

Meio Ambiente, Paisagem e Qualidade Ambiental

Variabilidade espacial em grande escala do fator k de solos agrícolas por métodos indiretos no domínio de Mares de Morros, SP, Brasil

Spatial variability on a large scale of the factor k of agricultural soils by indirect methods in the domain of Mares de Morros, SP, Brazil

Bruno Granjeiro Silva Rocha^I , Gustavo Souza Valladares^{II} , Nara Núbia de Lima Cruz^{III} , Cláudia Maria Sabóia de Aquino^{IV} 

^I Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Bom Jesus, PI, Brasil

^{II} Universidade Federal do Piauí, Coordenação do Curso de Geografia, Teresina, PI, Brasil

^{III} Universidade Federal Rural de Pernambuco, Dois Irmãos, Recife, Brasil

^{IV} Universidade Federal do Piauí, Coordenação do Curso de Geografia, Teresina, PI, Brasil

RESUMO

A erosão dos solos pela ação da água constitui-se um grave problema, que em última instância culmina com a redução da produtividade dos cultivos e degradação dos solos. As preocupações com a erosão dos solos culminaram com o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS). A erodibilidade dos solos (k) um fator da EUPS consiste na suscetibilidade natural do solo à erosão hídrica. Considerando serem os métodos diretos para sua determinação de elevado custo econômico, assim objetivou-se com o seguinte trabalho: comparar diferentes métodos indiretos para se estimar e avaliar a variabilidade espacial por meio de geoestatística e o método mais adequado para se estimar o fator k da EUPS em solos da região de Jundiá – SP. Os resultados evidenciaram que dos diferentes métodos testados para se estimar o fator k, a maioria não teve boa correlação e havendo métodos inconsistentes entre si. Por todos os métodos foi possível efetuar a interpolação por krigagem, tendo todos os dados de dependência espacial significativa pelo ajuste dos semivariogramas. O método proposto por Wischmeier & Smith (1978), foi o mais adequado para se estimar o fator k na área de estudo.

Palavras-chave: Dependência espacial; erodibilidade; krigagem; semivariograma

ABSTRACT

Soil erosion by water is a serious problem, which ultimately culminates in reduced crop yields and soil degradation. Concerns about soil erosion culminated in the development of the Universal Soil Loss Equation (EUPS). Soil erodibility (k) a factor of EUPS consists of the natural susceptibility of the soil to

water erosion. Considering that the direct methods for its determination are of high economic cost, it was aimed at the following work: to compare different indirect methods to estimate and evaluate spatial variability through geostatistics and the most appropriate method to estimate the K factor of EUPS in soils in the region of Jundiá - SP. The results showed that of the different methods tested to estimate the k factor, most did not have a good correlation and there were inconsistent methods between them. By all methods it was possible to perform the interpolation by kriging, having all the data of significant spatial dependence by adjusting the semivariograms. The method proposed by Wischmeier & Smith (1978), was the most adequate to estimate the k factor in the study area.

Keywords: Erodibility; kriging; semivariogram; spatial dependence

1 INTRODUÇÃO

As influências adversas da erosão do solo sobre a sua degradação, a produção agrícola, a qualidade da água, os sistemas hidrológicos e ambientes, têm sido reconhecidos como graves problemas para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e naturais (LAL, 1998). A estimativa de perda de erosão do solo embora necessária é muitas vezes difícil, em razão da complexa interação de vários fatores ambientais e antrópicos. Além dos parâmetros biofísicos, componentes sociais, econômicos e políticos também influenciam a erosão do solo (ANANDA & HERATH, 2003). Nesse contexto estimativas da perda de solo por erosão ou de avaliação de risco de erosão do solo são pesquisas necessárias para a conservação desse recurso natural (SIMONETTI et al., 2018) e ordenamento territorial (SOUZA & GALVANI, 2017).

Estudos com modelos para a estimativa da perda do solo por erosão têm sido desenvolvidos nas últimas décadas (WISCHMEIER & SMITH, 1978; NEARING ET AL., 1989; ADINARAYANA et al., 1999; D'AMBROSIO et al., 2001; VEIHE et al., 2001; SHEN et al., 2003). Na prática, a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e, assim como a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (REUPS) tem sido o modelo utilizado frequentemente na modelagem da perda do solo por erosão. A EUPS foi originalmente desenvolvida para estimar a erosão do solo em áreas de cultivo de topografia levemente inclinada (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Posteriormente ampliou-se sua aplicação a áreas de florestas, pastagens e áreas com ação

antrópica associadas a má gestão do uso da terra (RENARD et al., 1997). Entretanto os métodos de quantificação da perda de solo com base em parcelas de erosão possuem muitas limitações em termos de custo, representatividade e confiabilidade dos dados resultantes.

Para a avaliação e predição das perdas de solo por erosão, a EUPS, apresentada por Wischmeier e Smith (1978), tem sido o modelo utilizado com maior frequência (KINNELL et al., 2010). Este modelo caracteriza-se por estabelecer uma estimativa da perda de solo média anual causada por erosão (KINNELL et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011), contribuindo para que se tenha uma previsão mais precisa das perdas de solo, servindo como guia para o planejamento do uso e determinação das práticas de conservação mais apropriadas a uma dada área (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010).

A erodibilidade do solo, representada pelo fator k da EUPS, consiste na suscetibilidade do solo à erosão hídrica. Esse fator consiste em um atributo intrínseco de cada solo, obtido através do somatório de propriedades físicas e químicas, contribuindo para a previsão de perdas de solo e planejamento de uso da terra. Entre os atributos do solo que, de forma integrada, afetam a erodibilidade, destacam-se a permeabilidade do solo à água, a capacidade de armazenamento de água, a textura (principalmente os teores de silte), a coesão, o grau e o tipo de estrutura, C orgânico, os teores de óxidos de Fe e de Al, e o tipo de mineral de argila (DENARDIN, 1990; LIMA et al., 1990; SILVA et al., 1994, 1997, 1999, 2000; FERREIRA et al., 1999; MORGAN, 1995; BARTHÈS et al., 1999; PARYSOW et al, 2001, 2003).

No Brasil, um número considerável de solos já tem o seu valor de erodibilidade determinado com o uso de simuladores de chuva e, também, sob chuva natural (MARQUES et al., 1997a). Conforme levantamento realizado por Denardin (1990) e Silva et al. (2000, 2009), a erodibilidade de solos com horizonte B latossólico varia de 0,002-0,034 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, enquanto os solos que possuem horizonte B textural, B nítico e B plânico varia de 0,004-0,045 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹

(DENARDIN, 1990; MARQUES et al., 1997a e 1997b). Para os solos com B incipiente, os valores encontrados foram de 0,011 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ (BERTOL et al., 2002) e 0,026 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ (SILVA et al., 2009).

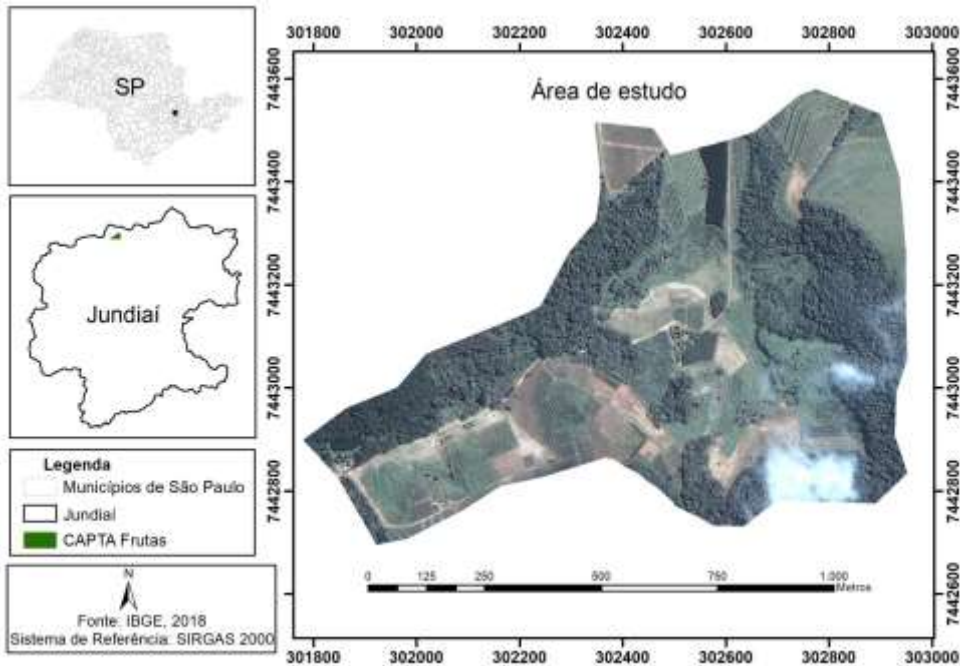
A determinação direta do fator k é feita por meio da instalação de parcelas de perda de solo no campo, seja sob chuva natural ou simulada, as quais envolvem altos custos além de demandarem no mínimo 5 anos de coleta de dados, evitando-se, assim, a variabilidade da erodibilidade (MARTINS et al., 2011). Em virtude do tempo requerido, se faz necessário o uso de modelos de estimativa indireta, obtidos por meio de regressões múltiplas com variáveis independentes: atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo (MARTINS et al., 2011; AMORIM et al., 2010; SILVA et al., 2009; ARRAES et al., 2010).

Assim, objetivou-se com o presente estudo comparar diferentes métodos indiretos para se estimar e avaliar a variabilidade espacial por meio de geoestatística e o método mais adequado para se estimar o fator k da EUPS em solos da região de Jundiaí – SP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo (Figura 1) foi o Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio das Frutas (CAPTA-Frutas), localizado no município de Jundiaí-SP, que abrange uma área de 142,8 ha. Delimitou-se uma área de 59,8 ha, onde se concentra o cultivo de frutas em duas microbacias. Esta área localiza-se entre 680 e 760 m de altitude, com geomorfologia de morros e relevo ondulado e forte ondulado. O clima corresponde ao Cwa de Köppen. Quanto à geologia, predominam os xistos. Os solos são classificados como: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, Latossolo Amarelo Distrófico típico, Argissolo Amarelo Distrófico típico e Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico (VALADARES et al., 1971).

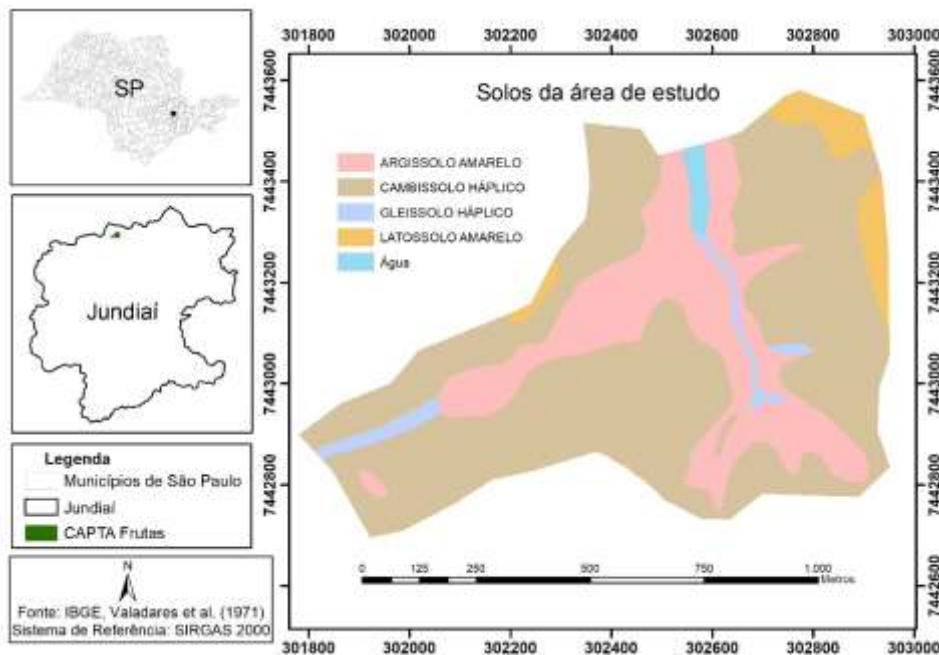
Figura 1 – Área de estudo, no Centro APTA – Frutas, Jundiaí, SP



Fonte: IBGE 2018

Foram coletados 100 pontos na profundidade 0-15 cm, Latossolo 4%, Gleissolo 7%, Argissolo 18% Cambissolo 71%. Todos os pontos amostrais foram georreferenciados com auxílio de GPS (Global Position System, modelo Garmin eTrex). As amostras coletadas foram caracterizadas nos laboratórios de solos do Instituto Agrônomo de Campinas, determinando as frações granulométricas e a matéria orgânica, atributos necessários para estimar o fator k. A permeabilidade dos solos, bem como a morfologia foi verificada em campo durante a amostragem. O mapa pedológico apresentado na Figura 2 foi produzido por Valladares et al. (1971) e teve sua legenda adequada ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018), tendo sido digitalizado em formato vetorial e incorporado no SIG.

Figura 2 – Ordens de solos da área de estudo no Centro APTA – Frutas, Jundiaí, SP



Fonte: Adaptado de Valadares et al. (1971)

Para a estimativa da erodibilidade por métodos indiretos (k) utilizou-se 04 equações:

Método 1 - Proposto por Bouyoucos, descrita por Bertoni & Lombardi Neto (2010):

$$k = (\% \text{areia} + \% \text{silte}) / (\% \text{argila}) / 100 \text{ (Eq. 1)}$$

Em que: Fator k corresponde a erodibilidade do solo (por $\text{Mg}/\text{ha h}^{-1} \text{Mj}^{-1} \text{mm}^{-1}$) e a % areia, % silte e % argila representaram as porcentagens das respectivas frações granulométricas para a camada de 0-15 cm.

Método 2 - Proposto por Roloff & Denardin (1994):

$$k = 0,0049 K + 0,0331 \text{ silte}^{0,5} \text{ (Eq. 2)}$$

Em que: Fator k corresponde a erodibilidade do solo ($\text{Mg/ha h}^{-1} \text{Mj}^1 \text{mm}^{-1}$); K corresponde a permeabilidade do solo; silte (teor de silte) x (teor de silte + areia fina g/kg^{-1}).

Método 3 - Proposto por Römken et al. (1987, 1997), adaptada para gerar valores em unidades internacionais com unidade no sistema internacional (SI):

$$k = 0,0034 + 0,0405 \exp \left((-1/2) \left((\log(Dg) + 1,659) / 0,7101 \right)^2 \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que: Fator k é a erodibilidade do solo ($\text{Mg/ha h}^{-1} \text{Mj}^1 \text{mm}^{-1}$); log é o logaritmo decimal; Dg é a média geométrica do diâmetro das partículas primárias, em mm, calculada de acordo com Shirazi & Boersma (1984) e expressa como:

$$Dg = \exp \left(0,01 \sum_{i=1}^3 f_i \ln M_i \right)$$

Em que: f_i é a percentagem das frações granulométricas das partículas de areia, silte e argila, \ln é o logaritmo natural, M_i é a média aritmética dos dois limites do diâmetro das partículas, segundo Shirazi & Boersma (1984).

Método 4 - Proposto por Wischmeier & Smith, (1978):

$$k = (2,1(\% \text{silte} + \% \text{silte} \times \% \text{areia})^{1,14} \times 10^{-4} \times (12 - m.\text{org})) / 100 \quad (\text{Eq 4})$$

Em que: k é a erodibilidade do solo ($\text{Mg ha h}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), m.org: % de matéria orgânica.

Para verificar a dependência espacial das variáveis e elaborar os mapas, foi empregada a análise geoestatística segundo Vieira (2000). Os semivariogramas foram construídos, partindo das pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância. A dependência espacial foi ajustada com o modelo matemático de melhor correspondência. As espacializações dos dados foram feitas por meio dos quartis com quatro classes. Calculou-se o grau de dependência espacial (GD), que é a proporção em porcentagem da variância

estrutural (C1) em relação ao patamar (C0+C1) (equação 5), sendo, segundo Zimback (2001) e Trangmar et al. (1985), dependência fraca <25 %, dependência moderada de 26 % a 75 % e dependência forte > 75 %.

$$GD = ((C_1 / (C_0 + C_1)) \times 100) \quad (\text{Eq 5})$$

Uma vez que o semivariograma representa a variabilidade espacial dos dados, comparou-se os parâmetros de ajuste dos semivariogramas para cada uma das variáveis estudadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela estatística descritiva dos dados na (Tabela 1), observa-se que os valores das médias e medianas (medidas de tendência central) são diferentes para os valores de k estimados pelos métodos 1, 2 e 4, e a mediana expressou valores menores do que a média. Com exceção do método 3, onde a mediana e média foram iguais. Os valores de k estimados pelos métodos 2 e 3 apresentaram baixa variabilidade, sendo os valores do primeiro quartil, mediana e terceiro quartil muito próximos, como também baixos coeficientes de variação.

Em virtude da variabilidade das ordens de solos, uma diferenciação nos valores de k é esperada, desta forma, por esta visão unilateral os métodos 1 e 4, por apresentarem uma maior dispersão dos dados se mostraram mais coerentes, estimando com maior exatidão o fator k.

Tabela 1 – Resultado da estatística descritiva para os fatores k estimados por diferentes métodos

Métodos	Média	Mediana	Primeiro quartil	Terceiro quartil	Assimetria	Curtose	CV%
Método 1	0,036	0,030	0,024	0,036	1,96	6,25	46
Método 2	0,016	0,015	0,014	0,016	-0,93	-1,14	10
Método 3	0,042	0,042	0,041	0,043	-1,64	2,98	5
Método 4	0,053	0,046	0,034	0,055	0,42	-0,38	37

CV% = coeficiente de variação em porcentagem. Método 1- Bouyoucos, Método 2- Roloff & Denardin, Metodo 3- Römken, Metodo 4 - Wischmeier & Smith. Fonte: Organização dos autores.

O método 2 estima valores de k, inferiores a 0,02, como sendo de fraca erodibilidade, resultado controverso, em virtude de ordens como Argissolos e Cambissolos predominantes na área, serem solos de maior erodibilidade. Pelo método 1 os valores variam entre moderado a forte, podendo ser mais coerentes com as propriedades dos solos estudados. O método 3 indica que todos os solos teriam erodibilidade muito forte, valor incoerente com os Latossolos presentes na área de estudo. O método 4 indica erodibilidade de forte a muito forte dos solos, o que destoa somente dos Latossolos encontrados na área de estudo, mas que também pode ser coerente, uma vez que pela menor expressão espacial dos Latossolos estes foram amostrados com menor frequência. Assim, infere-se novamente que os métodos 1 e 4 estariam estimando melhor a variabilidade dos solos.

A classificação do fator k também utilizada por Mannigel et al. (2002), aqui identificada como modelo 2, estimou valores moderados de k, enquanto os demais modelos retornaram valores variando entre alto a extremamente alto. Silva (2008) determinou média de 0,042 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ para Argissolo Vermelho-Amarelo de Sorocaba-SP, e Bueno & Stein (2004) observaram 0,0438 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ para Argissolo de Brotas-SP. A erodibilidade apresenta maior influência na determinação da perda de solo principalmente em áreas oriundas de solos com

horizonte subsuperficial com acúmulo de argila do tipo B textural (Bertoni & Lombardi Neto, 2010).

Bertoni & Lombardi Neto (2010) relacionaram, para o grupo dos Argissolos do Estado de São Paulo, valores médios do fator erodibilidade na ordem de 0,0356 e 0,0235 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, respectivamente para os horizontes A e B. Por outro lado, para o grupo de Latossolos tais valores foram de 0,0149 e 0,0088 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Estudos realizados por Marques et al (1997) encontraram para Argissolos valores variando de 0,004 a 0,045 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, valores relativamente semelhantes encontrados por Mannigel et al. (2002) e Ribeiro & Alves (2007), variando de 0,0100 a 0,0466 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Para Latossolos os valores encontrados por Dernadin (1990), Marques et al. (1997), Silva et al (1997), Hernani et al (1997) variaram de 0,004 a 0,010 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, valores relativamente maiores quando comparados aos encontrados por Mannigel et al. (2002) e Ribeiro & Alves (2007) que variaram de 0,0038 a 0,0061 $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Solos arenosos são muito permeáveis, porém, durante uma chuva, em razão do baixo teor de matéria orgânica e argila, importantes na agregação de partículas, o escoamento superficial e o impacto das gotas podem ocasionar grande perda de solo devido à baixa coerência entre as partículas (TOY et al., 2002).

Os resultados da análise geoestatística dos semivariogramas, podem ser observadas na tabela 2 e figura 3. O modelo esférico foi o que apresentou melhor ajuste aos dados do fator k estimados por meios das equações de 1 a 3, já o modelo exponencial gerou o melhor ajuste com os dados estimados pela equação 4 (tabela 2).

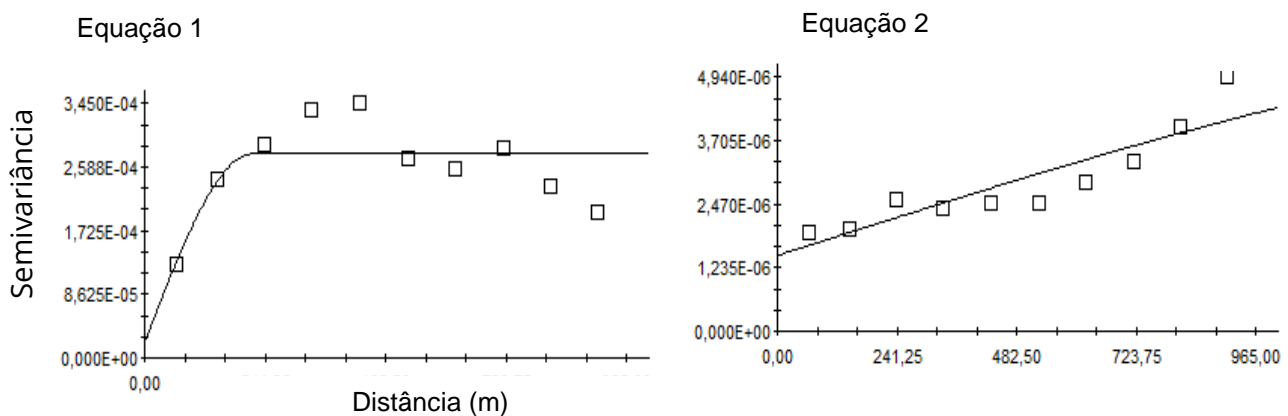
Tabela 2 – Resultado da estatística descritiva para os fatores K estimados por diferentes métodos

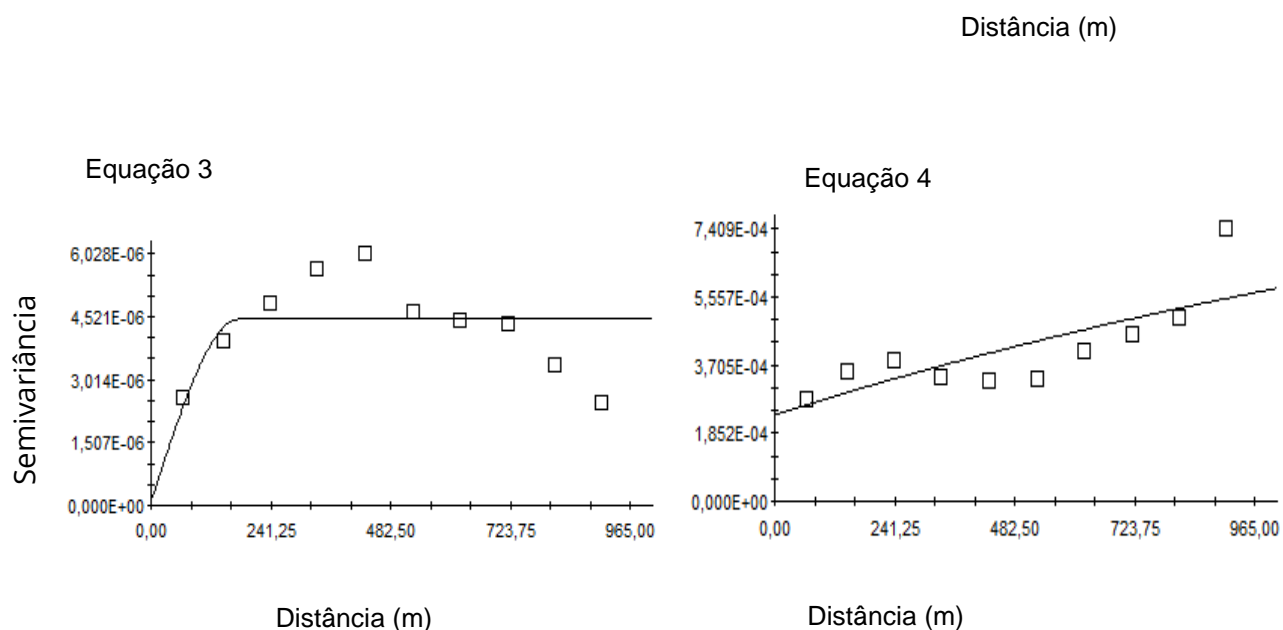
Variável	Modelo	Co	Co+C1	a	r ²	GD
Equação 1	esférico	0,000021	0,000277	218	0,55	92
Equação 2	exponencial	0,000001	0,000006	2110	0,80	83
Equação 3	esférico	0	0,000004	178	0,25	100
Equação 4	exponencial	0,00024	0,001139	2110	0,60	79

Equação 01: Método 1- Bouyoucos, Equação 02: Método 2- Roloff & Denardin, Equação 03: Método 3- Römken, Equação 04: Método 4 - Wischmeier & Smith. Co: efeito pepita; Co+C1: patamar; a: alcance (em metros); r²: coeficiente de determinação; GD: grau de dependência espacial (C1/(Co+C1)100).
Fonte: Organização dos autores.

A relação entre efeito pepita (C_0), que é a variabilidade não explicada, e o patamar do semivariograma ($C_0 + C1$) pode indicar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo. Todas as variáveis estudadas tiveram dependência espacial segundo a krigagem e o ajuste dos semivariogramas (Figura 3). A dependência espacial foi considerada forte para os dados de k estimados (ZIMBACK, 2001; TRANGMAR et al., 1985). Estes resultados indicam que a krigagem é um método adequado para se interpolar os dados de fator k na área de estudo.

Figura 3 – Semivariogramas para o fator K segundo cada modelo





Equação 01: Método 1- Bouyoucos, Equação 02: Método 2- Roloff & Denardin, Equação 03: Método 3- Römken, Equação 04: Método 4 - Wischmeier & Smith. Fonte: Organizado pelos autores.

Os valores de alcance dos semivariogramas têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, o que pode ser também um indicativo do intervalo entre diferentes tipos de solos. No geral, os menores alcances foram encontrados para os modelos estimados pelas equações 1 e 3, registrando a menor distância onde as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, ou seja, menores distâncias o resultado de uma amostra tem maior relação com seus vizinhos. Os métodos 2 e 4 geram semivariogramas com formas muito semelhantes.

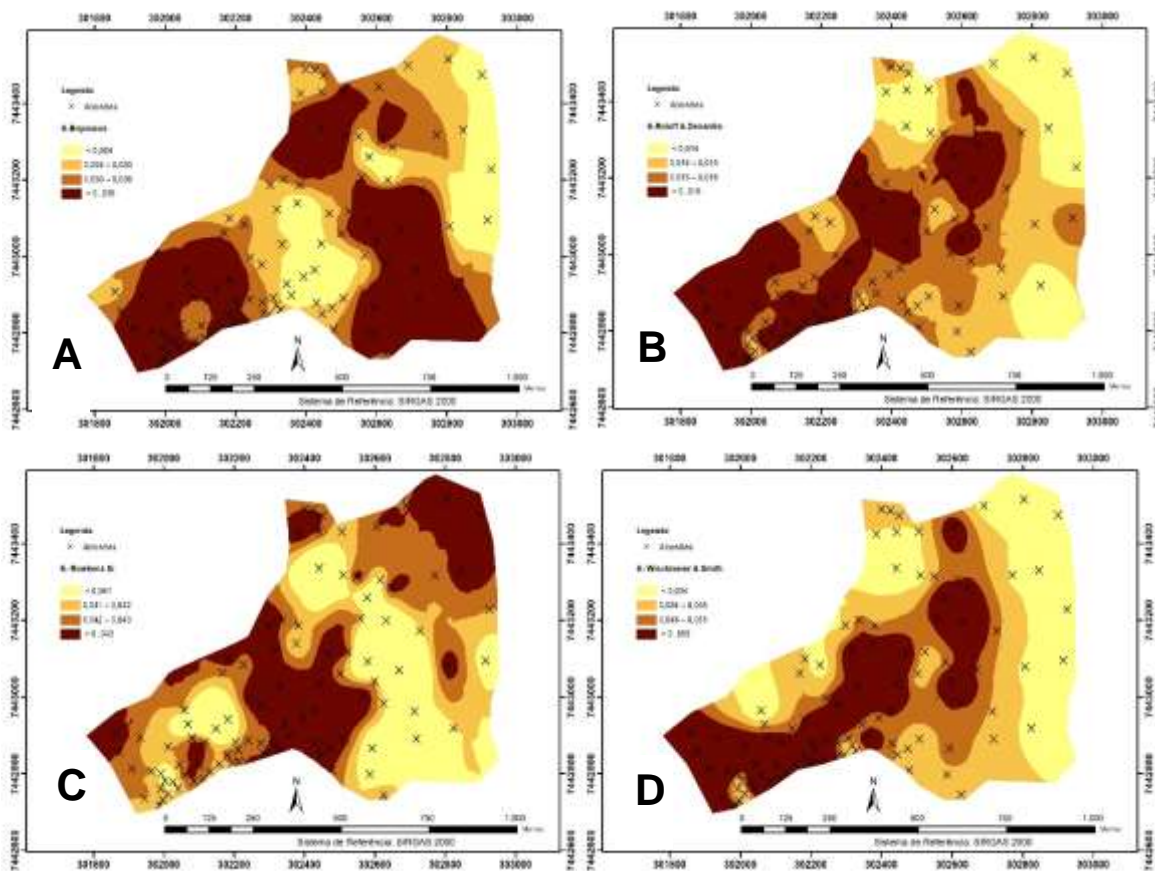
Os coeficientes de determinação (r^2) foram 0,55, 0,80, 0,25 e 0,64, respectivamente, para os modelos estimados pelas equações de 1 a 4. Os ajustes ao modelo esférico estão de acordo com os resultados de várias pesquisas que indicam ser este o modelo de maior ocorrência para se estimar as variáveis do solo (SALVIANO et al., 1998; SOUZA, 2001). O coeficiente de determinação do modelo 3 foi o menor, indicando um pior ajuste do semivariograma.

Como as variáveis estudadas são um resultado de diferentes agentes: cultura, manejo, fatores climáticos e gênese do solo, a forte dependência espacial está

associada a variações intrínsecas da união desses fatores, principalmente as características ligadas à suscetibilidade a erosão, tais como textura, permeabilidade e estrutura, enquanto as que apresentam moderada dependência espacial são influenciadas por propriedades extrínsecas como: aplicações de fertilizantes e cultivo (CAMBARDELLA et al., 1994). Os modelos representados pelas equações 2 e 4, expressaram maiores valores de alcance, tal fato deve-se à utilização de atributos como: permeabilidade e teor de matéria orgânica, que podem sofrer uma maior influência em seus resultados devido ao uso e manejo do solo.

Ao analisar os mapas de krigagem (Figura 4), é possível visualizar uma semelhança nos modelos 2 e 4, com menores valores de k no leste da área estudada e maiores no centro e oeste. Entretanto, o mapa do método 2 indica baixíssima variabilidade do k , o que não coincide com a realidade, uma vez que ocorrem pelo menos quatro ordens de solos com diferentes erodibilidades, em razão das diferenças morfogenéticas e atributos físicos e químicos. O mapa do modelo 2 apesar da variabilidade visivelmente demonstrada, não apresenta heterogeneidade em virtude dos valores estimados, com uma amplitude de 0,002. Entretanto para o mapa do modelo 4, foi expresso uma maior variabilidade, em áreas de ocorrência de Latossolos apresentou-se menores valores de k , indicando solos menos erodíveis, e para Cambissolos em virtude do relevo mais acidentado, como os mais erodíveis. Sugere-se então que este modelo seja eficaz na estimativa do fator k para os solos estudados.

Figura 4 - Distribuição espacial do fator K segundo diferentes modelos

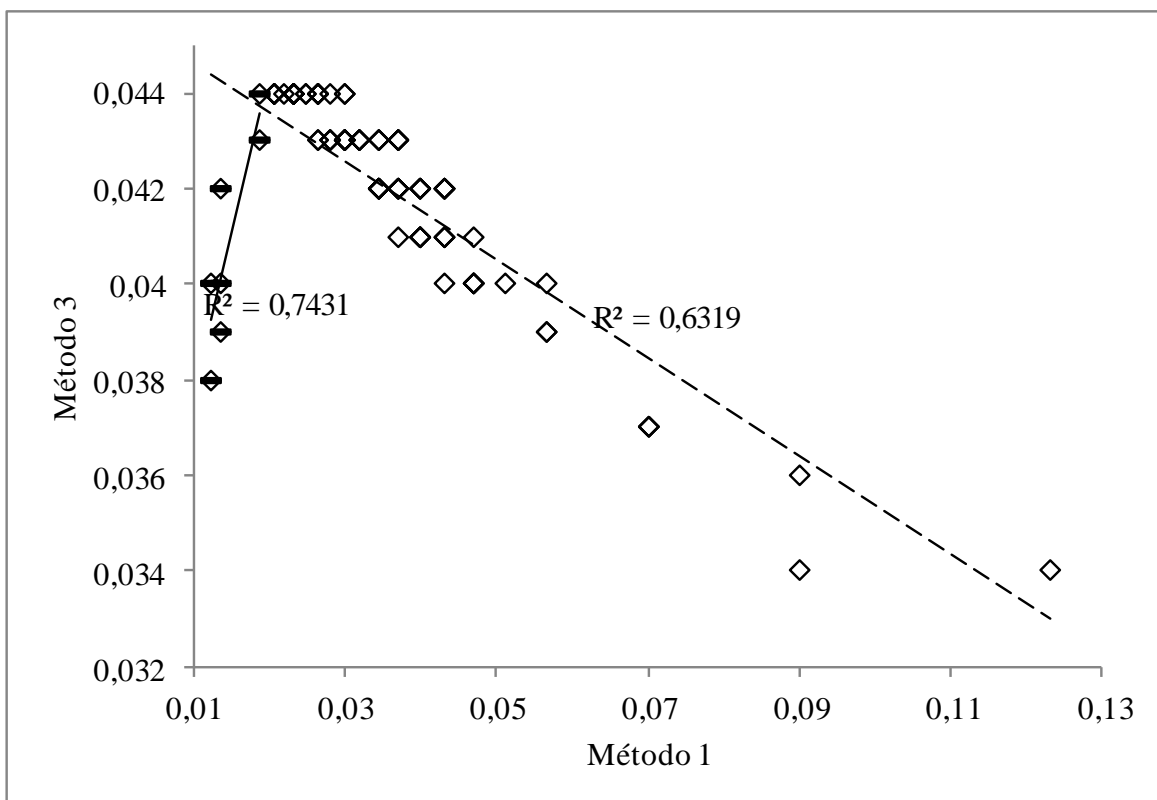


A: Método 1: Bouyoucos, descrita por Bertoni & Lombardi Neto (2010). B: Método 2: proposta por Roloff & Denardin (1994). C: Método 3: proposta por Römken et al. (1987, 1997). D: Método 4: calculada pela equação proposta por Wischmeier & Smith, (1978). Fonte: Organizado pelos autores.

O mapa obtido pelo modelo 3 não corrobora com os demais mapas, após a aplicação da equações de perda de solo, todos os métodos apresentaram acréscimo na erodibilidade, entretanto para modelo 3 houve uma diminuição desse atributo, além do que para solos argilosos expressou uma erodibilidade de moderada a alta, o que não é coerente com a área de estudo, uma vez que são os solos mais estruturados, como também o método indicou baixa variabilidade e se mostrou inadequado para estimar a erodibilidade dos solos na área de estudo. O mapa gerado pelo modelo 1 expressou correlação espacial com o modelo 4, porém em áreas de ocorrência de Cambissolos, os resultados indicaram baixa erodibilidade.

Após o emprego da análise de correlação linear, verificou-se que não houve correlação significativa entre os métodos 1 e 2 ($r=0,03$), métodos 1 e 4 ($r=0,04$), métodos 2 e 3 ($r=0,12$) e métodos 3 e 4 ($r=0,11$). Apenas os métodos 2 e 4 ($r=0,84$) apresentaram uma correlação alta e significativa a 1% de probabilidade, este resultado confirma a interpretação visual dos mapas da figura 3. Entre os métodos 1 e 3 também houve correlação linear alta e significativa a 1% de probabilidade, porém negativa ($-0,79$), indicando inconsistência entre os métodos, sendo confirmado pela linha de tendência tracejada (Figura 5). O método 3 assemelha-se ao método 1 apenas para amostras com textura argilosa, visível na linha de tendência contínua (figura 5), posicionadas junto ao eixo vertical. Para as amostras com textura argilosa o coeficiente de correlação linear foi de 0,86. A interpretação visual da figura 3 indica comportamento inverso dos valores do fator K para os métodos 1 e 3.

Figura 5 – Diagrama de dispersão entre os métodos 1 (Bertoni & Lombardi Neto, 2010) e 3 (Römken et al. (1987, 1997)



Legenda: ◆- Solos argilosos, ◇- Solos não argilosos. Fonte: Organizado pelos autores.

4 CONCLUSÕES

Após a verificação dos métodos testados, a maioria não apresentou boa correlação, no entanto o método 4 proposto por Wischmeier & Smith (1978) foi o método mais eficaz para se estimar o fator k, visto que o mesmo atribuiu maior erodibilidade aos Cambissolos, que são solos incipientes, com maior morfogênese e menor pedogênese, e menor erodibilidade aos Latossolos que são solos mais intemperizados e forte pedogênese. O método 2 apesar de correlacionado positivamente com o método 4 indicou pequena variabilidade entre as duas ordens de solos citadas, o que não corresponde ao balanço morfogênese e pedogênese.

Por todos os métodos foi possível efetuar a interpolação por krigagem, tendo todos os dados dependência espacial significativa pelo ajuste dos semivariogramas.

5 REFERÊNCIAS

ADINARAYANA, J.; RAO, K.G.; KRISHNA, N.R.; VENKATACHALAM, P.; SURI, J.K. A rule-based soil erosion model for a hilly catchment. **Catena**, Vol.37, p.309–318, 1999.

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Vol.30, p.1046-1049, 2010.

ANANDA, J.; HERATH, G. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. **J. Environmental Management**, Vol.68, p.343–353, 2003.

ARRAES, C.L.; BUENO, C.R.P.; PISSARRA, T.C.T. Estimativa da Erodibilidade do Solo para fins Conservacionistas na Microbacia Córrego do Tijuco, SP. **Bioscience Journal**, Vol.26, p.849-857, 2010.

BARTHÈS, B.; ALBRECHT, A.; ASSELINE, L.; DE NONI, G.; ROOSE, E.; Relationships between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). **Communication Soil Science Plant Analysis**, Vol.30, p.1929–1938, 1999.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; VISENTIN, D.; COGO, N.P. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.26, p.455-464, 2002.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 7.ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BUENO, C.R.P.; STEIN, D.P. Potencial natural e antrópico de erosão na região de Brotas, Estado de São Paulo. **Scientiarum**, Vol.26, p.1-5, 2004.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal**, Vol.58, p.1501-1511, 1994.

D'AMBROSIO D.; DI GREGORIO S.; GABRIELE S.; GAUDIO R.. A cellular automata model for soil erosion by water. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: **Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Vol.26, p.33-39, 2001.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1990. 81p. (Tese Doutorado)

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.23, p.515-524, 1999.

HERNANI, I. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.21, p.667-676, 1997.

KINNELL, P.I.A. Event soil loss, runoff and the universal soil loss Equation family of models: A review. **Journal of Hydrology**, Vol.385, p.384-397, 2010.

LAL, R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality: critical reviews. **Plant Science**, Vol.17, p.319-464, 1998.

LIMA, J.M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D.P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.14, p.85-90, 1990.

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 Scientia Agronomica**, Vol.24, p.1335-1340, 2002.

MARQUES, J.J.G.S.M.; ALVARENGA, R.C.; CURI, N.; SANTANA, D.P.; SILVA, M.L.N. Índices de erosividade da chuva, perdas de solo e fator erodibilidade para dois solos da região dos

cerrados: primeira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.21, p.427-434, 1997a.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; SÁ, M.A.C. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.21, p.447-456, 1997b.

MARTINS, S.G.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FONSECA, S. Erodibilidade do Solo nos Tabuleiros Costeiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Vol.41, p.322-327, 2011.

MORGAN, R.P.C. **Soil Erosion and Conservation**. 2.ed. England: Longman, 1995.

NEARING, M.A.; FOSTER G.R.; LANE L.J.; FINKNER S.C. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. **Transactions of the ASAE**, Vol.32, p.1587-1593, 1989.

OLIVEIRA, P.T.S.; ALVES, S.T.; RODRIGUES, D.B.B.; PANACHUKI, E. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. **Water Resource Management**, Vol.25, p.1021-1036, 2011.

PARYSOW, P.; WANG, G.; GERTNER, G.; ANDERSON, A. Assessing uncertainty of erodibility factor in national cooperative soil surveys: a case study at Fort Hood. **Journal of Soil Water Conservation**, Vol.56, p.207-211, 2001.

PARYSOW, P.; WANG, G.; GERTNER, G.; ANDERSON, A. Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility on joint sequential simulation. **Catena**, Vol.53, p.65-78, 2003.

RENARD K.G.; FOSTER G.R.; WEESIES G.A.; MCCOOL D.K.; YODER D.C. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Agricultural Handbook, Washington: USDA/ARS, 1997.

RIBEIRO, L.S.; ALVES, M.G. Quantificação de perda de solo por erosão no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2007, Florianópolis: INPE, 2007. p. 3039-3046.

ROLOFF, G.; DENARDIN, J.E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10, 1994, Florianópolis: INPE, 1994. p. 150-151.

RÖMKENS, M.J.M.; YOUNG, R.A.; POESEN, J.W.; MCCOOL, D.C.; EL-SWAIFY, S.A.; BRADFORD, J.M. Soil Erodibility Factor (K). In: RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D. K. & YODER, D.C. (Coordinators). **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation, Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Agriculture Handbook, Washington: USDA/ARS, 1997. 703, 65-99.

RÖMKENS, M.J.M.; PRASAD, S.N. & POESEN, J.W. Soil Erodibility and Properties. In: CONGRESS OF THE ISSS, 8, 1987, Hamburg: ISSS, 1987. p. 492-503.

SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.22, p.115-122, 1998.

SHEN D.Y.; MA A.N.; LIN H.; NIE X.H.; MAO S.J.; ZHANG B.; SHI J.J. A new approach for simulating water erosion on hillslopes. **International Journal of Remote Sensing**, Vol.24, p.2819-2835. 2003.

SHIRAZI, M. A.; BOERSMA, L. A. A unifying quantitative analyses of soil texture. Soil Science Society of American Proceedings, Vol.48, p.142 - 147, 1984.

SILVA, A.M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, C.J.; FERREIRA, M.F. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.33, p.1811-1820, 2009.

SILVA, A.M. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **International Journal of Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure**, Vol.8, p.5-14, 2008.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; FERREIRA, D.F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos Brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol.34, p.2287-2298, 1999.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LIMA, J.M.; FERREIRA, M.M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de Latossolos Brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol.35, p.1207-1220, 2000.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, M.S.; FERREIRA, M.M.; LOMBARDI NETO, F. Comparação entre métodos diretos e indiretos para determinação da erodibilidade em Latossolos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol.29, p.1751-1761, 1994.

SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J.M. Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro em Goiânia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.21, p.131-137, 1997.

SIMONETTI, V.C.; CUNHA, D.C.; OLIVEIRA, R.A.; SABONARO, D.Z., & ROSA, A. H. Análise da suscetibilidade do solo a processos erosivos do Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade (PNMCBIO) de Sorocaba (SP). **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, Vol.44, p.169-180, 2018.

SOUZA, V.; GALVANI, E. Determinação do potencial natural à erosão laminar na bacia do rio Jacaré Guaçú (SP). **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, Vol.39, p.08-23, 2017.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vol.25, p.699-707, 2001.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Vol.38, p.45-94, 1985.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R. & RENARD, K.G. **Soil erosion: Processes, prediction, measurement, and control**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

VALADARES, J.; LEPSCH, I.F.; KUPPER, A. Levantamento pedológico detalhado da Estação Experimental de Jundiaí, SP. **Bragantia**, Vol.30, p.337-386, 1971.

VEIHE A.; REY J.; QUINTON J.N.; STRAUSS P.; SANCHO F.M.; SOMARRIBA M. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. **Catena**, Vol.44, p.187-203. 2001.

VIEIRA, S.R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, Vol.1, p.3-87.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.A.; TOPP, G.C. & REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. Vol.2, p.1-45.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation**. Agricultural Handbook, Washington. USDA/DC, nº 537, 1978. 58p.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise especial de atributos químicos de solo para o mapeamento da fertilidade do solo**. Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônomicas/Unesp, 2001. 114p. (Tese de livre docência).

1 – Bruno Granjeiro Silva Rocha Correio:

Engenheiro Agrônomo

<http://orcid.org/0000-0002-8478-779X> - brunogranjeiro_18@hotmail.com

Contribuição: Escrita – Primeira Redação

2 – Gustavo Souza Valladares:

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Bolsista CNPq Produtividade em Pesquisa PQ2

<http://orcid.org/0000-0002-4884-6588> - valladares@ufpi.edu.br

Contribuição: Planejamento da pesquisa, coletas de campo, análises estatísticas, revisão da redação

3 – Nara Núbia de Lima Cruz:

Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Ciência do Solo

<http://orcid.org/0000-0003-3828-1488> - nnlc.16@hotmail.com

Contribuição: Primeira redação, análises estatísticas, revisão do texto

4 – Cláudia Maria Sabóia de Aquino:

Geógrafa, Doutora em Geografia

<http://orcid.org/0000-0002-3350-7452> - cmsaboia@gmail.com

Contribuição: Planejamento da metodologia da pesquisa, revisão da redação

Como citar este artigo

ROCHA, G., S., Bruno, VALLADARES, S., Gustavo, CRUZ, L. Nara Núbia, AQUINO, S., Claudia Maria. Variabilidade espacial em grande escala do fator k de solos agrícolas por métodos indiretos no domínio de Mares de Morros, SP, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 25, e13, p. 01-21, 2021. DOI 10.5902/2236499443552. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236499443552>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.