

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESEMPENHO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA
EROSÃO EM ENTRESSULCOS**

Ana Paula Oliveira Aranha

Engenheira Agrônoma

Jaboticabal-SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESEMPENHO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA
EROSÃO EM ENTRESSULCOS**

Ana Paula Oliveira Aranha

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

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

Jaboticabal-SP

2024

A662d

Aranha, Ana Paula Oliveira

Desempenho de modelos de predição da erosão em entressulcos / Ana Paula Oliveira Aranha. -- Jaboticabal, 2024
59 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho

1. Latossolo. 2. Intensidade de chuva. 3. Declividade. 4.
Taxa de descarga. I. Título.

REGISTRO DE IMPACTO

A presente tese destaca a importância de conhecer e prever fatores causadores da erosão em entressulcos do solo e a modelagem deste processo. A tese tem por intuito demonstrar que com base nos conhecimentos fundamentais do processo de erosão do solo é possível propor, testar e validar modelos, para estimar a taxa de erosão em entressulcos de alguns latossolos. Isto possibilitará o uso de modelos de previsão da erosão, em diferentes condições de solo, clima e uso agrícola, o que possibilitará a visualização e projeção de cenários de erosão do solo e a sua distribuição espacial em âmbito local e regional, podendo ser utilizado para propósitos de conservação do solo e da água, e contribuir para a criação de diferentes estratégias quanto à tomada de decisão sobre o uso, ocupação e gestão dos solos brasileiros.

IMPACT RECORD

This thesis highlights the importance of understanding and predicting the factors that cause erosion in soil interrills and modeling this process. It aims to demonstrate that, based on fundamental knowledge of soil erosion, it is possible to propose, test, and validate models to estimate the erosion rate in the interrills of certain oxisols. This will facilitate the use of erosion prediction models under various soil, climate, and agricultural conditions, enabling the visualization and projection of soil erosion scenarios and their spatial distribution at both local and regional levels. These models can be used for soil and water conservation purposes and can contribute to the development of strategies for decision-making regarding the use, occupation, and management of Brazilian soils.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DESEMPENHO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA EROSÃO EM ENTRESSULCOS

AUTORA: ANA PAULA OLIVEIRA ARANHA

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Data: 29/07/2024 18:01:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR (Participação Virtual)
Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) / Uberaba/MG



Documento assinado digitalmente
RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR
Data: 29/07/2024 19:20:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA
Data: 30/07/2024 09:05:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. LUDMILA DE FREITAS (Participação Virtual)
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO) / Ariqueme



Documento assinado digitalmente
LUDMILA DE FREITAS
Data: 29/07/2024 18:36:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
GENER TADEU PEREIRA
Data: 30/07/2024 14:32:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 29 de julho de 2024

DADOS CURRICULARES

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, 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), 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. Em 2018, ingressou no Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) e em 2020 ingressou no Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual de Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus Jaboticabal, atuando na área de manejo e conservação do solo e da água, e uso de modelos na previsão de erosão do solo.

Epígrafe

“Consagre ao senhor tudo o que você faz, e os teus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios16:3

Ao meu professor e orientador,
doutor Marcílio Vieira Martins Filho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e amor.

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

Ao meu esposo Lekson Rodrigues, por estar presente em todos os momentos da minha vida.

A minha família, em especial meus avós Maria do Carmo e Aristides que sempre me impulsionaram para conquistar meus objetivos, e aos meus irmãos Bianca e Chelton Aranha.

Ao professor Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, minha gratidão pela orientação, ensinamentos, apoio, incentivos e amizade.

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 Doutorado.

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Erosão hídrica do solo	3
2.2 Erodibilidade do solo	5
2.3 Erosão em entressulcos	8
2.3.1 Parâmetros hidrodinâmicos na erosão entressulcos	9
2.3.2 Tensão de cisalhamento do solo	12
2.4 Uso de modelos como subsídio no controle de erosão	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 A taxa de erosão em entressulcos	21
4.2 Efeito da declividade e intensidade de chuva na erosão em entressulcos...	22
4.3 Validação de modelos	30
5. CONCLUSÕES	38
6. REFERÊNCIAS	39

DESEMPENHO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA EROÇÃO EM ENTRESSULCOS

RESUMO: O uso de modelos matemáticos são uma ferramenta importante para o entendimento e descrição da erosão em entressulcos do solo, bem como uma alternativa que auxilia no planejamento de práticas agrícolas conservacionista para uso e ocupação do solo. Modelos propostos na literatura para prever a erosão em entressulcos (D_i) necessitam da avaliação de desempenho deles para estimar a D_i do solo. Isto constitui-se num elemento chave para o uso e a validação de modelos. Logo, o objetivo principal deste trabalho foi o de avaliar o desempenho de dois modelos em estimar D_i . O estudo foi realizado na área da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho no município de Jaboticabal no Estado de São Paulo. Um completo experimento fatorial com chuva simulada foi conduzido em três solos (LV_1 - Latossolo Vermelho distrófico; LV_2 - Latossolo Vermelho distrófico; LV_3 - Latossolo Vermelho eutroférico), quatro intensidades de chuva, quatro declives e com três repetições. Entre esses fatores, a taxa de descarga apresentou a maior correlação com a erosão em entressulcos ($r = 0,738$, $p < 0,01$), indicando que o volume de água escoando pela superfície é um dos principais determinantes da erosão. Além disso, observou-se que a inclinação do terreno, quando ajustada a funções curvilíneas convexas, descreve de forma precisa o impacto das declividades mais acentuadas nas taxas de erosão entressulcos. Esses resultados sugerem que a gestão da erosão deve focar tanto no controle da enxurrada quanto na modificação da inclinação do terreno para mitigar os efeitos erosivos. A interação dos fatores de erosão permitiu formular e avaliar o desempenho de duas Equações $D_i = K_i I q^{1/2} S^{2/3}$ e $D_i = K_i I R S_f$, as quais apresentam um termo linear de intensidade ($I q^{1/2} S^{2/3}$; $I R S_f$) que descreve a frequência do impacto das gotas da chuva. A validação dos modelos foi realizada utilizando várias métricas, incluindo o erro máximo (ME), erro médio quadrático relativo (RMSE) e eficiência do modelo (EF). Os resultados indicaram que o modelo representado pela Eq.33 apresentou o melhor desempenho para estimar a taxa de erosão em entressulcos nos três tipos de latossolos estudados. No entanto, foi observada uma tendência do modelo em subestimar a erosão, o que pode ser atribuído à complexidade das interações entre os fatores erosivos e às variações intrínsecas das propriedades do solo.

Palavras-chave: latossolos, intensidade de chuva, declividade, taxa de descarga.

PERFORMANCE OF EROSION PREDICTION MODELS IN INTERRILL AREAS

ABSTRACT: The use of mathematical models is essential for understanding and describing soil erosion in interrill areas, as well as for planning conservation agricultural practices for land use. Models proposed in the literature to predict interrill erosion (D_i) require performance evaluation for effective estimation. This study aimed to assess the performance of two models in estimating D_i . Conducted at São Paulo State University in Jaboticabal, São Paulo, a factorial experiment with simulated rainfall was carried out across three soil types (LV1 - dystrophic Red Latosol; LV2 - dystrophic Red Latosol; LV3 - eutrophic Red Latosol), four rainfall intensities, four slopes, and three replications. Among these factors, discharge rate showed the highest correlation with interrill erosion ($r = 0.738$, $p < 0.01$), indicating that surface runoff is a key determinant of erosion. Additionally, terrain slope, when adjusted to convex curvilinear functions, accurately described the impact of steeper gradients on erosion rates. These results suggest that erosion management should focus on controlling runoff and modifying slope to mitigate erosive effects. The interaction of erosion factors enabled the formulation and evaluation of two equations, $D_i = K_i I^{1/2} S^{2/3}$ and $D_i = K_i I R S_f$, both featuring a linear intensity term ($I^{1/2} S^{2/3}$; $I R S_f$) to describe raindrop impact frequency. Model validation employed various metrics, including maximum error (ME), relative mean square error (RMSE), and model efficiency (EF). Results indicated that the model represented by Eq.33 performed best in estimating interrill erosion rates across the three Latosol types studied. However, a tendency to underestimate erosion was noted, likely due to the complexity of interactions among erosive factors and intrinsic variations in soil properties.

Keywords: latosols, rainfall intensity, slope, discharge rate.

1. INTRODUÇÃO

O solo e a água são elementos vitais do meio ambiente, e constituem a base natural para o desenvolvimento das plantas, bem como dos animais que delas se alimentam. A ciência da conservação do solo e da água busca alternativas visando a manutenção ou recuperação de nascentes, córregos d'água e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

A erosão causada pela água e pelo vento é um dos fenômenos em escala mundial que mais afetam os solos (Brady e Weil, 2013). A deterioração ocorre não apenas nas propriedades agrícolas, mais também nas florestas, nos campos de pastagens naturais, bacias hidrográficas e de áreas urbanas. Carregadas pela água ou vento, as partículas do solo das áreas erodidas, são depositadas em outros locais, em torno de áreas de baixa altitude. Embora a erosão hídrica seja um fenômeno natural, as atividades antrópicas têm contribuído com a intensificação desse processo. As formas de erosão do solo de ocorrências mais comuns podem ser categorizadas em dois tipos: erosão em entressulcos e em sulcos.

O processo de erosão entressulcos (D_i) é um fenômeno altamente complexo, e pode ser influenciado por muitos fatores como: gradiente de inclinação, tipo de solo, rugosidade da superfície do solo, teor de umidade do solo, intensidade da chuva, infiltração, taxa de escoamento, comprimento da encosta e energia cinética da gota de chuva (Wang et al., 2019).

Nos entressulcos, o impacto das gotas de chuva é o fator responsável pela desagregação das partículas na massa do solo possibilitando desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (Cassol; Lima, 2003).

Há uma série de modelos propostos na literatura, por vários pesquisadores, para estimar a taxa de erosão em entressulcos (D_i) causada pela água da chuva e enxurrada, baseados em fatores que contribuem para o desenvolvimento desta forma de erosão. Dentre os modelos propostos tem-se:

Nearing et al. (1989)	$D_i = K_i I^2$	(1)
Zhang et al. (1998)	$D_i = a S^b$	(2)
Kinnel (1993)	$D_i = K_i I R S$	(3)
Flanagan e Nearing (1995)	$D_i = R I K_i S_f$	(4)
Zhang et al. (1998)	$D_i = K_i I q^{0.5} S^{0.67}$	(5)
Fox e Bryan (2000)	$D_i = K_i R^{2.37} S^{0.43}$	(6)
Bulygin et al. (2002)	$D_i = K_i I Q S^{0.67}$	(7)
Cao et al. (2015)	$D_i = K_i I^{7.94} Q S$	(8)
Zhang e Wang (2017)	$D_i = K_i I S Q^a L^b$	(9)
Wu et al. (2017)	$D_i = 7.5 \times 10^{-12} I^{3.04} S^{1.43}$	(10)

em que, D_i é a taxa de erosão em entressulcos, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; a e c são coeficientes ajustados; K_i é a erodibilidade em entressulcos ($\text{kg m}^{-4} \text{s}^1$); I é a intensidade de chuva (m s^{-1}); R ou Q é a taxa de enxurrada (m s^{-1}); q é a taxa de descarga ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), S é a declividade do terreno (m m^{-1}); S_f é fator declividade em entressulcos; L é o comprimento do declive (m).

Nos modelos descritos pelas Eqs. 3 a 9, em relação à Eq. 1, há a inclusão de parâmetros relativos ao escoamento superficial e declividade do terreno. As Eqs. 1 e 3 a 9 incluem também a intensidade da chuva e a erodibilidade do solo (K_i).

Deste modo, devido grande gama de modelos propostos na literatura, a avaliação de desempenho deles para estimar a erosão em entressulcos do solo torna-se elemento chave para o uso e a validação de modelos. Uma estimativa precisa, auxilia na identificação de áreas com ricos de erosão, possibilitando um planejamento eficiente no controle e prevenção da erosão, além de utilizar bancos de dados já existentes, otimizando assim, tempo e os custos relacionados a experimentos in loco. Logo, o objetivo principal deste trabalho foi o de avaliar o desempenho dos modelos representados pelas Equações 4 e 5 para estimar D_i .

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Erosão hídrica do solo

A erosão é um fenômeno que está presente na dinâmica do planeta ao longo dos anos, atuando como agente formador das paisagens. É um processo contínuo, que acontece de forma natural pela ação dos principais agentes erosivos como a água e o vento, ou geológica ocorrendo lentamente, possibilitando que a taxa de formação do solo esteja em equilíbrio a taxa de perda do solo

O solo é um componente natural, limitado e multifuncional do sistema físico da terra que fornece diversos serviços para a humanidade, garantindo a sobrevivência dos ecossistemas, da biodiversidade e a manutenção da vida. No entanto, os processos erosivos tornam-se um dos principais fatores de sua degradação, seja resultante de processos naturais ou induzidos por atividades antrópicas (Lima et al., 2023). A degradação dos solos tanto afeta as terras agricultáveis como as áreas com vegetação natural intensamente explorada pelo homem.

A erosão hídrica contribui para a improdutividade dos solos, facilitada e acelerada pelo homem com suas práticas inadequadas de manejo agrícola (Carvalho et al., 2002). O problema da erosão do solo deve ser resolvido na sobrevivência e no desenvolvimento humano, pois existem vários graus de erosão do solo em vários países do mundo, o que restringe severamente o desenvolvimento da economia agrícola em muitos países (Wang et al., 2021).

No Brasil, Anache et al. (2017), revisaram estudos de erosão hídrica do solo em regiões do país, e encontraram valores médios de perda anual de solo variando de 0,1 a 136,0 t ha⁻¹, conforme a cobertura e uso da terra. Borrelli et al. (2020), realizaram pesquisas de taxas futuras de erosão, modelando a mudança no potencial de erosão global do solo pela água, o estudo aponta que até 2070 a erosão hídrica global do solo crescerá em 30% e 66%.

A erosão do solo também afetam nutrientes e a ciclagem de carbono, as perdas de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e carbono orgânico, podem

comprometer os solos a longo prazo e a sua capacidade produtiva agrícola e ecossistêmica, o consumo global dos três principais nutrientes fertilizantes (N, P e K) usado para manter ou melhorar a fertilidade do solo, está em uma média anual crescente de 1,5, 2,2 e 2,4%, respectivamente (Borrelli et al., 2020).

Estudos conduzidos por Naipal et al., (2018) sobre a remoção global de carbono orgânico do solo por erosão hídrica em decorrência de mudanças climáticas e mudanças no uso da terra, demonstraram que durante o período de 1850 a 2005, a aceleração da erosão do solo leva a um fluxo potencial total de remoção de carbono orgânico do solo (SOC) de 74 ± 18 Pentagramas (Pg) C, dos quais 79 % a 85 % ocorre em terras agrícolas e pastagens, com os maiores efeitos encontrados nos trópicos, onde o desmatamento e a expansão agrícola aumentaram significativamente as taxas de erosão do solo.

Deste modo, estudos científicos apontam a elevada vulnerabilidade e suscetibilidade de muitas áreas aumentarem taxas de perda de solo, caso não sejam realizadas táticas adequadas de manejo e conservação solo e uso da terra (Raj; Kumar; Sooryamol, 2022). Para minimizar os impactos relacionados aos processos erosivos é pertinente inicialmente, entender esse fenômeno e os fatores que interferem e potencializam o processo (Sobrinho; Barbosa, 2022).

O processo erosivo incide em três eventos sequenciais caracterizados pelo desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo de um lugar para outro por ação natural de fenômenos como chuva, vento ou pela força de gravidade (Hamanaka et al., 2019). O desprendimento é definido como a liberação de partículas dos agregados e, uma vez desprendidas elas podem continuar próximas ao agregado ou serem transportadas, ocorrem de forma integrada pela energia provocadas pelo impacto das gotas d'água e a força cisalhante do escoamento superficial constituindo assim, o estágio inicial e mais importante do processo da erosão hídrica (Carvalho et al., 2002).

De acordo com Lee et al. (2022), a taxa de erosão dos solos agrícolas são impulsionada pela erosividade do clima e pela erodibilidade ou resistência do solo, comumente representada através dos parâmetros erodibilidade entressulcos (K_i) e erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão crítica de cisalhamento (τ_c). Esses parâmetros são afetados por fatores que apresentam alta variabilidade no tempo e no espaço, deste modo, fatores correlacionados as

características de práticas conservacionistas, solo e clima como: classe, ocupação, uso do solo, topografia, intensidade e sazonalidades das chuvas, podem intensificar o escoamento superficial, transporte de sedimentos e assim a perda de solo por erosão.

A erosão hídrica pode remover o solo de forma superficial ou subterrânea, sendo que a superficial se manifesta como erosão laminar, quando o arraste das partículas do solo é uniforme e suave em toda a extensão da vertente e a erosão linear, onde há uma concentração de linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno evoluindo para ravinas e voçorocas (Arantes, 2022).

A perda de solo por erosão hídrica, pode ser manifestada no local (on-site) e fora do local (off-site). A erosão on-site é rapidamente observada e causa danos imediatos como a perda do solo superficial rico em nutrientes e matéria orgânica provoca uma diminuição na fertilidade do solo e produtividade. Fora do local (off-site) os impactos da perda de solo incluem o aumento da sedimentação e turbidez, aumento dos níveis de nutrientes e poluentes que diminuem a qualidade da água, assoreamento de corpos hídricos, barragens e canais de irrigação (Hartanto et al., 2003).

2.2 Erodibilidade do solo

A suscetibilidade que o solo apresenta ao sofrer erosão hídrica, é definido como a erodibilidade (K). Segundo Torri et al., (1997) a erodibilidade do solo é um fator concentrado que representa a resposta total do solo a muitos processos erosivos e hidrológicos, como desprendimento e transporte do solo pela chuva e escoamento superficial, absorção da água da chuva pelo perfil do solo e geração de escoamento. Todos esses processos são complexos e dinâmicos em natureza e são influenciados de maneira diferentes pelas propriedades e características do perfil do solo.

Uma estrutura estável do solo é vital para evitar a erosão hídrica, pois o fator K é afetado diretamente devido mudanças em função do uso da terra, propriedades do solo, fatores climáticos, e a deterioração da estrutura do solo (Alaboz et al., 2021). Para Cebel et al., (2013) manter os níveis mais baixos do

fator K é uma das condições para minimizar perda de solo em áreas agrícolas, e afirmam que medidas necessárias podem ser tomadas para aumentar o conteúdo de matéria orgânica, melhorar a permeabilidade hidráulica e estrutura do solo.

Musso et al. (2022), discorre que a erodibilidade diminui com o decorrer da formação do solo, ou seja, espera-se que ocorra a diminuição das taxas de erosão do solo a partir do aumento da idade superficial, a vegetação e os fatores abióticos contribuem com desenvolvimento temporal, deste modo, quanto mais velhos são os solos mais escoamento superficial e menos permeabilidade da água. Os autores complementam que a rugosidade superficial do solo, atua no escoamento superficial tornando a superfície mais áspera, o que pode induzir a formação de mais canais e assim o aumento da erodibilidade.

A erodibilidade comumente estima a resistência que o solo apresenta ao desprendimento, geralmente solos com alta erodibilidade produzem taxa de erosão mais alta (Lee et al., 2022). Deste modo, a erodibilidade do solo varia dependendo dos subprocessos de erosão, isto é, erosão entressulcos e em sulcos (Thomaz; Fidalski, 2020). O modelo *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) expressa o fator K_r para a erodibilidade em sulcos e o fator K_i para a erodibilidade em entressulcos (Flanagan; Nearing, 1995).

A determinação da erodibilidade em entressulcos apresentada por Elliott et al. (1989), foi dada pela seguinte expressão:

$$K_i = \frac{D_i}{i^2 S_f} \quad (11)$$

em que, K_i é a erodibilidade em entressulcos do solo (Kg s m^{-4}), D_i é a taxa máxima de desagregação em entressulcos do solo ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), i é a intensidade da chuva, e o S_f é o fator de declive, a qual foi dada na seguinte expressão:

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{-4 \text{ sen}\theta} \quad (12)$$

em que, θ é o ângulo do declive (graus).

A erodibilidade em entressulcos (K_i), é influenciada por atributos do solo como: textura, estabilidade de agregados, umidade do solo, mineralogia, teor matéria orgânica e óxidos de Ferro e Alumínio (Martins Filho, 1999). A estabilidade estrutural é considerado um índice importante para avaliar a

erodibilidade do solo. Ao discutir sobre a relação entre classes de tamanho de agregados e coeficiente de erodibilidade entressulcos na região semiárida do Irã, Reza et al. (2018) expõe que o aumento do tamanho dos agregados associado ao aumento da quantidade de argila, diminuiu o K_i significativamente.

Lima e Andrade (2001) estudaram a erodibilidade entressulcos de três solos no estado de Minas Gerais - Brasil (Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), Podzólico Vermelho-Escuro (PE) e Latossolo Roxo (LR)), e as relações dessas erodibilidades com alguns de seus atributos físicos, químicos e mineralógicos, e concluíram que os atributos que mais influenciaram os valores das erodibilidades entressulcos foram os óxidos de ferro (Fe_s , Fe_o e Fe_d), teor de caulinita (Ct), argila dispersa em água (ADA), volume total de poros (VTP), densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p) e agregados estáveis em água < 0,105 mm (EA6).

Segundo Basga et al. (2020), o conteúdo óxidos de Fe e Al, cálcio, magnésio e matéria orgânica funcionam como um agente de ligação na estabilidade dos agregados. Solos pobres em agentes de ligação possuem mais susceptibilidade aos processos erosivos, mesmo submetidos a baixas energias de chuva e escoamento superficial (Igwe et al., 2009).

A matéria orgânica exerce efeito na estruturação e formação de agregados no solo. Estudos como o de Bastida et al. (2018), demonstraram que diferentes correções orgânicas contribuem com acréscimos no teor de carbono orgânico do solo, atividade microbiana, além de contribuir com propriedades físicas do solo induzindo na formação de agregados e na diminuição dos processos erosivos do solo. Naresh et al. (2018), complementam em seu estudo, que substâncias húmicas e partículas de argila favorecem a formação de compostos que auxiliam na agregação de partículas, diminuindo a erodibilidade do solo.

Kaşanin-Grubin et al. (2021), avaliaram as propriedades do solo, os índices de erodibilidade em relação ao leito rochoso, as propriedades geoquímicas e o carbono orgânico, além de avaliarem o efeito da profundidade do solo nos índices de erodibilidade, e concluíram que as propriedades dominantes do solo determinadas pelo leito rochoso, que se correlacionam com os índices de erodibilidade do solo florestal são o carbono orgânico, pH,

condutividade elétrica, concentração de íons cálcio e sódio, cátions totais solúveis em água e porcentagem de areia, de acordo com os índices testados, a suscetibilidade do solo à erosão segue a ordem: granito > andesito > arenito > quartzito > calcário.

2.3 Erosão em entressulcos

A erosão do solo consiste em dois processos principais: erosão em entressulcos e erosão em sulcos, tais processos ocorrem simultaneamente durante um evento de chuva. A erosão em entressulcos e sulcos são consideradas como os estágios iniciais da erosão hídrica, são fonte primária de perda de solo, mas podem rapidamente evoluir para erosão efêmera ou mesmo em voçorocas sob condições favoráveis (He et al., 2022).

Na erosão em sulcos a desagregação e transporte do solo dar-se por um fluxo concentrado ao longo de pequenos canais, que podem ser pouco a pouco obliterados por manejo utilizados na lavoura, a erosão entressulcos consiste na translocação do solo entressulcos (Zhang, 2018). Ocorre por uma ação combinada do efeito salpicamento ("rain splash") e do escoamento difuso (Oliveira, 2012). Deste modo, a erosão entressulcos compreende a perda de solo pelo impacto de gotas de chuva e escoamento não concentrado, ou seja, a fonte de sedimentos no processo é composta, basicamente, por materiais superficiais do solo (Hu et al., 2020; Bryan, 1987).

O processo de erosão entressulcos (D_i) é um fenômeno altamente complexo, e pode ser influenciado por muitos fatores, como: inclinação gradiente, tipo de solo, rugosidade da superfície do solo, teor de umidade do solo, intensidade da chuva, infiltração, taxa de escoamento, comprimento da encosta e energia cinética da gota de chuva (Wang et al., 2019).

O transporte de sedimentos entressulcos é influenciado pela hidráulica do fluxo superficial, características da precipitação, propriedades do sedimento e interação entre a profundidade do fluxo e o tamanho da gota, a intensidade da precipitação desempenha um duplo papel na erosão entressulcos, não apenas destacando os solos, mas também melhorando o transporte de sedimentos de fluxos superficial (Zhang, 2018). Na erosão entressulcos, há remoção seletiva de

partículas finas, atribuída à capacidade insuficiente do fluxo terrestre para transportar partículas grandes destacadas, ou para a deposição de sedimentos mais grosseiros (Shi et al., 2012).

Nos entressulcos, o impacto das gotas de chuva é o fator responsável pela desagregação das partículas em massa do solo possibilitando desagregar grandes quantidades de partículas devido à energia cinética das gotas, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (Cassol; Lima, 2003). Deste modo, na fase de desagregação a força erosiva é estabelecida pela energia cinética das gotas da chuva enquanto a resistência do solo age nas forças de natureza físico-química e biológica, a ação de resistência a desagregação está relacionada com fatores que conferem a estabilidade dos agregados do solo (Oliveira, 2012).

O transporte das partículas é efetivado, em sua maioria, pelo fluxo laminar raso, o qual é auxiliado pela turbulência provocada pelo impacto das gotas de chuva, que suspende e permanecem suspensas as partículas de solo (Foster et al., 1985). Na erosão em entressulcos, o material desagregado são transferidos para a região dos sulcos, este processo parte do princípio que a carga de sedimentos a ser transportada é limitada, ou pela disponibilidade de sedimentos ou pela capacidade de transporte do escoamento difuso (Foster, 1982).

Considerando que existem inúmeros fatores afetando o processo de erosão do solo entressulcos, mais pesquisas são necessárias para identificar o processo limitante da erosão entressulcos com base em diferentes tipos de solos e comprimentos de inclinação, além disso, vários modelos de erosão entressulcos foram estabelecidos com base em parâmetros de fluxo, incluindo velocidade de fluxo, tensão de cisalhamento, potência do fluxo e potência unitária do fluxo (Li et al., 2021).

2.3.1 Parâmetros hidrodinâmicos na erosão entressulcos

A erosão hídrica do solo é altamente dependente das propriedades hidráulicas do fluxo, portanto, parâmetros hidráulicos são frequentemente utilizados para prever a erosão em entressulcos e concentração de sedimentos (Feng et al., 2020; Qian et al., 2016). Os processos de escoamento e produção

de sedimentos são amplamente determinados por características hidráulicas de fluxo, por outro lado, os processos de erosão do solo podem alterar as características do fluxo hidráulico, alterando o regime do fluxo e rugosidade da superfície (An et al., 2012). Para Li et al. (2021) o parâmetro de intensidade de fluxo mostrou-se como preditor favorito para estimar a taxa de erosão entressulcos para encostas íngremes com produção de sedimentos altos e grossos nas regiões do planalto de Loess na China.

Muitos parâmetros podem ser utilizados para estudos da erosão em entressulcos, inclusive o número de Reynolds (Re), número de Froude (Fr) e tensão cisalhante. O número de Reynolds é uma medida da razão entre as forças de inércia com as forças de viscosidade, obtida pela equação 13 segundo Simons; Senturk, (1992):

$$Re = \frac{vh}{\nu} \quad (13)$$

em que, Re é o número de Reynolds, adimensional; ν é a viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$).

Enquanto o número de Froude expressa a razão entre forças de inércia e as forças gravitacionais, obtida pela equação 14 segundo Simons; Senturk, (1992):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (14)$$

em que, Fr é o número de Froude, adimensional; g é aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Em ensaios de erosão entressulcos, as forças hidrodinâmicas que se contestam às forças de resistência ao escoamento, apresentam a seguinte relação com o número de Reynolds (Yoon; Wenzel, 1971):

$$f = \frac{K}{Re} \quad (15)$$

em que, f é o fator de perda de carga; Re é o número de Reynolds; K é um parâmetro hidrodinâmico adimensional de resistência.

De acordo com Guo et al. (2013) existem dois tipos de resistências: resistência ao fluxo e resistência à erosão, ambos desempenham papéis

importantes no processo de erosão do solo. A resistência à erosão é importante para o transporte de sedimentos, e geralmente é quantificado pela coesão ou estabilidade do agregado, já a resistência ao fluxo é quantificada usando, a equação de Darcy-Weisbach e a equação de Manning:

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (16)$$

$$n = V^{-1} S^{1/2} R^{2/3} \quad (17)$$

em que, f é a resistência ao fluxo por Darcy-Weisbach; n é a resistência ao fluxo por Mannig; g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); R é o raio hidráulico (m); S é a inclinação média (seno do ângulo da inclinação) e V é a velocidade média do fluxo ($m\ s^{-1}$).

Sun et al. (2020) estudaram a variação do coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach com base na rugosidade da superfície e a relação entre as características hidráulicas (gradiente de inclinação e descarga unitária), número de Reynolds e número de Froude, os resultados mostram que o coeficiente de atrito é diferente entre diferentes métodos de cultivo e a rugosidade do talude é o fator crítico da erosão do solo.

Zang et al. (2023), pesquisaram uma relação potencial entre parâmetros hidrodinâmicos, gradiente de talude e descarga de fluxo, os resultados mostraram que os parâmetros hidráulicos (velocidade média do fluxo, profundidade do fluxo, número de Froude, número de Reynolds, tensão de cisalhamento, coeficiente de arrasto, potência do fluxo e potência unitária do fluxo) diferiram com o aumento dos gradientes de inclinação e descargas do fluxo. E complementam que os resultados do estudo, fornecem uma base científica para a compreensão do mecanismo hidrodinâmico das mudanças dinâmicas do transporte de sedimentos no talude, aprofundando a compreensão do mecanismo de erosão do solo e melhorando a precisão da previsão do modelo do processo de erosão do solo.

Nos últimos anos, modelos têm sido propostos na literatura, considerando as relações entre a taxa de erosão em entressulcos e parâmetros hidrodinâmicos. Para a previsão da erosão em entressulcos com o uso de parâmetros hidráulicos, frequentemente, os mais utilizados são a velocidade do fluxo superficial, a tensão cisalhante e a potência do fluxo (Qian et al, 2016; Wu

et al., 2017; Wu et al., 2022). Dentre os modelos propostos para previsão de D_i a partir de parâmetros hidrodinâmicos temos:

$$\text{Huang (1995)} \quad D_i = 0,502\Omega - 0,838 \quad (18)$$

$$\text{Fan e Wu (1999)} \quad D_i = a\tau^{(-1,3 \sim -0,97)} \quad (19)$$

$$\text{Fox e Bryan (2000)} \quad D_i = 4,45P + 2,54 \quad (20)$$

$$\text{Cao et al. (2015)} \quad D_i = 0,00008\Omega - 0,00079 \quad (21)$$

$$\text{Wu et al. (2017)} \quad D_i = 0,06\Omega - 0,0003 \quad (22)$$

$$\text{Wang et al. (2018)} \quad D_i = 0,0154 (\Omega - 0,00325) \quad (23)$$

$$\text{Wang et al. (2020)} \quad D_i = 36.848,79 (\Omega - 0,011) \quad (24)$$

$$\text{Qian et al. (2020)} \quad D_i = 0,0066\Omega - 9,9699 \times 10^{-5} \quad (25)$$

em que, D_i é a taxa de erosão em entressulcos, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; Ω é a potência do fluxo, W m^{-2} ; τ é a tensão cisalhante, Pa; P é potência unitária do fluxo, m s^{-1} .

2.3.2 Tensão de cisalhamento do solo

A propriedade do solo mais adequada para caracterizar a resistência à erosão do solo durante o processo de separação do solo e fluxo concentrado é a resistência ao cisalhamento, ou seja, a resistência máxima que o material do solo pode suportar sob tensões de cisalhamento (Zhang et al., 2022). A tensão cisalhante hidráulica é definida como a tensão de cisalhante exercida pelo fluxo no controle do canal, sendo a tensão de cisalhante hidráulica crítica a máxima a que solo pode sofrer quem que haver o movimento das partículas na superfície, deste modo a taxa de erosão representa o gradiente da relação estabelecida entre a tensão cisalhante aplicada e a perda de solo medida (Bastos, 1999).

A tensão crítica de cisalhamento pode ser considerada uma medida da resistência do solo à erosão hídrica, e a resistência ao cisalhamento superficial do solo pode ser considerada o parâmetro mais adequado para prever a tensão crítica de cisalhamento (Zhang et al., 2022). O cisalhamento crítico estima a resistência à mobilização e ao início do movimento das partículas do solo, uma vez que a tensão hidráulica de cisalhamento excede a tensão crítica de cisalhamento do solo, as partículas do solo começam a se moverem nos canais do sulco (Lee et al., 2022).

Deste modo, a tensão crítica de cisalhamento está relacionada a vários fatores, incluindo: a química, minerais e orgânicos dos coloides, que determinam a coesão de pequenos agregados; o tamanho, a forma e a organização espacial das partículas e agregados, que determinam a resistência ao atrito; a presença de uma rede de raízes e hifas que auxilia na constituição de grandes agregados (Léonard; Richard, 2004). Consiste também em parâmetros hidráulicos como profundidade da água, largura da água ou densidade do fluido (Wirtz et al., 2013).

2.4 Uso de modelos como subsídio no controle de erosão

O controle do processo erosivo e um manejo agrícola eficiente, requer o entendimento das interações entre os processos biológicos, químicos, físicos, hidrológicos e climáticos. Salumbo (2020), descreve de forma genérica três categorias para identificar os processos erosivos, sendo: 1) métodos de prospecção de erosão, que utilizam a observação de sinais visíveis de erosão; 2) métodos que utilizam o mapeamento de fatores que determinam os riscos de erosão; 3) e métodos que utilizam modelos de perda de solo.

Com relação ao uso da modelagem, nos últimos anos modelos foram desenvolvidos e utilizados com mais frequência para realizar previsões das condições atuais e futuras de erosão do solo, já que estes permitem descrever matematicamente e prever as etapas de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo, auxiliando na escolha de melhores estratégias para uso e manejo do solo, e na gestão da erosão de forma direta, mais rápida e custo mais baixo.

Os primeiros modelos matemáticos utilizados para aferir a perda de solo por erosão, tem seus procedimentos fundamentados em bases empíricas. Posteriormente, outros modelos foram criados a partir de processos físicos, capazes de realizar estimativas de perdas de água e solo como o WEPP.

Deste modo, o primeiro modelo elaborado de base empírica para previsão de perda de solo foi a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (Wischmeier; Smith, 1978). Posteriormente sua versão foi revisada, RUSLE (Equação Universal de Perda de Solo Revisada) (Renard et al., 1997). Esses modelos

usam informações do meio físico para estimar a erosão, geralmente, em escala de bacia hidrográfica, a perda anual de solo é estimada a partir da combinação de seis fatores contidos na RUSLE (Nachtigal et al., 2020). Sua expressão é a equação:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (26)$$

em que, A é a taxa de erosão; R é o fator de erosividade da chuva; K é o fator de erodibilidade do solo; LS é o fator de topográfico; C é o fator cobertura do solo, uso e manejo solo; P é o fator de práticas conservacionistas.

Baseado na textura e teor de carbono orgânico do solo o fator K - USLE (KUSLE) é uma medida importante para calcular a erodibilidade, apesar de seu valor está condicionado ao clima e aos sistemas de cultivo, é uma das ferramentas mais bem-sucedidas e prática para determinar o potencial de erodibilidade, baseando-se diretamente nas propriedades do solo (Radziuk; Świtoniak, 2021).

Os princípios de cálculo do fator K foram desenvolvidos em outros modelos como Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) (Williams et al., 1983), The European Soil Erosion Model (EUROSEM) (Morgan et al., 1998), dentre outros modelos.

Keller et al. (2021) estudaram os modelos USLE (Equação Universal de Perda de Solo), RUSLE (USLE Revisado), USLE-M (USLE-Modificado) e modelagem EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), com base em simulações de chuva realizadas no Koppány Vale, Hungria. Os resultados mostram que o EPIC produziu valores maiores, e o coeficiente de determinação resultou em uma correlação aceitável entre os valores medidos e calculados apenas no caso de USLE-M. Com base em outros indicadores estatísticos (por exemplo, NSEI, RMSE, PBIAS e erro relativo), RUSLE, USLE e USLE-M resultaram no melhor desempenho, no geral, independentemente de serem modelos sem base física, os modelos do tipo USLE produziram valores mais precisos de erodibilidade do solo, modelando assim os resultados.

Outros modelos como o WEPP, EUROSEM, LISEM (Limburg Soil Erosion Model), fazem uma distinção explícita dos processos de erosão entressulcos e em sulcos, e estimam a taxa de erosão entressulcos usando uma função com

vários fatores, incluindo o parâmetro de erodibilidade entressulcos que expressa a resistência do solo à erosão em entressulcos, erosividade da chuva, características de relevo, fatores hidráulicos, vegetação e uso da terra (Zang et al., 2014).

Em modelos de erosão, a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento são parâmetros essenciais, pois representam a resistência do solo que pode afetar significativamente a taxa de erosão. Esses parâmetros são normalmente estimados com experimentos de campo, parcela e escala de laboratório usando propriedades limitadas do solo e características de fluxo (Lee et al., 2022). Deste modo, torna-se fundamental a formação de banco de dados que permitam analisar e modelar diversas áreas, bem como a inserção de suas características pedológicas, topográficas e climáticas locais e/ou regionais, dentre outras informações, que auxiliem na saída de dados com boa confiabilidade dos modelos.

Nessa perspectiva, pesquisas como de Wu et al. (2022) buscaram compreender e quantificar padrões de erosão em solo argiloso, causados por diferentes variações da intensidade da chuva, declividade do terreno, velocidade do fluxo e a influência de parâmetros hidrodinâmicos dos solos estudados. Os resultados demonstram, que a potência do fluxo representou um preditor confiável da taxa de erosão laminar, e a tensão de cisalhamento foi o melhor preditor. Por outro lado, o fluxo unitário e a potência foram considerados um preditor ruim da taxa de erosão da laminar.

Wu e Chen (2020) realizaram um estudo abordando a modelagem de evolução de sulcos e combiná-los com um modelo de erosão do solo de chuva-escoamento para simular o ciclo de feedback de desenvolvimento geomórfico de encostas e processos de erosão do solo, e concluíram que as características da rede de sulcos alteram continuamente a erosividade e a separação dos fluxos da erosão do solo em entressulcos e sulcos. Além disso, a análise de sensibilidade indica que tanto a evolução do sulco quanto os processos de erosão do solo são sensíveis aos parâmetros de evolução do sulco, intensidade da chuva e ângulo de inclinação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na área da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho no município de Jaboticabal, região Nordeste do Estado de São Paulo (Figura 1), a microbacia possui uma extensão aproximada de 74 km². As coordenadas geográficas em latitudes Sul 21° 04' a 21° 21' e longitudes Oeste de Greenwich 48° 08' a 48° 26', com altitudes que variam aproximadamente entre 480 a 630 m.

O clima da região, pela classificação de Köppen é tipo Aw, subtropical, com inverno seco e com chuvas no verão, apresentando temperatura média anual em torno de 22,3°C e precipitação pluviométrica média anual de 1.206,5 mm (UNESP, 2017).

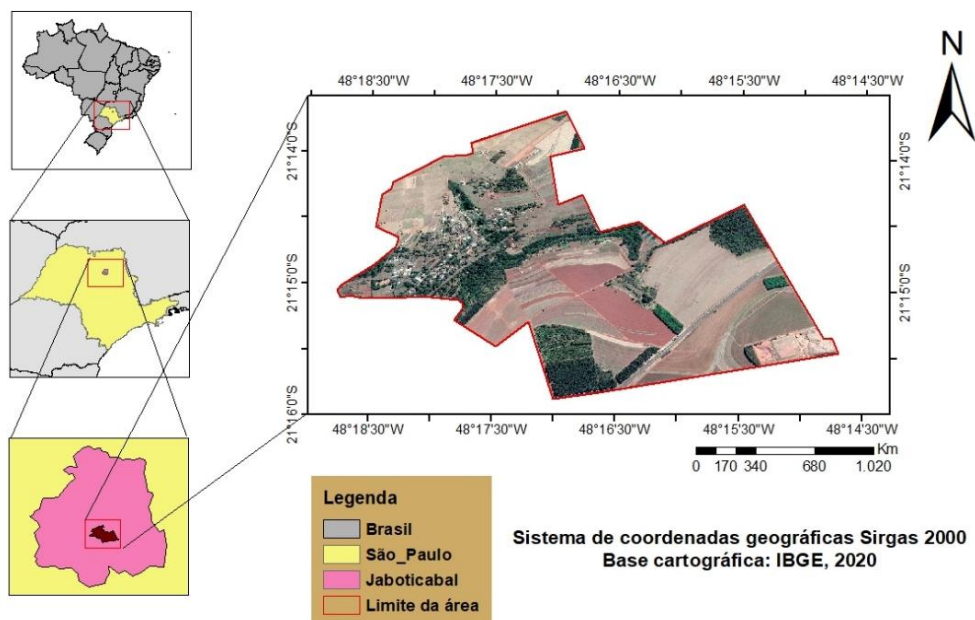


Figura 1: Localização da área de estudo na Universidade Estadual Paulista (UNESP) Júlio de Mesquita Filho, município de Jaboticabal, estado de São Paulo - Brasil.

Com bioma Mata Atlântica, a vegetação é tipo floresta estacional tropical, contendo trechos do cerrado, possuindo relevo suavemente ondulado, com declividade média em torno de 5%, nas áreas mais baixas a declividade podem alcançar até 13% (Veloso et al., 1991).

A área de estudo possui diversos cultivos com áreas experimentais, composto por pastagens, cultivos de cereais, cana-de-açúcar, silvicultura (eucaliptos). Possui o material geológico inserido na faixa de transição arenito-basalto, composto por arenitos do Grupo Bauru e basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral (Cunha, 2000).

Os solos utilizados foram classificados com base em Santos et al. (2018) 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 sulfúrico; ρ_r é a densidade de partículas; ρ_s é a densidade do solo. Fonte: Martins Filho (1999); Camargo et al. (2014).

Um completo delineamento experimental foi conduzido, num esquema fatorial (quatro níveis de declive, quatro intensidade de chuva, três solos e três repetições, resultando em 144 amostras de enxurrada. Os declives foram 5, 9, 15 e 40%, e as intensidades de chuva foram 53, 74, 91 e 125 mm h⁻¹. Parcelas experimentais, com 0,50 m x 0,75 m (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, 15 e 40%. O preparo do solo também foi realizado no sentido do declive.

As parcelas experimentais foram submetidas a chuvas simuladas com intensidades de 53, 74, 91 e 125 mm h⁻¹, 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:

$$D_i = m_s / (t A) \quad (27)$$

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).

Um segundo experimento ainda foi conduzido nos latossolos LV₁, LV₂ e LV₃, num esquema fatorial (quatro níveis de declive, três intensidades de chuva, três solos e três repetições, resultando em 108 amostras de enxurrada. As declividades do terreno foram: 5,2, 9, 15,1 e 40%, e as intensidades de chuva foram 53, 74, 91 e 125 mm h^{-1} . O intuito deste experimento foi o de gerar dados independentes de D_i para o processo validação de modelos. Todos os procedimentos experimentais foram os mesmos descritos anteriormente e semelhantes aos adotados por Martins Filho et al. (2003).

As análises de correlações entre declive, taxa de descarga, intensidade de chuva e taxa de erosão em entressulcos foram realizadas. Procedimento de

análise não linear para minimizar a soma de quadro dos resíduos foi conduzido com o método Gauss-Newton. Todas as análises estatísticas foram realizadas no Statistica (Statsoft, 1994).

Para a validação de modelos as estatísticas propostas por Loague e Green (1991), Lengick e Fox (1994) e Vanuytrecht et al. (2016) foram as utilizadas:

Erro máximo (ME),

$$ME = \text{Máximo } |P_i - O_i| \quad (28)$$

Erro médio quadrático relativo (RMSE),

$$RRMSE = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} \times (100/\bar{O}) \quad (29)$$

Eficiência do modelo (EF),

$$EF = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (30)$$

Coeficiente de massa residual,

$$CRM = (\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (31)$$

Diferença média (MD),

$$MD = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (32)$$

em que, O_i é o valor observado ou medido; P_i é o valor estimado; i é o índice de 0 a n ; n é o espaço amostral, e \bar{O} é a média dos valores observados.

O ME mede a maior diferença absoluta entre os valores preditos (P_i) e observados (O_i), um ME menor indica menor discrepância máxima. A EF avalia a eficiência do modelo em relação à variabilidade dos dados observados, um EF próximo de 1 indica alta eficiência, enquanto valores negativos indicam desempenho insatisfatório. O coeficiente de massa residual, avalia o viés do modelo em termos de massa residual, valores próximos de zero indicam menor viés. A MD, calcula a média das diferenças entre os valores preditos e observados, valores menores indicam melhor ajuste.

Como não há um padrão para a validação de modelos, quando os valores preditos e observados eram os mesmos, considerou-se que os parâmetros estatísticos RMSE, EF e MD assumem valores iguais a 0; 1; e 0, respectivamente.

O RMSE pode ser classificado, quanto à acuracidade, em termos de desempenho da estimação de um modelo como: < 10% excelente; 10-20% bom; 20-30% fraco; >30% ruim (Jamieson et al. 1991).

Ainda no processo de validação uma equação apresentada por Martins Filho et al. (2003) e duas ajustadas e calibradas com os dados do primeiro experimento também foram avaliadas:

$$D_i = 1.604.755,1 I R (1,061 - 1,037 e^{-4 \text{ sen}\theta}) \quad (33)$$

$$D_i = 1.432.147,00 I R (1,050 - 0,850 e^{-4 \text{ sen}\theta}) \quad (34)$$

$$D_i = 1.263.152,0 I R (1,061 - 1,037 e^{-4 \text{ sen}\theta}) \quad (35)$$

em que, D_i é a taxa de erosão em entressulcos, I é a intensidade de chuva (m s^{-1}); R é a taxa de enxurrada (m s^{-1}); θ é o ângulo de inclinação do terreno ($^\circ$). As constantes ajustadas nas Eqs. 33 a 35 representam a erodibilidade em entressulcos do solo (K_i).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A taxa de erosão em entressulcos

A análise da variância (ANOVA) demonstrou que a classe de solo, intensidade de chuva e declividade do terreno têm efeitos significativos ($p < 0,01$) na taxa de erosão entressulcos no estado de equilíbrio dinâmico, inclusive a interação Solo \times S \times I (Tabela 2). Deng et al. (2020), aborda que o efeito da intensidade das chuvas na erosão do solo está intimamente relacionado com as propriedades do solo, e outros fatores como o gradiente e o comprimento das encostas.

Características do solo apresentadas na Tabela 1, auxiliam na interpretação dos resultados, observa-se que os conteúdos MO presentes no solo são baixos, com teores de 19 g k^{-1} no LV₁, 24 g k^{-1} no LV₂ e 30 g k^{-1} no LV₃. Para os teores de óxidos de ferro, os resultados mostraram-se mais elevados, este fator segundo Alleoni e Camargo (1995) exercem influência nos atributos eletroquímicos de solos que são altamente intemperizados. O LV₁ apresentou valores mais baixos de MO, argila e Fe_2O_3 , e diferenciado pelas características distróficas. Segundo Oliveira et. al., (2012) a fração areia fina e silte são consideradas facilmente erodíveis devido pouca coesividade e fácil transporte de partículas.

Tabela 2. Análise da variância do sedimento erodido como variável dependente utilizando uma combinação de fatores com dados de três Latossolos.

Causas de variação	Graus de liberdade	QM $\times 10^8$ ⁽¹⁾	F ⁽²⁾
Solo	2	9,4	15,333**
Declive (S)	3	124,5	203,275**
Intensidade de chuva (I)	3	174,3	284,593**
Solo \times d%	6	2,7	4,401**
Solo \times I	6	1,9	3,069**
d% \times I	9	8,4	13,694**
Solo \times d% \times I	18	1,6	2,667**

(1) QM é o quadrado médio; (2) ** significativo ao de 1% pelo teste F.

A taxa de erosão em entressulcos apresentou maior correlação com a taxa de enxurrada, o que indica a importância da descarga de enxurrada na predição da erosão em entressulcos (Tabela 3). Esta constatação também foi confirmada em estudos prévios conduzidos por Zhang et al. (1998) e Zhang et al. (2014). Em estado de não equilíbrio dinâmico, a inclusão do fator enxurrada se faz ainda mais necessária (Kinnel, 1993; Zhang et al., 1998). A inclusão do fator enxurrada considera diretamente os efeitos da infiltração de água no solo na taxa de erosão em entressulcos (Zhang et al., 1998).

Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson usando fatores de erosão combinando resultados de três Latossolos.

	Intensidade de chuva (I, m s ⁻¹)	Enxurrada (R, m s ⁻¹)	Declividade (S, m m ⁻¹)	Erosão em entressulcos (D _i , kg m ⁻² s ⁻¹)
I	1,000	0,639**	0,003	0,533**
R		1,000	0,086	0,738**
S			1,000	0,581**
D _i				1,000

** significativo ao nível de 1% de probabilidade.

4.2 Efeito da declividade e intensidade de chuva na erosão em entressulcos

Para avaliar o efeito da declividade considerando a Eq. 2, o expoente b foi estimado em cada intensidade de chuva nos três Latossolos. A média dos expoentes ajustados foi 0,71 no LV₁, 0,63 no LV₂ e 0,67 no LV₃, valores que não diferem de 0,67 (p>0,05) nas intensidades de chuvas aplicadas (Tabela 4). Logo, S_f no nosso estudo é proporcional a S^{2/3} como registrado por Bulygin et al. (2002). Melhorias neste expoente poderão ser adicionadas após análise da interação solo × declividade × intensidade de chuva (Zhang et al., 1998).

Tabela 4. Coeficientes ajustados a e b ao Modelo $D_i = a S^b$.

Solo	Chuva	a	b	Média de b
LV ₁	1	0,0007	1,142	0,71 ^{ns}
	2	0,0006	0,554	
	3	0,0011	0,678	
	4	0,0014	0,460	
LV ₂	1	0,0006	0,857	0,63 ^{ns}
	2	0,0007	0,613	
	3	0,0013	0,654	
	4	0,0013	0,400	
LV ₃	1	0,0005	0,708	0,67 ^{ns}
	2	0,0009	0,668	
	3	0,0013	0,624	
	4	0,0025	0,661	
Geral				0,63 ^{ns}

ns é não significativo pelo teste t ($p > 0,05$).

No estado de equilíbrio dinâmico, os efeitos da taxa de descarga na erosão em entressulcos para todas as chuvas são apresentados na Figura 2. Pode ser observado que o LV₁ apresentou maior variabilidade que o LV₂ e LV₃. Todavia, no estado de equilíbrio dinâmico a taxa de enxurrada foi positiva e significativamente relacionada à taxa de erosão em entressulcos para todos os solos (Tabela 3).

Taxa de erosão em entressulcos, D_i , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

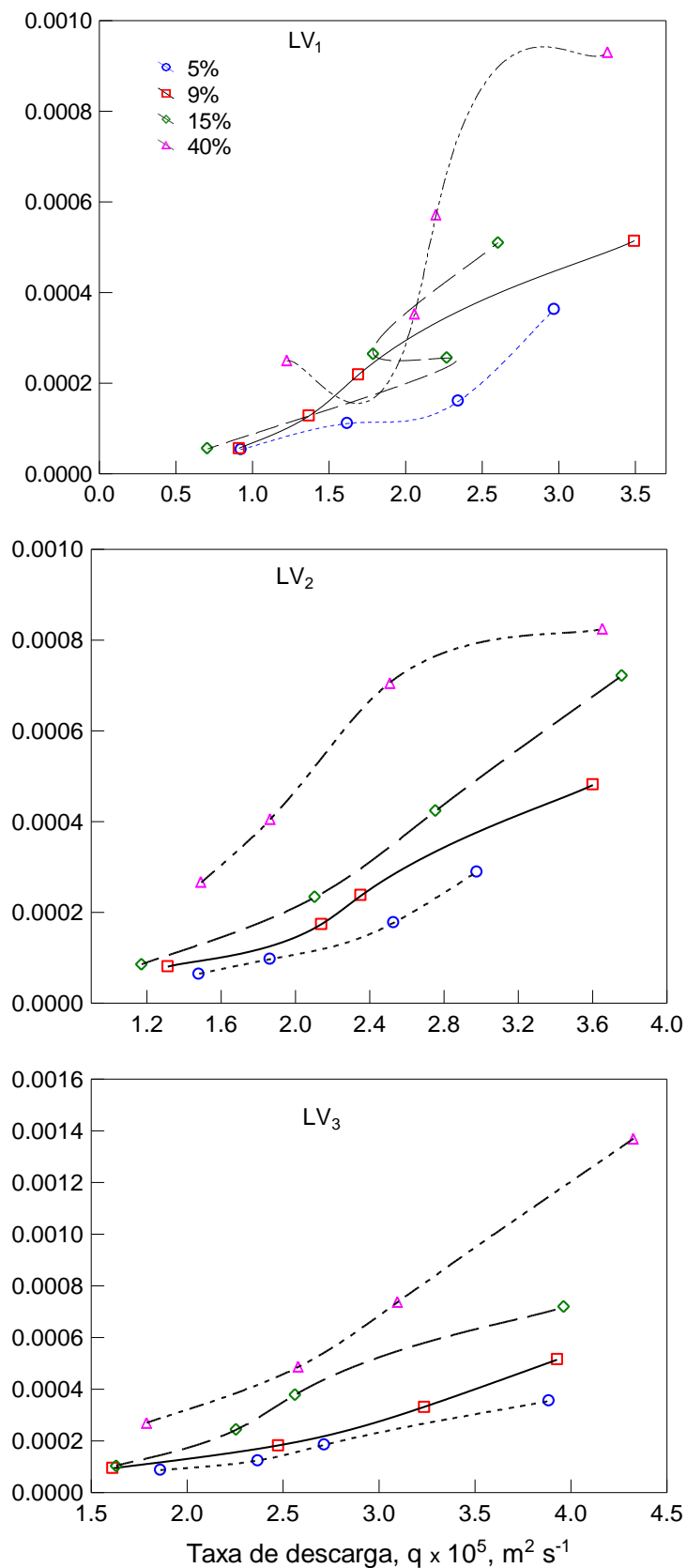


Figura 2. Efeitos da taxa de descarga com declividade de 5%, 9%, 15% e de 40%, na erosão em entressulcos para os solos LV₁, LV₂ e LV₃ em condições de estado de equilíbrio dinâmico, com nível de significância a 5% de probabilidade.

A taxa de erosão em entressulcos foi ajustada com um fator declive $S_f \propto S^{2/3}$ em função do declive (S), como mostrado na Figura 3. As inclinações das curvas variam com a intensidade da chuva. O não paralelismo entre as curvas ajustadas na Figura 3 indica segundo Zhang et al. (1998), existir interação entre intensidade de chuva e grau de declividade (Tabela 2). Na Figura 3 é possível observar que o efeito do grau de declive na erosão em entressulcos decresce com declives mais íngrimes. Este efeito é atribuído ao fato de em baixas declividades o transporte ser limitado e em altas declividades o limitante passar a ser a taxa de desagregação (Meyer et al., 1975).

Os resultados demonstram que as interações apresentadas podem ser descritas pela multiplicação de fatores em um modelo. Os ajustes apresentados na Figura 2 podem ser descritos como:

$$D_i \propto \frac{dD_i}{dS_f} S_f \quad (36)$$

em que, dD_i/dS_f é a inclinação da regressão ajustada, e S_f é o fator declive igual a $S^{2/3}$. A Eq. 12/36 pode ser reescrita como:

$$D_i \propto \frac{D_i}{dI} \frac{dI}{dS_f} S_f \quad (37)$$

em que, dD_i/dI é proporcional a I, $dI = dR$ em condições de estado de equilíbrio dinâmico quanto a infiltração, R é a taxa de enxurrada, e a Eq. 37 pode ser reescrita como:

$$D_i \propto I S_f \frac{dR}{dS_f} \quad (38)$$

em que, o termo representa os efeitos da enxurrada bem como a interação enxurrada × declive caracterizada por um fator enxurrada.

Os modelos de predição de taxa de descarga em solos com declividade mais acentuadas, são úteis no dimensionamento de práticas agrícolas (como: criações de terraços, bacias de retenção, irrigação controlada) ou uso do solo de acordo com governança sejam realizados, pois, torna-se possível realizar previsões de escoamento superficial durante eventos de chuva, colaborando assim, para que perdas de solo por processos erosivos sejam reduzidas em áreas agricultáveis e ambientais.

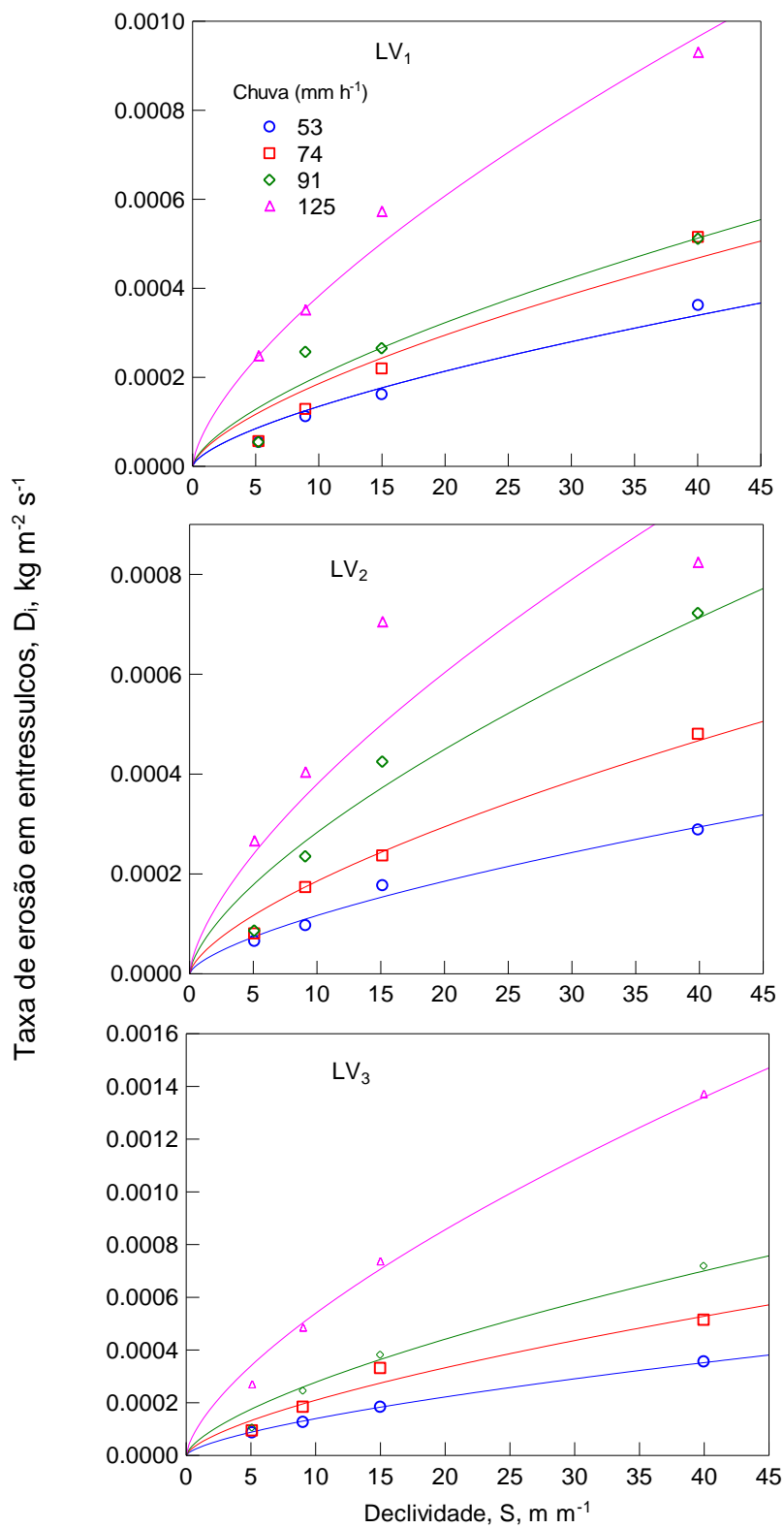


Figura 3. Efeitos da declividade com intensidade chuva de 53, 74, 91 e 125 mm h⁻¹, na taxa de erosão em entressulcos para os solos LV₁, LV₂ e LV₃, com nível de significância a 5% de probabilidade.

Com base nos resultados apresentados, considerando os mecanismos de erosão em entressulcos e as interações entre fatores de erosão (I , q , S e R) as seguintes equações foram propostas para serem ajustadas aos dados experimentais:

$$D_i = K_i I q^c S^{2/3} \quad (39)$$

$$D_i = K_i I R S_f \quad (40)$$

em que, K_i é a erodibilidade em entressulcos (Kg s m^{-4}), I é a intensidade da chuva (m s^{-1}), q é a taxa de descarga ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), c é um coeficiente de regressão, S é a declividade (m m^{-1}) e S_f é o fator declive proposto por Lebenow et al. (1990).

Os resultados na Tabela 5 claramente demonstram que os valores ajustados (Eq. 39) para c não diferem de 0,5 a $p=0,05$. O fator de escala nas Eqs. 39 e 40 descrevem a frequência de impacto das gotas da chuva, o qual foi no presente trabalho, a exemplo de Zhang et al. (1998), escolhido para representar a desagregação e a iminente capacidade de transporte devido ao impacto num fino fluxo superficial. A tensão cisalhante de um fino fluxo superficial de enxurrada é proporcional a $q^{1/3} S^{2/3}$ (Julien e Simons, 1985). Deste modo, com os valores de c obtidos (Eq. 39 e 5) pode-se considerar que o produto $q^{1/2} S^{2/3}$ é aproximadamente o valor de tensão cisalhante de um fino fluxo superficial, o qual poderá ser utilizado na descrição do transporte de sedimentos em entressulcos.

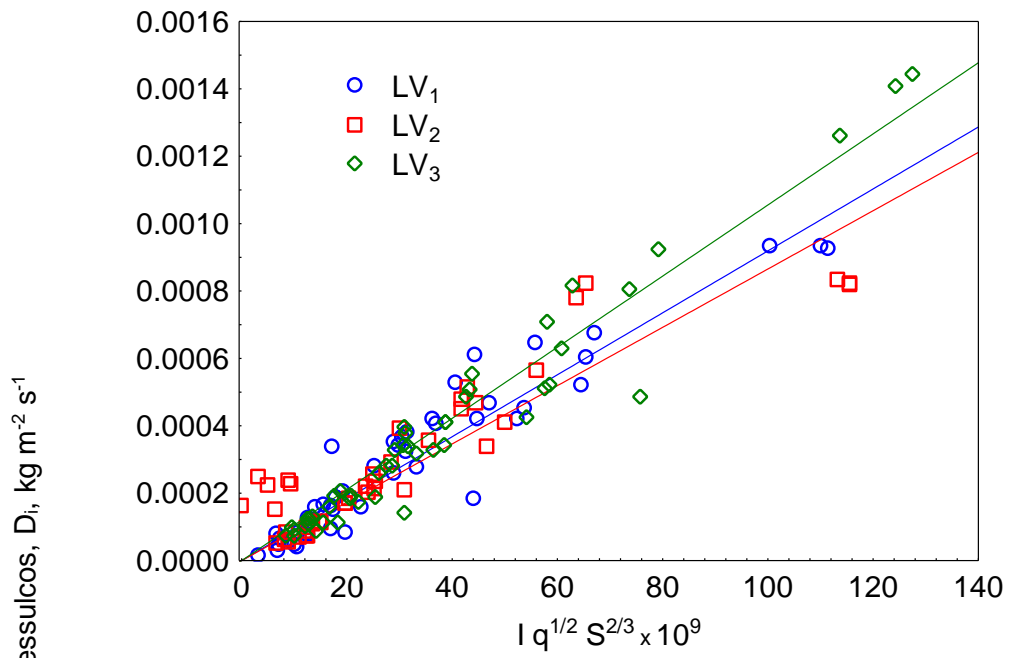
O desempenho das Eqs. 5 e 40 foram testados para os três Latossolos (LV_1 , LV_2 e LV_3), o que é apresentado na Figura 4.

As relações linearizadas para cada intensidade de chuva, declividade do terreno e taxas de descarga e/ou enxurrada indicam que as Eqs. 5 e 40 podem adequadamente simular a erosão em entressulcos. As inclinações das regressões (Figura 4) refletem a erodibilidade dos solos (K_i) para cada modelo avaliado, cujos valores podem ser observados na Tabela 5. É possível observar que com as Eq. 5 e Eq. 40, que os solos têm a seguinte ordem quanto a K_i : $LV_3 > LV_1 > LV_2$.

Tabela 5. Parâmetros ajustados a modelos de erosão em entressulcos.

Modelo	Equação	Solo	K _i	C	r ²	p>1
$D_i = K_i I q^c S^{2/3}$	Eq. 39	LV ₁	8741.026	0.49	0.90	0.000
		LV ₂	12798.76	0.54	0.80	0.000
		LV ₃	6427.949	0.45	0.94	0.000
$D_i = K_i I q^{1/2} S^{2/3}$	Eq. 5	LV ₁	9191.211		0.90	0.000
		LV ₂	8653.040		0.80	0.000
		LV ₃	10553.23		0.94	0.000
$D_i = K_i I R S_f$	Eq. 40	LV ₁	1312475		0.93	0.000
		LV ₂	1133603		0.82	0.000
		LV ₃	1315960		0.94	0.000

a



b

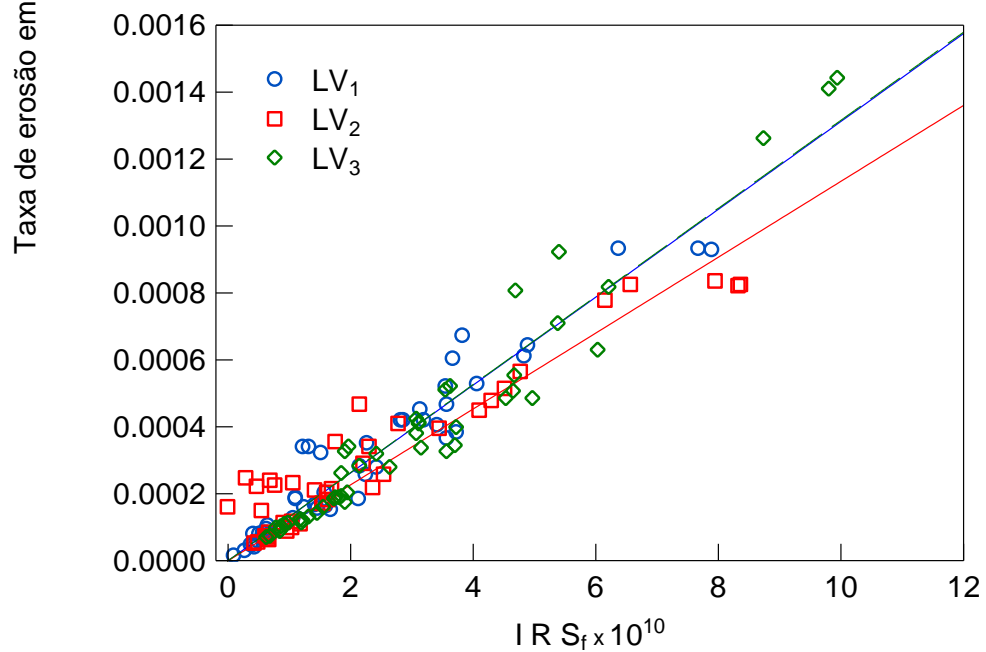


Figura 4. Regressões lineares com intercepto zero entre taxa de erosão em entressulcos para os solos LV₁, LV₂ e LV₃ e o fator de escala: a) Eq. 5 e b) Eq. 40, com nível de significância a 5% de probabilidade.

4.3 Validação de modelos

Dados experimentais não utilizados para calibração, ou nos testes iniciais de modelagem, foram empregados no processo de validação. Na execução do processo de validação das Eqs. 5, 39, 40, 33, 34 e 35 trinta e seis (36) valores de taxas de erosão em entressulcos foram utilizados para cada solo.

As estatísticas relativas ao desempenho dos modelos das Eqs. 5, 39, 40, 33, 34 e 35 são apresentadas na Tabela 6 para os LV₁, LV₂ e LV₃. A utilização das Eqs. 5, 39, 40 e 33 geraram erros máximos (ME) nas estimativas de D_i da ordem de $0,00041 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00046 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00044 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,00030 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no LV₁. A mesma sequência de Eqs. no LV₂ geraram erros máximos de $0,00057 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00053 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00069 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,00043 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Já no LV₃ os erros máximos foram $0,00024 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,00027 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,00010 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Para o conjunto LV₁+LV₂+LV₃ os ME foram de $0,00043 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,00067 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com as Eqs. 34 e 35.

Os erros máximos (ME) avaliados com as Eqs. 39, 5, 40 nas estimativas de D_i foram 1,3, 1,6 e 2,4 vezes maiores que com a Eq. 33 no LV₁. Já no LV₂, com o mesmo conjunto de Eqs. os ME em estimativas de D_i foram 2,0, 1,9 e 2,9 e no LV₃ 2,4, 2,2 e 1,9 vezes maiores que os obtidos com a Eq. 33. Como os valores de ME são próximos a zero (0,0), os resultados permitem inferir que há boa confiabilidade e acuracidade das estimativas de D_i com as Eqs. testadas (Tabela 6). Para averiguar esta condição estabeleceu-se regressões entre valores estimados (P_i) e medidos (D_i). Quando há uma significativa associação entre P_i e O_i , testes adicionais de paralelismo e coincidência podem ser realizados pela simples comparação dos coeficientes angulares e lineares das retas P_i vs. D_i e 1:1 (Lengnick e Fox, 1994).

As regressões entre P_i e D_i para os três latossolos demonstram que para as retas ajustadas (Tabela 7) que os coeficientes angulares são diferentes estatisticamente no nível de 5% de um (1,0), exceto para o LV₃ (Tabela 7). Já os coeficientes lineares das retas ajustadas entre P_i vs. D_i são iguais a zero estatisticamente no nível de 5% em todas as condições avaliadas. Logo, idealmente não temos retas paralelas e totalmente coincidentes. Isto demonstra que as Eqs. testadas não geram estimativas exatas dos valores de D_i .

Tabela 6. Análises estatísticas de eventos de erosão com modelos calibrados.

Solo	Modelo	ME	RMSE	CD	EF	CRM	MD
		Kg m ⁻² s ⁻¹	%			Kg m ⁻² s ⁻¹	Kg m ⁻² s ⁻¹
LV ₁	Eq. 39	0.00041	26.5	1.78	0.92	0.0844	-0.000029
	Eq. 5	0.00046	31.1	1.91	0.89	0.1323	-0.000045†
	Eq. 40	0.00044	39.9	1.78	0.81	0.2656	-0.000090†
	Eq. 33	0.00030	20.2	1.37	0.95	0.1031	-0.000035†
LV ₂	Eq. 39	0.00057	44.5	2.40	0.78	0.2042	-0.000074†
	Eq. 5	0.00053	42.0	2.36	0.80	0.1758	-0.000064†
	Eq. 40	0.00069	55.4	2.22	0.66	0.3398	-0.000123†
	Eq. 33	0.00043	27.0	1.54	0.92	0.0665	-0.000024
LV ₃	Eq. 39	0.00024	20.7	1.37	0.95	0.2042	0.000033†
	Eq. 5	0.00025	19.8	1.37	0.95	0.1758	0.000027†
	Eq. 40	0.00027	21.3	1.39	0.94	0.3398	-0.000053†
	Eq. 33	0.00010	9.0	0.97	0.99	0.3398	0.000020†
LV ₁ +LV ₂ +LV ₃	Eq. 34	0.00045	26.2	1.68	0.92	0.08379	-0.000030†
	Eq. 35	0.00067	31.6	1.48	0.88	0.13921	-0.000051†

Em que: ME é o erro máximo; RMSE é o erro-padrão das estimativas normalizado; CD é o coeficiente de determinação; EF é a eficiência do modelo; CRM é o coeficiente de massa residual; MD é a diferença média. † não difere de zero, estatisticamente, pelo teste t ao nível de 5%.

Quando há um ajuste perfeito entre valores medidos e estimados, o valor de CD é 1,0 (Loague e Green, 1990). Como pode ser observado isto não ocorreu com o uso das Eqs. 39, 5, 40, 33, 34 e 35 (Tabela 6 e 7). A Eq. 33 foi a que apresentou os valores de CD mais próximos da 1,0 nos LV₁, LV₂ e LV₃, o que corrobora resultados de Martins Filho et al. (2003) obtidos com os mesmos latossolos do presente trabalho.

Os erros nas estimativas de erosão em entressulcos, com base no RMSE, variaram de 20,2% a 39,9% no LV₁, 27,0% a 55,4% no LV₂ e 9,0% a 21,3% no LV₃ e para LV₁+LV₂+LV₃ 26,2% e 31,6% (Tabela 6).

Em função do RMSE, conforme Jamieson et al. (1991), no LV₁ as Eqs. 39, 5, 40 e 33 apresentam, nesta ordem, razoável (20% < RMSE ≤ 30%), pobre (RMSE > 30), e bom (10% ≤ RMSE < 20%) desempenho em estimar D_i. Para o LV₂ o desempenho das Eqs. 39, 5 e 40 para estimar D_i, com base no RMSE, é pobre e razoável com a Eq. 33 (Tabela 6). As Eqs. 39 e 40 apresentaram desempenhos razoáveis, a Eq.5 apresentou bom desempenho e a Eq. 33 excelente (RMSE < 10%) para estimar D_i no LV₃. No conjunto LV₁+LV₂+LV₃,

quanto ao RMSE o desempenho das Eqs. 34 e 35 pode ser considerado razoável ($20\% < \text{RMSE} \leq 30\%$).

Tabela 7. Análises de regressão entre valores medidos (D_i) e estimados (P_i) de taxa de erosão em entressulcos para o LV_1 , LV_2 , LV_3 .

Solo	Modelo	Coefficiente Angular	Intercepto	R^2
LV_1	Eq. 39	0,7404	$5,944 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
	Eq. 5	0,7054	$5,508 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
	Eq. 35	0,6877	$1,587 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
	Eq. 33	0,8404	$1,918 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
LV_2	Eq. 39	0,5981	$7,184 \times 10^{-5} \ddagger$	0,97**
	Eq. 5	0,6136	$7,651 \times 10^{-5} \ddagger$	0,97**
	Eq. 35	0,5542	$3,852 \times 10^{-5} \ddagger$	0,95**
	Eq. 33	0,7841	$5,428 \times 10^{-5} \ddagger$	0,95**
LV_3	Eq. 39	0,8381	$9,611 \times 10^{-5} \ddagger$	0,97**
	Eq. 5	0,8411	$8,631 \times 10^{-5} \ddagger$	0,98**
	Eq. 35	0,8308	$1,255 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
	Eq. 33	1,0127 ‡	$1,503 \times 10^{-5} \ddagger$	0,99**
$LV_1+LV_2+LV_3$	Eq. 34	0,7568	$5,800 \times 10^{-5} \ddagger$	0,98**
	Eq. 35	0,7975	$1,690 \times 10^{-5} \ddagger$	0,98**

‡ não difere de um, estatisticamente, pelo teste t ao nível de 5%; † não difere de zero, estatisticamente, pelo teste t ao nível de 5%.

Com relação à eficiência das equações (EF), nota-se que as Eqs. 5, 39, 40, 33, 34 e 35 apresentam excelente eficiência ($EF > 0,70$) na estimativa da taxa de erosão em entressulcos (D_i) para o LV_1 , LV_2 e LV_3 , exceto no LV_2 com a Eq. 40, a qual apresentou boa eficiência ($0,35 \leq EF \leq 0,70$). O EF não avalia apenas a linearidade dos valores observados, mas também avalia a diferenças relativas entre valores medidos e estimados (Martins Filho et al., 2003). Um valor igual à unidade para EF indica a melhor eficiência numa estimativa (Vanuytrecht et al., 2016), o que não é o caso dos resultados de EF na Tabela 6. Com as Eqs. 34 e 35 os valores de EF foram de 0,92 e 0,88, nesta ordem, os quais demonstram a excelência das Eqs. nas estimativas de D_i . Em experimentos de predição da erosão em entressulcos Mahmoodabadi e Cerdà (2013) obtiveram

valores de EF de 0,31 a 0,90. Já Zhang e Wang (2017) obtiveram EF de 0,73 e 0,92, em estudo do processo de erosão em entressulcos em declives íngrimes ($> 17,6\%$). Já Martins Filho et al. (2003) obtiveram valores de EF de 0,97 a 0,99 para o mesmo conjunto $LV_1+LV_2+LV_3$.

Os valores de MD não diferiram significativamente de 0,0 (zero) pelo teste t (Tabela 6), exceto Eq. 39 no LV_1 e Eq. 33 no LV_2 . Um MD ideal seria igual à zero (0,0), ou seja, valores estimados (P_i) iguais aos medidos (D_i). Logo, apenas pelos valores de MD não é possível apontar qual é a melhor Equação para estimar D_i . Contudo, a associação MD e CRM nos permite inferir sobre superestimativas ou subestimativas geradas por um modelo. Quando $CRM > 0$ e $MD < 0,0$ há um indicativo que valores medidos são subestimados pelos valores estimados (Lengnick e Fox, 1994). No LV_3 a Eq.33 tendeu a superestimar os valores medidos ($MD > 0,0$, Tabela 6), o que é discordante de Martins Filho (1999) no mesmo LV_3 . Estas inconsistências nas estimativas são esperadas, visto que nenhum modelo é perfeito, como demonstrado nas Figuras 5, 6 e 7. Para o conjunto $LV_1+LV_2+LV_3$ as Eqs. 34 e 35, o $CRM > 0$ e $MD > 0$ também indicam que os valores medidos são subestimados pelos valores estimados com as Eq. 34 e 35 (Figura 8).

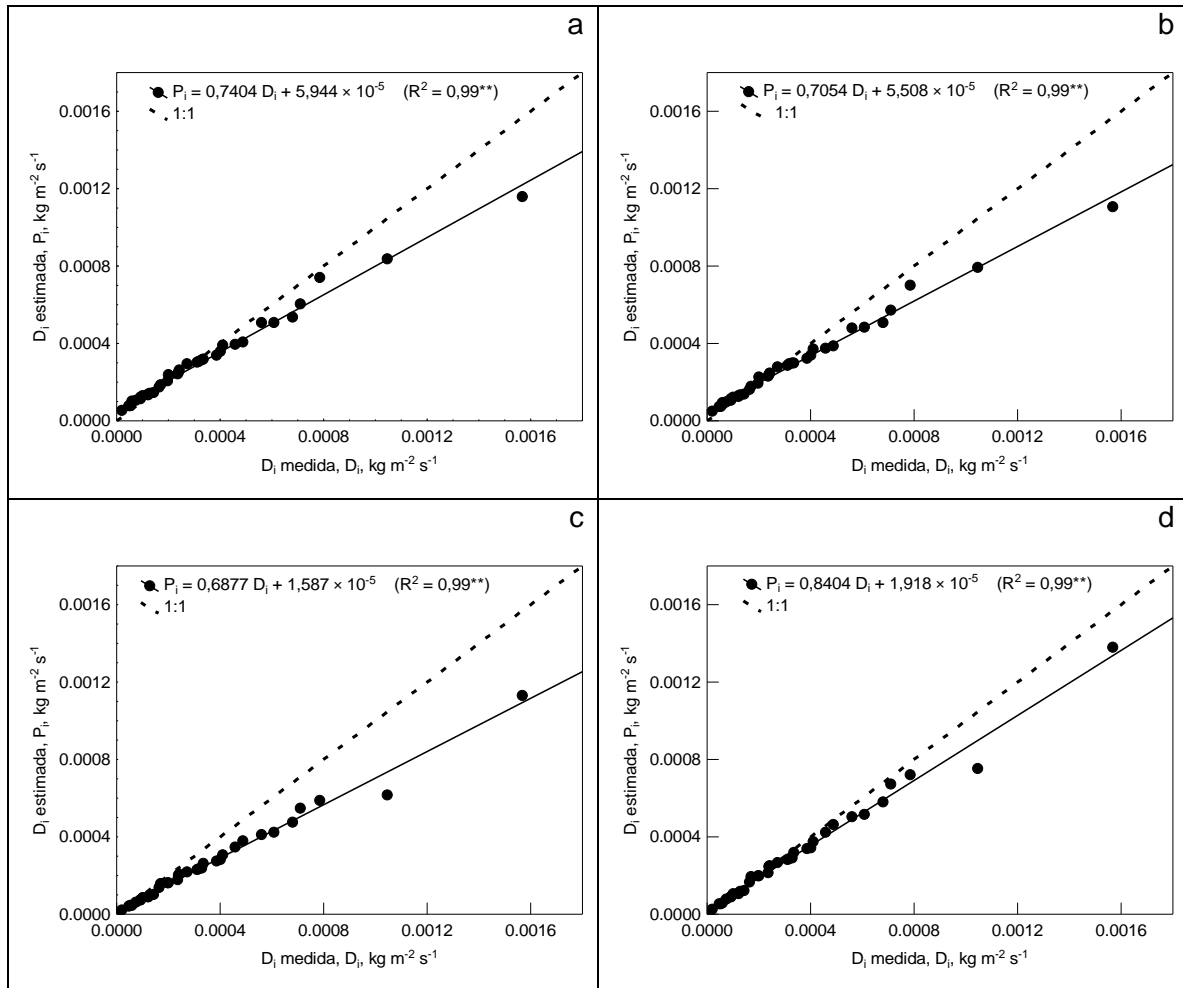


Figura 5. Valores medidos (D_i) em relação a valores estimados (P_i) de taxa de erosão em entressulcos no LV_1 .

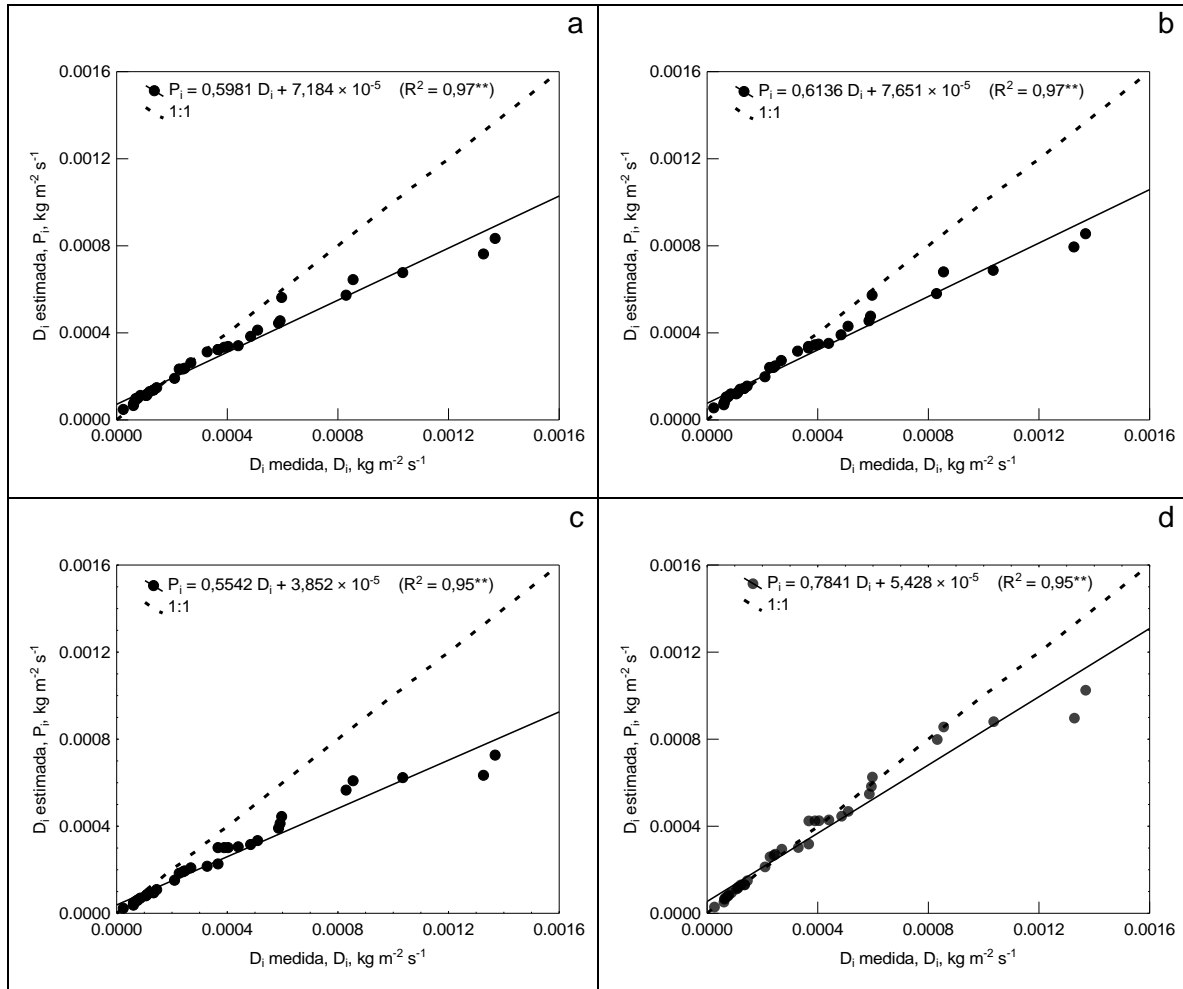


Figura 6. Valores medidos (D_i) em relação a valores estimados (P_i) de taxa de erosão em entressulcos no LV₂.

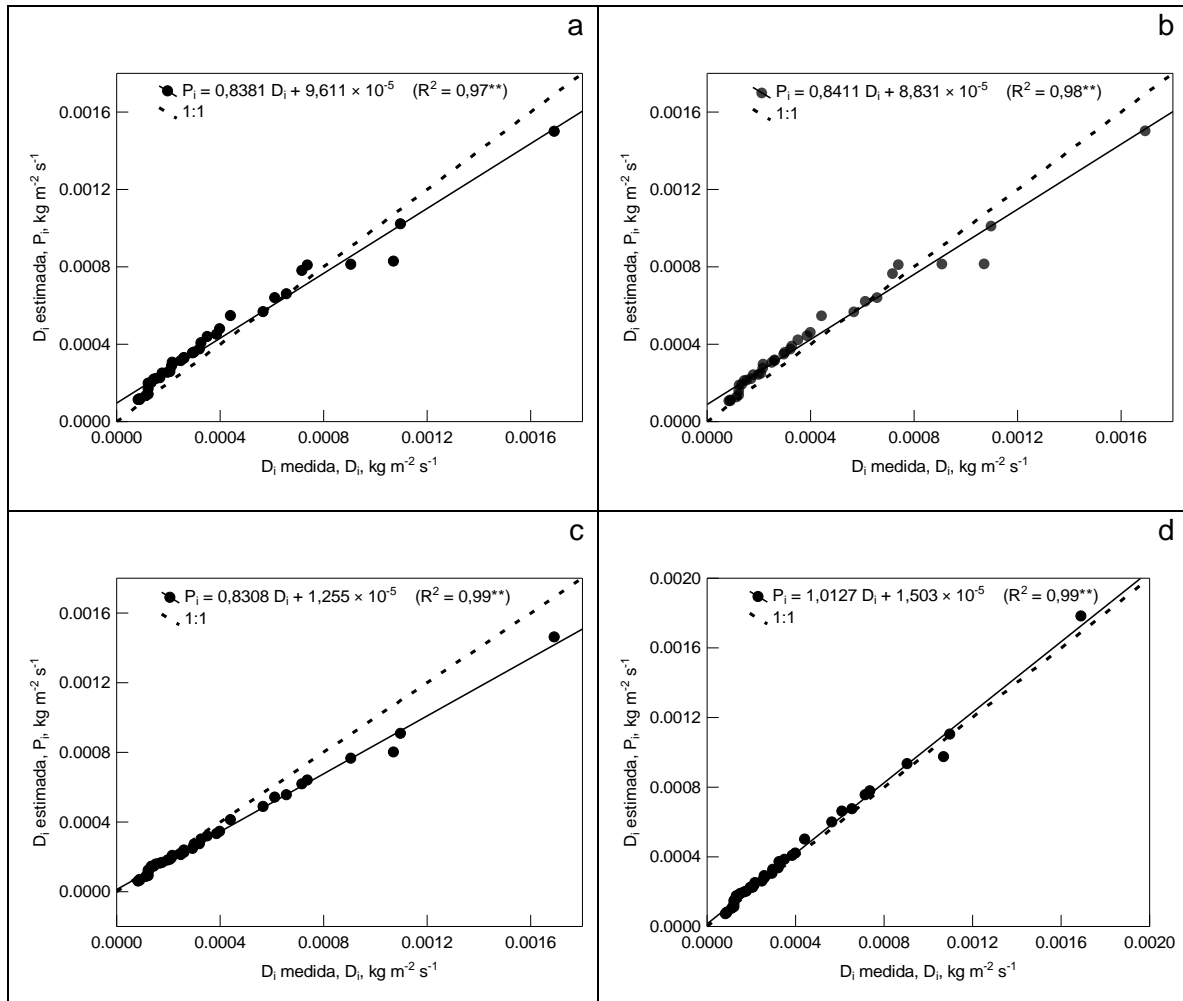


Figura 7. Valores medidos (D_i) em relação a valores estimados (P_i) de taxa de erosão em entressulcos no LV₃.

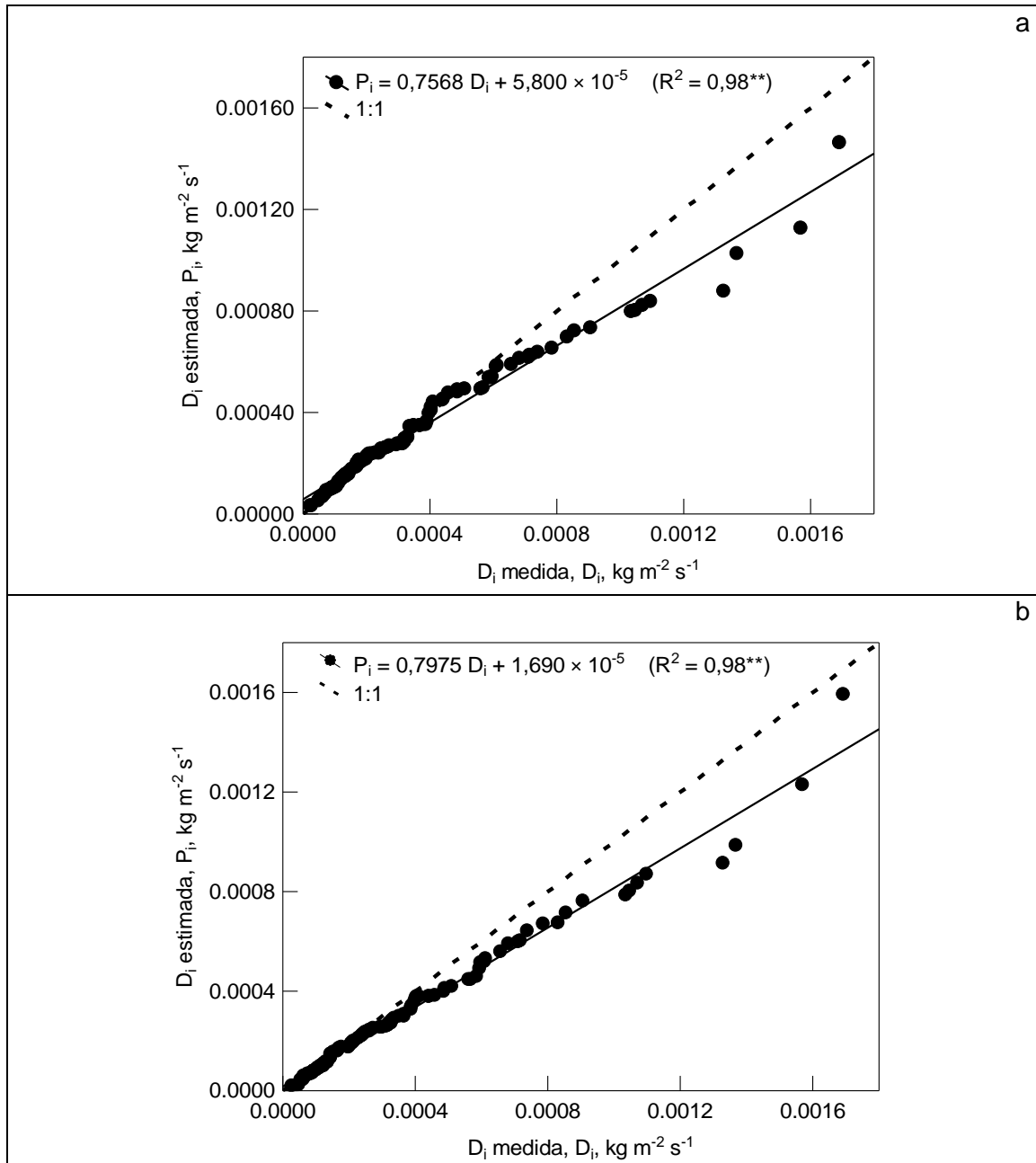


Figura 8. Valores medidos (D_i) em relação a valores estimados (P_i) de taxa de erosão em entressulcos para o conjunto LV_1 , LV_2 e LV_3 : a) com $S_f = 1,05 - 0,85 e^{-4 \text{sen}\theta}$; b) $S_f = 1,061 - 1,037 e^{-4 \text{sen}\theta}$.

5. CONCLUSÕES

O desempenho de diferentes modelos matemáticos foi avaliado, e as equações se mostraram eficazes na predição da erosão em entressulcos. A validação com base no ME, RMSE e EF do modelo representado pela Eq.33 apresentou os melhores resultados de validação para estimar a taxa de erosão em entressulcos nos três latossolos deste trabalho, embora haja tendência de D_i ser subestimada.

Os resultados mostraram que a intensidade da chuva, declividade do terreno e taxa de descarga de enxurrada e suas interações foram significativos na determinação da taxa de erosão em entressulcos. Fatores de declives ajustados a funções curvilíneas convexas descrevem bem o efeito de altas declividades nas taxas de erosão em entressulcos.

A interação dos fatores de erosão permitiu formular e avaliar o desempenho de duas equações para estimar a taxa de erosão em entressulcos (D_i), $D_i = K_i I q^{1/2} S^{2/3}$ e $D_i = K_i I R S_f$, as quais apresentam um termo linear de intensidade ($I q^{1/2} S^{2/3}$; $I R S_f$) que descreve a frequência do impacto das gotas da chuva. Logo, ele representa a desagregação pelo impacto das gotas da chuva e o iminente transporte do sedimento erodido por um fino fluxo de enxurrada superficial.

Os resultados deste estudo fornecem uma base sólida para desenvolver práticas agrícolas que reduzam a erosão em entressulcos. O uso de modelos validados, como a Eq. 33, pode ajudar agricultores a prever áreas com maior suscetibilidade à erosão em entressulcos, e na tomada de decisão para fins específicos de manejo e conservação do solo e da água.

As principais limitações do estudo incluem a realização dos experimentos em parcelas de pequena escala e em condições controladas, o que pode não representar completamente as variáveis encontradas em campos agrícolas maiores. Além disso, os tipos de solos estudados foram limitados a três latossolos, o que pode restringir a generalização dos resultados para outros tipos de solos. Para abordar essas limitações, há necessidade de pesquisas futuras com validações que possam abranger uma variedade maior de tipos de solos tropicais no Brasil.

6. REFERÊNCIAS

Alaboz P, Dengiz O, Demir S, Şenol H (2021) Digital mapping of soil erodibility factors based on decision tree using geostatistical approaches in terrestrial ecosystem. **CATENA**, 207:105634. DOI:10.1016/j.catena.2021.105634.

Alleonil LRF, Camargo AO (1995) Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de latossolos ácricos. **Scientia Agrícola**, 52 (3): 416-421.

An J, Zheng F, Lu J, Li G (2012) Investigating the Role of Raindrop Impact on Hydrodynamic Mechanism of Soil Erosion Under Simulated Rainfall Conditions. **Soil Science** 177:517–526. doi:10.1097/ss.0b013e3182639de1.

Anache JAA, 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. doi:10.1016/j.catena.2017.01.003

Arantes AE (2022) Suscetibilidade à Erosão Laminar e Linear da Bacia Hidrográfica do Rio Vermelho e a sua Relação com o Uso e Cobertura da Terra em 2012. **Revista Brasileira de Geografia Física** 15:3032-3046.

Basga SD, Temga JP, Tsozué D, Gove A, Sali B, Nguetnkam JP (2020) Erodibility of Vertisols in relation to agricultural practices along a toposequence in the Logone floodplain. Soil Science Society of Pakistan. **Soil Environ** 39 01-12. DOI:10.25252/SE/2020/101855.

Bastida F, Hernández T, García C (2018) Soil Erosion and C Losses: Strategies for Building Soil Carbon. **The Future of Soil Carbon** 215–238. DOI: 10.1016/b978-0-12-811687-6.00008-0.

Bastos CAB (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 303p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Borrelli P, Robinson DA, Panagos P, Lugato E, Yang JE, Alewell C, Ballabio C (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 202001403. DOI:10.1073/pnas.2001403117.

Brady NC, Weil RR (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução técnica; Igo Fernando Lepsch. 3. ed. Porto Alegre: Bookman.

Bryan RB (1987) Processes and significance of rill development. **Catena Verlag, Cremlingen-Destedt** 8:1-15.

Bulygin SY, Nearing MA, Achasov AB (2002) Parameters of interrill erodibility in the WEPP model. **Eurasian Soil Science** 35(11) 1237-1242.

- 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.
- Cao L, Zhang K, Dai H, Liang Y (2015) Modeling interrill erosion on unpaved roads in the Loess Plateau of China. **Land Degradation & Development** 26(8), 825-832.
- Carvalho DF, Montebeller CA, Cruz ES, Ceddia MB, Lana AMQ (2002) Perda de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 6:385-389.
- Cassol EA, Lima VSde (2003) Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília 38:117-124.
- Cebel H, Akgül S, Doğan O, Elbaşı F (2013) Türkiye Büyük Toprak Gruplarının Erozyona Duyarlılık “K” Faktörleri. **Soil-Water Journal Topraksu derQisi** 1 (30-45).
- Cunha, P. (2000) **Superfícies geomórficas e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- Deng L, Fei TSK, Zhang L, Fan X, Wu Y, Ni Y (2020) Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China. **Geomorphology**, 352, 106997.
- Elliot WJ, Flanagan DC (2023) Estimating WEPP cropland erodibility values from soil Properties. **Journal of the ASABE** 66:329-351 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2769-3295. doi: 10.13031/ja.15218.
- Elliot, W. J.; Liebenow, A. M.; Laflen, J. M.; Kohl, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88**. West Lafayette: Ohio State University/United States Department of Agriculture, 1989. p. A2-A25 (NSERL Report, 3).
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 1999.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (EMPRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 2 ed. p. 286. Brasília: EMBRAPA, 2006.
- Fan JC, Wu MF (1999) Effects of soil strength, texture, slope steepness and rainfall intensity on interrill erosion of some soils in Taiwan. 10th international soil conservation organization meeting, Purdue University, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Feng Q, Linyao D, Jigen L, Bei B, Honghu L, Jiesheng H, Hao L (2020) Equations for predicting interrill erosion on steep slopes in the Three Gorges

Reservoir, China. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**. 68:51–59 DOI: 10.2478/johh-2019-0024. SSN 1338-4333.

Flanagan D, Nearing M (1995) USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation. Nserl Report, 10, 1-123. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Status of the World's Soil Resources**. Roma, (2015).

Foster GR (1982) Modeling the erosion process. In: HAAN CT, JOHNSON HP, BRAKENSIEK DL (Eds.) **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, p. 297-380.

Foster GR, Young RA, Römkens MJM, Onstad CA (1985) Processes of soil erosion by water. In: FOLLETT RF, STEWART BA (Eds.). **Soil erosion and crop productivity Madison**: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America, p. 137-162.

Fox DM, Bryan RB (2000) The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena** 38(3), 211-222.

Guo T, Wang Q, Li D, Zhuang J, Wu L (2013) Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. **CATENA** 107:145–153. DOI:10.1016/j.catena.2013.03.00.

Hamanaka A, Sasaoka T, Shimada H, Matsumoto S (2019) Experimental study on soil erosion under different soil composition using rainfall simulator. **Plant, Soil and Environment**. DOI:10.17221/68/2019-pse.

Hartanto H, Prabhu R, Widayat AS, Asdak C (2003) Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. **Forest Ecology and Management**, 180:361–374. DOI:10.1016/s0378-1127(02)00656-4.

He T, Yang Y, Shi Y, Liang X, Fu S, Xie G, Liu B, Liu Y (2022) Quantifying spatial distribution of interrill and rill erosion in a loess at different slopes using structure from motion (SfM) photogrammetry. **International Soil and Water Conservation Research** 10:393-406.

Hicrettin Cebel H, Akgül S, Doğan O, Elbaşı F (2013) Türkiye Büyük Toprak Gruplarının Erozyona Duyarlılık “K” Faktörleri. **Soil-Water Journal Toprak ve Su Bilimi** 2:30-45.

Hu Y, Fister W, He Y, Kuhn NJ (2020) Assessment of crusting effects on interrill erosion by laser scanning. **PeerJ** 8:8487. DOI: <http://doi.org/10.7717/peerj.8487>.

Huang CH (1995) Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. **Soil Science Society of America Journal** 59(4), 982-990.

Igwe CA, Zarei M, Stahr K (2009) Colloidal stability in some tropical soils of southeastern Nigeria as affected by iron and aluminium oxides. **Catena** 77: 232-237.

Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR (1991) A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **F Crops Res** 27:337–350. doi:10.1016/0378- 4290(91)90040-3

Kaşanin-Grubin M, Hukić E, et al. (2021) Soil erodibility in European mountain beech forests. **Canadian Journal of Forest Research** 51:12. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0361.

Keller B, Centeri C, Szabó JA, Szalai Z, Jakab G (2021) Comparison of the applicability of different soil erosion models to predict soil erodibility factor and event soil losses on loess slopes in Hungary. **Water** 13:3517. DOI:10.3390/w13243517.

Kinnell PIA (1993) Runoff as a factor influencing experimentally determined interrill erodibilities. **Australian Journal of Soil Research**, 31(3), 333-342.

Lee S, Chu ML, Guzman JA, Flanagan DC (2022) Modeling soil erodibility and critical shear stress parameters for soil loss estimation. **Soil & Tillage Research** 218:105292. DOI: 10.1016/j.still.2021.105292.

Lengnick LL, Fox RH (1994) Simulation by NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. soil nitrate. **Agronomy Journal**, 87(1):167-75.

Léonard J, Richard G (2004) Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. **CATENA** 57:233–249. DOI:10.1016/j.catena.2003.11.007.

Li P, Zhang K, Wang J, Feng D (2021) Response of interrill erosion to flow parameters of sand loess in regions with high and coarse sediment yields. **Journal of Hydrology**, 592, 125786. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125786

Lima GMde, Rangel LdeA, Guerra AJT (2023) Monitoramento da microtopografia do solo em trilhas de uso público no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina (RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia** v. 24, nº 1 DOI: 10.20502/rbg.v24i1.2215.

Lima, P. M. P.; 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 (1971) Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, 7(1): 51-73.

Mahmoodabadi M, e Cerdà A (2013) WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. **Geoderma**, 204-205: 75-83.

Martins Filho MV (1999) **Modelagem do processo de erosão entressulcos em Latossolos de Jaboticabal-SP**. 140 f. Tese de Doutorado Lavras, Universidade Federal de Lavras.

Martins Filho MV (1999) **Modelagem do processo de erosão entressulcos em Latossolos de Jaboticabal-SP**. 140 f. Tese de Doutorado Lavras, Universidade Federal de Lavras.

Martins Filho MV, Andrade H, Dias Júnior MS, PEREIRA VP (2003) Modelagem do processo de erosão para latossolos de Jaboticabal - SP. **Engenharia Agrícola** 23(1) 9-20.

Matsumoto S, Ogata S, Shimada H, Sasaoka T, Hamanaka A, Kusuma G (2018) Effects of pH-Induced Changes in Soil Physical Characteristics on the Development of Soil Water Erosion. **Geosciences** 8(4)134. DOI:10.3390/geosciences8040134.

Meyer, L. D., Foster, G. R., & Romkens, M. J. M. (1975). Source of soil eroded by water from upland slopes. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources (pp. 177–189). Washington, DC: ARS-S-40, USDA-ARS, U.S. Gov. Print. Office.

Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald K, Chisci G, Torri D, Styczen ME (1998) The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms** 23:527–544.

Musso A, Tikhomirov D, Plötze M L, Greinwald K, Hartmann A, Geitner C, Maier F, Petibon F, Egli M (2022) Soil Formation and Mass Redistribution during the Holocene Using Meteoric ¹⁰Be, Soil Chemistry and Mineralogy. **Geosciences** 12, 99. DOI: 10.3390/geosciences12020099.

Nachtigall S D, Nunes MCM, Moura-Bueno JM, Lima CLRde, Miguel P, Beskow S, Silva TP (2020) Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental** v.25 n.6. DOI:10.1590/S1413-4152202020190136

Naipal V, Ciais P, Wang Y, Lauerwald R, Guenet B, Van Oost K (2018) Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850–2005. **Biogeosciences** 15:4459–4480. DOI:10.5194/bg-15-4459-2018.

Naresh R, Gupta R, Dhaliwal S, Tyagi K, Tyagi S, Prasad K, Jat L, Tyagi P (2018) Clay-humus stability of soil organic matter and microbial biomass under conservation tillage and residue management practices of rice-wheat cropping system: a review. *J. Pharmacogn.* **Phytochem.** 7 (4), 3020e3043.

Nascimento RJA (2019) **Erodibilidade em entressulcos, escoamento superficial e formação de crosta em solos representativos do Estado da Paraíba**. (Tese Doutorado). Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB.

Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC (1989) A process-based soil erosion model for USDE-WATER erosion prediction project technology. **Transactions of the ASAE** 32(5):1587-1593.

Oliveira FPde, Buarque DC, Viero AC, Merten GH, Cassol EA, Minella JPG (2012) Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16:337–346. DOI:10.1590/s1415-43662012000400002.

Portal Embrapa. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 2024. Disponível em: www.embrapa.br/solos/sibcs/niveis-categoricos-do-sistema?link=sibcs. Acesso em: 11 mar. 2024.

Qian F, Cheng D, Ding W, Huang J, Liu J (2016) Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China. **Journal Hydrol. Hydromech.** 64 (3), 237–245 DOI: 10.1515/johh-2016-0029.

Qian F, Dong LY, Liu JG, Sun B, Liu HH, Huang JS, Li H (2020) Equations for predicting interrill erosion on steep slopes in the Three Gorges Reservoir, China. **Journal of Hydrology and Hydromechanics** 68 (1), 51-59.

Radziuk H, Świtoniak M (2021) Soil erodibility factor (K) in soils under varying stages of truncation. **SOIL SCIENCE** 72:134621 DOI:10.37501/soilsa/134621.

Raj AD, Kumar S, Sooryamol KR (2022) Modelling climate change impact on soil loss and erosion vulnerability in a watershed of Shivalik Himalayas. **Catena** 14:106279.

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Mccool DK, Yoder DC (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture.

Salumbo AMdeO (2020) A Review of Soil Erosion Estimation Methods. **Agricultural Sciences** 11:667-691. DOI: 10.4236/as.2020.11804.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF (5. ed. rev. ampl.) (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF (5. ed. rev. ampl.) (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa.

Shi ZH, Fang NF, Wub FZ, Wanga L, Yue BJ, Wua GL (2012) Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology** 454-455:123-130.

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.

Simons DB, Senturk F (1992) **Sediment Transport Technology: water and sediment dynamics**. In: WATER Resources Publications. Colorado: s.n. p 897.

Sobrinho JF, Barbosa FEL (2022) Perdas de solo em área agrícola do Semi-árido. **Mercator** 21:1984-2201. DOI: 10.4215/rm2022.e21020.

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

Sun J, Govers G, Shi M, Zhai Y, Wu F (2020). Effects of different tillage practices on the hydraulic resistance of concentrated flow on the Loess Plateau in China. **CATENA** 185, 104293. doi:10.1016/j.catena.2019.104293.

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

Thomaz LE, 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 Artigo e0190064. DOI: 10.36783/18069657rbcS20190064.

Torri D, Poesen J, Borselli L (1997) Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. **CATENA**, 31:1–22. DOI:10.1016/S0341-8162(97)00036-2.

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.

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. **Reg Environ Change** 16: 659–672, <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0773-6>.

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.

Wang CF, Wang B, Wang YQ, Wang YJ, Zhang WL (2020) Improved interrill erosion prediction by considering the impact of the near-surface hydraulic gradient. **Soil and Tillage Research**, 203, p. 104687, 10.1016/j.still.2020.104687.

Wang CF, Wang B, Wang YQ, Wang YJ, Zhang WL, Yan YK (2019) Impact of near-surface hydraulic gradient on interrill erosion process. **European Journal of Soil Science** 71:598–614. DOI:10.1111/ejss.12905.

Wang D, Wang Z, Zhang Q, Zhang Q, Tian N, Liu J (2018) Sheet erosion rates and erosion control on steep rangelands in loess regions. **Earth Surface Processes and Landforms**, 43(14), 2926-2934.

Wang H, Xie T, Yu X, Zhang C (2021) Simulation of soil loss under different climatic conditions and agricultural farming economic benefits: The example of

Yulin City on Loess Plateau. **Agricultural Water Management** 244:106462. DOI:10.1016/j.agwat.2020.106462.

Williams JR, Renard KG, Dyke PT (1983) Epic – a New Method for Assessing Erosions Effect on Soil Productivity. **Journal of Soil and Water Conservation** 38:381-383.

Wirtz S, Seeger M, Remke A, Wengel R, Wagner J-F, Ries JB (2013) Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. **CATENA** 101:61–78. doi:10.1016/j.catena.2012.10.003.

Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture. 58 p.

Wu B, Li L, Xu L, Li X (2022) Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator. **Biosystems engineering** 216:1-12. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.01.017.

Wu B, Wang Z, Zhang Q, Shen N, Liu J (2017) Modelling sheet erosion on steep slopes in the loess region of China. **Journal of Hydrology**, 553, 549-558.

Wu S, Chen L (2020) Modeling Soil Erosion With Evolving Rills on Hillslopes. **Water Resources Research**, 56(10). doi:10.1029/2020wr027768.

Yoon YN, Wenzel HG (1971) Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. *Journal of the Hydraulics Division – ASCE*, New York 97:1367-1386.

Zhang FB, Wang Z L, Yang MY (2014) Validating and Improving Interrill Erosion Equations. **PLoS ONE** 9:88275. DOI:10.1371/journal.pone.0088275.

Zhang J, Shi D, Jin H, Li H, Jiang N, Ye Q (2022) Characteristics of cultivated layer soil shear strength for sloping farmland in response to soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China. **CATENA** 215:106304. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106304.

Zhang K, Xu X, Iversen BV, Weber PL, Jonge LWde, Wang X, Bai Y (2023) Effect of different underlying surfaces on hydraulic parameters of overland flow. **Soil and Tillage Research** 232, 105776. doi:10.1016/j.still.2023.105776.

Zhang X C, Nearing MA, Norton LD, Miller WP, West LT (1998) Modeling interrill sediment delivery. **Soil Science Society of America Journal**, 62 (2), p. 438, 10.2136/sssaj1998.03615995006200020021x.

Zhang XC (2018) Determining and modeling dominant processes of interrill soil erosion. **Water Resources Research**. DOI:10.1029/2018wr023217.

Zhang XC, Wang ZL (2017) Interrill soil erosion processes on steep slopes. **Journal of Hydrology**, 548, 652-664, 10.1016/j.jhydrol.2017.03.046.