, da bacia hidrográfica em estudo. Contudo, Lee e Choi (2010) estudaram a perda de solo pelo modelo da EUPS (Equação Universal de Perda de Solo), em uma bacia hidrográfica da Coreia, por meio de sensoriamento remoto e encontraram valores diferentes de perda de solo quando utilizaram diferentes resoluções espaciais para o parâmetro declividade.

Para previsão de perda de solos pelo uso da RUSLE, os dados topográficos são necessários para composição do fator comprimento e declividade de vertente – LS, que podem ser adquiridos preferencialmente por mapas planialtimétricos em diferentes escalas, todavia, tanto imagens por interferometria quanto orbitais de pares estereoscópicos são utilizadas. Cada uma dessas fontes tem suas próprias características tais como: diferentes sensores de aquisição de dados, formatos, custos e resoluções.

Atualmente, a necessidade de dados para modelagem ambiental, de áreas que não possuem cartas topográficas em escalas menores, torna necessária a busca por fontes confiáveis de elementos para representação da morfologia da superfície. Weill e Sparovek (2008) analisaram os fatores da EUPS na Microbacia Hidrográfica do Ceveiro – MHC. Os autores mantiveram os fatores R, C e P constantes e simularam o efeito alternado de dois fatores LS e K, fixando o fator LS em sua média e estimaram a perda de solo para o K mínimo e máximo encontrado na área, fazendo-se também o contrário. A relação da perda mínima e máxima para o fator K foi 1:2 (39 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹: 81 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e para o fator LS 1:254 (0,0342 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹:163,7100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), concluindo que o fator LS foi o fator que condicionou maior amplitude na variação de perdas de solo enquanto o fator K teve baixa amplitude.

Para o estado de São Paulo, uma das fontes de dados de altimetria são os mapas do Plano Geográfico do Estado de São Paulo com escala 1:10.000, porém estão indisponíveis para todo o estado. Dessa forma, levanta-se a hipótese de utilização das imagens ASTER GDEM e SRTM como fonte de dados altimétricos para predição de erosão em microbacia hidrográfica.

Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações de valores de elevação da superfície terrestre na forma de uma matriz ou de uma malha triangular (triangular irregular network). No formato matricial, cada célula possui um par de coordenadas (x , y) e o valor z referente à elevação (HENGL; REUTER, 2009). Os MDEs são um dos mais importantes dados nos trabalhos de análise geoespacial (TOUTIN, 2004).

Segundo Iorio (2012), a precisão altimétrica dos MDEs é de suma importância e, sabendo-se do alto custo de um levantamento de campo para coleta de dados altimétricos, é necessário que se chegue a métodos menos onerosos para tais fins, mas que, no entanto, mantenham a qualidade altimétrica de seus dados. Pesquisas recentes têm sido desenvolvidas avaliando e comparando os MDEs, entre eles, o SRTM (SMITH; SANDWELL, 2003; KELLNDOFER et al., 2004; RODRIGUEZ et al., 2006; VALERIANO et al., 2006; ALSDORF et al., 2007; FERNANDES; VALERIANO, 2013; POLIDORI et al., 2014), e ASTER (HIRT et al., 2010; GICHAMO et al., 2012; FREY; PAUL, 2012; WANG et al., 2012).

O objetivo do trabalho foi comparar estimativa de perda de solo em microbacia hidrográfica, gerado a partir da utilização de diferentes Modelos Numéricos de Terreno - MNT's em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas.

Material e Métodos

A Microbacia Hidrográfica do Ceveiro (MHC) está situada entre as latitudes 22° 41' 6.87" – 22° 36' 50.68" Sul e longitudes 47° 47' 14.96" – 47° 41' 59.48" Oeste de Greenwich, Datum Córrego Alegre, município de Piracicaba. A microbacia é limitada a montante pela Vila de Santana e a jusante pelo distrito de Ártemis e pelo rio de Piracicaba, sendo o córrego do Ceveiro afluente desse rio.

Todas as etapas do trabalho foram desenvolvidas dentro do SIG/SPRING, para que fosse possível maior controle sobre os erros. SPRING é um SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais (CÂMARA et al., 1996).

Os planos de informações, depois de digitalizados e incorporados ao banco de dados, foram manipulados através da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico – LEGAL, que, também, foi utilizada para obtenção das diferentes estimativas de perda de solos pela RUSLE conforme equação 1:

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

Sendo:

A = Perda de solo calculada por unidade de área, ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$);

R = Fator chuva: índice de erosão pela chuva, ($\text{MJ}/\text{ha} \cdot \text{mm}/\text{h}$);

K = Fator erodibilidade do solo ($\text{MJ}/\text{ha} \cdot \text{mm}/\text{h}$);

L = Fator comprimento do declive, (m);

S = Fator grau de declive, (%);

C = Fator uso e manejo (adimensional);

P = Fator prática conservacionista (adimensional).

Um programa na linguagem LEGAL é constituído de uma lista de sentenças que descreve um procedimento; tais sentenças são estruturadas em três grupos: declarações, instanciações e operações.

As declarações que definem variáveis que serão associadas aos dados fornecidos ou produzidos num programa; as instanciações correspondem a uma operação de recuperação de dados já existentes no banco de dados, ou de criação de um novo dado; as operações correspondem à aplicação de um ou mais operadores ou funções sobre variáveis declaradas e instanciadas previamente e comandos de controle que permitem o controle do fluxo de processamento de um programa. Não são algébricas por si só, entretanto são fundamentais para a modelagem de situações que envolvam a execução alternativa, condicional ou repetitiva de conjuntos de operações.

Planos de Informações

Mapa de Solos – Fator (K): O mapa de solo utilizado para a Microbacia Hidrográfica do Ceveiro (MHC) foi o apresentado por Silva (2000), o qual é considerado o mapa de solo mais detalhado para a microbacia. O mapa de solos proposto por Silva (2000) foi, inicialmente, passado para o formato digital por meio de digitalização. O arquivo resultante, salvo em formato TIFF, foi importado para o sistema SPRING e, então, prosseguiu-se para o seu registro e posterior digitalização, o que gerou um plano de informação dentro da categoria Temático do SIG/SPRING, com resolução 2,5 m. Após essa etapa, o mapa de solos foi readequado conforme Embrapa (2009) e reagrupado. Por meio da linguagem LEGAL, foi obtido um novo plano de

informação, dessa vez com os valores de referência de erodibilidade para cada tipo de solo da MHC, com resolução 2,5 m.

Topografia – Fator (LS): Foram utilizados, no trabalho, seis planos cartográficos 1:10.000 do Plano Geográfico do Estado de São Paulo elaborados pela divisão de geografia da Coordenadoria de Ação Regional da Secretaria de Economia e Planejamento do Governo de São Paulo. Os planos foram confeccionados a partir de levantamentos aerofotogramétricos realizados pela TerraFoto S.A. Atividades de Aerolevantamentos em 1978, com reambulação em campo entre 1978 e 1979. As curvas de nível são equidistantes em 5 metros. A projeção utilizada é a Universal Transversa Mercator – UTM; a referência horizontal é a de Córrego Alegre, MG. A referência vertical é do Marégrafo de Imbituba, SC.

Foram utilizados, no trabalho, dois mapas topográficos 1:50.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Os mapas foram confeccionados a partir de levantamentos estereofotogramétricos topográfico regular realizado pela VASP AEROFOTOGRAMETRIA S.A. 1965, com reambulação, restituição e triangulação em campo, em 1969.

As curvas de nível são equidistantes em 20 metros. A projeção utilizada é UTM; a referência horizontal é a de Córrego Alegre, MG e a referência vertical é do Marégrafo de Imbituba, SC.

A cena do modelo numérico, utilizado da missão ASTER, foi a ASTGTM_S23W048_dem. A cena da missão SRTM utilizada foi a SF-23-Y-A.

O fator comprimento de rampa – L e o fator declividade – S aparecem associados, representados pela variável LS conforme

equação 2, (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008):

$$LS = 0,00984.L^{0,63} \times S^{1,18} \quad (2)$$

Sendo:

L = Comprimento de rampa, em m;

S = Fator declividade em %.

O comprimento de rampa – L foi gerado a partir da função Mapa de distância do SPRING, considerando o caminho preferencial do fluxo. Foram considerados os cursos de água do mapa de drenagem. A rede de drenagem foi obtida a partir da fotointerpretação das fotografias aéreas da região da MHC, obtidas em 2005. Com o auxílio de estereoscópico de espelho e técnicas de sobreposição, a rede de drenagem foi sendo identificada e desenhada em folhas de acetato de 0,10 milímetros, com pontos de controle que serviram para registro posterior no SIG.

O comprimento de rampa foi calculado considerando que, dentro de uma mesma vertente, dependendo da direção preferencial do fluxo, ocorrem simultaneamente processos de erosão e deposição. Como resultado, foi gerada uma grade de distância com resolução de 2,5 m.

A declividade foi derivada a partir das grades topográficas da região da MHC. Neste trabalho, as grades foram obtidas, através da função Declividade, das curvas de nível processadas das diferentes fontes de dados (Cartas topográficas 1:10.000, 1:50.000, modelo SRTM e modelo Aster). Após essa etapa, foi realizado o fatiamento da grade declividade (obtida em porcentagem) para geração das classes de declividade, definidas a cada 5% iniciando do zero e finalizando na classe >45.

Para as grades derivadas do modelo SRTM e ASTER GDEM, foram geradas as curvas de nível de 20 e 5 metros

respectivamente através da opção Geração de Isolinhas do SPRING. A partir das curvas de níveis, tanto as derivadas da digitalização das cartas topográficas como as dos MNT's ASTER e SRTM, foi gerada uma grade triangular irregular (Triangular Irregular Network – TIN).

Com as grades TIN de todas as fontes de altitude, foi utilizada a função do SPRING para geração de grade de declividade em porcentagem para cada um dos planos de informação das fontes altimétricas. Posteriormente, integrou-se a declividade com o comprimento da vertente via linguagem LEGAL e como resultado obteve-se a grade numérica do fator LS para cada uma das fontes de altitude de categoria numérica com resolução espacial de 2,5 m.

Dados Pluviométricos – Fator (R): Foram utilizados dados do posto meteorológico de Piracicaba – SP pertencentes à base de dados da estação convencional do Departamento de Engenharia de Biosistemas – USP/ESALQ. Foi utilizada uma série de dados de 93 anos, 1917 até 2010. É considerado apenas um valor de R para toda a microbacia.

Os dados pluviométricos foram trabalhados em planilha eletrônica, onde os dados de cada mês puderam ser agrupados e somados para cálculo das médias e aplicação da fórmula. Os valores de 'P' foram obtidos pelo somatório dos valores de 'r' e assim calculou-se o EI₃₀ mensal da série, conforme equação 3

$$EI_{30} = 67,355 s \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (3)$$

Sendo:

EI_{30} = média mensal do índice de erosividade, em MJ.mm/ha.h;

r = média do total mensal de precipitação, em mm;

P = média do total anual de precipitação, em mm.

Para determinação do fator R, somou-se o resultado dos valores mensais do índice de erosividade, conforme equação 4:

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j} \quad (4)$$

O valor do fator R final para os dados utilizados foi de 6.378,040 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Esse valor foi atribuído a toda região da Microbacia do Ceveiro através da linguagem LEGAL. O resultado foi um plano de informação de categoria grade numérica com resolução espacial de 2,5 m.

Uso e Ocupação Atual do Solo – Fator (CP): Para obtenção do mapa de atual do solo, foram utilizadas imagens de alta resolução CCD e HRC do sensor CBERS 2B. Logo em seguida, foram registradas e foi utilizada primeiramente a função restauração para que as imagens CCD ficassem com resolução 2,5 m, iguais à imagem HRC. A transformação é o processo pelo qual as imagens se fundem e, assim, tornam-se imagens com resolução 2,5 m com composição colorida. No presente estudo, foram utilizadas as bandas 1, 2 e 3 do sensor CCD; e, ainda, fotografias aéreas de 2006. Foram feitas duas campanhas em campo para verificação dos resultados do mapa final de uso e ocupação.

Após o reconhecimento dos diferentes usos do solo e visitas ao local de estudo, foi criada uma categoria Temática com o plano de informação contendo o uso de 2010, que foi considerado o atual do solo. Prosseguiu-se para a criação de uma nova categoria de modelo numérico e, por meio da linguagem LEGAL, foram atribuídos valores CP (Tabela 1) integrados para cada uso e ocupação do solo, uma vez que a intenção do trabalho foi avaliar a utilização de diferentes

dados altimétricos. O resultado dessa etapa é uma grade numérica de resolução 2,5 m.

Estatística Kappa

O valor do índice Kappa permite analisar comparativamente os resultados da análise dos mapas resultantes da utilização de dados de sensoriamento remoto, dentro de certas restrições (LANDIS; KOCH,1977).

Para a análise dos resultados, é apresentada uma matriz de erros com os valores em pixels. Cada pixel equivale a uma área de 6,25 m². Cada matriz de erros é acompanhada dos valores dos erros do produtor e dos erros do usuário. As classes de perda de solo apresentadas foram divididas em: 0 a 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, 20 a 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, 50 a 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e >100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

Resultados e Discussão

Quando se realiza estatística Kappa em sensoriamento remoto, Congalton e Green (2008) discutem que deve ser Tabela 1 – Valores do fator CP utilizados no trabalho

Uso	Fator CP
Urbano	0,0000
Corpo aquoso	0,0000
Reflorestamento	0,0010 ⁽¹⁾
Mata	0,0001 ⁽¹⁾
Cana-de-açúcar	0,3066 ⁽²⁾
Pasto	0,0080 ⁽³⁾
Pasto sujo	0,0100 ⁽³⁾
Culturas anuais	0,5500 ⁽⁴⁾

Fonte: (1) Extraído de Santos (1993) citado por Weill (2008). (2) Estimado com base nos trabalhos de Machado et al. (1982) e Wischmeier e Smith (1978). (3) Extraído de Menk (1993) citado por Weill (2008). (4) Adaptado de Bertoni e Lombardi Neto (2008).

implementado o teste Z para indicar se o mapa que está sendo validado mostrou um resultado melhor que uma classificação randômica. Nesse caso, utilizou-se o valor de Z tabelado de 1,96. Portanto, quando o Z calculado for maior que esse valor, rejeita-se a hipótese de que K é igual a 0 ($H_0: K=0$) e aceita-se a hipótese 1 ($H_1: K \neq 0$) e, assim, o mapa validado é estatisticamente diferente de 0, sendo melhor que uma classificação randômica em 95%.

No presente estudo, todos os testes Z foram maiores que 1,96, portanto os mapas de perda de solo estimado pelos MNT's ASTER GDEM e SRTM possuem classificação melhor considerada do que uma aleatória, ao nível de confiança de 95%, quando a referência é a carta topográfica 1:10.000 e 1:50.000.

O índice Kappa para a primeira comparação (1:10.000 e ASTER GDEM) foi de 0,32, classificando as informações do mapa ASTER GDEM em razoáveis, quando comparadas às da referência. A exatidão global é o indicativo simples da concordância entre os mapas. Ele representa a divisão da somatória da diagonal principal (número de pixel em concordância nos dois mapas) pelo número total de amostras. Para os mapas topográficos ASTER GDEM e o de referência 1:10.000 a exatidão global foi de 0,618 ou 61,8%, valor considerado inadequado segundo Congalton e Green (2008), que estabelecem como aceitável 85%.

Segundo os mesmos autores, para uma análise mais detalhada, deve-se proceder para ao cálculo da exatidão do produtor e usuário os quais verificam quanto de uma classe de perda de solo (exemplo 0 a 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) o mapa ASTER GDEM identifica em relação ao que foi encontrado pela referência. Assim, tomando o mapa 10.000, observamos que

o valor para exatidão do produtor é 86,54% (Tabela 2), porém somente esse valor não permitiria estabelecer a verdade. A exatidão do usuário permite estabelecer uma relação pixel a pixel da posição desse acerto. Sendo assim, apenas 65,98% têm uma verdade posicional quando se utiliza o mapa ASTER GDEM, pois ele encontra uma quantidade muito maior de pixel para a classe 0 a 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, o que é imprescindível nesse caso. A exatidão do produtor é maior que a do usuário, o que mostra que o mapa ASTER GDEM está superestimando essa classe.

Pode-se notar, ainda, na tabela 2, que o mapa temático com informações altimétricas obtidas por sensoriamento remoto orbital (ASTER GDEM) identificou apenas 45,53% das áreas de 20 a 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹; 14,65% das áreas de 50 a 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 16,32% das áreas com perdas maiores 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Para as classes de 20 a 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, a exatidão do usuário foi de 57,17%; para a classe 50 a 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ foi de 33,07%, e para a classe >100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ foi de 60,05%. Nessas classes, o que se percebe é que a exatidão do produtor foi menor que a do usuário, mostrando que essas classes foram subestimadas. Esses resultados corroboram o trabalho realizado por Iorio et al. (2014), que compararam diferentes modelos digitais de elevação (SRTM versão 4, TOPODATA e ASTER GDEM) com o extraído de imagem ALOS/PRISM e ressaltou que nenhum dos modelos testados atendeu a escala 1:50.000, o que mostra que MDE's obtidos por técnicas de sensoriamento remoto, devem ser usados com certa cautela para análises em escalas pequenas.

Para a matriz de erros representada pela comparação entre a imagem SRTM e a carta 1:10.000, o índice Kappa resultante foi de 0,18 enquadrando as informações do mapa SRTM em ruim, quando comparadas

Tabela 2 - Matriz de erros para os MNT's das imagem ASTER GDEM e SRTM valores em pixels

MNT		1 : 10.000				Exatidão Usuário
	Classe (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	0_20	20_50	50_100	>100	
ASTER GDEM	0_20	1.357.540	591.765	97.659	10.673	65,98
	20_50	192.405	530.497	172.471	32.630	57,17
	50_100	15.048	41.227	47.256	39.350	33,07
	>100	3.758	1.798	5.169	16.122	60,05
Exatidão Produtor		86,54	45,53	14,65	16,32	%
SRTM	0_20	1.409.849	825.913	167.259	28.497	57,98
	20_50	150.404	329.400	132.087	31.957	51,16
	50_100	8.374	9.895	20.346	33.408	28,25
	>100	224	79	2.863	4.913	60,81
Exatidão Produtor		89,87	28,27	6,31	4,97	%
MNT		1 : 50.000				Exatidão Usuário
	Classe (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	0_20	20_50	50_100	>100	
ASTER GDEM	0_20	1.673.680	326.783	54.015	3.259	81,34
	20_50	456.523	377.358	85.187	8.935	40,66
	50_100	64.647	427.27	23.846	11.661	16,69
	>100	12.186	6.478	2.659	5.524	20,58
Exatidão Produtor		75,83	50,09	14,39	18,8	%
SRTM	0_20	1.862.542	482.637	77.663	8.676	76,6
	20_50	307.063	252.795	75.769	8.221	39,26
	50_100	34.391	16.157	10.729	10.746	14,9
	>100	3.040	1.757	1.546	1.736	21,49
Exatidão Produtor		84,39	33,56	6,47	5,91	%

Fonte: Fiorio, P.R. et al. (2014).

às da referência. A exatidão global é de 0,559 ou 55,9%. Observa-se que o valor para a classe de perda de solo entre 0 e 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ na coluna de exatidão do produtor é de 89,87%. Quando se nota a exatidão do usuário na coluna ao lado, pode-se afirmar que, no mapa da imagem SRTM, 57,98% das áreas de 0 a 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ correspondem a tais na referência, valor inferior ao do mapa da carta ASTER GDEM que é de 65,98%.

Assim, pode-se perceber que o mapa temático com dados altimétricos obtidos

pela missão SRTM identificou apenas 28,27% das áreas de 20 a 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹; 6,31% das áreas de 50 a 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 4,97% das áreas com perdas maiores 100 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, valores inferiores aos encontrados no mapa temático obtido com o MNT ASTER GDEM. Os acertos de posição, valores da coluna de exatidão do usuário, também são menores que os do mapa temático ASTER GDEM. Para as classes de 20 a 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, a exatidão do usuário foi de 51,16%; para a classe 50

a $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi de 28,25% e para a classe $>100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi de 60,81%.

A matriz de erros representada pela comparação entre a carta 1:50.000 e o MNT ASTER GDEM (tabela 2) apresentou o índice Kappa de 0,28 enquadrando as informações do mapa ASTER GDEM como razoáveis quando comparadas às da referência (carta topográfica 1:50.000). A exatidão global foi de 0,659 ou 65,9%. O valor para a classe de perda de solo entre 0 e $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ na coluna de exatidão do produtor é de 75,83%. A exatidão do usuário, mostra que, em 81,34%, ela realmente corresponderá à mesma classe encontrada para a carta de referência 1:50.000 para essa classe.

O MNT derivado dos dados ASTER GDEM subestimou essa classe quando confrontado com o mapa de referência 1:50.000.

O mapa temático com informações altimétricas ASTER GDEM obtidas por sensoriamento remoto orbital identificou apenas 50,09% das áreas de 20 a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$; 14,39% das áreas de 50 a $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e 18,80% das áreas com perdas maiores $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. Para as classes de 20 a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, a exatidão do usuário foi de 40,66%; para a classe 50 a $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi de 16,66%, e para a classe $>100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi de 20,58%.

A matriz de erros representada pela comparação entre a carta topográfica 1:50.000 e o MNT SRTM apresentou um índice Kappa de 0,21 classificando as informações do mapa SRTM como razoáveis quando comparadas às da referência (carta topográfica 1:50.000). A exatidão global é de 0,674 ou 67,4%. Podemos perceber que o valor para a classe de perda de solo entre 0 e $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ na coluna de exatidão do produtor é de

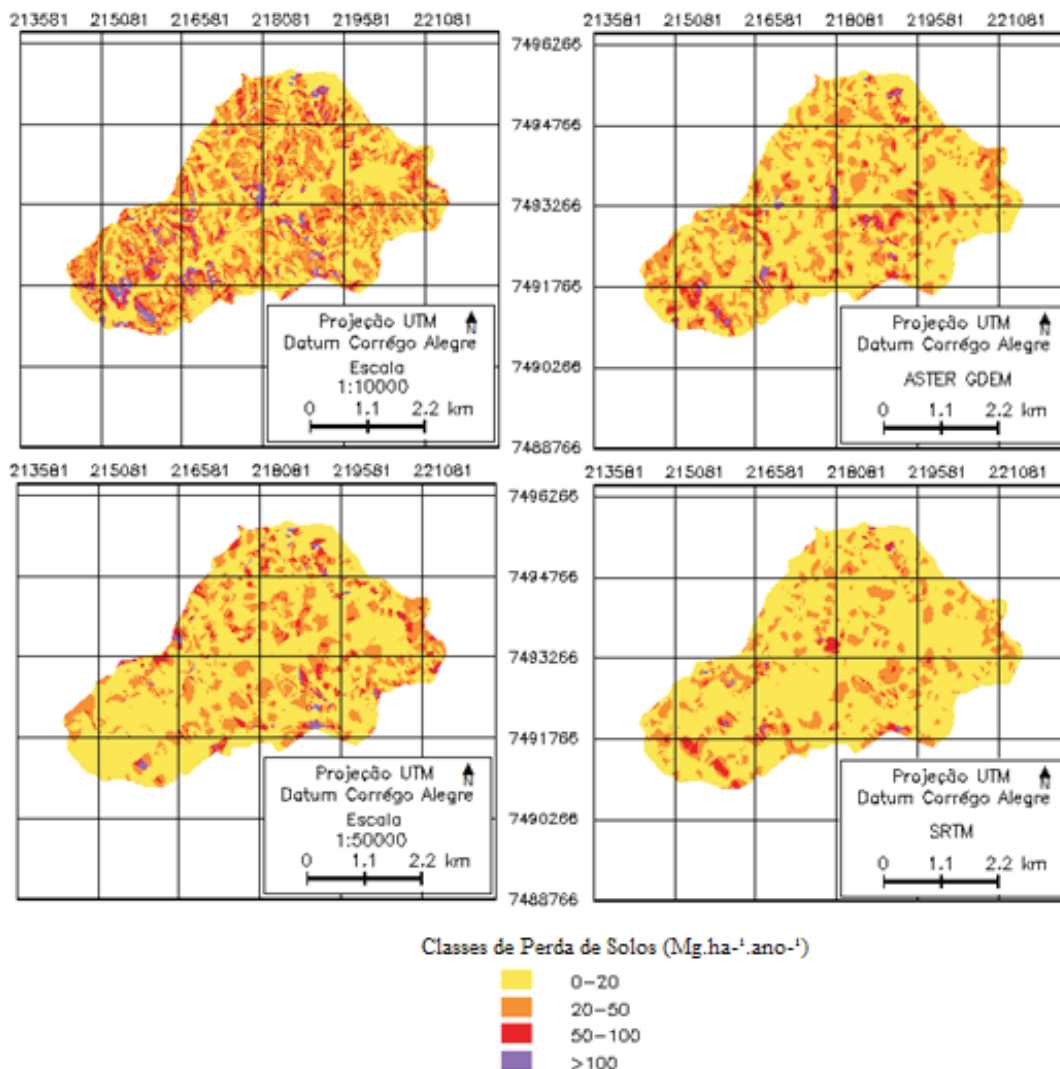
84,39%. Quando se observa a exatidão do usuário na coluna ao lado, pode-se afirmar que em 76,60% das vezes, o mapa temático SRTM indicará corretamente a classe de perda de solo da carta de referência 1:50.000. O mapa temático com o modelo SRTM identificou corretamente o local das classes de perda de solo apenas em 39,26% das áreas de 20 a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, 14,90% das áreas de 50 a $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e 21,49% das áreas com perdas maiores $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Na figura 1 verifica-se que as informações do modelo de elevação ASTER GDEM geraram uma espacialização final de perda de solo onde a classe de 0 a $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi superestimada enquanto as demais foram subestimadas. O mesmo ocorre com o resultado obtido com os dados da missão SRTM, resultado dos dados mais espaçados de altimetria da missão SRTM.

As informações do modelo de elevação ASTER GDEM acarretaram em um mapa final de perda de solo onde a classe de 0 a $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, 50 a $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e maior que $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi subestimada em relação a carta 1:50.000. Já a classe 20 a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ encontrado pelos dados ASTER GDEM foi maior que no mapa de referência.

O mapa de perda de solo estimado com os dados da missão SRTM superestimou as áreas da classe de 0 a $20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e também maiores que $100 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, quando comparados com o mapa de referência em escala 1:50.000. Isto provavelmente é resultado dos dados mais espaçados de altimetria da missão SRTM, tendo em vista que a resolução espacial é de 90 metros, podendo ter ocorrido uma acentuada variação de relevo. Neste caso, a média das altitudes presentes na região coberta pelo pixel,

Figura 1 - Representação da estimativa de perda de solos ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) das cartas topográficas 1:10.000, 1:50.000 e dos MNTs



Fonte: Fiorio, P.R. et al. (2014).

apresentada na imagem, apresentou-se com considerável diferença em relação ao dado real.

Conforme visto, as estimativas de perda de solo não foram iguais e ainda pouco semelhantes para os diferentes modelos de elevação analisados, o que concorda com o trabalho de Lee e Choi (2010). Iorio et al. (2014) afirmam que é muito importante avaliar os diferentes Modelos Digitais de Elevação, que atualmente apresentam diversas

aplicações no ramo das geotecnologias, quanto às suas vantagens e limitações, assim, visando alcançar os melhores resultados de acordo com o objetivo do trabalho ou estudo a ser realizado.

As estimativas são bastante diferentes quando se analisa a exatidão do usuário e a exatidão do produtor. Dessa forma, quando se estima a perda de solo em ambiente SIG, deve-se indicar em que escala se dá tal estimativa,

visto que, para diferentes escalas e modelos de elevação utilizados no presente estudo, encontraram-se diferentes resultados e estes bem discrepantes um em relação ao outro.

Conclusões

O modelo ASTER GDEM foi o que apresentou melhor concordância nas

estimativas de perda de solo com os modelos de referência 1:10.000 e 1:50.000.

Os modelos de elevação obtidos por sensoriamento remoto, quando analisados pela exatidão do produtor e exatidão do usuário, encontraram resultados discrepantes de perda de solo para a microbacia hidrográfica, quando comparados aos modelos de referência.

Referências

AGROPECUÁRIA, E. E. B. D. P. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ALSDORF, D. E.; RODRÍGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. Measuring surface water from space. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

AMORE, E.; MODICA, C.; NEARING, M.A.; SANTORO, V.C. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basin. **Journal of Hydrology**, Stuttgart, n. 293, p.100-114, 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6.ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355p.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO J.; MITSUO, F. Spring: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented data modelling. **Computers & Graphics**, Lisboa, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remote sensing data: principles and practice**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Francis and Taylor Group, 2008. 210p.

FERNANDES, P. J. F.; VALERIANO, M. D. M. Relações entre dados SRTM e classes geomorfológicas do projeto RADAMBRASIL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 357-369, 2013.

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; SPAROVEK, G. Cronologia e impacto ambiental do uso da terra na microbacia hidrográfica do Ceveiro, em Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 671-679, 2000.

FREY, H.; PAUL, F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 480-490, 2012.

GALDINO, S.; WEILL, M. A. M.; Estimativa do fator topográfico (LS) da RUSLE para a bacia do alto Taquari–MS/MT, utilizando algoritmo do ângulo de inclinação limite para erosão/deposição. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 4813-4820.

GICHAMO, T. et al. River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 37-46, 2012.

HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Elsevier, 2009. ISBN 0123743451.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; DE MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITA JÚNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p.47-60.

HIRT, C.; FILMER, M.; FEATHERSTONE, W. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2010.

IORIO, M. M. et al. Avaliação de modelos digitais de elevação extraídos de imagem alos/prism e comparação com os modelos disponibilizados gratuitamente na web. **Geociências**, v. 31, n. 4, p. 650-664, 2012.

KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITES, J. A.; HUNSAKER, C.; CLUTTER, M. Vegetation height estimation from shuttle radar topography mission and national elevation datasets. **Remote sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 339-358, 2004.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Arlington, n.33, p.159-174, 1977.

LEE, G. S.; CHOI, I. H. Scaling effect for the quantification of soil loss using GIS spatial analysis. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 14, n. 6, p. 897-904, 2010.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. I.; ARRUDA, J. V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-acucar [*Saccharum officinarum*]. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, p. 1323-1982, 1982.

MINGOTI, R. **Produção de sedimentos em microbacias hidrográficas em função do relevo e da cobertura florestal**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

- MINGOTI, R.; VETTORAZZI, C. A. Relative reduction in annual soil loss in micro watersheds due to the relief and forest cover. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, 2011.
- POLIDORI, L.; EL HAGE, M.; VALERIANO, M. D. M. Digital elevation model validation with no ground control: application to the topodata dem in Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 2, 2014.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. A.; WEESIES, D. K. McCool, YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water**: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington: Agriculture Handbook, n. 703, 1997. 384 p. ISBN: 0-16-048938-5
- RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.
- SILVA, E. D. **Mapas de solos produzidos em escalas e épocas distintas**. 2000. 177 f. Dissertação (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 9, p. 20-24, 2003.
- TOMAZONI, J. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F. A sistematização dos fatores da eups em sig para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Anta Gorda - PR. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v. 3, n. 1, p. 1-21, 2005.
- TOUTIN, T. RADARSAT-2 stereoscopy and polarimetry for 3D mapping. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 496-503, 2004.
- UDDIN, K.; DHAKAL, M.; JOSHI, G. An optical high and medium spatial resolution approach for erosion-prone areas assessment in Mustang, Nepal. **International Journal of Geosciences**, v. 5, n. 4, p. 383-393, 2014.
- VALERIANO, M. M. et al. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006.
- WANG, W.; YANG, X.; YAO, T. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 2, p. 213-225, 2012.
- WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do ceveiro (Piracicaba, SP). I - estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 801-814, 2008.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58