

Estimativa da taxa de perda de solo por erosão hídrica na Mesorregião de Ribeirão Preto

Grasiela de Oliveira Rodrigues¹

Angelica Giarolla¹

Gilvan Sampaio¹

Karinne Reis Deusdará Leal¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST

Caixa Postal 505 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

{grasiela.rodrigues, angelica.giarolla, gilvan.sampaio, karinne.leal}@inpe.br

Abstract. The goal of this paper is to determine the soil loss for Mesoregion of Ribeirão Preto using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The study area is located in the Northeastern region of the State of São Paulo and presents an area of about 2,758,817 hectares highly exploited. The method used climate, pedological, geomorphological data with high spatial resolution (30 meters) and land use cover map (1:50.000) for the calculation of the factors that are directly linked to the soil loss by water erosion. The results showed that intense erosive processes (beyond the limits of tolerance) characterize the study area where about 40% of the area has estimated the rate of loss of soil is more than 10 t ha⁻¹ year⁻¹. In those areas where the soil loss process is intense, the predominant land uses are those associated with agricultural exploration as the cultivation of cane sugar.

Palavras-chave: EUPS, soil loss, soil conservation, soil exploration

1. Introdução

O Estado de São Paulo é responsável por 32,6% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (IBGE, 2013) e apresenta destaque em diversos ramos econômicos, dentre eles, na prática agrícola, com a produção de cana-de-açúcar, laranja, milho, soja e café. A renda gerada por este setor correspondeu, em 2013, a 12,17% do PIB do estado (CEPEA, 2013).

A mesorregião de Ribeirão Preto representa para o estado um grande polo do agronegócio: detém o posto de maior produtora de cana-de-açúcar do estado de São Paulo e do Brasil e a quarta maior produção mundial. A região é também a terceira maior produtora de café do estado de São Paulo, décima quarta produtora de café do Brasil e décima nona produtora mundial. Destaca-se ainda na produção de laranja com a quinta maior produção no Brasil e a décima no mundo.

Considerando as abordagens da Conservação do Solo, inserida na Ciência do Solo, a exploração da terra por atividades agrícolas sem compromissos com o manejo e a conservação do solo acarreta vários prejuízos decorrentes do desprendimento acentuado das partículas do solo, processo denominado como erosão. Assim, neste contexto, surge o conceito de tolerância de perda de solo (T) que é “... a taxa máxima anual de erosão do solo que pode ocorrer e ainda permitir um alto nível de produtividade das culturas, a ser obtido econômica e indefinidamente” (Wischmeier e Smith, 1978). Trata-se de um critério qualitativo, estático, definido por tipo de solo, cujo valor médio para a maioria dos solos gira em torno de 12 t ha⁻¹ ano⁻¹. Lombardi Neto e Bertoni (1975) estudaram 75 perfis de solo do Estado de São Paulo e estimaram valores de tolerância média de perdas de solo que variaram de 4,5 a 13,4 t ha⁻¹ ano⁻¹ e de 9,6 a 15,0 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, para solos com horizontes B textural e com B latossólico. Entretanto, costuma-se utilizar comumente o valor de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ como limite para as perdas de solo na região paulista.

O Estado de São Paulo perde anualmente e 130 milhões de toneladas de terra, volume que representa cerca de 25% da perda de solo total sofrida pelo Brasil (Bertoni e Lombardi Neto, 2012), o que ocasiona diversos prejuízos econômicos e ambientais (Manzatto et. al, 2002;

Telles, 2010). Estima-se, inclusive, que 80% da área cultivada do estado esteja sofrendo processos erosivos além dos limites de tolerância (CDA, 2014).

Neste enfoque, diversos modelos foram desenvolvidos para se quantificar as perdas de solo por erosão e a maioria emprega informações que inviabilizam a aplicação, tanto relacionadas a dificuldade na obtenção quanto a quantidade. A Equação Universal da Perda de solo (EUPS) é um modelo empírico amplamente utilizado que considera dados climáticos, pedológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação da terra que resultam na estimativa da perda de solo por erosão hídrica para uma dada região.

Portanto, o objetivo deste trabalho é determinar a perda de solo para a mesorregião de Ribeirão Preto e avaliar sua exploração baseando-se no conceito de tolerância de perda de solo.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

A metodologia foi aplicada para a Mesorregião de Ribeirão Preto, divisão estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A região é composta por 66 municípios e possui área de 2,77 milhões de hectares, como mostra a Figura 1. A área é um grande polo econômico principalmente por apresentar fatores geomorfológicos (áreas planas) e climáticos (verão úmido e inverno seco) favoráveis para o cultivo de diversas culturas, além de se localizar perto de mercados facilitando o escoamento da produção agrícola.

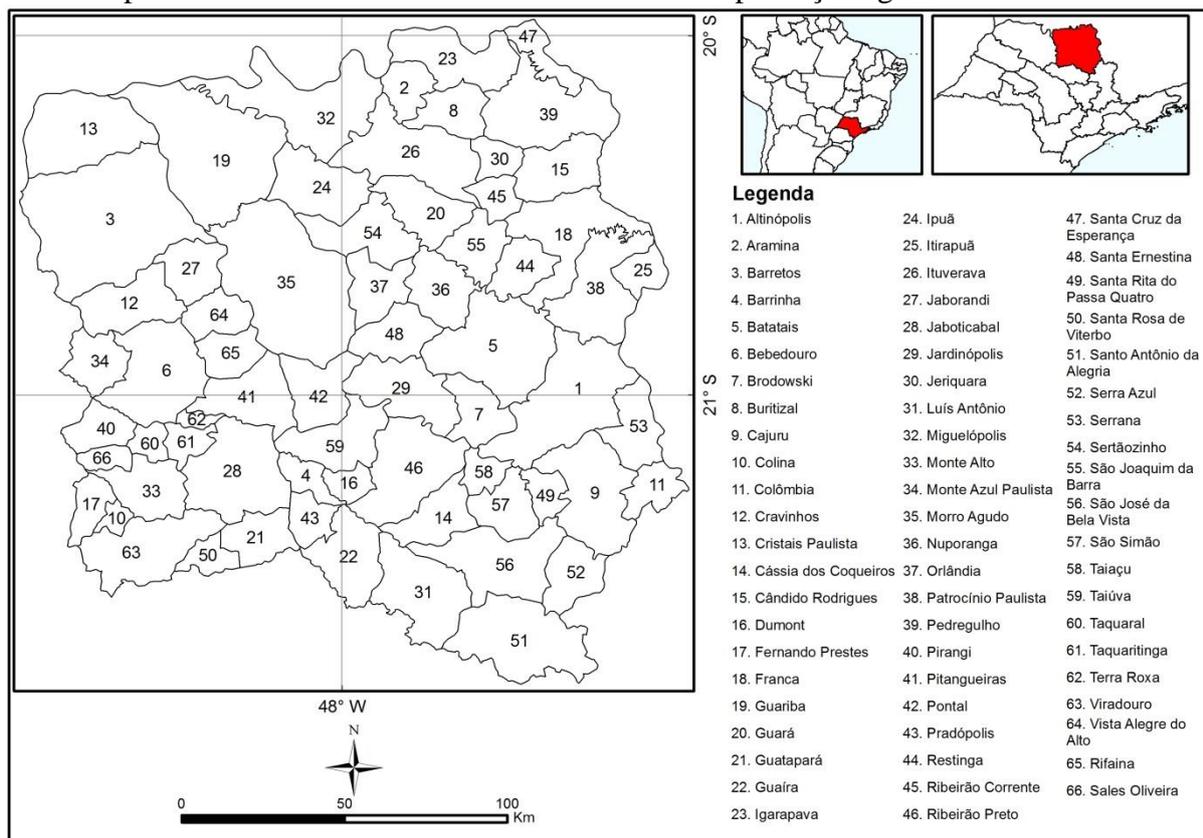


Figura 1. Localização da área de estudo

2.2 Materiais e método

Nesta pesquisa utilizou-se o *software* ArcGIS versão 10.1 (ESRI, 2014). O banco de dados foi composto pelas seguintes informações do estado de São Paulo: 1) Mapa Pedológico vetorial (Oliveira et al., 1999) em escala 1:100.000 apresentado na Figura 2a; 2) dados observados de precipitação do Centro Integrado de Informações Meteorológicas do Instituto

Agrônomo e da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (CIIAGRO-IAC/APTA) para o período de 1991 a 2014 (mm), manipulados no *software* Microsoft Excel 2010; 3) Modelo Digital de Terrenos (DEM, do inglês *Digital Elevation Model*) do Projeto Topodata (Valeriano, 2008) com resolução espacial de 30 m, mostrado na Figura 2b; 4) mapa vetorial do uso e cobertura do solo da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo na escala de 1:50.000 (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2013), mostrado na Figura 2c.

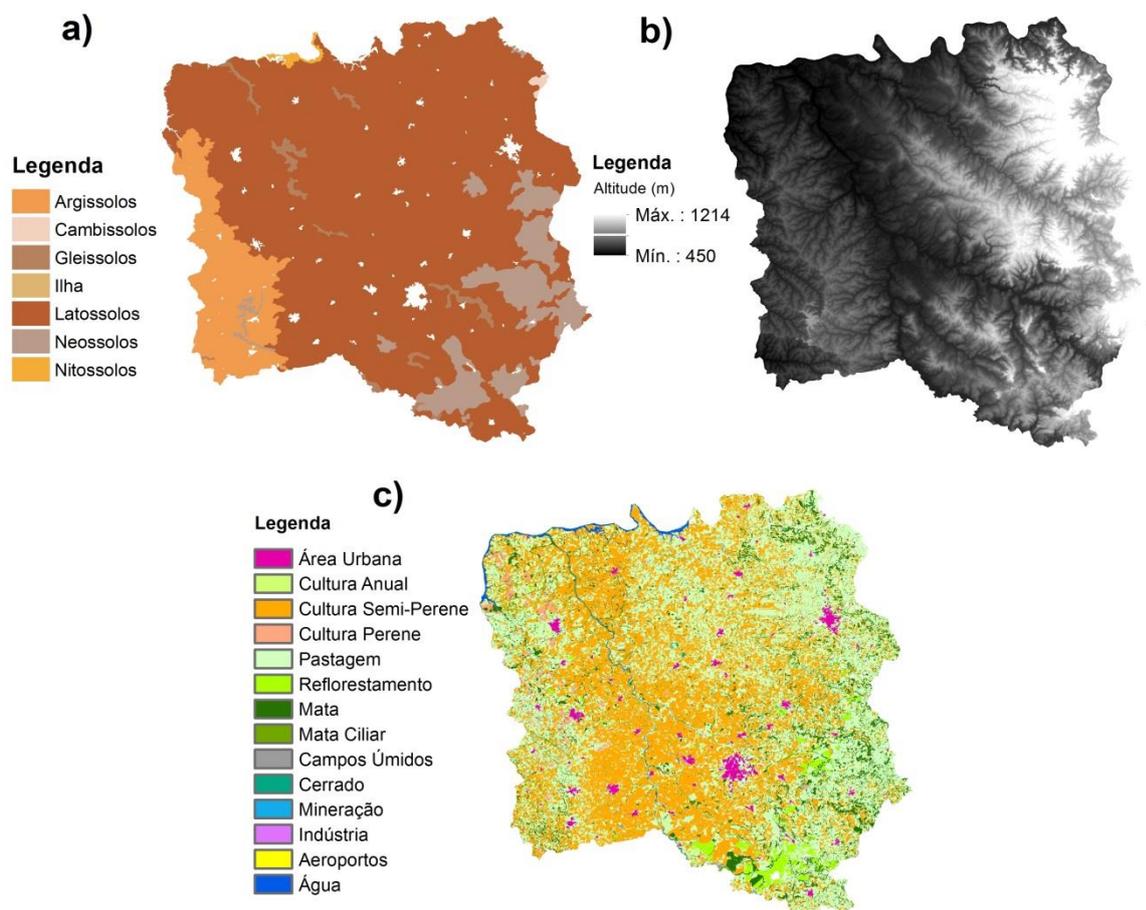


Figura 2. a) Mapa Pedológico, Oliveira et al. (1999); b) Mapa do Uso do Solo do Estado de São Paulo de 2005 com escala de 1:100.000, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, (2013); c) DEM: Projeto Topodata, Valeriano (2008)

A Equação Universal da Perda de Solo (EUPS) (Wischmeier & Smith, 1965) considera parâmetros do clima, geomorfologia, pedologia e de uso e ocupação do solo, conforme a Equação 1.

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

sendo:

A - perda de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

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

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

L - fator comprimento de rampa (adimensional)

S - fator declividade (adimensional)

C - fator uso e manejo (adimensional)

P - fator práticas conservacionistas (adimensional)

Fator R – Erosividade da Chuva

O fator erosividade (ou fator R) expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção, definido conforme a Equação 2 (Lombardi Neto e Moudenhauer, 1992). As médias mensal e anual foram calculadas a partir dos dados observados de precipitação do CIIAGRO (IAC/APTA) no período de 1991 até o presente.

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

sendo:

r - precipitação média mensal (mm)

P - precipitação média anual (mm)

Fator K – Erodibilidade dos solos

A erodibilidade dos solos (ou fator K) é a propriedade intrínseca do solo que representa a relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva (Denardin, 1990; Mannigel et al., 2002). Silva e Alvares (2005) compilaram os resultados de Denardin (1990) e Mannigel et al. (2002) e determinaram o fator K para cada tipo de solo presente no Estado de São Paulo, os quais foram utilizados neste trabalho.

Fatores geomorfológicos: L – Comprimento de rampa; S – Declividade

Os fatores L e S foram obtidos a partir do DEM do Projeto Topodata (Valeriano, 2008). Os principais métodos para a determinação desses fatores relacionados a geomorfologia são os propostos por Wischmeier and Smith (1978), Moore and Burch (1986), McCool et al. (1987), Moore and Wilson (1992) e Desmet and Govers (1996).

Neste trabalho o cálculo do fator L foi feito através do algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996) que emprega o conceito de área acumulada e direções de fluxo (ver Moore et al., 1991) como mostra a Eq. 3.

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

onde:

$L_{i,j}$ - comprimento da 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 da célula (m)

$x_{i,j}$ - valor da direção do fluxo e

m - coeficiente determinado de acordo com a declividade (θ) que assume os valores 0,5 se $\theta \geq 5\%$; 0,4 se $3\% \leq \theta \leq 5\%$; 0,3 se $1\% \leq \theta \leq 3\%$ e 0,2 se $\theta > 1\%$.

O Fator S foi determinado a partir das Eqs. 4 e 5 propostas por McCool et al. (1987) conforme limiar de declividade (θ) de 9%.

$$S = 10,8 * \text{sen}(\theta) + 0,03 \text{ se } \theta < 9\% \quad (4)$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\theta) - 0,5 \text{ se } \theta \geq 9\% \quad (5)$$

Fator C – Uso e Manejo do Solo

O fator C foi determinado associando-se para categorias mapeadas de uso e ocupação do solo valores médios do fator C presentes na literatura como mostra a Figura 4.

Fator P – Práticas Conservacionistas

O fator P foi calculado conforme Bertoni e Lombardi Neto (2012) e utilizado em Oliveira et al. (2007). Nesta metodologia a declividade (θ) é considerado o atributo mais influente nas práticas de conservação do solo, obedecendo as seguintes relações: se $0 \leq \theta \leq 5\%$, então $P=0,6$; se $5\% < \theta \leq 20\%$, então $P=0,69947 - 0,08991 * \theta + 0,01184 * \theta^2 - 0,00035 * \theta^3$ e se $\theta > 20\%$, $P=1$.

O produto dos fatores anteriormente determinados resulta na estimativa da perda de solo para o Estado de São Paulo.

3 Resultados e Discussões

A Figura 3(a-f) mostra os mapas dos fatores da EUPS que, ao serem multiplicados, geraram o mapa da estimativa de perda de solo para a Mesorregião de Ribeirão Preto apresentando na Figura 4. Os mapas, em ambiente SIG, apresentam resolução espacial de 30 m (área total = 30.808.806 pixels).

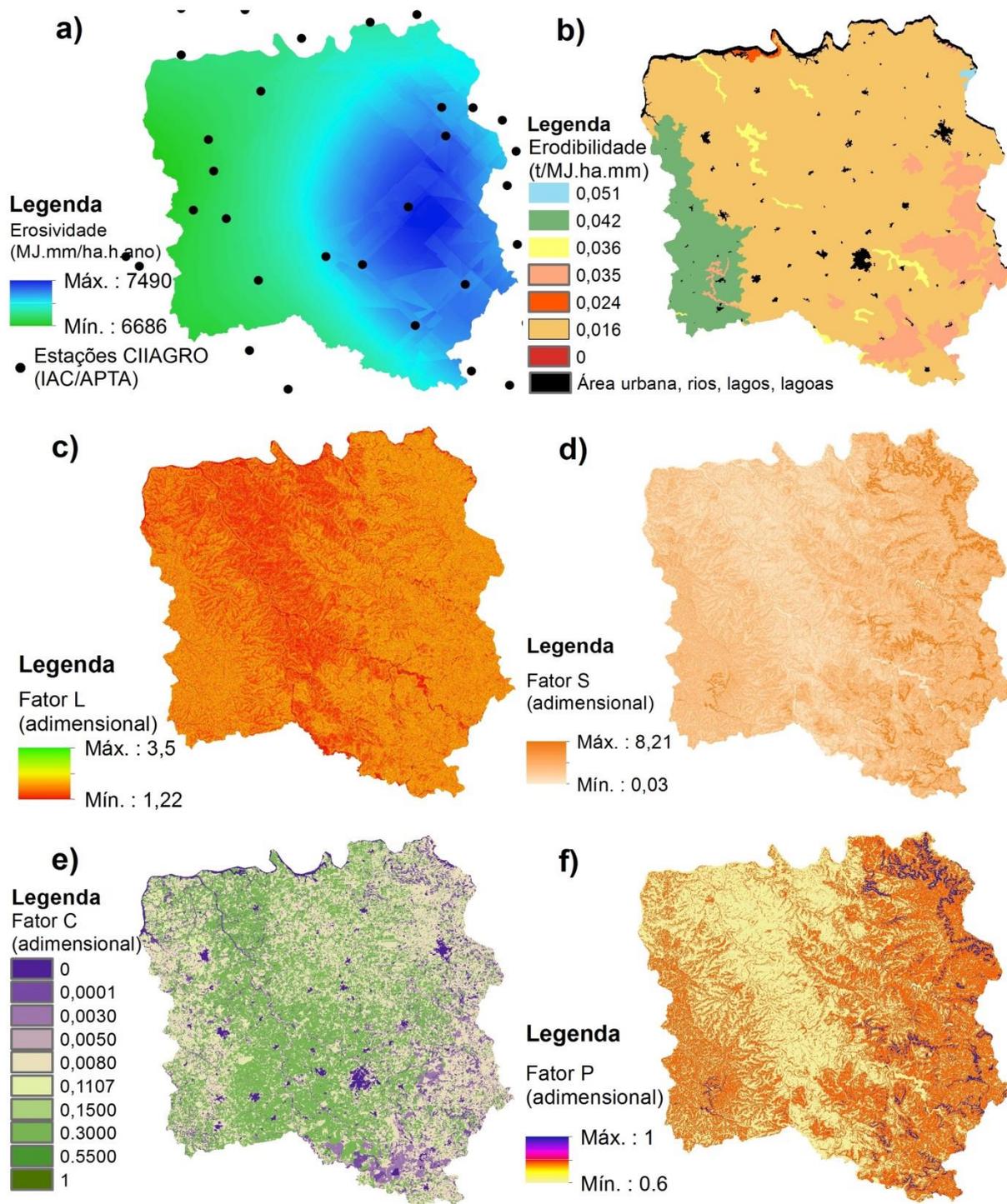


Figura 3. Fatores da EUPS para a Mesorregião de Ribeirão Preto: (a) Fator R, (b) Fator K, (c) Fator S, (d) Fator L, (e) Fator C e (f) Fator P

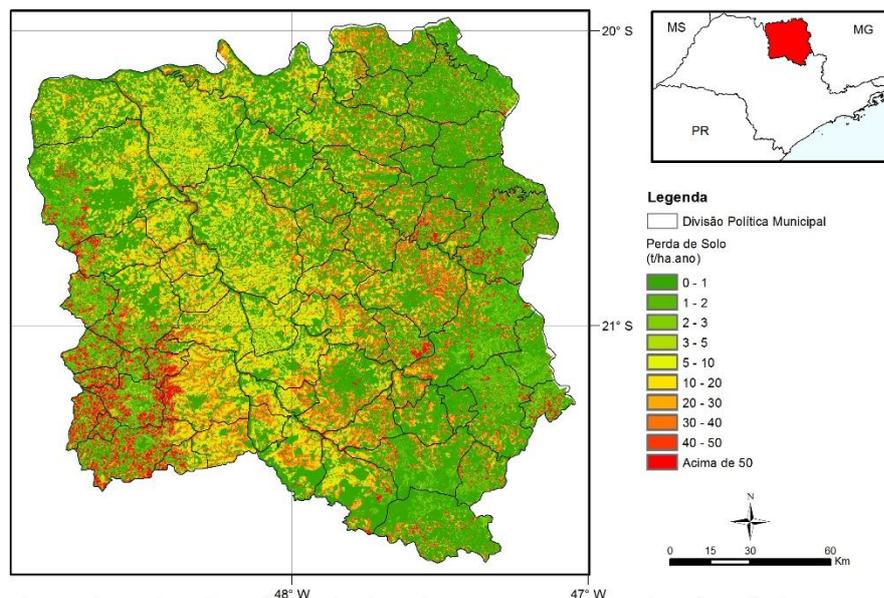


Figura 4. Estimativa da perda de solo para a Mesorregião de Ribeirão Preto

A compreensão dos resultados das estimativas de perda de solo dos modelos de erosão (Figura 4) deve ser realizada considerando os fatores determinados na Figura 3(a-f) de forma integrada. Os extremos superiores da erosividade na Mesorregião de Ribeirão Preto ocorrem na porção leste com índices que variam aproximadamente entre 7000 e 7490 $\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (Figura 3a), os quais seguem os padrões de distribuição da precipitação. Entretanto, como pode ser observado na Figura 4, verifica-se que a perda de solo é intensa nas áreas ocupadas por atividades agrícolas, as quais são limitadas pela geomorfologia (um exemplo disso é a cultura da cana-de-açúcar muito presente na região).

Em se tratando do fator K, a área de estudo apresenta Latossolos em sua maior parte, cerca de 80% do total, que são muito evoluídos pedogeneticamente, profundos e desnaturados e correspondem a uma baixa erodibilidade (Figura 3b).

Os avanços na aquisição de informações por Sensoriamento Remoto com relação a aquisição de dados topográficos e o desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica favorecem atualmente a obtenção de atributos topográficos (ver Moore et al., 1991). Assim sendo, o uso dos dados do Projeto Topodata permitem uma ampla abrangência de aplicações, tais como as relacionadas a análises físicas da paisagem. Considerando os aspectos geomorfológicos da área de estudo verifica-se que comprimento de rampa não segue necessariamente o padrão da declividade nas áreas com relevo acentuado uma vez em que não apresenta áreas com altas declividades e grandes comprimentos, Figuras 3c e 3d, porém esta correlação acontece para as áreas mais planas (as áreas mais planas tendem a apresentar comprimento de rampa maiores). Tais fatores são considerados complementares de modo que as áreas com declividade acentuada podem apresentar diversos comprimentos de rampa, ao passo que o contrário ocorre com menor frequência: as áreas com maiores comprimentos de rampa tendem a serem mais extensas e com baixa declividade. Desse modo, a área de estudo apresenta-se relativamente plana no centro e em sua porção oeste favorecendo as atividades agrícolas mecanizadas predominantes na região; na porção leste as altitudes são superiores e justificam o predomínio de pastagens (Figura 2c).

O fator de uso e manejo do solo apresentado na Figura 3e possui valores próximos a zero onde os usos e manejos não contribuem com a perda de solo e aumenta na medida em que os usos e manejos estão progressivamente ligados ao desprendimento das partículas do solo. Para a mesorregião de Ribeirão Preto, nos locais onde ocorrem atividades agropecuárias, o fator manejo do solo apresentou valores maiores que 0,3.

O fator práticas conservacionistas apresentado na Figura 3f mostrou padrões de distribuição que seguem os padrões espaciais da declividade, visto que o método utilizado considera que este atributo topográfico é limitante para as práticas de conservação.

A Mesorregião de Ribeirão Preto, portanto, apresenta extensa área cujos processos erosivos são acentuados como aponta a Tabela 1. Verifica-se que 45% da área de estudo apresentou estimativa de perda de solo de até 2 t ha⁻¹ ano⁻¹; 20% da área apresenta perda de solo entre 2 e 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ e aproximadamente 37% da área apresenta estimativa da taxa de perda de solo superior a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando as estimativas de limite de tolerância de 10 a 12 t ha⁻¹ ano⁻¹ para latossolos estabelecidas por Lombardi Neto e Bertoni (1975) para o Estado de São Paulo, verifica-se que mais de 1 milhão de hectares da Mesorregião de Ribeirão Preto está sendo explorada nos limites de tolerância ou acima.

Tabela 1. Quantificação da estimativa da perda de solo na Mesorregião de Ribeirão Preto

Estimativa da perda de Solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Nº de pixels (30x30m)	Área (10 ³ ha)	Área relativa
0-1	1025863	92	3%
1-2	13017047	1172	42%
2-3	3098813	279	10%
3-5	1434953	129	5%
5-10	740378	67	2%
10-20	2401202	216	8%
20-30	3386030	305	11%
30-40	1822585	164	6%
40-50	1951436	176	6%
Acima de 50	1930499	174	6%
Total	30808806	2773	100%

As consequências da exploração além dos limites de tolerância do recurso solo são diversas e conduzem ao abandono da área devido aos elevados custos para suprir a falta dos nutrientes que foram transportados pelo processo erosivo e a diminuição da espessura do solo até profundidades consideradas críticas cujas consequências são irreversíveis. Assim sendo, a determinação das estimativas das taxas de perda de solo pelos modelos de erosão é importante para os estudos relacionados à conservação do solo, porém são insuficientes uma vez que não se conhecem os limites de tolerância da exploração do solo. Ao mesmo tempo, considerar também a taxa de renovação do solo é importante pois possibilita a compreensão do solo como é um sistema: o *input* é a quantidade de solo que entra no sistema (taxa de renovação) e o *output* é a perda de solo determinada pelos modelos de erosão.

Portanto, considerar que o solo é um recurso finito, limitado e não-renovável deve ser o princípio das políticas de utilização do solo.

4 Conclusões

Conclui-se que a exploração do solo da Mesorregião de Ribeirão Preto localizada no Estado de São Paulo é intensa e a estimativa da taxa da perda de solo mostra que grande parte da área encontra-se explorada além dos limites de tolerância do solo. Estas áreas são caracterizadas por usos agrícolas consolidados como o cultivo da cana-de-açúcar e por pecuária.

Agradecimentos

À CAPES pela bolsa de doutorado concedida do primeiro autor e à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, na pessoa de Aline Salim, pela disponibilização de dados para este trabalho.

Referências Bibliográficas

Lombardi Neto, F.; Bertoni, J. **Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 28).

- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. Conservação do solo. 8.ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355p.
- CDA - Coordenadoria de Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo. **Conservação do Solo**. Campinas: CDA, 2014.
- CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do Agronegócio**. Piracicaba: USP, 2013.
- Denardin, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba: USP, 1990, 114p. Tese Doutorado
- 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.
- ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute, Inc.** (Esri), 2014.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contas Regionais do Brasil 2011**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.
- Lombardi Neto, F.; Moldenhauer, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas. **Bragantia**, v. 51, p.189-196, 1992.
- 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**, v.24, p. 1335–1340, 2002.
- Manzatto, C. V.; Junior, E. F.; Peres, J. R. R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002, 149p.
- McCool, D.K.; Brown, G.R.; Foster, G.R.; Meyer, L.D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers** v.30, p. 1387–1396, 1987.
- Moore, I. D.; Burch, G. J. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1294 – 1298, 1986.
- Moore, I. D.; Grayson, R. B.; Ladson, A. R. Digital Terrain Modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.
- Moore, I.; Wilson, J.P. Length slope factor for the revised universal soil loss equation: Simplified method of solution. **Journal of Soil Water Conservation**, v.47, p.423–428, 1992.
- Oliveira, A. M. M.; Pinto, S. A. F.; Lombardi Neto, F. Caracterização de Indicadores da Erosão do Solo em Bacias Hidrográficas com o Suporte de Geotecnologias e Modelo Preditivo. **Estudos Geográficos**, v.5, p.63-86, 2007.
- Oliveira, J.B.; Camargo, M.N.; Rossi, M.; Calderano Filho, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 64p, 1999. Mapa
- Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Mapeamento de Cobertura da Terra do Estado de São Paulo 2005 – Escala 1:50.000**. São Paulo: Coordenadoria De Planejamento Ambiental, 2013. Mapa. DVD Rom.
- Silva, A. M.; Alvares, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. **Geociências**, v.24, p.33-41, 2005.
- Telles, T. S. **Os custos da erosão do solo**. Londrina: UEL, 2010. 46p. Dissertação Mestrado
- Valeriano, M. de M. **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008, 72p.
- Wischmeier, W. H. E.; Smith, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 58p, 1978.
- Wischmeier, W. H. E.; Smith, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**. Washington: USDA, 45p, 1965.