

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREDIÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA
ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS
NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL**

Ana Paula Oliveira Aranha

Agrônoma

2020

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREDIÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA
ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS
NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL**

Ana Paula Oliveira Aranha

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Coorientadora: Prof. Dr^a. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

A862p	Aranha, Ana Paula Oliveira Predicação e variabilidade espacial da erodibilidade do solo em entressulcos de Latossolos no nordeste do Estado de São Paulo, Brasil / Ana Paula Oliveira Aranha. – Jaboticabal, 2020 45 p. : tabs., mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho Coorientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra 1. Erosão em entressulcos. 2. Óxidos de ferro. 3. WEPP. 4. Mineralogia do solo. 5. Variabilidade espacial. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PREDIÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

AUTORA: ANA PAULA OLIVEIRA ARANHA

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

COORIENTADORA: TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal - UNESP

P/



Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR
Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM / Uberaba/MG

P/



Jaboticabal, 31 de julho de 2020

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Ana Paula Oliveira Aranha: Brasileira, Paraense, nascida na cidade de Santa Maria do Pará. Iniciou a vida acadêmica na escola rural Severiano Benedito de Sousa, cursou ensino fundamental e médio na Escola Estadual João Gabriel da Silva. Ingressou no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) – Campus Castanhal em 2011-2012 no curso Técnico em Agroindústria e 2013-2018 no Curso de Agronomia. Foi bolsista de iniciação científica no período de dois anos, desenvolvendo estudos para a elaboração de novos produtos que proporcionasse a agregação de valor, e integração da cadeia produtiva da fruticultura no Estado do Pará. Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Agronomia) no período de três anos, desenvolvendo trabalhos na área de ensino, pesquisa e extensão, no qual atuou em projetos voltados para manejo do solo, produção vegetal, extensão rural, metodologias de ATER e monitorias. No segundo semestre de 2018, ingressou no Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual de Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus Jaboticabal, recebendo auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. Faz parte do grupo de pesquisa CSME (Caracterização dos Solos para fins de Manejo Específico) e do grupo pesquisa POLUS (Política de Uso do Solo), atuando na área de manejo e conservação do solo e da água, e uso de modelos na previsão de erosão do solo.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota” (Madre Teresa de Calcutá).

AGRADECIMENTO

“A medida do amor é amar sem medida”. Com essa certeza expresso meu amor e gratidão a Deus, por ter dado força e ânimo para chegar até aqui.

Aos meus pais Ana Célia e Francinaldo, por todo amor, esforço, educação e trabalho dedicado a mim.

A todos meus familiares em especial meus avós e aos meus irmãos Chelton e Bianca. A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Jaboticabal e ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência Solo), pela oportunidade e suporte para a realização do mestrado.

Ao professor e orientador Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pelo tempo dedicado a este trabalho, orientação, ensinamentos, paciência. Ajudou-me ser uma profissional e ser humano melhor.

À professora Dr^a. Teresa Cristina Tarlé Pissarra pela coorientação, disponibilidade, amizade e ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa.

À minha amiga Poliana Mara Freire pela amizade, apoio e colaboração no desenvolvimento dessa pesquisa.

Às meninas da Republica: Fernanda Santos, Karine Dalla Vechia, Raquel, Aurea Veras, Eliane Nascimento, Mari Janes Nunes, Tatiana, com quem compartilhei muitos momentos desde da chegada em Jaboticabal.

Aos amigos que conquiste na UNESP: Yasmin Sampaio, Ari Cruz, Luís Henrique, Rodrigo, Sabrina Nascimento, Aline Moreno, Valter, Antônio Michael, Diego Sodré, Thiago Águas.

Aos amigos de longas datas: Marcio Alan, Alex Medeiros, Kelly Karoline, Tayse Fernanda, Hemelyn Soares e Raquel de Jesus, grandes incentivadores na minha decisão em cursar a pós-graduação.

A Dley Silva (in memoria) pelo companheirismo, força, ânimo e carinho dedicado a mim.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Erodibilidade do solo (K).....	3
2.1.1 Erodibilidade em entressulcos (K_i)	4
2.1.2 Erodibilidade em sulco (K_r)	5
2.2 Tensão cisalhante crítica (τ_c)	6
2.3 Mineralogia do solo	7
2.4 Water Erosion Prediction Project – WEPP	9
2.5 Geoestatística: Krigagem, variograma e distribuição normal	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Caracterização da área de estudo	14
3.2 Erodibilidade em entressulcos	15
3.3 Análise dos dados.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5. CONCLUSÕES.....	27
6. REFERÊNCIAS	28

**PREDIÇÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA ERODIBILIDADE EM
ENTRESSULCOS DE LATOSSOLOS NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO
PAULO, BRASIL**

RESUMO - Um componente crítico para o uso bem-sucedido do WEPP, em regiões com solos tropicais, refere-se à carência de valores da erodibilidade em entressulcos (K_i). Deste modo, objetivou-se: i) determinar K_i de latossolos argilosos; ii) estimar K_i a partir de atributos do solo; iii) acessar a variabilidade espacial dos valores preditos de K_i . Parcelas experimentais de 0,38 m², com declividades médias de 0,10 m m⁻¹, foram submetidas a chuva simulada, com intensidade de 65 mm h⁻¹ e duração de 65 minutos, para determinar K_i . Amostras de enxurrada foram coletadas e, posteriormente, a concentração de sedimentos e o fluxo de enxurrada foram determinados. Os solos testados foram: 1) LV₁ - Latossolo Vermelho distrófico; LV₂ - Latossolo Vermelho distrófico; LV₃ - Latossolo Vermelho eutroférico. Os teores de argila e Fe₂O₃ apresentaram correlações negativas e significativas com K_i ($r=-0,94$ e $r=-0,86$, nesta ordem). A razão caulinita/(caulinita+gibbsita) apresentou correlação positiva e significativa com K_i . As equações do modelo WEPP foram insatisfatórias para estimar K_i , pois a eficiência do modelo (EF) foi negativa (EF=-90.07). Uma equação para estimar K_i foi proposta: $K_i = 0,8445 + 0,0013 \times \text{Areia}$ ($R^2=0,87^{**}$). Ela foi validada, cujo desempenho foi muito bom (EF = 0,90). Uma análise geoestatística foi conduzida, o que permitiu a confecção de mapas. A variabilidade espacial dos atributos foi observada, com nítida contribuição da textura e mineralogia do solo em definir zonas específicas para K_i . Tais resultados podem servir de apoio para estudos futuros da erosão hídrica em ambientes tropicais, utilizando a variabilidade espacial no seu processo de modelagem.

Palavras-chave: erosão em entressulcos, óxidos de ferro, WEPP, mineralogia do solo, variabilidade espacial

PREDICTION AND SPATIAL VARIABILITY OF INTERRILL ERODIBILITY OF OXISOLS IN NORTHEASTERN SÃO PAULO STATE, BRAZIL

ABSTRACT - A critical component for the successful use of WEPP, in regions with climatic soils, refers to the lack of erodibility values in off-season (K_i). Thus, the objective was to: i) determine K_i of clayey oxisols; ii) estimate K_i from soil attributes; iii) access a spatial variability of the predicted K_i values. Experimental plots of 0.38m^2 , with media slope of 0.10 m m^{-1} , were subjected to simulated rain, with an intensity of 65 mm h^{-1} and duration of 65 minutes, to determine K_i . Flood samples were collected and, subsequently, a concentration of sediments and flood flow were selected. The following were tested: 1) LV_1 - Dystrophic Red Latosol; LV_2 - Dystrophic Red Latosol; LV_3 - Eutrophic Red Latosol. The clay and Fe_2O_3 contents reported negative and calculated correlations with K_i ($r = 0.94$ and $r = -0.86$, in that order). The kaolinite/(kaolinite+gibbsite) ratio shows a positive and significant correlation with K_i . As the equations of the WEPP model were unsatisfactory for the K_i estimate, the efficiency of the model (EF) was negative (EF = -90.07). An equation for the K_i estimate was proposed: $K_i = 0.8445 + 0.0013 \times \text{Sand}$ ($R^2 = 0.87^{**}$). It was validated, whose performance was very good (EF = 0.90). A geostatistical analysis was conducted, or allowed the making of maps. A spatial variability of the attributes was observed, with the contribution of soil texture and mineralogy in specific areas defined for K_i . These results may serve as support for future studies of water erosion in climatic environments, using a spatial variation in its modeling process.

Keywords: interwoven erosion, iron oxides, WEPP, soil mineralogy, spatial variability.

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo é um sério problema global, visto que, gera impactos nos ambientes naturais, urbanos e agrícolas, tais como assoreamento, poluição e degradação do solo e corpos d'água. Contudo, observa-se que o aumento desse processo ao longo do tempo, está ligado à intensificação do uso da terra para fins agrícolas em todo o mundo (Anache et al., 2017).

Globalmente os problemas relacionados aos solos e aos recursos hídricos são uma preocupação recorrente. Um relatório fornecido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) demonstrou que 33% dos solos de todo o mundo estão degradados em decorrência de diversos fatores, dentre estes, a erosão é apontada como um dos principais problemas encontrados sendo responsável pela perda de 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano (FAO, 2015). Em condições tropicais, como na região nordeste do estado de São Paulo - Brasil, a erosão hídrica, tem-se mostrado como o principal fator de degradação do solo, principalmente em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Martinelli e Filoso, 2007; Silva et al., 2012; Medeiros et al., 2016).

Sabendo-se que existe uma forte relação entre uso, manejo, erosão do solo e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Vanwalleghem et al., 2017), o uso de técnicas de conservação do solo e da água é essencial para a conservação dos solos. Para tanto, a previsão das perdas de solo por erosão é uma questão importante na elaboração de um planejamento conservacionista eficaz. Neste sentido, o uso de modelos como o WEPP (Water Erosion Prediction Project), na predição da erosão, pode ser utilizado para estabelecer áreas prioritárias para a conservação.

Apesar do modelo WEPP ser utilizado em vários locais no mundo, trabalhos realizados em solos brasileiros (Cassol e Lima, 2003; Nunes e Cassol, 2008; Tomaz e Fidalski, 2020), demonstram que há pouca informação para uso confiável do WEPP, uma vez que, uma das maiores dificuldades é a falta de informações relativas as erodibilidades do solo, em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r), bem como da tensão cisalhante crítica do solo (τ_c). Sobre esse aspecto, Reichert e Norton (2013) demonstraram que o uso de equação WEPP, para teor de areia < 30% (Flanagen e Nearing, 1995), não foi apropriado para estimar a erodibilidade em entressulcos de

solos altamente argilosos. Nunes e Cassol (2008) também observam a não adequação do modelo, quando estimaram a erodibilidade em entressulcos de três Latossolos no Rio Grande do Sul – Brasil.

Os fatores K_i , K_r e τ_c são influenciados por muitos atributos do solo, dentre os quais a sua mineralogia. A mineralogia da fração argila tem um importante papel na agregação do solo (Reichert et al., 2009), enquanto a estabilidade dos agregados afeta a erodibilidade do solo. Altos teores de caulinita em relação aos de gibsitita podem contribuir para aumentar os valores de erodibilidade do solo (Barbosa et al., 2019). Isto ocorre porque solos cauliníticos têm maior densidade, menor estabilidade dos seus agregados e menor velocidade de infiltração de água, quando comparados aos solos gbsíticos (Ferreira et al., 1999).

Nos trópicos, os solos são altamente intemperizados, com a presença de caulinita, óxidos e hidróxidos de Fe e Al na fração argila (Reichert et al., 2001). Tais características, conferem, principalmente, aos Latossolos, alterações nas relações entre os seus atributos e as erodibilidades K_i , K_r e τ_c . Neste sentido, Flanagan e Nearing (1995) propuseram equações para estimativas de K_i , K_r e τ_c a partir de atributos do solo levantados por Elliot et al. (1989) nos EUA, as quais foram incorporadas no WEPP. Barbosa et al. (2019) estimaram a partir de atributos do solo os valores de K_i e K_r para Latossolos, no nordeste do estado de São Paulo, utilizando as equações de Flanagan e Nearing (1995).

A respeito da adequação do WEPP, para obtenção de dados confiáveis, tem-se observado diferenças significativas dos valores estimados de K_i e K_r , no campo e no laboratório, como estabelecido por Reichert e Norton (2013). Assim, parâmetros de erodibilidade para modelos de erosão com concepção física, como o WEPP, devem ser determinados em campo para solos tropicais, e novas equações carecem serem desenvolvidas para estimar esses valores com base nas propriedades dos solos tropicais.

Além do uso de modelos para a predição da erosão, o uso de mapas é uma ferramenta importante, que pode servir de subsídios para estabelecer áreas prioritárias quanto a conservação do solo, ou seja, áreas com necessidades de manejo específico (Barbosa et al, 2019). Caso semelhante, quanto a estabelecer zonas específicas de manejo, foi o demonstrado por Tomaz e Fidalski (2020), para

solos tropicais sob cultivo convencional, em uma área com a seguinte sequência de classes de solos: 1) Latossolo Vermelho típico (Próximo ao topo); 2) Argissolo Vermelho abrupto (meio da encosta); 3) Neossolo Quartzarênico (deposição da encosta). A posição do solo ao longo da área e o conteúdo total de areia foram as melhores explicações para o aumento da erodibilidade em entressulcos do topo para a deposição da encosta.

Considerando-se o exposto, os objetivos deste trabalho foram: i) determinar a erodibilidade em entressulcos (K_i) de três latossolos argilosos, em condições de campo, para uso no WEPP; ii) estimar K_i a partir de atributos do solo; 3) acessar a variabilidade espacial dos valores estimados em área experimental no nordeste do estado de São Paulo, Brasil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Erodibilidade do solo (K)

O processo de erosão hídrica do solo é um dos grandes problemas ambientais do mundo e, apesar de ser um fenômeno natural, as atividades antrópicas têm contribuído com a intensificação desse processo. Sabe-se, que vários fatores podem interferir na erosão hídrica do solo, desta forma, Wischmeier e Smith (1965) propuseram a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), na qual avalia alguns parâmetros como a erosividade da chuva (R); erodibilidade do solo (K); comprimento de rampa (L); declividade de rampa (S); cobertura vegetal (C) e práticas conservacionistas (P). Tais parâmetros podem auxiliar na predição de perda de solo e no planejamento agrícola no controle da erosão.

Dentre esses parâmetros, a erodibilidade (K) do solo, representa a susceptibilidade aos processos erosivos, na qual, sua maior ou menor vulnerabilidade dependerá das características intrínsecas que o solo apresentará (Raimo et al., 2019). Alguns atributos, tais como a textura, teor de água no solo, resistência a penetração do solo, o teor de óxidos de ferro, juntamente com outras características, como a mineralogia da fração argila, a quantidade e a natureza dos cátions, o conteúdo de matéria orgânica, as ações de microrganismos e das raízes (Martins Filho, 1999;

Martins Filho, 2008; Franco et al., 2012), deixam evidente que a erodibilidade não expressa valor constante para cada solo.

A textura do solo, de caráter físico, representa a distribuição granulométrica (% de areia, silte e argila), e está intimamente ligada a resistência à erodibilidade, por afetar os processos de desagregação e transporte (Bocuti et al., 2019). A mineralogia, responsável pela estrutura, a qual, atribui ao solo diferentes propriedades físicas, entre elas densidade, permeabilidade e coesão (Barbosa et al., 2019; Thomaz e Fidalski, 2020), confere maior ou menor K. Isso por que, o teor de óxidos de ferro, alumínio e matéria orgânica, permitem a maior estabilidade aos agregados no solo, além disso, o teor de matéria orgânica, também, implica diretamente na capacidade de infiltração e permeabilidade da água no solo erosivos (Correa et al., 2018; Bocuti et al., 2019), o que reflete sua vulnerabilidade aos processos.

Diante de tais características, a erodibilidade do solo pode ser classificada de duas maneiras: em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r), ocorrendo de forma independente um do outro, e quando são realizadas predições de perda de solo, é possível trabalhar técnicas de manejo e práticas conservacionistas apropriadas.

2.1.1 Erodibilidade em entressulcos (K_i)

A erodibilidade em entressulcos (K_i) é definida como a facilidade que um solo tem em sofrer desagregação das suas partículas, em decorrência do impacto da gota da chuva, com consequente transporte, pelo escoamento superficial laminar ou fluxo superficial fino (Vaezi et al., 2018). Sua determinação pode ser feita por meio de experimentos à campo, utilizando-se de chuva natural ou simulada, ou de forma indireta, estimando-a a partir de análise de regressão.

A quantificação do K_i , à campo, envolve altos custos e demanda tempo, para que a coleta de dados necessária seja alcançada (Martins et al., 2011; Eduardo et al., 2013; Dantas et al., 2014). Por esse motivo, tem-se adotado métodos indiretos, para predição da erodibilidade, por meio de modelos matemáticos, sendo utilizadas variáveis, que se correlacionam com a resistência do solo de forma direta ou indireta (Mirzaee et al., 2019; Brito et al., 2019).

Estudos desenvolvidos em solos tropicais, os quais, apresentam maior acréscimo de teores de argila total, óxidos de ferro e carbono orgânico, demonstram que há uma tendência em diminuir o fator erodibilidade (Nunes e Cassol, 2008; Nunes e Cassol, 2011; Franco et al., 2012; Thomaz e Fidalski, 2020), o que permite utilizar esses atributos para estimar a K_i . Essa característica ocorre porque o carbono orgânico e os óxidos de ferro, operam como agentes cimentantes no processo de formação de agregados, permitindo maior resistência dos solos aos impactos das gotas de chuva (Bocuti et al., 2019), tornando-os, assim, mais estáveis e dificultando o seu transporte pelo escoamento superficial.

Ao analisar o K_i , utilizando três diferentes Latossolos, com classe textural muito argilosa, Nunes e Cassol (2008) obtiveram $0,76 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$, para o Latossolo Vermelho aluminoférrico, $0,97 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$, para o Latossolo Vermelho aluminoférrico, e $1,48 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$, para o Latossolo Vermelho distrófico, e demonstraram que a variação no K_i tem relação com a variação no conteúdo de argila e de óxidos de ferro de baixa cristalinidade. Barbosa et al. (2019) também constatou que esses atributos, resultam em diferentes níveis de estabilidade dos agregados, obtendo como valor médio de K_i , o equivalente a $3.340 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$.

Já Thomaz e Fidalski (2020), testando a taxa de erodibilidade de três diferentes classes de solo arenoso, dentro os quais, um se encontra sobre Latossolo Vermelho típico, com K_i igual a $1,58 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$, concluíram que a resposta a erodibilidade é atribuída às propriedades físico-químicas intrínsecas, como o teor total de areia e seu tamanho. Sobre a variação de K_i quanto aos atributos físicos, Bocuti et al (2019) discorre que o grau de correlação do K_i com os atributos físicos, tende a ser expressivo quando os solos são agrupados pela classe textural.

2.1.2 Erodibilidade em sulco (K_r)

A erodibilidade em sulco, representa a susceptibilidade do solo ao desprendimento das partículas de forma laminar, contudo, este desprendimento está associado ao fluxo superficial concentrado (Dantas et al., 2014). A mensuração do K_r , também pode ser realizada através de experimentos sob chuva artificial ou natural, ou

estimados, com base nas propriedades químicas e físicas, por meio de equações matemáticas (Costa, 2015; Barbosa et al., 2019).

Assim como na K_i , os atributos do solo também são responsáveis pela variação no K_r , e para sua melhor compreensão, é necessário entender os diversos fatores que interferem nesse processo, e que acabam por expressar valores distintos (Teixeira 2017). Dentre estes, a influência da mineralogia do solo tem sido observada em diversos trabalhos.

Como resultado de alto grau de intemperismo, os Latossolos brasileiros, além de bem estruturados fisicamente, possuem na fração argila, diferentes proporções de caulinita, óxidos de alumínio (gibbsita) e óxidos de ferro (goethita, hematita, maghemita) (Camargo et al., 2014), influenciando sobre a estabilidade dos agregados do solo.

A respeito do valor de K_r em latossolos, Costa (2015) obteve valor equivalente a $0,0025 \text{ s m}^{-1}$ para o latossolo vermelho distroférico, textura argilosa. Ao estudar quatro tipos de latossolos, em duas unidades de experimentação na região de Jaboticabal, Alcantara (2018) exibiu variações no K_r , onde os valores determinados foram de $0,0094 \text{ s m}^{-1}$ para o latossolo vermelho distrófico; $0,0046 \text{ s m}^{-1}$ para o latossolo Vermelho estrófico; $0,0035 \text{ s m}^{-1}$ e $0,0042 \text{ s m}^{-1}$ para o latossolo vermelho eutroférico, de diferentes áreas. O autor ressalta que o teor de óxido de ferro no solo, tem relação direta com a variação de K_r , sendo que, quanto menor o teor, maior será seu valor.

Devido as características peculiares atribuídas para cada solo, a erodibilidade em sulco pode não expressar valor constante. Contudo, Barbosa et al. (2019) ao mapear a erodibilidade de latossolos com diferentes teores de ferro, em Guataporã, Estado de São Paulo, afirma que solos mais cauliniticos e com conteúdo expressivo de areia, tendem a apresentar maiores valores de erosibilidade em sulco.

2.2 Tensão cisalhante critica (τ_c)

A tensão cisalhante crítica, assim como, a erodibilidade é um fator de grande significância para determinação da capacidade de resistência do solo à erosão. Considerada como um dos principais índices quando se analisa a resistência à

erosão, corresponde a tensão máxima que o solo recebe sem que haja remoção de suas partículas (Knapen e Poesen, 2010). Por isso, quando a tensão cisalhante provocada pelo escoamento se torna maior que a resistência crítica do solo, ocorre a desagregação das suas particuladas (Enriquez et al., 2015; Teixeira, 2017).

O comportamento da tensão cisalhante crítica do solo está intimamente ligado as suas propriedades físico-químicas, indiciando variações próprias correlacionadas com a classe textural. Nesse sentido, identificando a τ_c de diferentes solos de estradas não pavimentadas, Oliveira et al. (2009) obtiveram valores variados para os solos com texturas diferentes: 2,08 Pa no arenoso; 3,74 Pa no franco argilo arenoso; 3,78 Pa no argilo arenosa; 3,93 Pa no franco argiloso; 4,87 Pa no franco arenoso.

Ao analisar a resistência em um canal de drenagem construído em uma estrada não pavimentada implantada sob Latossolo Vermelho Amarelo, com classe textural argilosa, Enriquez et al. (2015) alcançaram como resultado uma τ_c equivalente a 7,61 Pa. Este valor também está próximo ao obtido por Griebeler et al. (2005) que apresentou τ_c de 7,5 Pa, para um solo com características similares. Por outro lado, Costa (2015) encontrou em um Latossolo com textura argilosa de 2,5 Pa.

A respeito dessa variação, nos valores de tensão cisalhante crítica, Teixeira (2017) ponderou que a τ_c pode estar relacionada com o grau de compactação que o solo apresenta, assim como, a sua variação mineralógica, uma vez que, solos com menores teores de ferro tem potência de compactação maior, e esse aumento da compactação influencia diretamente na tensão cisalhante crítica. Isto explicaria as diferenças de valores de τ_c .

2.3 Mineralogia do solo

Os Latossolos brasileiros são caracterizados pelo alto grau de intemperismo, o qual implica em uma acentuada perda de sílica e de bases (Ca, Mg, K, Na) no perfil do solo, com acumulação residual de óxidos de ferro e, ou de alumínio (EMBRAPA, 2013). Nesse sentido, os Latossolos possuem na sua constituição, os minerais caulinita, óxidos de alumínio (gibbsita) e óxidos de ferro (goethita, hematita, maghemita), em maior ocorrência, porém, em distintas proporções (Camargo et al.,

2014), devido a diferentes fatores no processo de intemperização, dando a estes solos diferentes composições mineralógicas.

Devido sofrerem grandes perdas de silício, a maior presença dos óxidos se dá devido à maior solubilidade desse mineral em relação ao Fe e ao Al, ou seja, existe uma menor ocorrência de minerais silicatados nos Latossolos (Schaefer et al., 2008). Além disso, a presença destes minerais não se dá de maneira homogênea, pois, a variação dos seus teores são atribuídos às distintas composições químicas e mineralógicas dos materiais de origem, clima das áreas de ocorrência, condições de drenagem e remoção de Si do solo (Ghidin et al., 2006; Camargo et al., 2008).

Diante do exposto, Ferreira et al. (1999) concluíram que os minerais caulinita e gibbsita são responsáveis pela estrutura dos Latossolos, tal que ambos possuem distinta influência, quanto as suas estruturas físicas. O primeiro, tende a apresentar solos com maior densidade, maior proporção de poros pequenos, e menor permeabilidade. Já os Latossolos gibbsíticos, possuem menor densidade, maior proporção de poros grandes e maior permeabilidade. Essa característica evidencia a importância de se compreender o comportamento destes atributos, nas características físicas e como refletem sobre os processos erosivos.

Uma vez que a estabilidade dos agregados influencia a desagregação do solo, pelo impacto das gotas da chuva, também é fundamental compreender a relação do tipo de estrutura do solo sobre a estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, na erodibilidade. Segundo Silva et al. (2009), Latossolos com predominância de minerais gibbsita, apresentam baixo valor de erodibilidade, uma vez que, ao estarem associados aos maiores teores de óxidos de Fe e C orgânico, contribuem no processo de formação dos agregados, agindo como agentes cimentantes, e, assim, permitindo maior resistência dos solos.

Quanto a correlação entre o teor de óxidos de ferro e o fator erodibilidade, Nunes e Cassol (2008) corroboram ao afirmar que a baixa erodibilidade em entressulcos, deve-se, possivelmente, aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade, por serem mais efetivos na estabilidade dos agregados do que os óxidos de ferro cristalinos (ex. goethita e hematita). Lima e Andrade (2001), também observam positiva e significativa correlação da erodibilidade com a caulinita, indicando que Latossolos com a

predominância desse mineral demonstram maior susceptibilidade em à erosão em entressulcos.

Outro ponto interessante a respeito da variação mineralógica, diz respeito a tensão cisalhante crítica do solo, que é fator importante para entender a resistência do solo aos processos erosivos. Teixeira (2017) discorreu que o teor de Fe tem relação direta com a compactação e, conseqüente, influência sobre a tensão cisalhante crítica do solo. Segundo Rossetti et al. (2015) solos com menor teor total de ferro, próximo de 50 g kg^{-1} , apresentam potencial de compactação, chegando a ser 40% maior, logo, o aumento da compactação repercutirá sobre a tensão cisalhante crítica do solo.

Diante do exposto, é evidente a necessidade de compreender a influência da mineralogia na erodibilidade (em sulcos e entressulcos) e na tensão cisalhante crítica do solo para os Latossolos Brasileiros. Tal conhecimento, é ainda mais relevante uma vez que os atributos mineralógicos não se distribuem de maneira homogênea espacialmente (Camargo et al., 2008), o que justifica investigar K_i e K_r , por exemplo, para assim, auxiliar na escolha adequada de áreas e práticas de manejo no uso agrícola do solo.

2.4 Water Erosion Prediction Project – WEPP

A necessidade de planejar o manejo e a conservação do solo e da água, para garantir o melhor uso e produtividade da terra, motivou pesquisadores do mundo a buscar por ferramentas que auxiliassem no processo de avaliação dos diferentes cenários de manejo do solo. Dentro deste contexto, criou-se um dos modelos matemáticos para predição da erosão mais conhecidos no mundo, o Water Erosion Prediction Project – WEPP (Flanagan e Nearing, 1995). Esse modelo permite estimar as perdas de solo e água por erosão hídrica com base em processos físicos.

Contudo, assim como a maioria dos métodos e equações utilizados para prever a erosão hídrica do solo, o modelo WEPP foi pensado e desenvolvido para solos de regiões de clima temperado. Nesse sentido, a principal limitação, quanto a sua aplicação em solos com características distintas, é a falta de dados calibrados e validados exigidos como elementos de entrada no WEPP (Machado et al., 2003;

Martins Filho, 2009). Desse modo, justifica-se a importância de realizar ajustes, ou mesmo, criar equações que possam ser aplicadas para estimação de fenômenos envolvidos nos processos erosivos.

O WEPP, baseia-se nas teorias fundamentais de infiltração, hidrologia, hidráulica, física do solo, mecânica da erosão e fitotecnia (Machado et al., 2003). Por esse motivo, é dividido conceitualmente em seis componentes, para estimar os fenômenos do processo erosivo, os quais podem ser descritos, com base nos trabalhos de Machado et al. (2003), Amorim (2004), Gonçalves (2008) e Moraes (2016), em: hidrológico, crescimento de plantas e decomposição de resíduos, balanço hídrico, hidráulica, solo e erosão do solo.

O componente hidrológico tem como característica a sua divisão em outros três componentes: clima, inverno e hidrologia de superfície e subsuperfície (Gonçalves, 2008). Para a aplicação do componente clima, são usados dados climáticos diários, logo, o WEPP utiliza o programa CLIGEN (gerador climático estocástico) para gerar as informações climáticas necessárias (Machado et al., 2003). Quanto ao componente inverno, não se aplica as condições tropicais, uma vez que se utiliza de dados de congelamento do solo, acúmulo e derretimento de neve (Gonçalves, 2008).

Para a aplicação do componente hidrológico de superfície e subsuperfície, a base de dados corresponde à taxa de infiltração, escoamento superficial e balanço hídrico diário, incluindo a evapotranspiração e a percolação profunda (Amorim, 2004).

O componente crescimento de plantas e decomposição de resíduos, estima o crescimento da planta, sua senescência, assim como a decomposição dos resíduos obtidos pelos tratamentos culturais (Machado et al., 2003). As condições da cobertura vegetal e dos resíduos das culturas abaixo e acima do solo são usados para avaliar o desprendimento e arraste das partículas do solo. Nesse sentido, dados de entradas como biomassa, altura e cobertura da copa, índice de área foliar, área basal da planta e práticas de manejo do solo, estão entre os parâmetros exigidos para a determinação desse componente (Gonçalves, 2008).

O balanço hídrico é componente fundamental para estimar a infiltração, o escoamento superficial e a tensão cisalhante do escoamento superficial. Assim, para estimá-lo, são utilizadas informações de outros componentes como clima e hidrologia e o desenvolvimento de plantas (Amorim, 2004).

Quanto a componente hidráulica, o que se pretende é determinar o valor da tensão cisalhante do escoamento superficial, o qual, atua sobre o solo, repercutindo sobre o desprendimento das suas partículas. Nesta componente um parâmetro a ser incluso também é o coeficiente de rugosidade da superfície (Moraes, 2016).

A respeito do componente solo, os parâmetros para a estimação são pautados nas propriedades do solo, que influenciam na infiltração, escoamento superficial e o processo erosivo. Esses parâmetros também apresentam um dinamismo em função dos efeitos das práticas de manejo do solo, intemperismo e histórico da precipitação, os quais, podem ser reajustadas, em função do tempo, das operações de cultivo e dos processos hidrológicos (Machado et al., 2003).

Para o componente erosão do solo, há uma divisão em erosão entressulcos e em sulcos. Esta componente, por trabalhar com estimativas de desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, possui parâmetros fundamentados nas propriedades do solo, tais como a erodibilidade em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r), e tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), uma vez que estão relacionados a resistência à erosão (Machado et al., 2003).

Estudos realizados no Brasil, com o intuito de comparar e avaliar o desempenho do modelo WEPP e parte de suas equações, sob condições tropicais (Machado et al., 2003; Nunes e Cassol, 2008; Amorim et al., 2010; Tomaz e Fidalski, 2020), demonstraram que é necessário calibrar algumas equações e validá-las, para que haja uma melhor eficiência no uso do WEPP. Os referidos estudos, também confirmaram que existe uma ausência de informações para o uso confiável do WEPP, relativas a erodibilidade do solo (K_i e K_r), especialmente para os Latossolos brasileiros.

Nesse sentido, é importante que se obtenha uma base de dados de entrada, para validar o modelo WEPP, e assim, garantir seu efetivo uso em solos tropicais. A respeito da validação do modelo para Latossolos, Nunes e Cassol (2008) observam a não adequação do modelo, quando estimaram a erodibilidade em entressulcos de três Latossolos no Rio Grande do Sul – Brasil. Do mesmo modo, Reichert e Norton (2013) também demonstram que o uso de equações do WEPP, para solos com teor de areia < 30%, não foi apropriado para estimar a erodibilidade em entressulcos de solos altamente argilosos. Por outro lado, Barbosa et al. (2019) ao avaliar a eficiência da suscetibilidade magnética de Latossolos, com diferentes teores de ferro, em uma área

com cultivo de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, aplicando equações do modelo WEPP para estimar K_i e K_r , obteve como resultado uma precisão de 85% para Latossolos com teor de ferro total variando de 1 a 20%.

2.5 Geoestatística: Krigagem, variograma e distribuição normal

Vários métodos têm demonstrado eficiência para avaliar a perda de solo, a tensão cisalhante e a erodibilidade do solo, tendo em vista propriedades dinâmicas sujeitas as variações temporais e espaciais. O uso da geoestatística, apresenta-se como uma ferramenta eficiente para auxiliar na compreensão da variabilidade espacial. Ela apresenta como ponto de partida um conjunto de observações de natureza quantitativa e qualitativa, que são usadas para inferir as propriedades do fenômeno espacial em estudo, objetivando caracterizar, espacialmente, uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial, com determinação das incertezas associadas (Yamamoto e Landim, 2013).

De acordo com Siqueira (2010), a dependência espacial pode ser estimada com medidas de autocorrelação e da semivariância, a partir dos gráficos em função da distância, modelando a dependência espacial. O autor discorreu que existem várias técnicas para a validação de um semivariograma, tal que as mais frequentes são: coeficiente de determinação (r^2), validação cruzada (Isaaks e Srivastava, 1989) e Jack-Knifing (Vieira, 1995). Com o uso destas técnicas modelagem é possível fazer estimativas de valores da variável para pontos não amostrados, por meio de interpoladores.

Dentre as técnicas de interpolação, a Krigagem se destaca como uma das mais complexas e usuais, pois emprega o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações. Utilizando o princípio da Primeira Lei de Geografia de Tobler, a qual descreve que unidades de análise mais próximas entre si são mais parecidas do que unidades mais distantes, a krigagem usa funções matemáticas para adicionar pesos maiores nas posições mais próximas aos pontos amostrais, e pesos menores nas posições mais distantes, criando novos pontos interpolados com apoio nas combinações lineares de dados (Jakob, 2002).

Diferente dos métodos tradicionais de estimativa, por médias ponderadas ou médias móveis, a krigagem, ao realizar estimativas de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base nos valores vizinhos quando considerados interdependentes, apresenta estimativas não tendenciosas e eficiência (Yamamoto e Landim, 2013), isso porque os pesos atribuídos às diferentes amostras são determinados a partir de uma análise de correlação espacial, baseada no semivariograma (Camargo et al., 2004).

Devido essas características, a Krigagem tem auxiliado em diversos estudos voltados para o manejo do solo, o qual, pode-se observa o uso para estimar e mapear a variabilidade espacial do K de diferentes classes de solo, com o intuito de definir áreas susceptíveis à erosão e, ordens e características de solos que regem suas variações (Raimo et al., 2019). Dentre o conjunto de métodos que a técnica engloba, destacam-se a krigagem Ordinária.

A krigagem ordinária é comumente utilizada, uma vez que usa a informação estrutural fornecida pelo modelo do variograma, fornece estimativas imparciais de uma variável, com variação mínima (Souza, 2014; Raimo et al., 2019), permitindo representar com mais qualidade a variabilidade espacial inerente à propriedade em estudo (Camargo et al., 2004). De acordo com Grego e Oliveira (2015), o método considera que não há necessidade de conhecer o valor da média, sendo o valor da média constante, porém desconhecida.

Sendo um suporte básico da krigagem, o variograma refere-se à variabilidade, cuja ferramenta de análise é uma função do semivariograma, que por sua vez, é responsável por medir a variância entre pontos de uma amostragem, separados por uma distância. Dessa forma, a função permite entender que amostras próximas, tendem a apresentar uma variância menor, já que são mais parecidas entre si, por outro lado, quanto mais afastadas forem as amostras, mais seus valores deverão ser diferentes (Grego e Oliveira, 2015).

O ajuste da função do semivariograma a ser utilizada, é uma das etapas mais importantes para efetuar a Krigagem, pois quando os parâmetros utilizados não são estimados com precisão, o modelo poderá fornecer informações distorcidas (Camargo et al., 2004). A normalidade dos dados, é uma característica que também deve ser levada em consideração. Quando a distribuição se mostra com acentuada assimetria,

torna-se necessário transformá-los, para que sejam simétricos, ou seja, assumam uma distribuição normal. Segundo Yamamoto e Landim (2013), quanto mais simétricos os dados forem em torno da média, melhores serão as estimativas dos erros.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Microbacia Hidrográfica do Córrego Jaboticabal, compreendendo especificamente a área da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção (FEPP) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Figura 1), no município de Jaboticabal, região Nordeste do Estado de São Paulo. A microbacia ocupa uma área de 74 km², com coordenadas em latitudes Sul 21° 04' a 21° 21' e longitudes Oeste de Greenwich 48° 08' a 48° 26'. As altitudes variam entre 480 a 630 m.

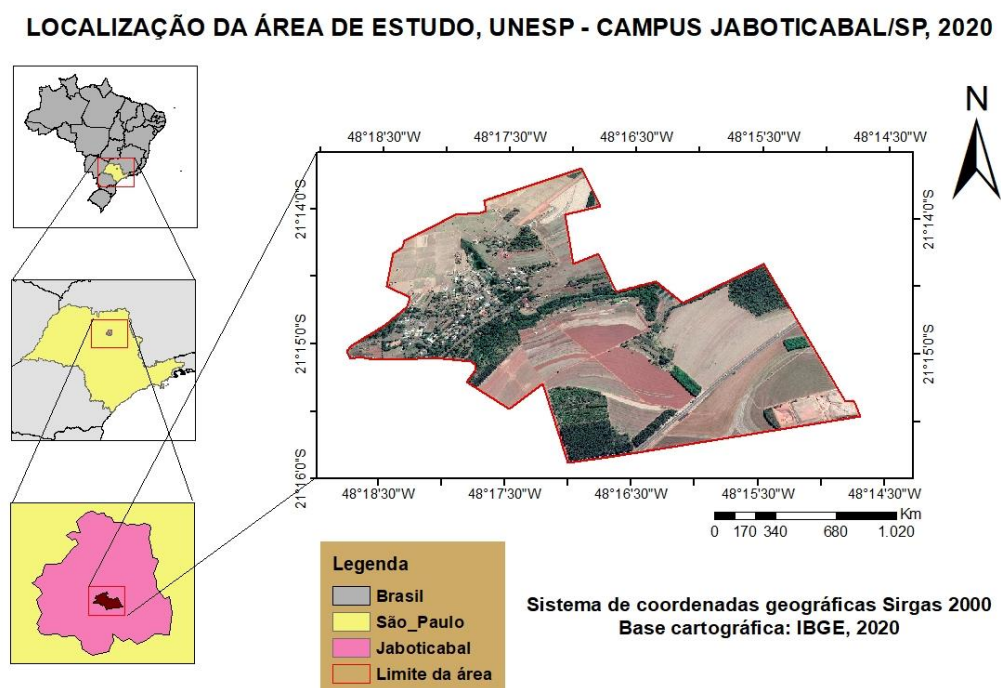


Figura 1: Mapa de localização da Universidade Estadual Paulista - UNESP Campus Jaboticabal.

O clima da região, pela classificação de Köppen, é considerado Aw, com inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média anual em torno de 22,3°C. A precipitação pluviométrica média é ao redor de 1.206,5 mm anuais, com umidade relativa do ar oscilando entre 80,2 % em períodos mais húmidos, e 40,0 % em períodos mais secos (UNESP, 2017).

A topografia local é suavemente ondulada na maior parte da área, sendo que a declividade média fica em torno de 5%. Já nas partes baixas e nos encaixes da drenagem os valores da declividade podem chegar até 13%. A cobertura vegetal primária é do tipo floresta estacional semidecidual tropical e trechos de cerrado (Veloso et al., 1991), pertencentes ao bioma Mata Atlântica. O material geológico está inserido em faixa de transição (arenito-basalto) e é constituído por arenitos do Grupo Bauru, formação Adamantina e basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, e material trabalhado arenito e basalto (Cunha, 2000).

Os solos da FEPP (LV₁, LV₂, LV₃) foram classificados no sistema da Embrapa (2013) como: LV₁ - Latossolo Vermelho distrófico; LV₂ - Latossolo Vermelho distrófico; LV₃ - Latossolo Vermelho eutroférico. Atributos destes Latossolos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos, mineralógicos e matéria orgânica dos solos na profundidade de 0,00 a 0,20 m.

Solo	Argila	Silte	AMG	AG	AM	AF	AMF	MO	Ct/(Ct+Gb)	Gt/(Hm+Gt)	Fe ₂ O ₃	ρ_r	ρ_s
----- g kg ⁻¹ -----											g kg ⁻¹	--- Kg m ⁻³ ---	
LV ₁	307	50	0	27	195	345	76	19	0,79	0,13	69	2,51	1,72
LV ₂	451	76	0	81	255	114	23	24	0,62	0,10	101	2,62	1,32
LV ₃	488	245	3	23	74	97	70	30	0,47	0,14	209	2,66	1,10

LV₁ é Latossolo Vermelho distrófico; LV₂ é Latossolo Vermelho distrófico; LV₃ é Latossolo Vermelho eutroférico; AMG é areia muito grossa; AG é areia grossa; AM é areia média; AF é areia fina; AMF é areia muito fina; MO é material orgânica; Ct é caulinita; Gb é Gibbsita; Fe₂O₃ é o teor de óxido de ferro pelo ataque sufúrico; ρ_r é a densidade de partículas; ρ_s é a densidade do solo. Fonte: Centurion (1998); Martins Filho (1999); Camargo et al. (2014).

3.2 Erodibilidade em entressulcos

Para o cálculo de erodibilidade, um experimento foi conduzido na FEPP num delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), num esquema fatorial (3

x 3) constituído por três classes de solos (LV₁, LV₂ e LV₃, Tabela 1) e três declives (5%; 9% e 15%) e 4 repetições, totalizando 36 parcelas.

Parcelas experimentais, com 0,50 m de largura e 0,75 m de comprimento (0,375 m²), foram delimitadas com chapas metálicas nas laterais e parte superior, e por calhas coletoras metálicas em seus limites inferiores, nos três solos. As calhas coletoras, com 0,50 m de largura, convergiam para uma saída lateral de 0,065 m de diâmetro. Amostras de enxurrada foram coletadas nestas calhas para quantificar as perdas de solo e água. Todas as parcelas foram alinhadas no sentido da declividade do terreno: 5%, 9% e 15%. O preparo do solo também foi realizado no sentido do declive.

As parcelas experimentais foram submetidas a chuvas simuladas com intensidade média em torno de 65 mm h⁻¹ (I), durante 65 minutos. Utilizou-se, para realizar as referidas precipitações, um simulador de chuvas de hastes rotativas do tipo Swanson, com bicos *veejet* 80-100, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por Swanson (1965). Trinta e seis pluviômetros, alinhados no sentido do declive, na área de ação do simulador de chuvas, como descrito em Silva et al. (2012), foram utilizados para determinar as intensidades das precipitações produzidas pelo simulador, nas áreas ocupadas pelas parcelas experimentais.

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos foram realizadas no quinto minuto após o início da enxurrada e, a partir daí, a cada cinco minutos. Amostras foram coletadas em recipientes de vidro com capacidade de 1 L, cronometrando-se o tempo de coleta. Logo após as coletas, os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório para a quantificação da concentração de sedimentos e volume de solução, e consequente determinação das taxas de perdas de solo e água. Os volumes de solução coletados foram avaliados gravimetricamente, em balança com resolução de 0,01 g, e, em seguida, as amostras foram deixadas em repouso por 24 horas para a deposição de sedimentos. Após o período de repouso de 24 horas, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C até secagem completa. Após secagem, as amostras foram pesadas, determinando-se o peso de sedimento de cada uma. A concentração de sedimentos foi obtida considerando-se o volume da solução, a densidade da água e do sedimento na solução, conforme descrito por Vanoni (1975).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram determinadas como:

$$D_i = m_s / (t A) \quad (1)$$

em que, m_s = massa de solo desagregado (kg), t é o tempo de coleta (s) e A é a área da parcela (m^2).

Os valores de D_i obtidos, nos 15 últimos minutos das amostragens de enxurrada, foram utilizados para se estabelecer a erodibilidade em entressulcos (K_i). Para isto, utilizou-se a equação adotada no WEPP por Flanagan et al. (1995):

$$K_i = D_i / (I R S_f) \quad (2)$$

em que, D_i é a taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), I é a Areintensidade da chuva (m s^{-1}), R é a taxa de enxurrada (m s^{-1}) e S_f é o fator declive.

O S_f foi calculado como proposto por Liebenow et al. (1992):

$$S_f = 1.05 - 0,85 e^{-4 \text{ sen}\theta} \quad (3)$$

em que, e é a base dos logaritmos naturais, e θ é o ângulo do declive em graus.

Valores de K_i também foram estimados com as equações do modelo WEPP propostas por Flanagan e Livingston (1995):

$$K_i = 2728000 + 192100 \text{ AMF} \quad \text{Areia} \geq 30\% \quad (4)$$

$$K_i = 6054000 - 55130 \text{ Arg} \quad \text{Areia} < 30\% \quad (5)$$

em que, AMF é o percentual de areia muito fina (%); Arg é o percentual de Argila (%).

3.3 Análise dos dados

As análises estatísticas foram realizadas com o programa Statistica (Statsoft, 1994) e as análises geoestatísticas com o programa GS+ versão 7.0 (Robertson, 2004). Análises geoestatísticas do K_i , foram realizadas seguindo-se metodologia descrita por Vieira et al. (1983) e Robertson (1998), na qual apresentam-se em três etapas: 1) análise espacial para obter o semivariograma; 2) escolha de modelo e ajuste do semivariograma e 3) obtenção de valores das variáveis em estudo, por

técnicas de interpolação. No ajuste do semivariograma, utilizou-se dados dos 69 pontos amostrais georreferenciados coletados em campo. Critérios como o maior coeficiente de determinação (R^2) e a menor soma de quadrados do resíduo (SQR) foram adotados para a escolha do modelo do semivariograma. A partir da técnica de krigagem ordinária (KO) foram elaborados mapas utilizando-se o software Surfer versão 8 (Barbosa et al, 2019).

Para os testes de validação dos modelos propostos na literatura e ajustados, no presente trabalho, utilizou-se parâmetros estatísticos propostos por Loague e Green (1991) e Lengnick e Fox (1994) e Vanuytrecht et al. (2016) tais como: Erro médio quadrático relativo (RRMSE),

$$\text{RRMSE} = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} (100/O) \quad (6)$$

Eficiência do modelo (EF),

$$\text{EF} = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \quad (7)$$

Coeficiente de massa residual (CRM),

$$\text{CRM} = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (8)$$

em que, O_i é o valor observado; P_i é o valor predito; i é o índice de 0 a n ; n é o espaço amostral; O é a Média dos valores observados.

Os resultados de valores de K_i foram separados em dois conjuntos quanto ao número de parcelas experimentais, por sorteio: 1) 24 parcelas; 2) 12 parcelas. O primeiro conjunto foi utilizado para obter valores de K_i e relacioná-los aos atributos dos Latossolos. Com o segundo conjunto, independente do primeiro, foram obtidos dados de K_i utilizados na validação dos modelos testados neste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de K_i variaram de 1,20 a $1,80 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ (Tabela 2). O valor médio de K_i foi de $1,50 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ ($LV_1+LV_2+LV_3$), o qual é compatível com valores obtidos por Martins Filho et al. (2003) de $1,41 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ e por Thomaz e Fidalski (2020) de $1,81 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$, em Latossolos de clima tropical no Brasil.

Argila, silte e areia apresentaram teores de 286 a 506 g kg^{-1} , 46 a 252 g kg^{-1} e 253 a 666 g kg^{-1} , respectivamente (Tabela 2). Os resultados indicam que a área não tem conteúdos elevados de MO, os quais são inferiores em média a 30 g kg^{-1} . Tais resultados não corroboram os de Souza et al. (2003), que registraram incrementos no conteúdo de MO pela colheita mecanizada de cana crua, em Latossolos cultivados na região nordeste do estado de São Paulo. A presença de óxidos em concentrações elevadas é típica de solos altamente intemperizados, devido ao elevado nível de pedogênese que promove o acúmulo deles (Alleoni e Camargo, 1995). Os valores da razão $Ct/(Ct+Gb)$ que variaram de 0,3 a 0,8 correspondem aos encontrados em Latossolos na mesma região (Cunha, 2000; Camargo et al., 2008; Camargo et al., 2014). Os desvios padrões elevados para alguns atributos refletem a influência dos materiais parentais, visto que a área da FEPP se encontra num divisor litoestratigráfico basalto-arenito como observado por Peluco et al. (2013).

Tabela 2. Estatística descritiva de atributos de Latossolos na profundidade de 0,00-0,20 m para 24 parcelas experimentais.

Atributo	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão (S)
$K_i \times 10^{-6} (\text{Kg m s}^{-4})$	24	1.5	1.2	1.8	0.2
Argila (g kg^{-1})	24	416	286	506	80.8
Silte (g kg^{-1})	24	123.4	46	252	88.1
Areia (g kg^{-1})	24	460.6	253	666	157.9
MO (g kg^{-1})	24	24.5	18.8	32.2	4.7
Fe_2O_3 (g kg^{-1})	24	126.4	63	231.5	61.5
Al_2O_3 (g kg^{-1})	24	191.9	109	265.5	53.3
SiO_2 (g kg^{-1})	24	120.1	83	149.5	21.4
$Ct/(Ct+Gb)$	24	0.5	0.3	0.8	0.2

K_i é a erodibilidade em entressulcos; MO é a matéria orgânica; Ct é caulinita; Gb é a gibbsita; n é o espaço amostral.

Os atributos K_i e areia apresentaram correlação significativa e positiva com $Ct/(Ct + Gb)$ e negativa com argila, silte, matéria orgânica, Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 (Tabela

3). O teor de areia total foi fortemente correlacionado a erodibilidade em entressulcos por Thomaz e Fidalsjki (2020), pois solos com maiores teores de areia tendem a apresentar menor agregação e em consequência maior selamento superficial sob chuva, o que aumenta a erodibilidade deles. Os resultados para $Ct/(Ct + Gb)$ e Fe_2O_3 corroboram os de Barbosa et al. (2019). K_i não apresentou correlação significativa com AMF.

As correlações negativas e significativas dos óxidos com K_i já eram esperadas e são consistentes com Singer e Le Bissonnais (1998) e Lima e Andrade (2001). Em especial os óxidos de ferro e alumínio contribuem para a formação de uma estrutura granular e mais estável, o que aumenta a permeabilidade em Latossolos e contribuem para reduzir a erodibilidade (Römkens et al. 1977; Singer e Le Bissonnais, 1998; Ferreira et al., 1999). Em solos tropicais altamente intemperizados, os óxidos de Fe e Al são os agentes principais que atuam na estabilidade estrutural (Oades e Waters, 1991). Latossolos mais cauliníticos tendem a ter uma estrutura mais compacta, com alta densidade e baixa permeabilidade (Ferreira et al., 1999). Deste fato, decorre a correlação positiva ente K_i e $Ct/(Ct + Gb)$. Isto, segundo Barbosa et al. (2019), demonstra que solos cauliníticos e com teores expressivos de areia são mais suscetíveis à erosão em entressulcos.

Tabela 3. Matriz de correlação de Pearson para atributos de Latossolos.

	K_i	Argila	Silte	Areia	AMF	MO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
Argila	-0.94								
Silte	-0.81	0.75							
Areia	0.93	-0.93	-0.94						
AMF	0.30	-0.44	0.24	0.09					
MO	-0.91	0.91	0.94	-0.99	-0.07				
Fe_2O_3	-0.86	0.79	0.99	-0.95	0.15	0.93			
Al_2O_3	-0.96	0.96	0.73	-0.90	-0.45	0.86	0.81		
SiO_2	-0.88	0.89	0.51	-0.74	-0.65	0.70	0.60	0.95	
$Ct/(Ct+Gb)$	0.95	-0.94	-0.90	0.99	0.19	-0.97	-0.93	-0.95	-0.81

Valores em negrito foram não significativos.

A argila e a matéria orgânica contribuem como elementos que ligam as partículas do solo originando agregados estáveis (Ben-Hur et al., 1985; Singer e Le Bissonnais, 1998; Carrizo et al., 2015). Deste modo, o aumento do teor de argila no

solo aumenta a estabilidade dos seus agregados (Kemper e Koch, 1966) implicando em maior taxa de infiltração de água e baixa taxa de enxurrada (Ben-Hur et al., 1985). Por tais motivos, justificam-se as correlações negativas entre K_i e argila e matéria orgânica (Tabela 3).

Com o aumento do teor de frações mais finas de silte, Boruvka et al. (2002) verificaram decréscimo significativo na vulnerabilidade à destruição dos agregados do solo por umedecimento, secamento e ação de forças mecânicas. Os resultados da correlação negativa e significativa entre silte e K_i (Tabela 3), para os Latossolos deste trabalho, concordam com os de Boruvka et al. (2002).

A relação entre K_i e areia foi ajustada a um modelo linear a partir de valores médios obtidos em 24 parcelas com a Eq. (9) demonstrada na figura 2, estimou-se valores de K_i para um grupo de doze parcelas distintas das 24 utilizadas no ajuste desta equação. Testes de validação para resultados de K_i obtidos nas 12 parcelas e estimados com as Eqs. (4), (5) e (9) foram conduzidos (Tabela 4).

Quanto a eficiência das Equações (4), (5) e (9), EF, pode-se inferir que a Eq. (9) é, em geral, mais eficiente na predição de K_i para os Latossolos LV₁, LV₂ e LV₃ (Tabela 4). A eficiência da Eq. (9) aponta para um desempenho muito bom pelos critérios de Moriasi et al. (2015), os quais classificaram o desempenho de um modelo como: 1) Muito bom, $EF > 0,80$; 2) Bom, $0,70 < EF \leq 0,80$; 3) Satisfatório, $0,45 < EF \leq 0,70$; 4) Insatisfatório, $EF \leq 0,45$. Logo, pode-se inferir que a equação mais eficiente foi a Eq. (9). A EF não avalia apenas a linearidade dos valores observados, mas também as diferenças relativas entre valores observados e estimados (Risse et al., 1993). Um valor de EF igual a 1,0 indica um modelo perfeito, que não foi o caso. A EF indica se um modelo descreve melhor os dados ($EF > 0$) do que simplesmente a média das observações (Movedi et al., 2019). No caso das Eqs. (4) e (5) estas podem ser consideradas insatisfatórias para estimar K_i . Quando $EF < 1$ o indicativo é que os valores estimados são mais errôneos do que o simples uso da média dos valores observados (Risse et al., 1993).

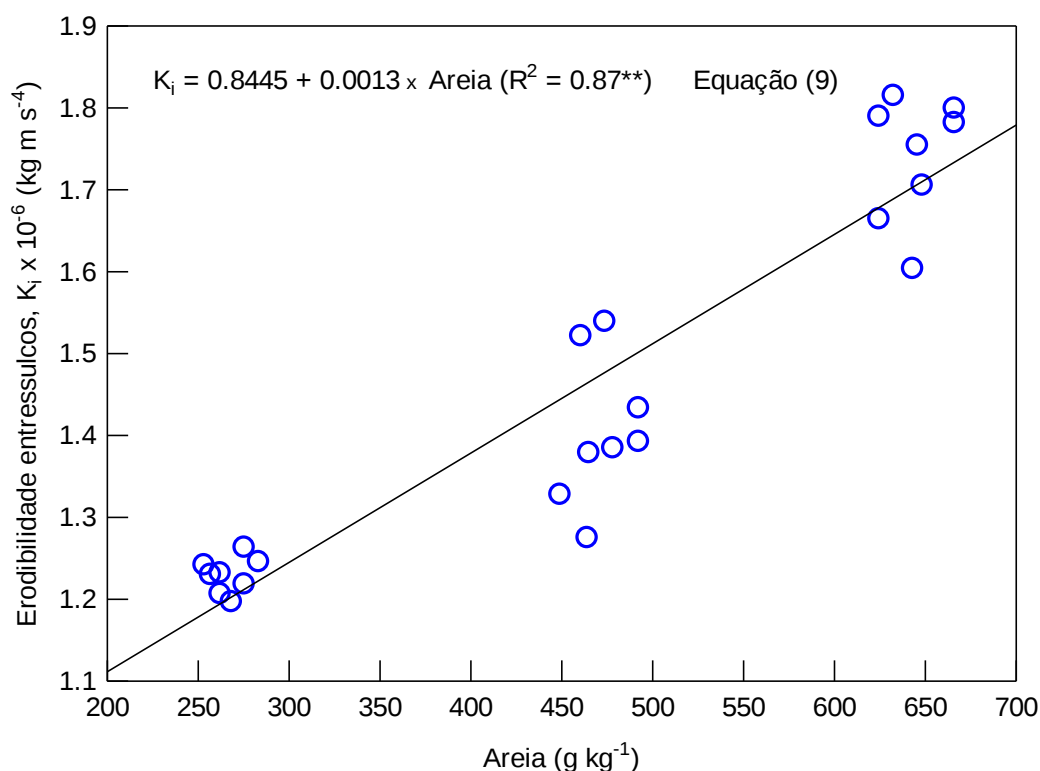


Figura 2. Calibração de regressão para predição da erodibilidade entressulcos a partir do teor de areia.

Tabela 4. Testes de validação das Equações WEPP e ajustada.

K_i	Equações	EF	RRMSE (%)	CRM
$K_{i\text{ WEPP}}$	(4) e (5)	-90.07	150.21	-1.486
$K_{i\text{ (9)}}$	(9)	0.90	4.94	0.004

K_i é a erodibilidade entressulcos; EF é a eficiência do modelo; RRMSE é o erro médio quadrático relativo; CRM é o coeficiente de massa residual.w

Os erros nas estimativas de K_i com as Eqs. (4), (5) e (9) foram baseados no RRMSE, que representa o erro médio quadrático relativo. O RRMSE foi de 150,21% com as Equações do WEPP e de 4,94% com a Eq. (9). No caso das Eqs. WEPP, os valores de RRMSE permitem considerar tais equações como de desempenhos ruins quando $\text{RRMSE} > 30\%$ (Vanuytrecht et al. 2016). Já no caso da Eq. (9), o seu desempenho com $\text{RRMSE} < 10\%$ pode ser considerado excelente (Jamieson et al., 1991; Vanuytrecht et al., 2016). A magnitude dos erros cometidos, ao se estimar valores de K_i com a Eq. (9), foi menor que com as Eqs. WEPP para os Latossolos LV₁, LV₂ e LV₃ (Tabela 1).

Os valores negativos de CRM indicam superestimativas dos valores observados, enquanto $CRM > 0$ indicam subestimativas (Zacharias et al., 1996). Deste modo, valores estimados com as Eqs. (4) e (5) do WEPP superestimaram os valores observados (Tabela 4). Logo, os valores médios de K_i determinados experimentalmente no campo foram inferiores aos estimados com as Eqs. Wepp propostas por Flanagan e Nearing (1995). A coleção de dados de K_i obtidos para 32 solos, nos EUA, por Elliot et al. (1989), a qual deu origem as Eqs. (4) e (5) propostas por Flanagan e Nearing (1995), tinham apenas seis solos com mais de 30% de teor de argila. Os Latossolos testados apresentaram em média mais que 30% de argila (Tabela 1). Para solos muito argilosos, na Austrália, Reichert e Norton (2013) já haviam alertado para o fato das Eqs. (4) e (5) do WEPP não serem adequadas para estimar a erodibilidade em entressulcos. Outra razão pode ser a interação entre os óxidos de silício, ferro e alumínio, presentes no LV_1 , LV_2 e LV_3 , com maior reatividade, o que aumenta a coesão e contribui para a redução da erodibilidade (Silva et al., 1999).

Pelos resultados dos testes de validação (Tabela 4) foi possível admitir que há boa confiabilidade e qualidade de saída no uso da Eq. (9), em termos de valores preditos, ou estimados, quando comparados aos valores observados (Figura 3).

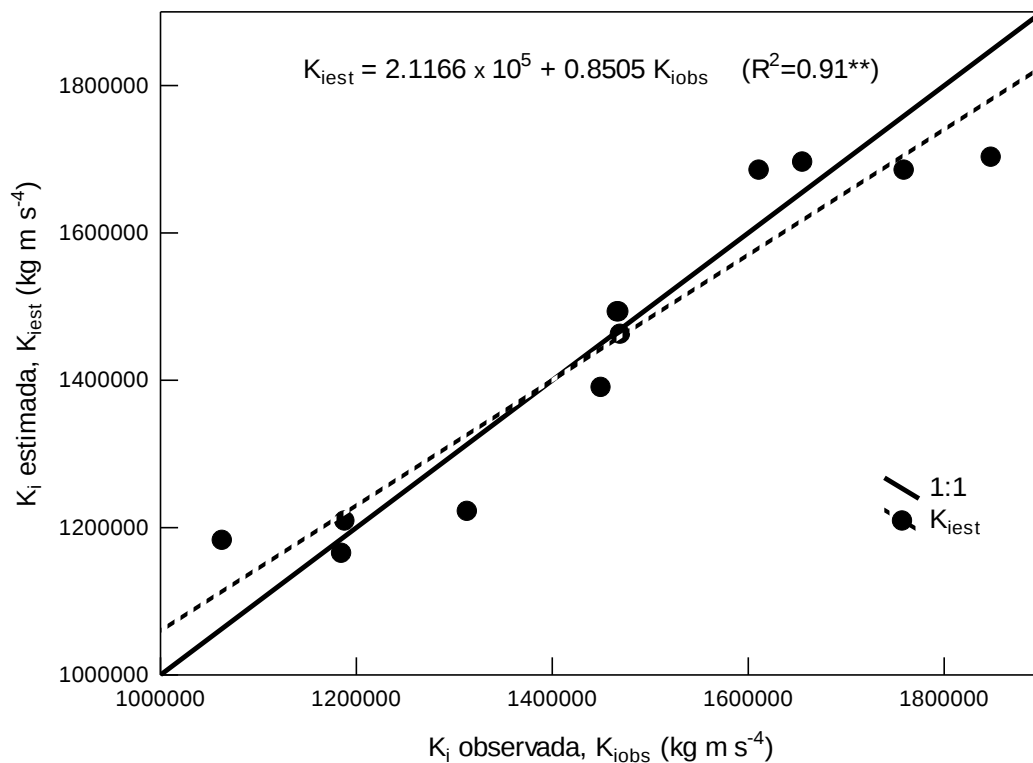


Figura 3. Valores observados e estimados com a Eq. (9) de erodibilidade em entressulcos.

Mediante os resultados da validação e expressos na Figura 3 utilizou-se a Eq. (9) para estimar K_i em 69 amostras de pontos georreferenciados na FEPP. Valores estimados de K_i e observados de areia, argila, $Ct/(Ct+Gb)$ e Fe_2O_3 foram submetidos a análises geoestatísticas (Tabela 5). Aos resultados obtidos ajustou-se semivariogramas para representar a distribuição espacial de K_i e de areia, argila, $Ct/(Ct+Gb)$ e Fe_2O_3 observados na área da FEPP. Os atributos apresentaram dependência espacial, considerando-se critérios de Cambardella et al. (1994), o que permitiu estabelecer a distribuição espacial de cada um deles na área.

A erodibilidade em entressulcos (K_i) e o Fe_2O_3 foram melhores ajustados ao modelo esférico com R^2 igual a 0,97 e 0,98, respectivamente. Já para areia, argila e razão $Ct/(Ct+Gb)$ o melhor ajuste foi com o modelo gaussiano com R^2 de 0,98, 0,93 e 0,95, respectivamente (Tabela 5). Os atributos K_i , areia, argila, a razão $Ct/(Ct+Gb)$ e o Fe_2O_3 apresentaram forte grau de dependência espacial ($C/(C_0+C) \times 100 \leq 25\%$), segundo critérios de Cambardella et al. (1994). Resultados similares para atributos do solo como argila, Fe_2O_3 e K_i foram obtidos por Siqueira et al. (2014) e Barbosa et al. (2019), para outros Latossolos na região nordeste do estado de São Paulo. O alcance

obtido para Fe_2O_3 e K_i são compatíveis com os obtidos por Barbosa et al. (2019). Os demais alcances (a), para atributos texturais, são compatíveis, em termos de ordem de grandeza, com resultados obtidos por Cunha (2000) na área da FEPP.

Tabela 5. Parâmetros dos modelos ajustadas para semivariogramas de atributos do solo.

Atributos	Modelo	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C) \times 100$ (%)	a (m)	R^2	SQR
K_i	Esférico	0.0001	0.0658	0.15	2334	0.97	1.76×10^{-4}
Areia	Gaussiano	1120	11770	9.52	170	0.98	6.22×10^5
Argila	Gaussiano	380	27240	1.40	198	0.93	2.26×10^7
Ct/(Ct+Gb)	Gaussiano	0.00072	0.02234	3.22	169	0.95	6.33×10^{-6}
Fe_2O_3	Esférico	477	2478	19.25	1638	0.98	5.72×10^4

K_i é a erodibilidade em entressulcos, Ct é a caulinita; Gb é a gibbsita; Fe_2O_3 é óxido de ferro; C_0 é o efeito pepita, C_0+C é o patamar, a é o alcance, $C_0/(C_0+C)$ é o grau de dependência espacial, R^2 é o coeficiente de determinação e SQR é soma do quadrado dos resíduos.

A Figura 4 apresenta os mapas de distribuição espacial do conteúdo de areia, argila, Ct/(Ct+Gb), Fe_2O_3 e K_i usando o método de interpolação por krigagem, já que eles apresentaram dependência espacial (Tabela 5).

Os resultados demonstram que há uma correlação positiva entre areia e K_i . É possível também perceber correlações negativas entre K_i e argila e K_i e Fe_2O_3 . A razão Ct/(Ct+Gb) apresentou correlação positiva com K_i , respectivamente.

As correlações negativas de K_i com argila e Fe_2O_3 confirmam observações de Veiga et al. (1993) e Nunes e Cassol (2008). Para estes autores, os óxidos promovem uma cimentação das partículas primárias do solo, o que origina agregados com alta estabilidade como demonstrado por Ferreira et al. (1999). Óxidos extraídos com DCB em solos argilosos, quando combinados com a granulometria, permitiram a Römken et al. (1977) estimarem adequadamente a erodibilidade do solo. Deste modo, com os resultados expostos na Figura 4, fica evidente que a combinação textura e mineralogia do solo parecem contribuir conjuntamente para definir zonas específicas de valores de K_i . Tal fato, corrobora resultados que apontam ser a erodibilidade em entressulcos dependente da ação conjunta de diversos atributos do solo (Meyer e Harmon, 1984; Romero et al., 2007; Rienzi et al., 2013; Vaezi, 2018).

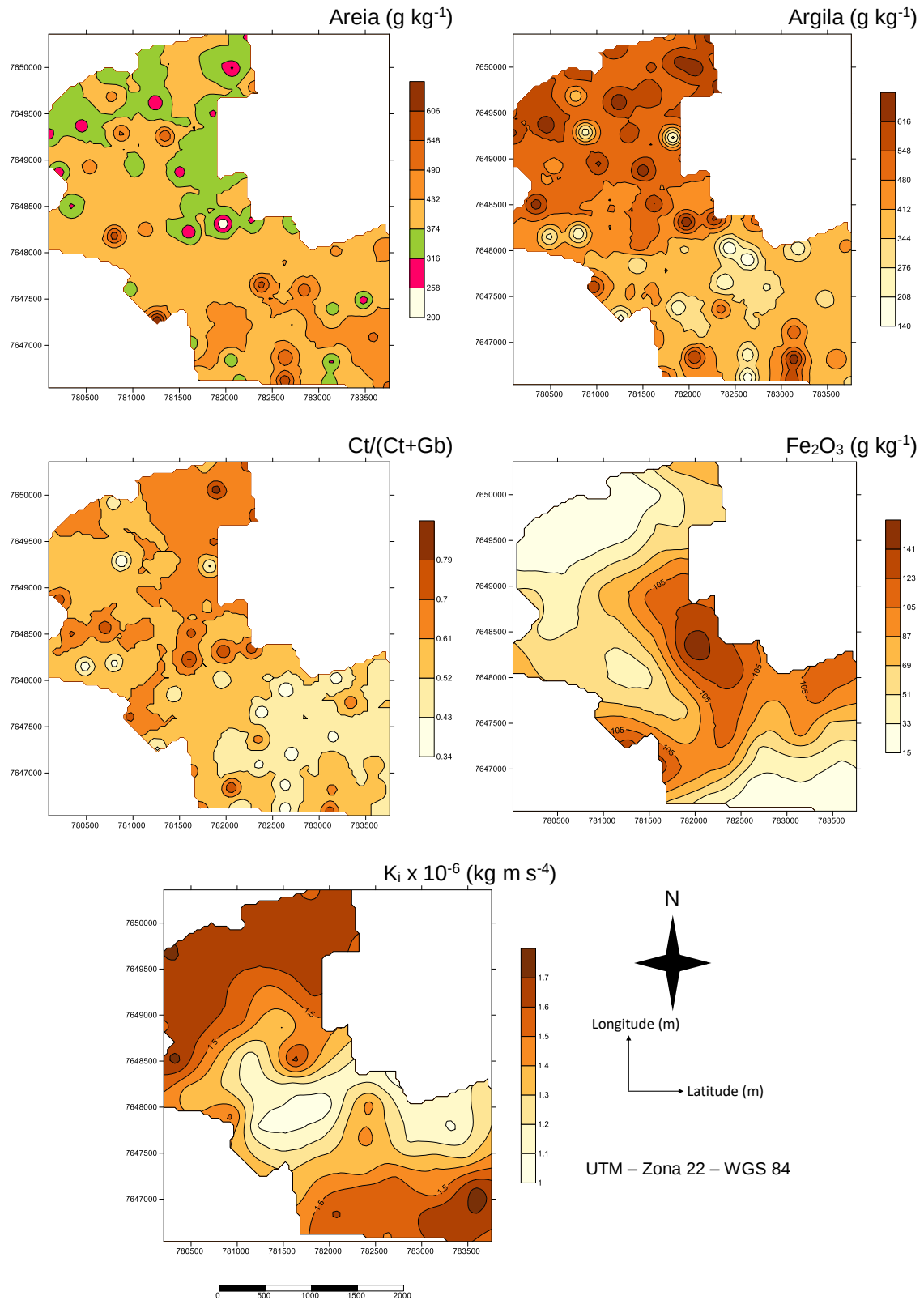


Figura 4. Distribuição espacial obtida por krigagem para areia, argila, $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$, Fe_2O_3 e K_i estimada pela areia.

Quanto ao mapeamento de K_i , pode-se ressaltar que, ele é ferramenta importante no monitoramento do uso do solo na FEPP, para fins agrícolas ou não. Com este resultado pode-se monitorar temporalmente os impactos que eventuais mudanças de uso do solo podem causar nos ambientes ocupados pelos Latossolos LV₁, LV₂ e LV₃. Isto poderá permitir a elaboração de planos de conservação do solo para a prática de atividades agrícolas mais sustentáveis.

5. CONCLUSÕES

A erodibilidade em entressulcos é $1,70 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ no Latossolo Vermelho distrófico (LV₁), $1,60 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ no Latossolo Vermelho distrófico (LV₂) e $1,20 \times 10^6 \text{ kg m s}^{-4}$ no Latossolo Vermelho eutroférico (LV₃).

O uso dos teores de areia muito fina e argila, como incorporado modelo WEPP, é insatisfatório para estimar a erodibilidade em entressulcos (K_i), para Latossolos região nordeste do Estado de São Paulo.

A equação $K_i = 0,8445 + 0,0013 \times \text{Areia}$ ($R^2=0,87^{**}$) oferece bom desempenho e eficiência na predição da erodibilidade em entressulcos, para Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutroférico.

Latossolos mais caulíníticos e com teores expressivos de areia são mais suscetíveis à erosão em entressulcos. Isto corrobora a literatura científica no assunto, pois solos com maiores teores de areia apresentam menor agregação, o que contribui com maior selamento superficial e aumento na erodibilidade em entressulcos.

Mapas interpolados de atributos do solo são uma ferramenta útil para definir zonas específicas da ocorrência de K_i , bem como para o manejo específico e recomendações de práticas de conservação do solo, no uso dos Latossolos estudados.

6. REFERÊNCIAS

- Alcantara GH (2018) **Erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica de com diferentes teores de óxido de ferro** 60f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - UNESP, Jaboticabal.
- Alleoni LRF, Camargo AO (1995) Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de Latossolos Ácricos. **Scientia Agricola** 52:416–421.
- Amorim RSS (2004) **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - UFV, Viçosa.
- Amorim RSS, Da Silva DD, Pruski FF, De Matos AT (2010) Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola** 30:1046 -1049.
- Anache JA, Wendland EC, Oliveira PTS, Flanagan DC, Nearing MA (2017) Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: a meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena** 152: 29-39.
- Barbosa RS, Marques Júnior J, Barrón V, Martins Filho MV, Siqueira DS, Peluco RG, Camargo LA, Silva LS (2019) Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental Earth Sciences** 78: 12.
- Ben-Hur M, Shainberg I, Bakker D, Keren R (1985) Effect of Soil Texture and CaCO₃ Content on Water Infiltration in Crusted Soil as Related to Water Salinity. **Irrigation Science** 6:281-294.
- Bocuti ED, Amorim RSS, Santos TGD, Raimo LADLD, Pereira HG (2019) Erodibilidade entressulcos e sua relação com atributos de solos do Cerrado. **Revista de Ciências Agrárias** 42: 71-80.
- Boruvka L, Valla M, Donátová H, Nemecek K (2002) Vulnerability of soil aggregates in relation to soil properties. **Rostlinná Výroba** 48: 329-334.
- Brito WBM, Campo MCC, Brito Filho E, Lima AFL, Cunha JMC, Silva LI, Santos LAC, Mantovanelli BC (2019) Dynamics and spatial aspects of erodibility in Indian Black Earth in the Amazon, Brazil. **Catena**. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104281>.
- Camargo ECG, Fucks SD, Câmara G (2004). Análise espacial de superfícies. In: Druck S, Carvalho MS, Câmara G, Monteiro AMV. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 79-122.
- Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Bahia ASRS (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola** 71:244-256.

Camargo LA, Marques Júnior, Pereira GT, Horvat RA (2008) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:2269-2277.

Cambardella C A, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison 58:1501-151.

Carrizo ME, Alesso CA, Cosentino D, Imhoff S (2015) Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. **Sci. Agric.**v.72, n.1, p.75-82.

Cassol EA, Lima VD de (2003) Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 38(1): 117-12.

Correa E, Moraes IC, Cunha CML, Pinto SDAF (2018) Influência do cultivo de cana-de-açúcar nas perdas de solo por erosão hídrica em cambissolos no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 19: 231-243.

Costa JT (2015) **Modelagem da capacidade de transporte de sedimentos em Latossolo Férrico**. 54 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Unesp, Jaboticabal.

Cunha P (2000) **Superfície geomórfica e variabilidade de latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)** 149p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

Cunha, P. (2000) **Superfícies geomórficas e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista.

Dantas JS, Martins Filho MV, Marques Júnior J, Resende JMdoA, Teixeira DdeB, Barbosa RS, Siqueira DS (2014) Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v.49, n.9, p.700-707.

Eduardo EN, Carvalho D, Machado RL, Soares PFC, Almeida W (2013) Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37: 796-803.

Elliot WJ, Liebenow AM, LafLVm JM, Khol KDA (1989) A compendium of erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987/88. **USDA - Agric. Res. Serv. Ohio**: Ohio State University.

Embrapa (2013) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3º ed. Brasília: Embrapa.

Enriquez AG, da Silva D P, Pruski FF, Griebeler NP, Cecon PR (2015) Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem de estrada rural não pavimentada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 19: 160–165.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:515-524.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:515-524.

Flanagan DC, Nearing MA (1995) **USDA - Water Erosion Prediction Project: WEPP user summary**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service pp 1-47.
Food and Agriculture Organization of the

Franco AMP (2010) **Erosão em entressulcos e qualidade física de solos construídos após mineração de carvão**. 95p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Franco AMP, Cassol EA, Pauletto EA, Inda AV (2012) Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um argissolo vermelho. **Revista Brasileira Agrociência** 18: 175-187.

Ghidin AA, Melo VF, Lima VC, Lima MJC (2006). Topos sequências de latossolos originados de rochas basálticas no paraná. I – Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:293-306.

Gonçalves FA (2008) **Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa**. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - UFV, Viçosa.

Grego CR, Oliveira RP (2015) Conceitos Básicos Da Geoestatística. In: Oliveira RP, Grego CR, Brandao ZN (Ed.) **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília, DF: Embrapa, p. 41-62.

Griebeler NP, Pruski FF, Silva JMA, Ramos MM, Silva DD (2005) Equipamento Equipamento da erodibilidade cisalhamento do solo em para determinação e tensão crítica de canais de estradas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 9:166-170.

Isaaks EH, Srivastava RM (1989) An introduction to applied geostatistics. **New York: Oxford University Press** p. 561.

Jakob AAE (2002) A Krigagem como método de análise de dados demográficos. **XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais**, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR (1991) A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research** 27:337–350.

Kemper WD, Koch EJ (1966) Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. USDA Tech Bull 1355.

Knapen A, Poesen J (2010) Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms** 35:217-228.

Lengnick LL, Fox RH (1994) Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. soil nitrate. **Agronomy Journal** 87: 167-75.

Lima PMP, Andrade H (2001) Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com b textural e b latossólico do sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:463-474.

Loague K, Green RE (1991) Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology** 7: 51-73.

Machado CC, Garcia AR, Silva E, Fontes AM (2003) Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore** 7: 295-300.

Martinelli LA, Filoso S (2007) Polluting effects of Brazil's sugar-ethanol industry. **Nature**, v. 445, n. 364.

Martins Filho MV (1999) **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal-SP**. 140f Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Martins Filho MV (2008) Apostila de Erosão hídrica do solo. Disciplina: Conservação do Solo. Unesp, Jaboticabal 44 p.

Martins SG, Avanzi JC, Silva MLN, Curi N, Fonseca S (2011) Erodibilidade do solo nos Tabuleiros Costeiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 41: 322-327.

Medeiros GOR, Giarolla A, Sampaio G, Marinho MA (2016) Estimates of annual soil loss rates in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira Ciência Solo**. DOI:10.1590/18069657rbc20150497

Meyer LD, Harmon W C (1984) Susceptibility of agricultural soil to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison 48 (5): 1152-1157.

Mirzaee S, Ghorbani-Dashtaki S, Kerry R (2019) Comparison of a spatial, spatial and hybrid methods for predicting inter-rill and rill soil sensitivity to erosion at the field scale. **Catena** 188 (2020) 104439.

Moraes IC (2016) **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica MEUPS e WEPP: contribuição em Bacias Hidrográficas**. 191f Tese (Doutorado em Geografia) Unesp, Rio Claro.

Moriassi D, Gitau M, Pai N, Daggupati P (2015) Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. **Transactions of the ASABE** (American Society of Agricultural and Biological Engineers) 58(6):1763-1785.

Movedi E, Bellocchi G, Argenti G, Paleari L, Vesely F, Stagliano N, Dibari C, Confalonieri R (2019) Development of generic crop models for simulation of multispecies plant communities in mown grasslands. **Ecological Modelling** 401:111-128.

Nunes MCM, Cassol EA (2008) Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 2839-2845.

Nunes MCM, Cassol EA (2011) Produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental** 15: 541–547.

Oades JM, Waters AG (1991) Aggregate hierarchy in soils. **Austral. J. Soil Res** 29:815-828.

Oliveira JF, Griebeler NP, Correchel V, Silva VC (2009) Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 13:955-960.

Peluco RG, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DB, Adame CR, Cortez LA (2013) Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 48:661–672.

Raimo LADLD, Amorim RSS, Torres GN, Bocuti ED, Couto EG (2019) Variabilidade espacial da erodibilidade no estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias** 42: 55-67.

Reichert JM, Norton LD (2013) Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. **Soil Research**. <http://dx.doi.org/10.1071/SR12243>.

Reichert JM, Norton LD, Favaretto N, Huang C, Blume E (2009) Settling Velocity, Aggregate Stability, and Interrill Erodibility of Soils Varying in Clay Mineralogy. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 73:1369-1377.

Reichert JM, Schafer MJ, Cassol EA, Norton LD (2001) Interrill and Rill Erosion on a Tropical Sandy Loam Soil Affected by Tillage and Consolidation. **USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory** pp 601-605.

Rienzi EA, Fox JF, Grove JH, Matocha CJ Interrill erosion in soils with different land uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution (2013). **Catena** 107 (2013) 130–138.

Risse LM, Nearing MA, Nicks AD, Laflen JM (1993) Error Assessment in the universal Soil Loss Equation. **Soil Sci. Am. J.** 57:825-833.

Robertson GP (2004) GS+: Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide. **Plainwell: Gamma Desing Software**, pp 152.

Romero CC, Stroosnijder L, Baigorria GA (2007) Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. **Catena** 70 (2):105–113.

Römken MJM, Roth CB, Nelson DW (1977) Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison 41 (5): 954-960.

Rosseti KV (2015) **Qualidade estrutural em Latossolos compactados cultivados com milho** 90f. Tese (Doutorado em Agronomia) -Unesp, Jaboticabal.

Schaefer CEGR, Fabris JD, Ker JC (2008) Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals** 43:

Silva AM, Silva MLN, Curi N, Avanzi CJ, Ferreira MM (2009) Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e Latossolo na região de lavras, sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1811-1820.

Silva GRV, Souza ZM, Martins Filho MV, Barbosa RS, Souza GS (2012) Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 36 (3): 963-970.

Silva MLN, Curi N, Ferreira MM, Lima JM, Ferreira DF (1999) Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 34, nº 12. 2287 – 2298 pp.

Singer MJ, Le Bissonnais Y (1998) Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a mediterranean climate. **Geomorphology** 24:79–85.

Siqueira DS (2010) **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar** 75f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP, Jaboticabal.

Siqueira DS, Marques Jr. J, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DB, Peluco RG (2014) Sampling density and proportion for the characterization of the Variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**.

Souza CK, Marques Júnior J, Martins Filho MV, Pereira GT (2003) Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:1067–1074.

Souza ZM, Souza GS, Marques Júnior J, Pereira GT (2014) Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural** 44: 261-268.

Statsoft (1994) *Statistica: Quick reference*. Tulsa: Statsoft, pp 148

Swanson NP (1965) Rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph 8 (1):71-72.

Teixeira LG (2017) **Mapeamento da erodibilidade de Latossolos utilizando a cor**. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Jaboticabal.

Thomaz E L, Fidalski J (2020) Interrill erodibility of different sandy soils increases along a catena in the Caiuá Sandstone Formation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 44: 13.

United Nations. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, FAO and ITPS. 2015. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias- UNESP (2017) Departamento de Ciências Exatas. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista. Disponível em: http://www.fcav.unesp.br/#!/estacao-agroclimatologica/dados/estacao_convencional/. Acessado em 12 novembro de 2018.

Vaezi AR, Eslami SF, Keesstra (2018) Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. **Catena** 167:385-398.

Vanoni VA (1975) Sedimentation engineering. **New York: The American Society of Civil Engineers**, pp 745.

Vanuytrecht E, Raes D, Willems P (2016) Regional and global climate projections increase mid-century yield variability and crop productivity in Belgium. **Regional Environmental Change** 16:659–672.

Vanwalleghem T, Gómez JA, Infante AJ, González de MM, Vanderlinden K, Guzmán G, Laguna A, Giráldez AJV (2017) Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. **Anthropocene** 17:13–29.

Veiga M da, Cabeda MSV, Reichert JM (1993) Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP 17 (1): 289-298.

Veloso HP, Rangel Filho ALR, Lima JCA (1991) Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.

Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar JW (1983) Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, 51(3): 1-75.

Vieira SR, Lombardi Neto F (1995) Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas 54(2): 405-412.

Wischmeier WH, Smith DD (1965) Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA, 52p. Agricultural Handbook, 282.

Yamamoto JK, Landim PMB (2013) **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 215p.

Zacharias S, Heatwole CD, Coakley CW (1996) Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph 39(1): 47-54.