

# ESPAIALIZAÇÃO TEMPORAL DAS PERDAS DE SOLO EM UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM PREDOMÍNIO DE SOLOS ARENOSOS

*Edvania Aparecida CORRÊA<sup>1</sup>*

*Sérgio dos Anjos Ferreira PINTO<sup>2</sup>*

*Antonio Aparecido COUTO JUNIOR<sup>3</sup>*

## Resumo

O presente artigo tem como objetivo avaliar temporalmente a distribuição espacial das perdas de solo em uma bacia hidrográfica rural de pequeno porte, tendo em vista que a mesma encontra-se em uma área de relevo predominantemente ondulado/forte ondulado. Com base na formulação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) e utilizando a documentação cartográfica e os produtos de Sensoriamento Remoto, foram obtidos, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), as cartas referentes à erosividade, erodibilidade, fator topográfico, fator práticas conservacionistas e usos da terra referentes aos cenários de 1988, 2006 e 2013. Em todos os cenários avaliados observou-se o predomínio de pastagens e vegetação natural florestal, as quais ocorreram em aproximadamente 90% do total da área de estudo. Por outro lado, também foi possível verificar a expansão da cultura de cana-de-açúcar na porção sul/sudeste da área de estudo, a qual, considerando as características físicas da bacia, acarreta perdas de solo acima do limite tolerável. Desta maneira, grande importância deve ser dada na aplicação de um adequado planejamento agrícola visando à implantação de culturas que proporcionem maior proteção do solo. Neste sentido, a carta de potencial natural de erosão e a carta de risco de erosão demonstraram ser importantes instrumentos no planejamento agrícola em nível de bacias hidrográficas.

**Palavras-chave:** Erosão hídrica. Geoprocessamento. Uso da terra. EUPS.

---

<sup>1</sup> Doutoranda em Geografia pela Universidade Estadual Paulista, IGCE/UNESP/Rio Claro. Av. 24A nº 1515 - Bela Vista - CEP: 13506-900, Rio Claro - SP - Brasil. E-mail: edvaniacorreia@ig.com.br

<sup>2</sup> Professor Titular do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento da Universidade Estadual Paulista, IGCE/UNESP/Rio Claro. Av. 24A nº 1515 - Bela Vista - CEP: 13506-900, Rio Claro - SP - Brasil. E-mail: sanjos@rc.unesp.br

<sup>3</sup> Mestrando em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista, IGCE/UNESP/Rio Claro. Av. 24A nº 1515 - Bela Vista - CEP: 13506-900, Rio Claro - SP - Brasil. E-mail: acjunior\_2003@hotmail.com

## Abstract

### Temporal spatialization of soil loss in a small watershed with dominance of sandy soil

This article aims to evaluate temporally the spatial distribution of soil loss in a small rural stream basin, since it is located in an area of undulating and heavily undulating relief. Based on the formulation of the USLE, use of cartographic documentation and remote sensing products, were obtained in GIS, maps of erosivity, erodibility, topographic factor, conservation practices factor and land use for scenarios relating to 1988, 2006 and 2013. In all scenarios evaluated, there was a predominance of grassland and forest natural vegetation, which occurred in approximately 90% of the study area. On the other hand, it was also observed the expansion of sugar cane cultivation in the southern/southeast portion of area, which, considering the physical characteristics of the basin, causes soil losses above the tolerable limit. Therefore, great importance should be given in the application of an appropriate agricultural planning, aiming at the implementation of practices which provide greater protection of the soil. In this sense, maps of natural erosion potential and erosion risk were important subsidies for agricultural planning.

**Key words:** Water erosion. Geoprocessing. Land use. USLE.

## INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos naturais pelo homem foram e são de fundamental importância para o desenvolvimento e manutenção das sociedades, mas causam impactos que muitas vezes são difíceis de solucionar ou mesmo contornar. Neste sentido, a erosão acelerada dos solos causada pela ação do escoamento superficial das águas pluviais representa um importante impacto devido à magnitude dos prejuízos que causa, direta ou indiretamente ao meio ambiente (VEIGA FILHO, 1992).

Dentre os muitos fatores que influenciam os processos erosivos, tem-se a erodibilidade dos solos, a declividade e o uso da terra.

A erodibilidade é uma propriedade do solo resultante da interação entre as suas características físicas (textura, estrutura, permeabilidade e densidade), químicas, mineralógicas e biológicas de resistir aos processos de desprendimento de partículas geradas pelo processo erosivo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; CORRECHEL, 2003). Neste contexto, quando se avalia a textura dos solos, destacam-se os solos arenosos por possuírem baixa coesão devido à pequena proporção de partículas argilosas. Tais partículas argilosas, quando ocorrentes em maiores quantidades no solo, atuam como agentes ligantes entre as partículas maiores. Neste sentido, em um pequeno evento de enxurrada, tem-se maior arraste dos solos arenosos e maiores perdas da porção agricultável do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

O potencial erosivo também aumenta com o grau do declive e com a extensão da vertente, os quais geram, respectivamente, aumento da velocidade e do volume do escoamento superficial (MORGAN, 2005). Lang et al. (1984), avaliando a influência da declividade na erosão entre sulcos em um topossolo, verificaram que o potencial de erosão foi maior para a área com 9% de declive do que na área com 3% de declividade. Também Lattanzi et al. (1974), observando a erosão entre sulcos de um solo siltoso, verificaram que, quando a declividade da superfície do solo foi aumentada de 2% para 20%, a erosão entre sulcos mais que dobrou.

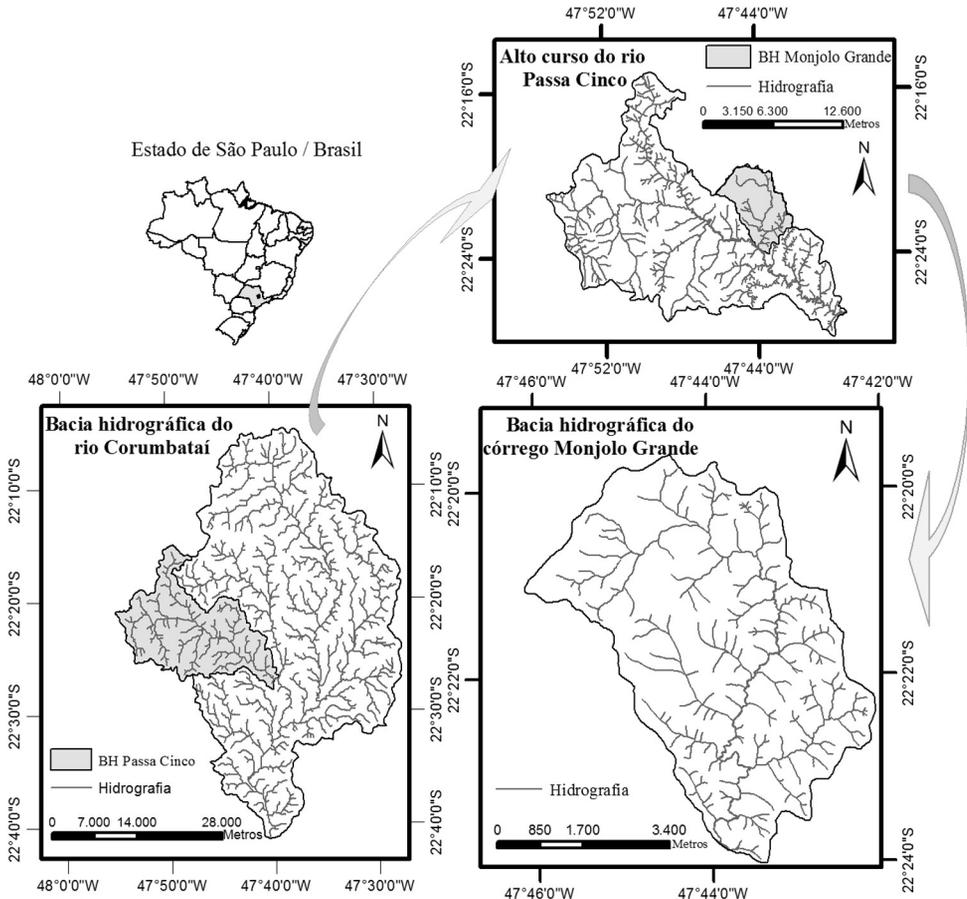
O uso e cobertura da terra possuem elevada importância no processo erosivo, na medida em que oferecem proteção natural contra os efeitos negativos que a erosão acarreta no terreno. A vegetação ajuda a reduzir o impacto das gotas da chuva na superfície, na medida em que faz com estas se dividam em várias gotículas, reduzindo com isso a força de impacto das mesmas sobre o solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010). Casetti (1991) salienta ainda que a cobertura vegetal tem papel frenador, dissipando a energia do material em deslocamento. É devido à presença de obstáculos existentes na superfície, oriundos da cobertura vegetal (porte arbóreo, gramíneas, matéria orgânica) que o fluxo difuso tem sua energia dissipada, havendo redução da capacidade de transporte, e minimizando a atuação dos processos erosivos. Quando da retirada de tal proteção através da implantação de cultivos agrícolas, tem-se o aumento do potencial erosivo e a consequente degradação dos solos e cursos d'água.

Desta maneira, para a proposição de um adequado planejamento ambiental, que deve ter como objetivo o desenvolvimento racional, deve-se atender aos princípios básicos da sustentabilidade ecológica, econômica, social e cultural (SACHS, 2000), pois o meio ambiente é produto de uma interação entre as esferas do meio físico, biológico e social (SANTOS, 2004). Neste sentido, um planejamento ambiental que contemple as ações conservacionistas para o meio agrícola é tido como imprescindível para a manutenção da produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, a sobrevivência humana e o desenvolvimento das nações.

Tendo em vista a predisposição aos riscos de erosão hídrica do solo verificada em áreas de declividade média a elevada, associados a solos arenosos e práticas de culturas anuais, o objetivo do presente artigo foi o de avaliar temporalmente a distribuição espacial das perdas de solo em uma bacia hidrográfica rural de pequeno porte considerando que na mesma verifica-se uma crescente expansão das culturas de cana-de-açúcar em áreas com predomínio de solo arenoso associadas a relevo ondulado/fortemente ondulado.

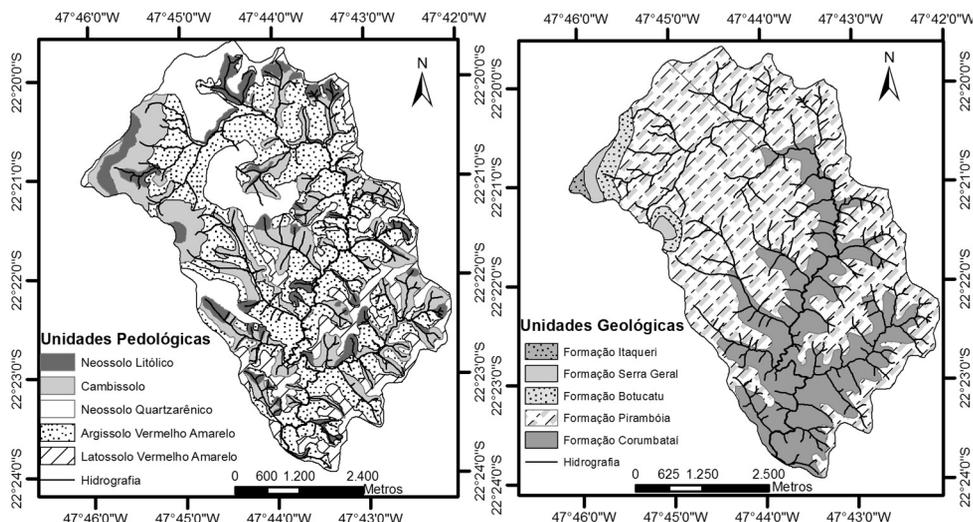
## **CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

Tendo em vista o objetivo de estudo, foi selecionada a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande na qual se encontra acelerada expansão da cultura de cana-de-açúcar. Tal bacia, a qual é tributária do rio Passa Cinco, sub-bacia do rio Corumbataí, no baixo curso do Rio Piracicaba (SP), se situa no município de Ipeúna, centro leste do Estado de São Paulo, compreendendo área aproximada de 2800 ha (28 km<sup>2</sup>) e perímetro de 25,5 Km, com localização entre as latitudes de 22° 18' e 22° 23' sul e longitudes 47° 48' e 47° 42' a oeste de Greenwich - fuso 23 (Figura 1).



**Figura 1 - Localização da área de estudo**

Considerando a distribuição das chuvas e as variações de temperatura ao longo do ano, a área da bacia é enquadrada no tipo climático Cwa, conforme a classificação zonal de Köppen, podendo ser associado ao clima subtropical, com inverno seco e verão chuvoso. No que tange à caracterização geológica, a microbacia é sustentada pelas Formações Itaqueri, Serra Geral, Botucatu, Pirambóia e Corumbataí, as quais correspondem a 0,37%, 0,83%, 2,55%, 68,55% e 27,71% de ocorrência, respectivamente (CEAPLA, 2012) (Figura 2b). Tendo em vista o predomínio da formação Pirambóia, a qual é composta basicamente por arenitos de granulação fina e média, tem-se a ampla ocorrência de solos de textura arenosa em toda a área da bacia. Neste sentido, tem-se que 44% da área de estudo é composta por Argissolo Vermelho Amarelo, distrófico, com texturas variando de arenosas a franco arenosas ocorrentes em relevos ondulados. Também em menor proporção tem-se Cambissolo, Latossolo Vermelho Amarelo, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Litólico ocorrentes em 24%, 12%, 12% e 8% respectivamente, apresentando textura predominantemente arenosa/franco arenosa (CORRÊA, 2011) (Figura 2a).



**Figuras 2a e 2b - Mapa pedológico e geológico da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

Quanto ao quadro geomorfológico, a área de estudo está inserida na transição entre a província geomorfológica denominada Depressão Periférica e as áreas de relevo de Cuestas arenito-basálticas, na zona do Médio Tietê, correspondendo a um relevo muito diversificado, dissecado e com estruturas resistentes em claros ressaltos topográficos. Apresenta relevo predominantemente formado por colinas, com altitudes variando de 550m a 600m. Devido à localização na zona de transição entre a Depressão Periférica e o relevo de cuestas arenito-basálticas, apresenta áreas de alta declividade, drenagem densa e entalhada, exibindo algumas formas de relevo residual como o Morro do Bizigueli e o Morro da Guarita, cujas feições são características das áreas de transição. Tais relevos residuais apresentam-se como pequenos maciços residuais de frente da cuesta arenito-basáltica, com altitudes alcançando a cota de 900 metros (ALMEIDA, 1964).

## METODOLOGIA

### *Elaboração da base cartográfica*

A obtenção da base cartográfica da área foi realizada por meio da digitalização das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), na escala de 1:10.000. Após a digitalização, as mesmas foram armazenadas com resolução de 300dpi em formato TIFF e georreferenciadas em ambiente SIG na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum Córrego Alegre, Fuso 23S, considerando o padrão de exatidão cartográfico A (BRASIL, 1984). Posteriormente foi realizada a vetorização das feições cartográficas, e gerado em ambiente SIG o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET) com grade celular de 3 metros, a partir das curvas de nível, pontos cotados e hidrografia. Como método de interpolação, foi utilizada a função topogrid do ArcGis 10, Topo To Raster.

### Obtenção dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS)

Os dados de erosividade (fator R) foram obtidos utilizando o índice de erosão proposto por Lombardi e Moldenhauer (1992), onde R é a somatória das médias mensais do índice de Erosão ( $EI_{30}$ ):

$$EI_{30} = 67,35 \left( \frac{r^2}{p} \right)^{0,85} \quad (1)$$

Onde:

EI = média mensal do índice de erosão (MJ.mm/ha.L);

r = precipitação média mensal (mm);

P = precipitação média anual (mm).

Devido à ausência de registradores de chuva localizados no interior da bacia e considerando a necessidade de um número mínimo de amostras para a realização da interpolação dos dados, foram selecionados 45 postos pluviométricos localizados nas cidades próximas à área de estudo. Os dados pluviométricos utilizados foram obtidos a partir do banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE/SP).

No conjunto dos dados disponíveis, verificou-se em alguns postos pluviométricos a ausência de dados em alguns meses e em determinados anos. Para a correção desses dados, foi aplicado o método de ponderação regional indicado em Tucci (2000). Com a eliminação das falhas de dados presentes nos postos selecionados, foi obtido, para cada posto, o valor da erosividade (R) por meio da equação 1. Utilizando o software Variowin 2.1.1, foi obtido o variograma experimental e, a partir do método de Krigagem Ordinária, foi gerado o modelo de continuidade espacial do fator erosividade.

O fator K foi obtido a partir do levantamento fotopedológico realizado por Corrêa (2010). A partir das unidades pedológicas mapeadas, foram associados os valores do fator K e tolerância de perdas de solo (T) com os dados disponíveis em Bertoni e Lombardi Neto (2010), Fiorio (1998) e Fujihara (2002).

Para a obtenção do fator L foi utilizado o algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996), o qual emprega o conceito de área de contribuição para o cálculo automático da extensão de vertente. Para tanto, tornou-se necessária a obtenção do cálculo da declividade, da direção de fluxo e a quantidade de fluxo acumulado a montante (SILVA, 2003).

Utilizando o MDET, foi obtido o mapa de Direção de Fluxo, sendo este composto por oito direções distintas: 1 (Leste), 2 (Sudeste), 4 (Sul), 8 (Sudoeste), 16 (Oeste), 32 (Noroeste), 64 (Norte) e 128 (Nordeste). Posteriormente, com base no mapa de Direção de Fluxo, foi obtido o Mapa de Fluxo Acumulado, o qual define o número de células a montante que contribuem para uma determinada célula a jusante. Esse mapa é um dos componentes do parâmetro de "Área de contribuição" ( $A_{i,j-in}$ ) utilizado para gerar o mapa de extensão de vertentes proposto por Desmet e Govers (1996).

Para a obtenção do parâmetro "Direção de Fluxo" ( $X_{i,j}$ ) tornou-se necessária a reclassificação do Mapa de Direção de Fluxo: os valores 1, 4, 16 e 64, representantes dos pontos cardeais - L, S, O, N -, reclassificados para o valor de 0,5; e os valores de 2, 8, 32, e 128, representantes dos pontos colaterais - SE, SO, NO e NE -, reclassificados para 0,354.

Também com base no MDET, foi obtido um mapa de declividade (em %) e este foi reclassificado conforme os valores para a obtenção do parâmetro m: 0,5 se  $s \geq 5\%$  (s é o grau de declividade); 0,4 se  $3\% \leq s < 5\%$ ; 0,3 se  $1\% \leq s < 3\%$ ; 0,2 se  $s < 1\%$ .

Com a definição dos parâmetros provenientes da declividade, da direção de fluxo e da área de contribuição representada pelo fluxo acumulado para cada célula, foi obtido o fator L da EUPS, através da equação 2:

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

Onde:

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

$A_{i,j-in}$  = área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j);

D: tamanho da grade de células (m);

$x_{i,j}$ : valor da direção do fluxo;

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

É válido ressaltar que, após a obtenção do fator L através da aplicação da equação 2, procedeu-se à exclusão das áreas de deposição que apresentavam valores superiores à hipotenusa da grade de células (células de 3 metros, sendo a hipotenusa de 4,2426406 metros). Para tais células, correspondentes a área de deposição, foi associado o valor de 0, tendo em vista que a EUPS estima somente a erosão na vertente e não a deposição nas áreas de fluxo acumulado de água.

Os dados de declividade foram obtidos com o apoio do Modelo Numérico do Terreno gerando o MDET. Com os dados de declividade (%) e juntamente com os dados do fator L, foi gerado o mapa de fator topográfico (ft), considerando a formulação apresentada por Bertoni e Lombardi Neto (2010):

$$ft = 0,00984 * L^{0,63} * S^{1,18} \quad (3)$$

Onde:

ft = fator topográfico (adimensional);

L = fator extensão de vertente (m);

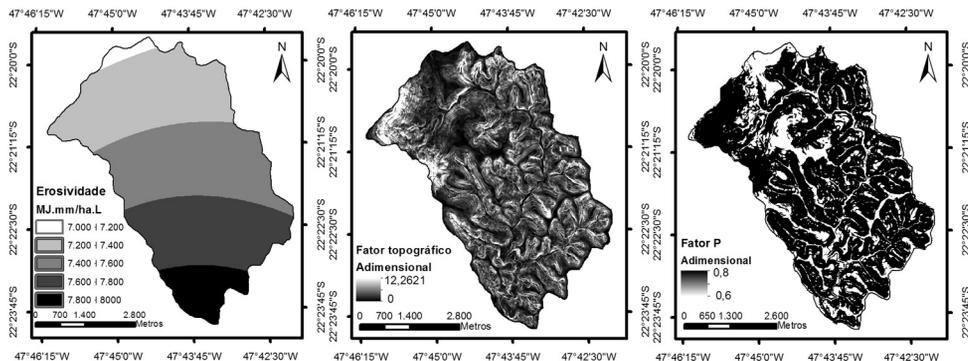
S = fator declividade (%).

Para a elaboração do mapa de uso/cobertura da terra, foram utilizadas fotografias aéreas e imagens de satélite, as quais foram processadas no SIG Spring 4.3. Para os cenários de 1988 e 2006 foram utilizadas fotografias aéreas, sendo que no cenário de 1988 as mesmas eram em papel fotográfico na escala de 1: 40.000, no formato 230mm x 230mm, recobrimento longitudinal e lateral de 60 e 30%, e no cenário de 2006 em formato digital. Já no cenário de 2013 foi utilizada imagem do satélite Ikonos II de 01/08/2013.

Para ambos os cenários, primeiramente foram definidas as classes temáticas. Posteriormente, foi realizada a segmentação das imagens por meio do método denominado crescimento por regiões. Após a segmentação, procedeu-se à classificação temática, utilizando o método de classificação não supervisionada, com o classificador Iseog, e adotando o limiar de aceitação de 99%. Em seguida, foi realizada a edição matricial visando à correção de algumas áreas que foram erroneamente classificadas. Posteriormente, foi realizada a transformação dos dados matriciais para dados vetoriais (IBGE, 2013), sendo associada a cada classe temática de uso/cobertura da terra os valores do fator C presentes em Donzelli et al. (1992).

Considerando os elevados valores de declividade da área de estudo, o fator P foi obtido com base na declividade, a qual é tida como fator limitante. Para áreas com

declividade até 12%, foi associado o valor P igual a 0,6, e nas áreas com declividades superiores a 12% foi adotado o valor de 0,8 (Figura 3c) (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).



**Figuras 3a, 3b e 3c - Mapas do fator erosividade, fator topográfico e fator prática conservacionista da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

### Integração dos dados

O Potencial Natural de Erosão (PNE) foi gerado no contexto da EUPS utilizando-se apenas os fatores que representam os parâmetros do meio físico (fatores R, K, L e S), os quais correspondem às estimativas de perda de terras em áreas destituídas de cobertura vegetal e sem qualquer intervenção antrópica. Os diferentes planos de informação (PIs) referentes aos parâmetros do meio físico foram combinados em ambiente SIG (DONZELLI, et al., 1992):

$$PNE = R.K.ft \quad (4)$$

Onde:

PNE = potencial natural de erosão ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ );

R = fator erosividade da chuva ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ );

K = fator erodibilidade do solo ( $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );

ft = fator topográfico (adimensional);

Os dados de PNE foram transformados em classes qualitativas, ordenadas em seis categorias, adaptadas de Bertoni e Lombardi Neto (1999), Scopel, (1988) e Nascimento (1998), sendo: muito baixo (0 - 50  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ); baixo (50 - 100  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ); médio (100-200  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ); alto (200 - 600  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ); muito alto (600 - 1000  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e extremamente alto (> 1000  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

Donzelli et al (1992) utilizaram o índice *risco de erosão* ou *capacidade de uso-manejo permissível* ( $CP_{\text{permissível}}$ ) para determinar as classes de uso-manejo permissível, relacionando os valores do PNE e fator P com os valores de tolerância de perda de cada solo (T) presentes em Bertoni e Lombardi Neto (2010):

$$CP_{\text{permissível}} = \frac{T}{PNE \times P} \quad (5)$$

Buscando-se estimar qualitativamente as áreas com ocorrência de processos erosivos derivados dos diversos usos da terra, obteve-se os valores de expectativa de erosão (ee) conforme Donzelli et al. (1992). Tais valores, os quais indicam a ocorrência de erosão que se espera em um dado local, são obtidos pela diferença entre a estimativa dos valores da condição atual de uso e manejo e práticas conservacionistas ( $CP_{\text{atual}}$ ) e o índice de perdas de solo máximo admissível ( $CP_{\text{permissível}}$ ):

$$ee = CP_{\text{atual}} - CP_{\text{permissível}} \quad (6)$$

Os valores resultantes de expectativa de erosão foram reclassificados conforme Donzelli, et al. (1992) (Tabela 1). É válido ressaltar que os valores negativos são classificados como ausentes, demonstrando que o uso atual não provocaria perdas potenciais acima do tolerável.

**Tabela 1 - Classes de expectativa de erosão**

Classe de expectativa de erosão	Classes ee
Ausente	< 0
Baixa	0   0,05
Média	0,05   0,5
Alta	> 0,5

Por último, tendo como objetivo prever a quantidade de material erodido tendo em vista os usos dos cenários avaliados, foi calculado o risco de erosão simulado (es) proposto por Cavalieri (1998), o qual é tido como sendo a relação existente entre as perdas de solo atual ( $A$ )<sup>3</sup> e as perdas toleráveis de cada classe de solo (T):

$$es = \frac{A}{T} \quad (7)$$

Posteriormente os valores resultantes foram reclassificados conforme proposto por Cavalieri (1998), sendo as classes apresentadas na tabela 2:

**Tabela 2 - Classes de risco de erosão simulado**

Classe de risco de erosão simulado	valores de es
Perda de solo tolerável	0   1
Perda de 1 a 2 vezes acima do limite tolerável	1   2
Perda de 2 a 5 vezes acima do limite tolerável	2   5
Perda de 5 a 10 vezes acima do limite tolerável	5   10
Perda maior que 10 vezes acima do limite tolerável	> 10

<sup>3</sup>  $A = R.K.L.S.C.P$  onde: A é a perda de solo por ano ( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ); R - fator erosividade ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ); K - fator erodibilidade ( $\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); L e S - fator extensão de vertente (m) e grau de declive (%); C - fator cobertura vegetal (adimensional); P - fator práticas manejo/conservacionistas (adimensional).

## ANÁLISE DO RESULTADOS

### *Análise dos fatores da EUPS*

A área de estudo apresenta isovalores de erosividade variando de 7000 a 8000 MJ.Mm/ha.h.ano, sendo que os maiores valores estão localizados no baixo curso do Ribeirão Monjolo Grande. O potencial erosivo possui maior intensidade na estação chuvosa, onde entre os meses de novembro a março verifica-se a ocorrência de 83% do total anual do potencial erosivo ocasionado pelas chuvas (Figura 3a). É nos meses de novembro e dezembro, quando se verificam elevados valores de erosividade e consequentemente maior potencial erosivo, que se observa a ocorrência de áreas de solos expostos decorrentes do final do período de safra/entressafra da cana-de-açúcar. Tais áreas, estando menos protegidas pela vegetação, tornam-se mais vulneráveis ao processo erosivo.

O grau de declividade, assim como a extensão da vertente, constituem os fatores que determinam a velocidade do escoamento superficial, caracterizando assim o potencial de carregamento pela erosão em termos de tamanho e quantidade de material. Os valores obtidos para o fator topográfico variam de 0 a 12,2621 (valores adimensionais), demonstrando que nas áreas com convergência de fluxo e de elevada declividade tem-se valores do fator topográfico elevados, e nas áreas de interflúvios com baixa declividade, verificam-se valores baixos. Neste sentido, as áreas com maior susceptibilidade aos processos erosivos decorrentes das características topográficas, devem ser ocupadas com culturas que possibilitem maior proteção ao solo.

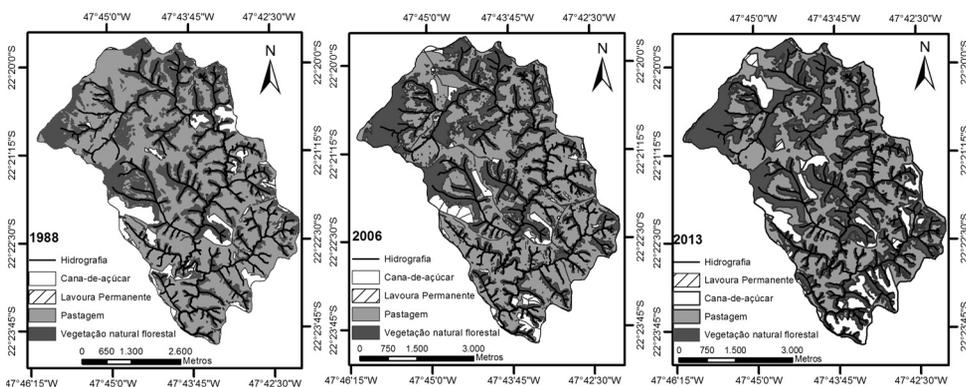
Quanto ao fator erodibilidade, verifica-se que os solos mais susceptíveis (Neossolos Litólicos e Cambissolos), os quais totalizam 32,5% de ocorrência, estão localizados em áreas de maior declividade (acima de 30%) e nas áreas da formação Itaqueri e Serra Geral. Da mesma maneira, solos como o Argissolo Vermelho Amarelo, o qual ocorre em 43,5% da área de estudo, são encontrados predominantemente nas médias e baixas vertentes com classes de declividade variando de 6 a 30%. Também foram identificados solos como Latossolo Vermelho Amarelo em 12,35% da área de estudo, os quais ocorrem em áreas de menor declividade correspondentes aos divisores de água. Por último foi identificada a classe de Neossolo Quartzarênico, ocorrente em áreas de menor declividade (<20%) e vertentes longas onde há a ocorrência da formação Pirambóia (Figura 2a).

### *Análise temporal da dinâmica do uso da terra*

No cenário de 1988 têm-se as áreas de pastagem ocupando um total de 63,9% da área da bacia, e demais usos, como as áreas de cana-de-açúcar, perfazendo um total de 5,81% (Tabela 3). Analisando a Figura 4a, tem-se que muitas Áreas de Proteção Permanente (APP), localizadas no entorno dos cursos d'água, apresentavam ausência total de mata ciliar e ocupação por pastagens e cultivo da cana-de-açúcar.

**Tabela 3 - Uso/cobertura da terra da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

Uso	1988		2006		2013	
	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)
Cana-de-açúcar	5,81	167,64	5,53	159,65	9,66	278,75
Vegetação natural Florestal	30,26	873,62	36,06	1041,13	40,67	1174,18
Pastagem	63,90	1844,76	58,12	1678,05	48,54	1401,47
Lavoura permanente	0,03	0,98	0,28	8,18	0	0
Silvicultura	0	0	0	0	1,13	32,59
Total	100,00	2887,00	100,00	2887,00	100,00	2887,00



**Figuras 4a, 4b e 4c - Mapas de uso/cobertura da terra dos cenários de 1988, 2006 e 2013 da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

O mapeamento das classes de uso da terra para o cenário de 2006 apresentou 58,12% da área de estudo ocupada por pastagens (Figura 4b). As demais formas de uso, como culturas relacionadas ao plantio de cana-de-açúcar, ocupavam 5,53% da área de estudo. Quando da comparação com o cenário anterior, de 1988, nota-se um aumento considerável nas áreas de mata ciliar, as quais apresentaram um crescimento de aproximadamente 20%. Da mesma maneira, nota-se um decréscimo das áreas de pastagem em virtude das áreas de mata ciliar e culturas permanentes.

Por fim, no cenário de 2013, nota-se uma expansão das áreas de cana-de-açúcar nos setores sul/sudeste da bacia. Quando da comparação com o cenário anterior, nota-se um aumento de aproximadamente 75% da área cultivada. Também, as áreas de vegetação natural florestal tiveram um aumento de 12% quando comparada ao cenário de 2006 e de 34% quando comparadas ao cenário de 1988. Tais dados demonstram um aumento de 300,56 ha ocupados com vegetação florestal em APPs. Assim como no cenário de 2006, em 2013 também foi possível observar um decréscimo das áreas com pastagens, as quais apresentaram ocorrência em 48,54% da área de estudo (decréscimo de 20% quando comparada ao cenário anterior). Tal decréscimo se deve à expansão da cultura de cana-de-açúcar, das APPs e de silvicultura.

*Potencial Natural de Erosão (PNE), Uso/Manejo Permissível da terra (UMP) e Risco de erosão simulado*

Na tabela 4 constata-se o predomínio das classes de PNE muito baixo, baixo e médio em toda a área de estudo. Tais classes predominam em 35,16%, 24,76% e 24,34% da área da bacia hidrográfica, correspondendo a um total de 84,26% de ocorrência. Em menor ocorrência têm-se as classes denominadas como alto (200-600 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), muito alto (600-1000 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e extremamente alto (>1000 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) as quais correspondem, respectivamente a 14,30%, 1,24% e 0,19% do total da área de estudo. As classes de PNE com risco médio a extremamente alto de erosão (total de 40% de ocorrência) estão localizadas em relevos ondulados a fortemente ondulados, onde os valores de declividade são superiores a 8% e há a ocorrência de solos mais vulneráveis aos processos de erosão hídrica do solo, como Argissolos Vermelho Amarelos, Cambissolos e Neossolos Litólicos.

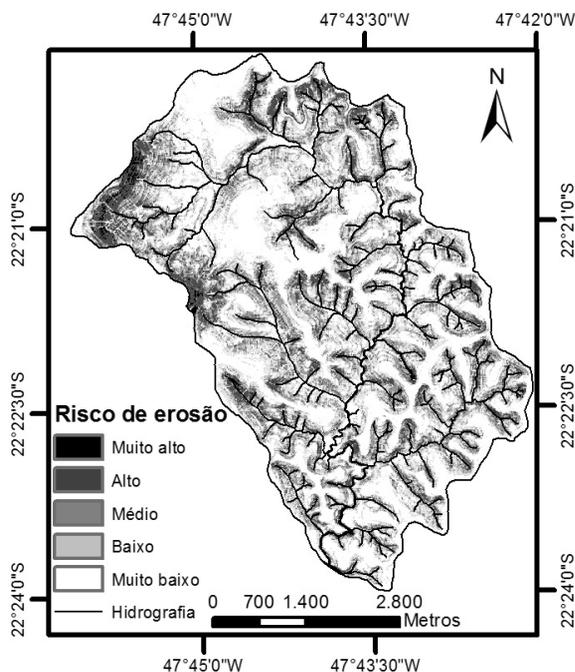
**Tabela 4 - Classes do potencial natural de erosão para a bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

	PNE (t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Área total (%)
Muito baixo	0 - 50	35,16
Baixo	50 - 100	24,76
Médio	100 - 200	24,34
Alto	200 - 600	14,30
Muito alto	600 - 1000	1,24
Extremamente alto	> 1000	0,19

O UMP é constituído pelos valores máximos do fator C, os quais correspondem ao limite de perdas toleráveis de cada área. Assim, 50,42% da área de estudo foi classificada com risco de erosão muito baixo, denotando que nessas áreas a indicação geral de uso/ manejo são as culturas anuais e culturas perenes, sendo necessário, devido aos valores de declividade e características de erodibilidade dos solos, a prática de medidas conservacionistas visando o controle da erosão e/ou aumento da fertilidade (Figura 5). Quando se avaliam os usos da terra presentes nos cenários, tem-se a ocorrência de pastagens e de cana-de-açúcar em locais com risco muito baixo de erosão, demonstrando assim a subutilização agrícola de dessas áreas. Quanto às classes de risco de erosão baixa e médio, estas correspondem a 16,88% e 21,81% respectivamente (somando 38,69% da área de estudo), conforme os dados da tabela 5.

**Tabela 5 - Classes de uso e manejo permissível (UMP) e grupos de risco de erosão da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

Classes de UMP	Grau de risco de erosão	Indicação Geral de uso e manejo	Área (%)
Não especificado		Limitações por deficiência de drenagem	3,31
< 0,010	Muito alto	Silvicultura/manutenção da cobertura vegetal	2,29
0,010 - 0,017	Alto	Silvicultura	5,28
0,017 - 0,048	Médio	Pastagem com manejo	21,81
0,048 - 0,088	Baixo	Pastagem sem manejo/culturas perenes e semiperenes	16,88
> 0,088	Muito baixo	Cultura Anual com práticas intensivas de conservação	50,42



**Figura 5 - Mapa dos grupos de risco de erosão da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande**

A classe de risco de erosão baixa é constituída por áreas declivosas (até o limite de mecanização) com solos de média/alta erodibilidade. Nesta classe, as culturas anuais podem ser implementadas desde que haja rotação com pastagens e que sejam aradas a cada quatro/cinco anos. Tais áreas também são indicadas para culturas perenes, desde que realizadas com intensa aplicação de práticas conservacionistas em função da declividade e/ou da melhoria da fertilidade natural. Já a classe de risco de erosão médio constitui áreas com problemas de declive muito acentuado e solos com elevado potencial de erodibilidade. Estas são áreas impróprias para a

implementação de culturas anuais, sendo indicadas somente para pastagens com restrições moderadas de uso e práticas conservacionistas simples.

Quando se avaliam os usos da terra nos cenários avaliados em relação às classes de risco baixo e médio, tem-se ampla ocorrência de pastagens sem manejo e áreas de pastagem de cana-de-açúcar. Nas áreas de pastagem é possível a visualização, por meio do documento cartográfico (para os cenários de 1988 e 2006), e por meio de trabalhos de campo realizados nos anos de 2012 e 2013, da ampla ocorrência de feições erosivas lineares, como as ravinas, as quais se relacionam, em alguns pontos, com a baixa proteção do solo pelas pastagens (Figura 6a). Da mesma maneira, na classe de risco médio é possível também visualizar a ocorrência de áreas de cana-de-açúcar e em alguns pontos a formação de ravinas, demonstrando assim a inadequação do uso agrícola (Figura 6b).



**Figuras 6a e 6b - Feições erosivas lineares em áreas de pastagens e cana-de-açúcar**

Por último, as classes denominadas de risco de erosão alto e muito alto apresentam, como indicação de uso, as práticas de silvicultura e a manutenção da cobertura vegetal natural, sendo estas ocorrentes em 5,6% da área de estudo. Quanto às classes de uso da terra com risco de erosão alto e muito alto, a área de estudo apresentou vegetação natural florestal em todos os cenários.

O risco de erosão simulado é a relação existente entre a perda de solo do cenário avaliado e a tolerância de perda de solo, sendo uma função das características de cada classe de solo. Também a expectativa de erosão é um índice que apresenta o grau de erosão esperada em razão do uso, manejo e práticas conservacionistas aplicadas. Em todos os cenários avaliados, tem-se que mais de 90% da área apresentou ausência de expectativa de erosão, sendo as perdas de solo classificadas como

toleráveis, ou seja, não ultrapassam os limites toleráveis de perdas de cada classe de solo. Neste contexto, as classes de uso pastagem e vegetação densa florestal em APPs, as quais em todos os cenários avaliados correspondem a aproximadamente 90% de ocorrência, são responsáveis pelos baixos valores de expectativa de erosão e de risco de erosão tolerável, indicando assim a adequação e até a subutilização de tais áreas agrícolas. No entanto, quando se avaliam as áreas com cultivo de cana-de-açúcar, tem-se que parte destas áreas, aproximadamente 3,2%, 2,19% e 3,91%, referente aos cenários de 1988, 2006 e 2013, respectivamente, apresentaram perdas simuladas variando de 2 a 5 vezes o limite tolerável de perdas de solo.

Desta maneira, grande atenção deve ser dada à expansão das áreas com cultivo de cana-de-açúcar que vem ocorrendo na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande, tendo em vista que os riscos de erosão simulados são tidos como um confiável indicador da maior atenção a ser dada a determinadas áreas agrícolas no que tange à elaboração e execução de programas de conservação do solo. Neste sentido, tal expansão deve ocorrer nas áreas de menor declividade, coincidentes com as áreas classificadas com risco de erosão muito baixo (conforme Figura 5) com a devida aplicação de práticas conservacionistas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores do fator R (erosividade) se mostraram mais elevados no norte da área de estudo, sendo que 84% do total anual do potencial erosivo se concentram nos meses de novembro a março. A aplicação do método proposto por Desmet e Govers (1996) para a obtenção do fator L (extensão de vertente) apresentou bons resultados na área de estudo, sendo possível identificar tanto as áreas de interflúvios como as áreas de concentração de água. Consequentemente, a modelagem do fator topográfico mostrou, de forma consistente, as condições de variação de declividade e convergência/divergência de fluxo nas vertentes, permitindo que a modelagem de erosão hídrica seja também aplicada em bacias hidrográficas de relevo mais complexo.

A utilização das fotografias aéreas e imagens orbitais, assim como dos aplicativos presentes nos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), como a segmentação e a classificação não supervisionada, revelaram-se como opções importantes na classificação e mapeamento do uso da terra. Como resultado destas classificações tem-se, como usos predominantes em todos os cenários, pastagens e mata densa florestada. No entanto, foi possível observar a expansão da cultura de cana-de-açúcar na porção sul/sudeste da área de estudo, a qual, considerando as características físicas da bacia, acarreta perdas de solo acima do limite tolerável. Desta maneira, grande importância deve ser dada na implantação de um planejamento agrícola adequado visando à implantação de culturas que proporcionem maior proteção do solo contra a desagregação pelas chuvas e transporte de partículas pelo escoamento superficial nas vertentes.

Como um dos produtos a serem utilizados como documentos na elaboração de um planejamento agrícola, o mapa de potencial natural à erosão e o mapa de risco de erosão, conjuntamente, possibilitam indicar os melhores usos da terra a serem implantados, considerando para isso a devida conservação dos solos e da água. Por outro lado, os dados de expectativa de erosão, assim como de risco de erosão simulado, constituem importantes ferramentas de identificação das áreas agrícolas que necessitam de ações imediatas na implantação de outros cultivos e na adoção de práticas conservacionistas vegetativas, edáficas e mecânicas.

Por fim, a documentação cartográfica, as fotografias aéreas e imagens de satélite, a aplicação do modelo EUPS, e a integração dos dados em ambiente SIG foram essenciais para a modelagem da erosão hídrica do solo na área de estudo.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas e pelo apoio financeiro por meio do projeto "Avaliação da erosão hídrica, transporte de sedimentos e qualidade de água na bacia do Ribeirão Monjolo Grande (Ipeúna-SP)" e pelo apoio da Prefeitura Municipal de Ipeúna, juntamente com a Coordenadoria de Assistência Técnica Integral - CATI, pelo suporte às atividades de campo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, n. 41, p. 169-263, 1964.

CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. CEAPLA. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/atlas/>>. Acesso em 25/06/2012.

BERTONI, José.; LOMBARDI NETO, Francisco. **Conservação do solo**. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355p.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991

CAVALIERI, A. **Estimativa da adequação de uso das terras na quadrícula de Moji Mirim (SP) utilizando diferentes métodos**. 1998. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Editora Blücher, 1999. 236p.

CORRÊA, Edvania Aparecida. **Caracterização da cobertura vegetal na Equação Universal de Perda de Solos (fator C) por meio de geotecnologias**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

CORRECHEL, V. **Avaliação de Índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do <sup>137</sup>C**. 2003. 79f. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2003.

DESMET, P. J. J.; G. GOVERS. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51 n. 5, p. 427-433, 1996.

DONZELLI, P.L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S.A.F.; NOGUEIRA, F.P.; ROTTA, C.L.; LOMBARDI NETO, F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para o planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. **Documentos IAC**, v. 29, p.91-119,1992.

FIORIO, P.R. **Cronologia do uso da terra e seu impacto no ambiente da Microbacia hidrográfica do Córrego do Ceveiro da Região de Piracicaba, SP.** 1998.114 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FUJIHARA, A. K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista** com suporte de Geoprocessamento. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, Piracicaba, 2002.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984.** Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em 8 jan. 2012.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra.** 3. ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

LANG, R.D.; MCCAFFREY, L.A.H. 1984. Ground cover: its effects on soil loss from grazed runoff plots, Gunnedah. *Journal of the Soil Conservation Service NSW* 40: 56-61

LATTANZI, A.R.; MEYER, L.D.; BAUMGARDNER, M.F. Influences of mulchrate and slope steepness on interrill erosion. *Soil Science. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.38, p.946-950, 1974.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da Chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, v. 51, n.2, p189-196, 1992.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation.** 3º ed. Inglaterra: Blackwell Publishing. p.304. 2005.

NASCIMENTO, M. A. **Bacia do rio João Leite:** influência das condições ambientais naturais e antrópicas na perda de terra por erosão laminar. 1998. 176 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

SACHS, I. **Gestão negociada e contratual da biodiversidade.** Brasília: MMA, 2000.

SANTOS, R.F. **Planejamento Ambiental:** teoria e prática. São Paulo: Of. de Textos, 2004.

SCOPEL, Iraci. **Avaliação da Erosão com Auxílio de Sensoriamento Remoto e da Equação Universal de Perdas de Solo a Nordeste de Cornélio Procópio (PR).** 1988. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Curitiba, 1988.

SILVA, Valtercides Cavalcante da. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS, na bacia do rio Paracatu. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 33, n. 1, p.29-34, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade/Edusp/ABRH, 2000. 943p.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de Bacias Hidrográficas. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. **Solos Altamente Suscetíveis à Erosão.** Jaboticabal: Faculdade Ciências Agrárias e Veterinárias/UNESP - Jaboticabal e Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1994. p. 223-242.

VEIGA FILHO, A. A.; SOUZA, M. V. M.; MARTIN B, N. B.; YANAGUISH, C. T.; MATSUNAGA, M. Análise de investimentos em adoção de tecnologias e conservação do solo no estado de São Paulo. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 39, n.1, p.133-154, 1992.

Recebido em fevereiro de 2014

Revisado em setembro de 2014

Aceito em outubro de 2014