

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**RESISTÊNCIA À EROSÃO E PERDAS DE NUTRIENTES
DE UM LATOSSOLO COMPACTADO E/OU CONSOLIDADO**

Raimunda Eliane Nascimento do Nascimento

Engenheira Agrônoma

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**RESISTÊNCIA À EROÇÃO E PERDAS DE NUTRIENTES DE UM
LATOSSOLO COMPACTADO E/OU CONSOLIDADO**

Discente: **Raimunda Eliane Nascimento do Nascimento**

Orientador: **Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho**

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

N244r	Nascimento, Raimunda Eliane Nascimento do Resistência à erosão e perdas de nutrientes de um latossolo compactado e/ou consolidado / Raimunda Eliane Nascimento do Nascimento. -- Jaboticabal, 2021 66 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Marcilio Vieira Martins Filho 1. erodibilidade em sulcos. 2. tensão cisalhante crítica. 3. resistência ao fluxo. I. Título.
-------	---

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RESISTÊNCIA À EROSÃO E PERDAS DE NUTRIENTES DE UM LATOSSOLO COMPACTADO E/OU CONSOLIDADO

AUTORA: RAIMUNDA ELIANE NASCIMENTO DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

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

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

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / FEIS - UNESP Ilha Solteira

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO ARAUJO CAMPOS (Participação Virtual)
Departamento de Geografia / Uberaba/MG

Jaboticabal, 26 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Raimunda Eliane Nascimento do Nascimento – Filha de Joao Batista Marques do Nascimento e Raimunda Nascimento do Nascimento. Nasceu no município de Igarapé Açu - PA, em 11 de outubro de 1989. Coursou Agronomia pelo Instituto Federal do Para- Campus Castanhal onde obteve em abril de 2018 o título de Engenheira Agrônoma. Durante a graduação, desenvolveu com êxito algumas atividades de extensão, com destaque para o projeto “Empreendimentos Econômico Solidário com Estratégia de Formação Acadêmica e Fortalecimentos de Cadeias Produtivas Locais”. Desenvolveu atividades de Ensino, Pesquisa e Extensão junto a Empreendimentos Econômicos Solidários pelo programa Incubadora Tecnológica de Desenvolvimento e Inovação de Cooperativas e Empreendimentos Solidários – INCUBITEC. No primeiro semestre de 2019 ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Epígrafe

“Não fui eu que ordenei a você?

Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

(Josué 1:9)

Dedicatória

Dedico a minha família por todo amor,
carinho, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as graças alcançadas diariamente, pelo dom da vida e por estar comigo ao longo de todo este percurso e tornando possível a realização do meu sonho. Agradeço ao Senhor com todo meu coração. A ti toda honra e toda glória!

Um dos agradecimentos mais especiais é dedicado aos meus pais: Raimunda Nascimento do Nascimento e Joao Batista Marques do Nascimento, que me puseram no mundo e desde então me educam, me acompanham, me apoiam e sempre acreditaram em mim. Apesar das dificuldades, sempre estão em oração por mim e me incentivando a buscar o que eles não tiveram a oportunidade de ter. E que nos momentos de minha ausência dedicada aos estudos, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente! Pai e Mãe vocês são minha inspiração! Amo vocês!

Meus agradecimentos aos meus irmãos Elisangela, Erivaldo, Elivane, Edivania e Elaine que contribuíram diretamente para a realização desse trabalho, meu muito obrigado. Amo cada um de vocês!

Agradeço ao Prof. Dr. Marcilio Vieira Martins filho pela paciência e dedicação nas orientações. E acima de tudo, pelo incentivo e empenho para a realização deste trabalho.

Aos amigos que a Unesp me proporcionou, em especial Mary Jane, Jonathan Viana, Marcos Virtuoso, pessoas que estiveram do meu lado nos momentos alegres e difíceis, que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), por ter me acolhido durante o decorrer do curso, me proporcionando a oportunidade de ter uma melhor qualificação, contribuindo assim para o meu futuro profissional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Erosão	4
2.2 Erosão em sulcos.....	5
2.3 Fatores que interferem na erosão em sulcos	8
2.3.1 Intensidade da chuva e taxa de enxurrada.....	8
2.3.2 Erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica.....	9
2.3.3 Compactação do solo	12
2.3.4 Consolidação do solo	13
2.3.5 Sistema de manejo do solo	14
2.3.6 Perdas de nutrientes por erosão.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÕES.....	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

RESISTÊNCIA À EROSÃO E PERDAS DE NUTRIENTES DE UM LATOSSOLO COMPACTADO E/OU CONSOLIDADO

RESUMO - Vários modelos de predição da erosão, como o *Water Erosion Prediction Project* – WEPP, exigem a determinação de parâmetros que determinam a resistência do solo à erosão (RSE) como erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica. Deste modo o objetivo do presente trabalho foi determinar a erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão cisalhante crítica (τ_c), num latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar e com tráfego intenso devido a colheita mecanizada, em áreas não-trafegadas (NT) e trafegadas (T), na condição de solo compactado/consolidado. Na instalação do experimento foi retirada a palha da superfície do solo. Seis sulcos ou canais retangulares foram pré-formados, com um enxadão, nas áreas T e NT. Aplicou-se uma chuva simulada de 65 mm h^{-1} e, durante esta, foram realizadas avaliações do cisalhamento hidráulico nos sulcos. Foram aplicadas a chuva, chuva mais fluxos adicionais e, ainda, apenas fluxos extras de água nos sulcos; os fluxos adicionais tiveram vazões de 25, 52 e 125 L min^{-1} . O cisalhamento do fluxo nos sulcos também foi avaliado quando da aplicação dos fluxos e chuva + fluxos. Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos foram realizadas a cada 5 minutos após o início da enxurrada, por meio de calha coletora localizada na parte inferior de cada sulco. A erodibilidade do solo em sulcos (K_r) foi estimada pela análise de regressão entre os valores médios da tensão de cisalhamento (τ) e de desagregação do solo (D_r) obtidos para cada vazão aplicada. Os valores de K_r e τ_c estimados foram $0,0063 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $2,984 \text{ Pa}$ para local NT e, $0,0055 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $4,218 \text{ Pa}$ para local T, respectivamente. A tensão cisalhante crítica (τ_c) foi 1,4 vezes maior nos locais T, o que indica as áreas NT como os prováveis locais de início da erosão em sulcos em áreas com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. A erodibilidade em sulcos (K_r) não diferiu significativamente entre áreas NT e T.

Palavras-chave: erodibilidade em sulcos; tensão cisalhante crítica; resistência ao fluxo

RESISTANCE TO EROSION AND NUTRIENT LOSSES FROM A COMPACTED AND/OR CONSOLIDATED OXISOL

ABSTRACT - Several erosion predictions models, such as the Water Erosion Prediction Project - WEPP, require the determination of parameters that determine soil resistance to erosion (SER) such as erosion resistance in grooves and critical shear stress. Thus, the objective of the present work is to determine the rill erodibility (K_r) and the critical shear stress (c), in a Oxisol under sugarcane cultivation and with intense traffic due to mechanized harvesting, in areas without traffic (NT) and with traffick (T), in the condition of compacted/consolidated soil. In the setup of the experiment, the straw was removed from the soil surface. Six rectangular rills or channels were pre-formed, with a hoe in the T and NT areas. A 65 mm h^{-1} simulated rainfall was applied and, during that, evaluations of hydraulic shear in the rills were done. Rain, rain with additional flows, and single water extra flows in the rills were applied; additional flows had 25, 52 and 125 L min^{-1} flow rates. The shear flow in the rills was also evaluated by occasion of the flows and rain with flows application. Samples for flow rates measures of surface runoff and sediment concentrations were taken each 5 minutes after the runoff beginning, through the collector pipeline at the bottom of each rill. The critical shear stress (τ_c) was 1.4 times higher at T sites, which indicates NT areas as the probable sites of beginning rill erosion in areas with mechanized sugarcane harvesting. Rill erodibility (K_r) did not differ significantly between NT and T areas.

Keywords: rill erodibility; critical shear stress; flow resistance

1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo é globalmente reconhecida como um dos principais problemas ambientais, a qual contribui com o aumento da concentração de sedimentos e nutrientes nos locais de deposição, como os corpos d'água, o que reduz a qualidade do solo e da água no meio ambiente. A erosão é definida considerando-se três processos: desagregação, transporte e deposição. Quando ocorre uma chuva as partículas do solo podem ser inicialmente desagregadas pelo impacto das suas gotas e subsequentemente transportadas pelo fluxo superficial, especialmente nos sulcos distribuídos aleatoriamente na superfície do solo (Ma et al., 2020).

O fluxo concentrado de água nos sulcos é o agente responsável pela desagregação e transporte dos sedimentos, o que caracteriza a denominada erosão em sulcos (Foster, 1982). O processo de erosão em sulcos pode ser avaliado como (Nearing et al., 1989):

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (1)$$

em que, D_r = taxa de erosão em sulcos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); K_r = erodibilidade do solo dos sulcos (s m^{-1}); τ = tensão cisalhante do fluxo (Pa); τ_c = tensão cisalhante crítica do solo (Pa); G = carga de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); T_c = capacidade de transporte do escoamento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$). A erosão em sulcos ocorre quando a tensão cisalhante do fluxo (τ) é maior que a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) e se a carga de sedimento (G) presente no fluxo é menor que a sua capacidade de transporte (T_c), pois neste caso $D_r > 0$ (Nearing et al., 1989, Shen et al., 2016).

O revolvimento do solo aumenta a susceptibilidade à erosão (K_r) e reduz a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), enquanto a consolidação e a compactação do solo podem produzir efeitos inversos (Foster, 1982; Martins Filho et al., 2001; Schäfer et al., 2001; Thomaz, 2013, Tian et al., 2017; Telak et al., 2021). A consolidação refere-se a um aumento na estabilidade estrutural do solo, proveniente da tensão efetiva por compressão induzida pelo potencial matricial durante a redistribuição da água no solo após a chuva (Nearing et al., 1988b; Schäfer et al., 2001). Essa consolidação em associação com a compactação do solo alteram os

atributos do solo durante o ano, tais como: densidade do solo e porosidade do solo, retenção e infiltração de água, assim como a susceptibilidade à erosão e a tensão cisalhante crítica do solo (Nearing et al., 1988a; Martins Filho et al., 2001; Schäfer et al., 2001).

Durante a ocorrência de um evento de erosão há duas resistências que são oferecidas a este fenômeno, resistência ao fluxo de enxurrada e resistência do solo à erosão (SER). A resistência do solo à erosão (SER), segundo Knapen e Poesen (2010), é representada por propriedades do solo como erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c).

A resistência à erosão é importante para o transporte de sedimentos, e é normalmente quantificada, por exemplo, pela coesão ou estabilidade dos agregados (Guo et al., 2013). Já a resistência ao fluxo é quantificada utilizando-se o coeficiente de Manning (n) e o fator de fricção de Darcy-Weisbach (f) com as seguintes equações:

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

$$f = \frac{8 g R_h S}{V^2} \quad (3)$$

em que, V é velocidade média do fluxo ($m s^{-1}$); R_h é o raio hidráulico (m); S é a razão de inclinação ($m m^{-1}$); g é a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

A erodibilidade em sulcos e a tensão cisalhante crítica do solo são principalmente afetadas por outras propriedades do solo (Li et al., 2019). Dentre estas propriedades temos a textura, potencial da água no solo, volume total de poros do solo, estabilidade de agregados, coesão do solo, propriedades físico-químicas do solo, teor de água no solo, densidade do solo, resistência do solo saturado, limite de plasticidade (Elliott et al., 1989; Flanagan e Livingston, 1995; Knapen e Poesen, 2010; Xiao et al., 2017; Wang et al., 2018).

Os sistemas de manejo do solo, a consolidação e a compactação alteram a sua capacidade em resistir à erosão em sulcos (Schäfer et al., 2001; Thomaz, 2013; Kimiaghali et al., 2016), bem como muitas variáveis hidráulicas. Dentre as variáveis hidráulicas incluem-se fator de fricção de Darcy-Weisbach (f), coeficiente de rugosidade de Manning (n), número de Froude (Fr), número de Reynolds (Re) e cisalhamento hidráulico (t). Todas estas variáveis hidráulicas são determinadas a

partir da velocidade do fluxo (V) como apresentado por Ma et al. (2020) e Li et al. (2020).

Operações de cultivo, incluindo o tipo de implemento, frequência de uso, velocidade e profundidade de cultivo têm impacto no processo de erosão em sulcos, pois estas alteram a taxa de infiltração, a descarga de enxurrada e a erodibilidade do solo (Li et al., 2010; Liying et al., 2013). O preparo do solo e a consolidação do solo alteram a sua capacidade em resistir à erosão em sulcos (Schäfer et al., 2001). Thomaz (2013) demonstrou haver alterações de variáveis hidráulicas na presença de camada compactada no solo. As condições hidráulicas do fluxo podem afetar a capacidade de desagregação e o transporte de sedimentos, uma vez que são a força motriz para o deslocamento do solo (Li et al., 2019). No cultivo de cana-de-açúcar é comum a presença de uma camada compactada, na parte superior do perfil, principalmente de 0,0 a 0,30 m, devido à intensa utilização de máquinas agrícolas. A compactação pode estar associada, ou não, ao aumento da erosão hídrica. Esses dois processos são reconhecidamente degradativos do solo, os quais afetam grandemente a sustentabilidade e o uso dos solos agrícolas.

No WEPP equações de Nearing et al. (1988a e b) são utilizadas em uma rotina para ajustar K_r e τ_c , em condições de solo consolidado. A consolidação é um processo de aumento natural da estabilidade do solo (Nearing et al., 1988a e b). Contudo, não há estudos que apontem para a viabilidade do uso de tais equações em condições de solo compactado devido ao seu manejo. Logo, no modelo WEPP, para o ajuste dos valores de K_r e τ_c não há uma rotina específica para a compactação provocada pelos rodados de máquinas agrícolas como exposto por Nearing et al. (1989).

Há poucos relatos na literatura que discutem os efeitos da erosão no solo, quando este tem uma camada compactada (Rockwell, 2011 e Thomaz, 2013). Portanto, a existência, ou não, de relações entre K_r , τ_c e compactação do solo é pouco estudada. Caso estas relações existam e sejam adequadamente modeladas, elas poderão vir a serem utilizadas em diversas áreas do conhecimento como: ciência do solo, engenharia civil, geologia, etc. Tal fato contribuirá em muito para mapeamentos dos padrões espaciais da erosão e compactação, na identificação de áreas de risco, na prevenção e na adoção de medidas mitigadoras destes dois fenômenos. Deste modo, os objetivos deste trabalho são determinar: 1) a erodibilidade em sulcos (K_r) e a

tensão cisalhante crítica (τ_c), ou seja, a resistência do solo à erosão (RSE); 2) as características hidráulicas do fluxo superficial, num Latossolo eutroférico vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, com tráfego intenso devido a colheita mecanizada, em áreas não-trafegadas (NT) e trafegadas (T), na condição de solo compactado e/ou consolidado; 3) avaliar as perdas de nutrientes por erosão em sulcos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Erosão

A erosão dos solos é considerada um dos maiores problemas ambientais em todo o mundo, influenciando tanto nos solos agrícolas quanto nos florestais (Hu e Flanagan, 2013). Segundo o relatório apresentado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2017), 33% dos solos do mundo encontram-se degradados por diversos fatores, entre eles o processo erosivo acelerado. A erosão consiste no processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento (Bertoni e Lombardi Neto, 2017).

Para Bertol et al. (2017) a ocorrência de processos erosivos é determinada, entre outros, por fatores como erosividade da chuva, erodibilidade do solo e cobertura vegetal, sendo a cobertura do solo um fator de grande importância no controle da erosão hídrica. No Brasil, a erosão causada pela água da chuva é a forma mais significativa de degradação do solo, com estimativa do volume de solo perdido variando de 0,1 a 136,0 t/ha/ano, conforme o uso e a cobertura da terra (Anache et al., 2017).

O escoamento superficial é o principal processo relacionado a erosão. Ainda que o impacto das gotas de chuva apresente importante papel na liberação das partículas de solo, é o escoamento da água o responsável pelo transporte das partículas de solo liberadas para áreas em que ocorre o escoamento concentrado, e assim dependendo da carga de sedimento e da capacidade de transporte do escoamento é que ocorre a liberação ou deposição dos sedimentos (Pruski et al., 2001).

Os principais problemas resultantes da erosão dos solos podem ser exemplificados da seguinte forma: remoção dos nutrientes existentes no topo dos solos; redução da penetração das raízes e do armazenamento de água; diminuição das áreas a serem utilizadas para agricultura e pecuária; aumento do assoreamento de rios, lagos, reservatórios e açudes, acarretando muitas vezes grandes enchentes em várias partes do mundo; poluição de corpos líquidos, em especial, pelo transporte de defensivos agrícolas, junto com os sedimentos (Guerra, 2017).

Nesse sentido, Xiong et al. (2018) relataram que a eficiência de técnicas de conservação do solo e da água para melhoria da qualidade ambiental está associada a atividades que auxiliam a: reduzir o escoamento e conservar o solo, melhorar a fertilidade e produtividade do solo, aumentar a produtividade das culturas e garantir a segurança alimentar, crescimento da biodiversidade, maior capacidade de infiltração da água no solo e proporcionar uma melhor visualização da paisagem ambiental.

Portanto, compreender os fatores do processo erosivo e quantificar as perdas de solo, serve como princípio para o planejamento de medidas preventivas e/ou de controle que proponham maximizar o uso dos recursos hídricos e reduzir os efeitos negativos proporcionados pela perda do solo (Bertoni e Lombardi, 2017).

2.2 Erosão em sulcos

A erosão em sulcos ocorre com o escoamento concentrado na superfície, onde a água flui em canais efêmeros, os quais podem ter tido início devido ao desprendimento das partículas associados aos processos erosivos anteriores, a topografia do terreno, rugosidade do solo e marcas de tráfegos de equipamentos de cultivo (Martins Filho, 1999). Em contraposição, a erosão causada pelo impacto das gotas da água da chuva com subsequente transporte do material desagregado por um fino fluxo de água superficial é definida como erosão em entressulcos (Silva et al., 2012; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020).

No processo de erosão em sulcos, o agente responsável pela desagregação e transporte dos sedimentos em sulcos é o escoamento concentrado (Peng et al., 2015; Di Stefano et al., 2016; Niu et al., 2020). Esta desagregação ocorre pela ação

cisalhante do escoamento superficial, com o transporte de sedimentos sendo influenciado pela descarga líquida e velocidade do escoamento (Cantalice, 2002; Parhizkar et al., 2020).

A erosão em sulcos é uma das principais fontes de sedimentos em áreas agrícolas, porque os sulcos transportam partículas desagregadas nas áreas entressulcos e no perímetro molhado dos próprios sulcos (Foster et al., 1984; Nearing et al., 1989; Shen et al., 2016).

A taxa de desagregação varia conforme o tipo e manejo do solo e é diretamente proporcional à erodibilidade do solo e à diferença entre a tensão cisalhante associada ao escoamento e a tensão crítica de cisalhamento do solo como demonstrado. Portanto, Schafer (2001) ressalta que a erosão em sulcos é uma resultante da interação da capacidade do escoamento em erodir e a capacidade do solo em resistir às forças de desagregação e transporte da gua.

A resistência do solo à erosão (RSE) é controlada por fatores como (Knapen et al., 2007 e Knapen; Poesen, 2010): condições ambientais; uso do solo; sistemas de preparo; erodibilidade em sulcos influenciada pelo conteúdo de água do solo, densidade do solo, densidade de raízes, densidade da parte aérea das plantas, resíduos culturais e atividade microbiológica do solo; resistência cisalhante do solo, a qual afeta a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c).

Perante o exposto, torna-se importante a predição da desagregação das partículas do solo que ocorre num sulco. Esta desagregação das partículas do solo por um fluxo concentrado pode ser estimada pelo uso de diferentes variáveis hidráulicas, como por exemplo, a tensão cisalhante do fluxo, a potência do escoamento e a vazão ou descarga total do fluxo (Wirtz et al. (2013), Guo et al. (2013), Shen et al. (2019), Parhizkar et al., 2020).

A componente erosão assume, em modelos de predição como WEPP – *Water Erosion Prediction Project* (Nearing et al., 1988), a conhecida expressão de acoplamento desagregação-transporte (Foster et al., 1995; Shen et al., 2016):

$$D_r = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (4)$$

em que, D_r é a taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); D_c é a taxa de desagregação por um fluxo de água limpa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); G é a carga de sedimento presente no fluxo ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); T_c é a capacidade de transporte de sedimento (kg m^{-1}

s^{-1}). O termo $(1 - G/T)$ é um termo resposta para a desagregação do solo em sulcos, o qual reflete que a desagregação é proporcional a diferença entre a carga e a capacidade de transporte de sedimento (Shen et al., 2016). Quando a tensão cisalhante do fluxo (t) excede a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), a capacidade de desagregação (D_c) pode ser expressa como:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (5)$$

em que, a desagregação por um fluxo de água limpa pode ser expressa por uma equação linear entre D_c e τ como:

$$D_c = a\tau - b \quad (6)$$

em que, o intercepto vertical é $b = K_r \tau_c$ e o coeficiente angular é $a = K_r$. Deste modo, $\tau_c = b/a$ ($D_c = 0$).

A resistência do solo a erosão em sulcos (RSE) é usualmente expressa por dois parâmetros (Knapen et al., 2008): τ_c , tensão cisalhante a partir da qual a desagregação do solo inicia-se; K_r , erodibilidade em sulcos, a qual indica que a taxa de desagregação do solo aumentará com o aumento da tensão de cisalhamento quando o valor crítico (τ_c) for excedido.

Ambos os fatores de resistência à erosão, K_r e τ_c , são muito sensíveis como parâmetros de entrada em modelos de predição da erosão por fluxos concentrados (Alberts et al., 1995; Knapen et al., 2008). Isto exige uma prévia calibração destes fatores, o que é oneroso e moroso. Deste fato decorre que há necessidade de pesquisas que avaliem os fatores que interferem em K_r e τ_c , tal que estes fatores possam ser preditos a partir de características intrínsecas do solo locais e atualizadas, por exemplo, o que permitirá melhorias no uso de modelos de previsão da erosão, com obtenções rápidas, precisas e confiáveis dos valores preditos.

Vários fatores têm sido investigados por afetarem a RSE, dentre eles: consolidação do solo, o impacto da chuva induzindo consolidação e selamento superficial, compactação, grau do declive, preparo do solo, manejo de resíduos, textura, densidade do solo, teor de matéria orgânica, umidade do solo, velocidade do fluxo superficial, rugosidade superficial (West et al., 1992; Flanagan e Livingston, 1995; Sheridan et al. 2000; Knapen et al., 2007; Knapen et al., 2010; Xiao et al., 2017).

2.3 Fatores que interferem na erosão em sulcos

2.3.1 Intensidade da chuva e taxa de enxurrada

O potencial energético da chuva capaz de provocar erosão no solo, denominado erosividade, é expresso como uma função de parâmetros como intensidade da chuva (I), energia cinética (KE), pluviosidade/erosividade (EI_{30}), ou momento da gota de chuva (Smith e Wischmeier, 1957; Nearing et al., 1989; Renard et al., 1997; Morgan et al., 1998; Zambon et al., 2020). Dentre eles a intensidade da chuva tem sido apontada como um parâmetro fundamental relacionado com a erosão do solo (Kinnell et al., 2020; Almeida et al., 2021). A erosão em sulcos geralmente aumenta com o aumento da intensidade de chuva (Berger et al., 2010; Fang et al., 2015).

Os impactos da intensidade da chuva na erosão em sulcos foram avaliados por Shen et al. (2016), os quais observaram que os seus efeitos são maiores que os gerados pela declividade. A intensidade da chuva contribuiu para o selamento superficial do solo, com o que Tian et al. (2017) observaram um decréscimo da taxa de infiltração (19% - 26%), com uma efetiva formação de sulcos e subsequente incremento em largura (5 % - 26%), comprimento (4% - 22%) e profundidade (3% - 22%) deles. Neste mesmo sentido, com um aumento da intensidade de chuva (50 e 75 mm h⁻¹), Shen et al. (2019) demonstraram que a percentagem de área de solo cobertura com sulcos aumentou de 1% - 12%. A intensidade da chuva é o principal fator controlando a enxurrada e a erosão.

O fluxo de enxurrada tem por início o processo de erosão em entressulcos, quando o solo sela e, subsequentemente, a taxa de infiltração de água diminui (Moore e Singer, 1990; Tian et al., 2017). Este fluxo é afetado pela rugosidade superficial (Vermang et al. 2015; Ding e Huang, 2017), a qual controla a velocidade e a capacidade da enxurrada em erodir o solo (Li et al., 2020). O fluxo em entressulcos pode concentrar-se nos sulcos em função da topografia (Peng et al., 2015; Li et al., 2019; Li et al., 2020), propriedades do solo (Knapen et al., 2010; Wang et al., 2014; Xiao et al., 2017), cobertura vegetal (Braida e Cassol, 1999; Shi et al., 2012), taxas de precipitação e infiltração (Chaplot e Le Bissonnais, 2003; Wang et al., 2017).

O fluxo nos sulcos tem maior velocidade, profundidade e capacidade de transporte que o fluxo entressulcos (Mirzaee e Ghorbani-Dashtaki, 2018). Com a capacidade de transporte aumentada, até 80% dos sedimentos erodidos nas encostas podem ser transportados nos sulcos (McCool et al., 1989).

2.3.2 Erodibilidade em sulcos e tensão cisalhante crítica

A erodibilidade expressa a resistência do solo à erosão hídrica (Foster, 1982). Entre outros fatores, é um reflexo dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos do solo (Denardin, 1990; Lima et al., 1990; Flanagan e Livingston, 1995). É considerada como um fator essencial do solo para medir a sua susceptibilidade em sofrer erosão hídrica (Bryan, 2000; Pintaldi et al., 2017). A susceptibilidade ou resistência de um solo à desagregação e transporte, geralmente, é reconhecida como um dos principais determinantes da erosão local (Laflen et al., 1991).

Os atributos do solo que mais influenciam a erodibilidade nos diferentes solos são as que afetam ou modificam a taxa de infiltração de água no solo, dependem diretamente das propriedades do solo como textura, estrutura, matéria orgânica, combinadas com a resistência do solo ao cisalhamento (Bryan, 2000; Li et al., 2015). A erodibilidade, assim como todos os atributos do solo, varia naturalmente no tempo e no espaço (Zhang et al. 2014; Liu et al., 2020).

O valor de tensão cisalhante crítica ou cisalhamento hidráulico crítico (τ_c) representa uma medida da resistência do solo sob o efeito de uma força, o qual pode ser definido pela equação de Coulomb (Zaho, 2000):

$$\tau_c = c + z \tan \phi \quad (7)$$

em que, c = coesão (Pa); z = tensão normal (Pa) e ϕ = ângulo de fricção interna do solo ($^\circ$). No caso do processo de erosão em sulcos a força é exercida pelo fluxo de enxurrada escoando na superfície do solo.

A partir do momento que a tensão da água (τ) na superfície é superior à de resistência do solo (τ_c), inicia-se a erosão em sulcos como discutido na apresentação da Equação (1).

Há diversos registros na literatura de valores de τ_c medidos no solo: 0,41 a 6,64 (Elliot al., 1989); 1 a 2 Pa (Tang et al., 2004); 0 a 15 Pa (Knapen et al., 2007); 1,33 a 2,63 Pa (Yao et al., 2008); 3,2 a 6,4 Pa (Lei et al., 2008). Com o uso do solo para fins agrícolas o τ_c varia de 2,08 a 6,30 (Zhang et al., 2008). Os valores de τ_c são dependentes das condições experimentais ou de suposições teóricas, mas com um senso comum (Bryan, 2000): 1) certas condições são necessárias para início da incisão em sulcos; 2) as condições críticas não têm um valor fixo, mas variável com as combinações de diferentes fatores.

O cisalhamento hidráulico crítico é frequentemente estimado utilizando propriedades físicas e químicas do solo que são assumidas ser constantes para um dado solo, entretanto, o τ_c pode mudar devido a variações na umidade, densidade, composição e coesão do solo (Singh e Thompson, 2016; Kimiaghali et al., 2016). Muitas relações entre propriedades físicas, mecânicas, eletroquímicas e cisalhamento hidráulico crítico foram estabelecidas, dentre as quais algumas são apresentadas como:

$$\tau_c = 0,01 (\tau_s + 180) \times \text{tg} (30 + 1,73 \text{ IP}) \quad \text{Dunn (1959)} \quad (8)$$

$$\tau_c = 0,163 \text{ IP}^{0,84} \quad \text{Smerdon e Beasley (1961)} \quad (9)$$

$$\tau_c = 0,493 \text{ IP}^{0,0182 \text{ Cp}} \quad \text{Smerdon e Beasley (1961)} \quad (10)$$

$$\tau_c = -0,03414 + 0,00001 \text{ IP} + 0,00031 \text{ D} + 0,00029 \text{ K}_\phi \sigma_\phi \text{M}\phi + 0,00325 \text{ VS} + 0,00004 \text{ D}\% + 0,00102 \text{ LL} \quad \text{Carlson e Enger (1962)} \quad (11)$$

$$\tau_c = 6,85 \times 10^{-6} \rho_s^{2,44} \quad \text{Owen (1975)} \quad (12)$$

$$\tau_c = 5,42 \times 10^{-6} \rho_s^{2,28} \quad \text{Thorn e Parsons (1980)} \quad (13)$$

$$\tau_c = 0,1 + 0,1779 \text{ SC} + 0,0028 \text{ SC}^2 - 2,34 \times 10^{-5} \text{ SC}^3 \quad \text{Julian e Torres (2006)} \quad (14)$$

$$\tau_c = 0,70 e^{0,065 \text{ SM}} \quad \text{Singh e Thompson (2016)} \quad (15)$$

$$\tau_c = 0,79 e^{0,045 \text{ SM}} \quad \text{Singh e Thompson (2016)} \quad (16)$$

em que, τ_s é a tensão cisalhante do sedimento (Pa); tg é a tangente; IP é o índice de plasticidade; Cp é a percentagem de argila; D é a densidade natural do solo (lb/ft³); $\text{K}_\phi \sigma_\phi \text{M}\phi$ é determinado com base na distribuição granulométrica; VS é a resistência ao cisalhamento pelo teste de Vane; D% é a percentagem de densidade máxima de Proctor; LL é o limite de liquidez; ρ_s é a densidade do solo; SC é a percentagem da fração argila-silte; SM é umidade do solo (%).

Valores de erodibilidade em sulcos (K_r) e tensão cisalhante crítica (τ_c), seguindo metodologia de campo apresentada por Elliott et al. (1989), obtidos em 32 solos nos EUA, para uso no WEPP, foram utilizados por Flanagan e Livingston (1995), para propor equações estimativas de K_r e τ_c a partir de atributos do solo como:

$$K_r = 0,00197 + 0,00030 \text{ AMF} + 0,03863 e^{-1,84 \text{ MO}} \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (17)$$

$$\tau_c = 2,67 + 0,065 \text{ ARG} - 0,058 \text{ AMF} \quad \text{areia} \geq 30\% \quad (18)$$

$$K_r = 0,0069 + 0,134 e^{-0,20 \text{ ARG}} \quad \text{areia} < 30\% \quad (19)$$

$$\tau_c = 3,5 \quad \text{areia} < 30\% \quad (20)$$

em que, AMF é o percentual de areia muito fina, %; e é a base dos logaritmos neperianos; MO é o percentual de matéria orgânica do solo, %; ARG é o percentual de argila, %.

A desagregação do solo por fluxos concentrados, segundo Knapen e Poesen (2010) pode ser prevista a partir de propriedades do solo. Eles afirmaram tal fato baseados na premissa de que K_r e τ_c , que representam a resistência do solo à erosão (RSE), podem ser estimados a partir de propriedades do solo, visto que na literatura há diversos relatos de fatores que controlam a RSE, como demonstrou Knapen et al. (2007). Neste contexto, diversos experimentos foram conduzidos para determinar os principais fatores que controlam as variações espaciais e temporais da RSE, no topo de solos *Loess*, na região central da Bélgica (Knapen et al., 2007b, 2007c, 2008a, 2008b). Um resumo dos fatores ambientais que afetam a RSE e, por consequência, a erosão em sulcos, segundo Knapen e Poesen (2010), é apresentado na Figura 1.

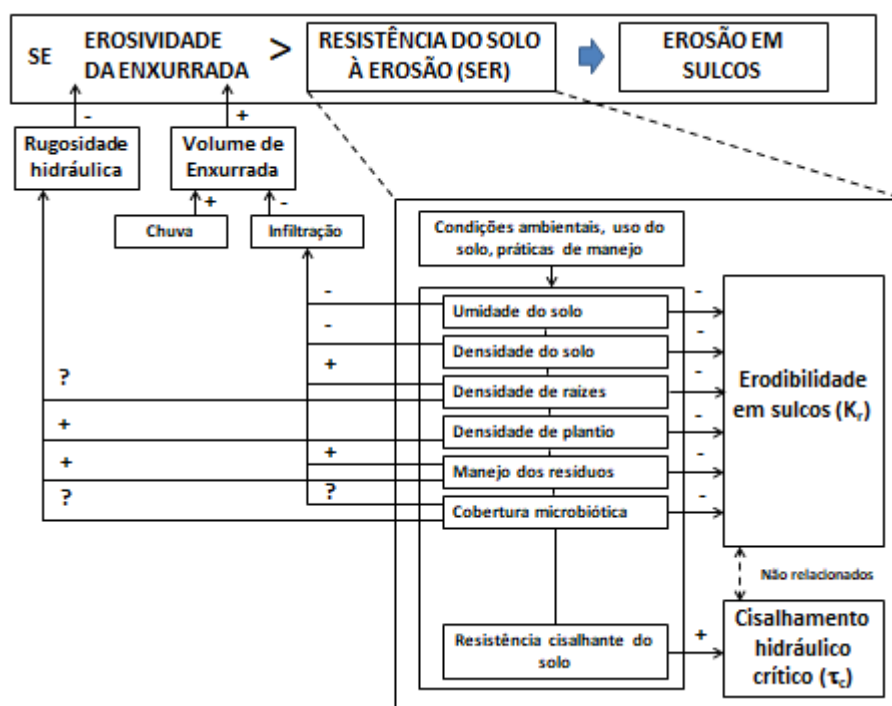


Figura 1. Representação esquemática dos principais fatores de resistência à erosão (RSE) do topo de solos *Loess* durante fluxo concentrado e seu impacto na erosividade da enxurrada. Adaptado de Knapen e Poesen (2010).

2.3.3 Compactação do solo

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, no qual ocorre um aumento da densidade do solo, em decorrência da redução de volume pela expulsão do ar (Silva et al., 2006). A compactação do solo gera a redução da porosidade total do mesmo, retenção de água e condutividade hidráulica, aumento da resistência do solo à penetração das raízes, permeabilidade e da aeração do solo (Cavichiolo, 2005).

A intensificação do tráfego por máquina, o preparo e o manejo do solo sob condições inadequadas de umidade do solo pode resultar no processo de compactação (Cherubin et al. 2016; Cortez et al., 2020). Com a compactação o volume dos poros diminui, enquanto aumenta a densidade do solo (Horn et al., 1995). Acompanhados por um aumento da densidade do solo, várias propriedades e funções do solo também mudam: capacidade de armazenamento de ar, capacidade de campo, taxa de infiltração e permeabilidade do ar, tudo isso diminui, resultando

em um fluxo subsuperficial restrito, o que aumenta a velocidade e a quantidade de escoamento superficial e intensifica a erosão do solo (Batey, 2009; Gebhardt et al., 2009).

A presença de uma camada compactada no solo pode induzir a subprocessos como a descontinuidade hidráulica e impor outros limiares para a erosão do solo e o desenvolvimento de erosão em sulcos (Thomaz, 2013). Apesar dos avanços na modelagem da erosão, os efeitos das linhas trafegadas não são usualmente considerados (Saggau et al., 2019). O solo de parcelas intensamente trafegadas e submetidas à chuva simulada apresentou taxa de erosão 60% menor, segundo Martins Filho et al. (2001), em relação às parcelas com solo recentemente preparado.

Os efeitos da compactação na erosão em sulcos, para solo com densidade aparente de 0,9 ou 1,1 g cm⁻³, foram avaliados por Prats et al. (2019), os quais observaram que a desagregação de sedimentos, por fluxo concentrado, diminuiu de 858 g m⁻² obtido nas parcelas sem cobertura e não compactadas para 237 g m⁻² nas parcelas sem cobertura e compactadas. Prats et al. (2019) atribuíram esta redução significativa à maior energia necessária para desagregar as partículas do solo nas parcelas compactadas.

A taxa de erosão diminuiu com o aumento gradual do teor de água em solo tratado com biochar (5% e 10%) compactado e em solo sem biochar descoberto. Isto foi principalmente atribuído aos fenômenos de floculação e dispersão das partículas do solo ao longo da curva de compactação (Kumar et al., 2019).

Não há um consenso sobre os efeitos da compactação na erosão do solo e, também, nem há resultados de pesquisas em número considerável para tanto. Logo, este fato reforça a justificativa a relevância da proposta do presente trabalho.

2.3.4 Consolidação do solo

Um fator que pode alterar a erosão em sulcos é a consolidação do solo. Um decréscimo na erodibilidade do solo, principalmente em sulcos, ocorre com o tempo após o seu preparo, por um aumento da densidade do solo e resistência mecânica do solo devido à consolidação (Knapen et al., 2007b; Wilsom et al., 2020). A

consolidação do solo é definida como um processo de aumento na sua estabilidade estrutural, consequência da tensão efetiva induzida pelo potencial matricial durante a redistribuição da água no solo após a chuva (Nearing et al., 1988b). Ela é um processo natural de umedecimento e secagem que aumenta a estabilidade do solo (Brown et al., 1990).

O fenômeno da consolidação aumenta a resistência do solo e sua coesão, o que resultaria em uma menor taxa de infiltração, erosão entressulcos e concentração de sedimentos na enxurrada, mesmo com o aumento da taxa de enxurrada (Brown & Norton, 1994; Zhang et al., 1998).

Foi observado por West et al. (1992) que a consolidação reduziu a erodibilidade em aproximadamente 80% para o sistema de plantio direto, em comparação com os sistemas de cultivo convencional. Para a tensão cisalhante crítica (τ_c), King et al. (1995) verificaram que τ_c aumentou em 66% devido a consolidação após um mês de chuvas leves. Com a consolidação do solo aumentos de K_r , com sistemas de preparo convencional e plantio direto, foram observadas por King et al. (1995) da ordem de 39% e 35%, respectivamente. Já Reichert et al. (2001) observaram, em solo recentemente preparado e consolidado após 2 meses em sistema convencional, uma diminuição de aproximadamente 70 % para K_r e, também, um aumento de 19 % no τ_c devido a consolidação.

Resultados contraditórios em pesquisas realizadas são, provavelmente, devidos às diferenças tais como solos testados, métodos de preparo, e uso de precipitação simulada ou natural (Wilson et al., 2020). Logo, há ainda uma lacuna de pesquisas na literatura demonstrando como as propriedades da erosão, como K_r e τ_c , mudam no tempo com a consolidação.

2.3.5 Sistema de manejo do solo

Entre as práticas de manejo que diretamente influenciam o processo erosivo causado pela água da chuva, as operações de preparo do solo e semeadura das culturas ganham destaque, uma vez que elas determinam as condições físicas de superfície e subsuperfície dele.

O tipo de preparo de solo influencia fortemente nas perdas de solo por erosão, afetando os atributos químicas e físicas (Panachuki et al., 2010; Wilsom et al., 2020). Foster (1982) argumentou que a forma de preparo do solo tem impacto nos valores de transporte de sedimentos nos sulcos, podendo deixar o solo mais susceptível à erosão em sulcos e principalmente quando é no sentido do declive. As operações de cultivo como frequência de preparo, velocidade de preparo e profundidade e tipo de preparo do solo, têm impactos na erosão em sulcos por mudanças na infiltração de água, taxa de enxurrada e erodibilidade do solo (Zhao et al., 2018).

O tipo de implemento agrícola utilizado e a intensidade do preparo do solo modificam a quantidade de material de cobertura que ficará no solo (Schick et al., 1999). A presença de cobertura vegetal no solo tem forte influência no processo erosivo. Resultados obtidos por Cassol et al. (2004) demonstraram que a presença de resíduo vegetal na cobertura do solo, têm efeito na altura da lâmina de escoamento, assim como no aumento da sua rugosidade hidráulica que reduz a velocidade média do escoamento, provocando assim barreiras físicas que reduzem as taxas de desagregação do solo.

O uso de técnicas conservacionistas, como a manutenção de resíduos na superfície e/ou incorporação no solo, pode decrescer a erodibilidade e a tensão cisalhante crítica devido aos efeitos das ligações físicas e químicas (Wang et al., 2020). Um estudo de Xin et al. (2016) demonstrou que a perda de solo foi reduzida de 15 a 100% quando cobertura por resíduos aumentos de 15 a 75% num gradiente de declive de 5%. Para declives de 10 a 20%, Jourgholami et al. (2019) observaram que a erosão decresceu de 49 a 79% com um aumento na cobertura do solo por resíduos variando de 0,42 a 1,69 kg m⁻².

Diversas pesquisas têm demonstrado a eficácia de preparos conservacionistas associados à manutenção de resíduos culturais ou da cobertura vegetal do solo no controle da erosão (Wang et al., 2018; Luo et al., 2018; Wang et al., 2020). Portanto, a utilização dos resíduos culturais como cobertura do solo é uma maneira simples e eficaz de controlar a erosão em áreas cultivadas (Bertol et al., 1997; Bertol et al., 2007).

Os sistemas de preparo e manejo do solo influenciam as taxas de erosão hídrica ocorridas em um solo, expondo-o em maior ou menor intensidade ao impacto das gotas de chuva e a ação da enxurrada, levando a ocorrência de erosão, podendo ocasionar degradação da estrutura do solo, perdas de solo, água, nutrientes e matéria orgânica (Cardoso et al., 2012; Oliveira et al., 2015).

As relações entre fatores que influenciam a erosão em sulcos, como precipitação, enxurrada, solo, comprimento do declive, gradiente de declive, sistemas de cultivo, vegetação etc, foram investigadas por inúmeros pesquisadores (Kimiaghalam et al., 2016; Luo et al., 2018; Shen et al., 2019; Wang et al., 2020). Com base em pesquisas, com as citadas e outras, as inter-relações dos fatores que influenciam o processo de erosão em sulcos foram apresentadas por Sun et al. (2013). Na Figura 2 estas inter-relações são apresentadas. As combinações e interações de diferentes fatores e seus impactos no início e processo de erosão em sulcos (Figura 2), dada a complexidade do fenômeno, precisam de mais investigações pelas redes de pesquisadores como citado por Sun et al. (2013). Apenas deste modo, será possível a obtenção de novas informações para verificar os potenciais efeitos atenuantes atribuíveis à agricultura conservacionista e, ainda, a necessidade de instrumentos políticos mais eficazes para a proteção do solo como citado por Borrelli et al. (2020).

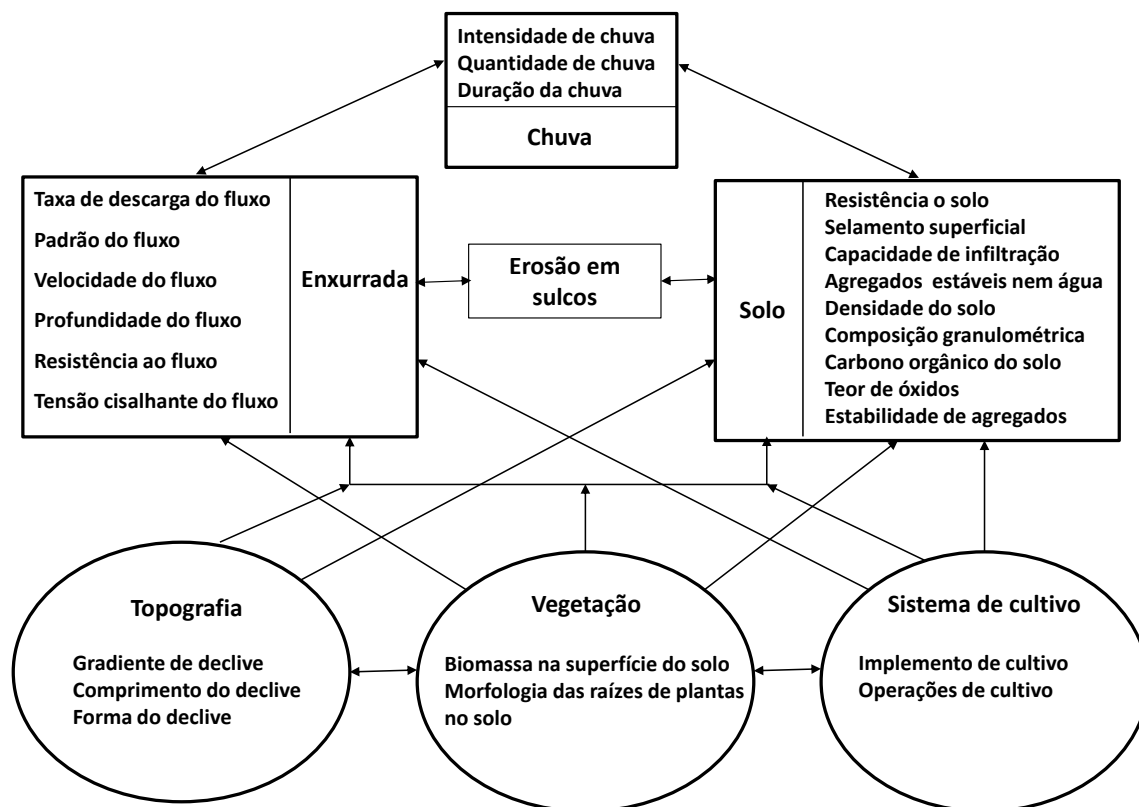


Figura 2. Inter-relações dos fatores que influenciam o processo de erosão em sulcos. Adaptado de Sun et al. (2013).

2.3.6 Perdas de nutrientes por erosão

As perdas de nutrientes por erosão hídrica são um dos principais fatores determinantes do empobrecimento dos solos e da redução da produtividade da maioria das culturas. As perdas de nutrientes do solo pelo escoamento e sedimentos erodidos são a principal razão para o declínio da fertilidade do solo (Bashagaluke et al., 2018). Os sedimentos erodidos concentram grandes quantidades de nutrientes como nitrogênio e fósforo, principais elementos causadores da eutrofização (Xu et al., 2013). As perdas aceleradas de solo e consequentemente de água e nutrientes, segundo Dai et al. (2018), são resultados dos cultivos intensos, manejo do solo inadequado e chuvas irregulares.

Em escala mundial, a perda anual de 75 000 milhões de toneladas de solo de áreas agrícolas implica um prejuízo em cerca de 400 000 milhões de USD em produção agrícola. Essa perda reduz também consideravelmente a capacidade do

solo para armazenar e reciclar carbono, nutrientes e água. Estima-se que as perdas de produção anual de cereais devido à erosão sejam a 7,6 milhões de toneladas (FAO, 2019). A concentração de determinado nutriente na enxurrada pode variar de acordo com a quantidade em que este está disponível no solo, o que por sua vez pode ser influenciada pela aplicação de corretivos, por adubações, pelo tipo de solo, pelo tipo de manejo que está sendo empregado na área (Schick et al. 2000; Bertol et al., 2004).

Preferencialmente a erosão transporta componentes do solo que estão disponíveis em maiores concentrações na superfície ou perto da superfície do solo, incluindo C orgânico, sendo essas camadas as mais afetadas, visto que é onde se concentra a maior parte dos nutrientes do solo para a nutrição das plantas (Berhe et al., 2018). As perdas de nutrientes podem ser expressas tanto em concentração do elemento na suspensão ou no sedimento, como em quantidade perdida por área. A concentração de determinado elemento na enxurrada varia principalmente com sua concentração no solo, que é influenciada pelas fertilizações, manejo e tipo de solo (Shick et al., 2000; Bertol et al., 2004).

A quantidade de nutrientes transportados dos solos agrícolas depende das práticas de manejo dos solos disponíveis e do tipo de sistema de cultivo utilizado (Bashagaluke et al., 2018). A perda de nutrientes do solo por meio da erosão indica significativo custo devido à necessidade de reposição para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de cultivo. Assim, o manejo conservacionista bem como a presença da cobertura vegetal viva ou morta acima da superfície do solo, intercepta o impacto das gotas d'água da chuva sobre o solo, protegendo-o (Thomazini et al., 2012; Ramos et al., 2014).

Portanto, as principais consequências da erosão hídrica são as perdas de água, solo, MO, nutrientes e os custos gerados por estas perdas. Estudar esse fenômeno é de extrema importância, visto que a água doce é um recurso natural escasso e que a perda gradativa das camadas de terra pode tornar os solos improdutivos, além dos altos custos com a aplicação de fertilizantes para produção das culturas agrícolas. Desta forma, reverter a degradação da terra é essencial para melhorar a produtividade da água, a disponibilidade de nutrientes, e manter os nutrientes do solo e controlar o escoamento e a perda de solo são cruciais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido em área de operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar localizada no município de Guariba, Estado de São Paulo, no ano de 2007, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 21° 21' 36" S e Longitude 48° 13' 42" W. O clima local, segundo a classificação de Köppen, é o denominado tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média anual de 1.438 mm. Ressalta-se que a área experimental vem sendo utilizada para a produção de cana-de-açúcar e com um histórico de mais de quinze anos de colheita mecanizada. O solo local é um Latossolo Vermelho eutroférico (Santos et al., 2018).

Na instalação do experimento foi retirada a palha da superfície do solo. Seis sulcos ou canais parabólicos, com 0,25 m de largura, 9,00 m de comprimento e 0,20 m de profundidade na porção central, foram pré-formados, com um enxadão, em áreas tráfegadas (T) e não tráfegadas (NT), constituídas pelas entrelinhas e linhas da cultura de cana-de-açúcar, respectivamente.

As laterais destes sulcos foram delimitadas por pequenos amontoados de terra, originados a partir da formação dos mesmos. No limite inferior de cada sulco foi instalada uma calha coletora convergente, para uma saída de aproximadamente 0,10 m de diâmetro, a qual facilitou a coleta de amostras de enxurrada e as avaliações de vazões. Na cabeceira de cada um dos três sulcos haviam, também, saídas individuais em tubo PVC, de 0,10 m de diâmetro, para fornecimento de fluxos adicionais de água.

Para as simulações de chuvas, com consequente produção de sedimentos erodidos foi utilizado um simulador de chuvas de hastes rotativas, tipo Swanson, com bicos veejet 80-100, previamente calibrado e nivelado no terreno, como proposto por Swanson (1965). As intensidades das chuvas foram determinadas dispondo-se 36 pluviômetros radialmente no sentido do declive como descrito por Martins Filho (1999).

Uma chuva de 60 mm h⁻¹ foi aplicada, 24 horas antes dos testes experimentais, para uniformizar a umidade do solo próximo da sua capacidade de campo. Isso foi

efetuado partindo da premissa básica que o fluxo superficial de água só ocorre quando o solo está saturado ou próximo disso. Para evitar danos ao solo foram utilizadas telas plásticas para dissipar a energia das gotas da água da chuva nas parcelas. Após este procedimento, as parcelas foram cobertas com lona plástica, para se evitar perdas de água por evaporação e, ainda, danos devido a eventual ocorrência de precipitações naturais.

No dia seguinte, nas parcelas em sulcos, aplicou-se uma chuva de intensidade de 65 mm h^{-1} (C) durante 65 minutos, e aos 5, 35 e 55 minutos de chuva, foram realizadas avaliações do cisalhamento hidráulico nos sulcos, utilizando-se de um perfilômetro, o qual foi fotografado com o uso de uma máquina fotográfica. Essas avaliações foram feitas em duas posições dos sulcos: a 2 m da cabeceira e a 2 m do final dos sulcos. O perfilômetro (Figura 3a) constituiu-se de 100 hastes metálicas espaçadas de 0,005 m e, acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 1,8 m de comprimento e 1,5 m de altura. As fotografias foram digitalizadas e analisadas em uma planilha de Excel, em microcomputador, para as determinações de variáveis hidráulicas como perímetro molhado (P_m), área de secção transversal ocupada pelo fluxo (a) e raio hidráulico (R_h).

A velocidade superficial do fluxo foi também avaliada, nos três diferentes instantes da chuva, citados anteriormente, utilizando-se como corante o azul de metileno, cronometrando-se o tempo necessário para que este percorresse os 5,00 m centrais do comprimento total de cada sulco. Esses valores de velocidade superficial medidos foram multiplicados por um fator de correção, $\alpha = 0,6$, para se obter a velocidade média do escoamento, tendo-se em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos. Esse valor tem sido utilizado e recomendado por outros autores (Braida & Cassol, 1996).

Aplicou-se a chuva (C), chuva mais fluxos adicionais ($C + F_n$, para $n = 1, 2, 3$) e, apenas os fluxos extras de água (F_n , para $n = 1, 2, 3$) nos sulcos; os fluxos extras tiveram as seguintes vazões: $F_1 = 25 \text{ L min}^{-1}$, $F_2 = 52 \text{ L min}^{-1}$ e $F_3 = 125 \text{ L min}^{-1}$. O cisalhamento e a velocidade superficial do fluxo nos sulcos foram avaliados, como já descrito, aos 5, 35 e 55 minutos para a chuva e, aos 5, 10 e 15 minutos quando da aplicação dos fluxos (F_n) e/ou chuva + fluxos ($C + F_n$).

Durante a última amostragem da enxurrada, uma graduação nos recipientes de coleta foi o indicador do equilíbrio atingido durante a chuva (C). Como o tempo de amostragem foi cronometrado até o volume de enxurrada atingir a graduação dos recipientes, facilmente pôde-se estimar a vazão de enxurrada nos minutos finais da chuva (C), caracterizando uma condição de equilíbrio. A vazão, quando se encerrou a chuva, foi de, aproximadamente, $6,7 \text{ L min}^{-1}$.

Deu-se reinício à chuva (C), até que a enxurrada atingisse o equilíbrio anterior. Várias amostragens de enxurrada foram realizadas, a partir do instante em que esta ocorreu, até que os tempos cronometrados e os volumes coletados em recipientes graduados fossem iguais ao do equilíbrio. A partir deste momento as três diferentes vazões (F_1 , F_2 e F_3) foram aplicadas diretamente nas cabeceiras dos sulcos, através de um sistema de fornecimento de fluxos adicionais acoplado a uma moto-bomba. As combinações C + F_1 , C + F_2 e C + F_3 tiveram duração de 20 minutos cada. Após as combinações chuva + fluxos adicionais (C + F_n) aplicaram-se apenas os fluxos F_1 , F_2 e F_3 (Figura 3b), durante 20 minutos cada, sem a presença da chuva (C).

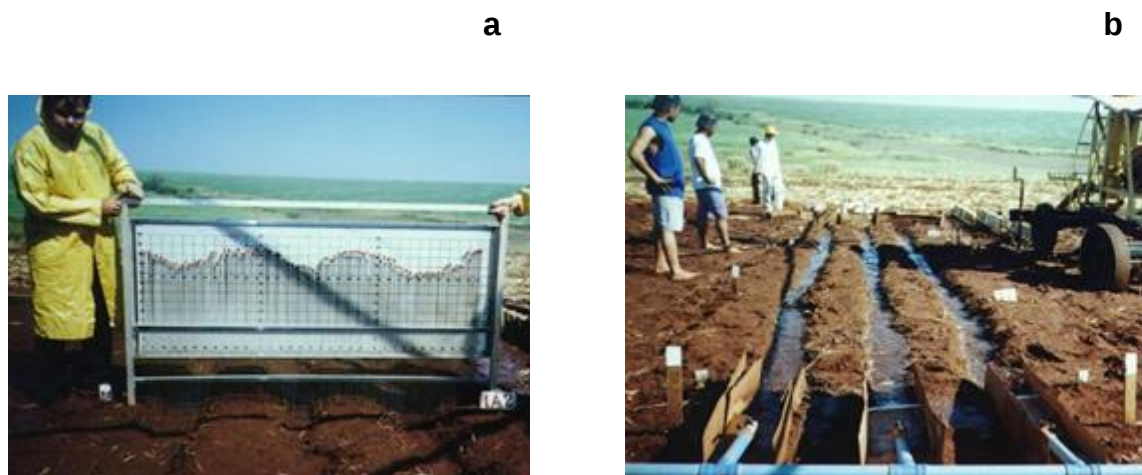


Figura 3. a) Imagem registrando um perfilômetro; b) Aplicação de fluxo extra nos sulcos.

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos, quando da aplicação da chuva e/ou dos fluxos adicionais, foram realizadas a cada 5 minutos após o início da enxurrada, por meio de calha coletora localizada na parte inferior de cada sulco. As amostras foram

coletadas em recipientes, com capacidade para 1L, cronometrando-se o tempo de coleta.

Logo após as coletas, os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório, pesados e, posteriormente, mantidos em repouso por 24 horas, quando se sifonou o máximo possível de água. Depois, os recipientes foram levados para uma estufa a uma temperatura de 65°C até peso constante, para que pudessem ser novamente pesados para a quantificação da concentração de sedimentos, o volume da solução e, conseqüentemente, determinação das taxas de perdas de solo e água.

Para a caracterização química do solo e do sedimento erodido, o cálcio, o magnésio, o potássio e o fósforo foram extraídos pelo método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987). O carbono orgânico (C%) foi determinado seguindo metodologia da EMBRAPA (1979).

O raio hidráulico dos sulcos foi determinado pela seguinte relação:

$$R_h = \frac{a}{P_m} \quad (21)$$

em que, R_h é o raio hidráulico da seção transversal (m); a é a área da seção transversal (m²); P_m é o perímetro molhado da seção transversal (m).

A declividade dos sulcos foi determinada com um nível de precisão, pela variação de altura entre dois pontos de distância determinada nos sulcos, e expressa em m m⁻¹.

A tensão cisalhante média do escoamento (τ) foi obtida com a seguinte equação:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (22)$$

em que, γ é o peso específico da água (N m⁻³); R_h é o raio hidráulico do canal (m); S é a declividade do canal (m m⁻¹).

Para definir as condições hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados e de sua interação com a superfície do solo, foram determinadas algumas características hidráulicas, descritas em Simons e Senturk (1992), e apresentadas a seguir.

O número de Reynolds foi determinado pela relação:

$$R_e = \frac{R_h v}{\nu} \quad (23)$$

em que, R_e é o número de Reynolds (adimensional); V é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); R_h é o raio hidráulico (m); ν é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Como a viscosidade cinemática (ν) da água varia conforme a temperatura, esta foi determinada, em $^{\circ}\text{C}$, em cada ensaio. A viscosidade cinemática (ν) da água foi determinada de acordo com a temperatura (T , em $^{\circ}\text{C}$), conforme a expressão dada por Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (24)$$

A temperatura da água nos testes de campo foi de 25°C , por conseguinte, a viscosidade cinemática (ν) foi tomada como uma constante de $8,98 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

O número de Froude (F_r) foi obtido pela expressão:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g R_h}} \quad (25)$$

em que, v é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); R_h é o raio hidráulico (m).

A velocidade de cisalhamento (U^*) foi determinada pela expressão abaixo:

$$U^* = \sqrt{g S R_h} \quad (26)$$

em que, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); R_h é o raio hidráulico (m); S é a declive do fundo do sulco (m m^{-1}).

A resistência ao fluxo superficial foi avaliada pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n) e o fator de fricção de Darcy-Weisbach (f) determinados com as Equações (2) e (3).

A partir da massa de solo seco e da duração das coletas, determinaram-se as taxas de descarga sólida, em kg s^{-1} . Por fim, as taxas de desagregação de solo nos sulcos foram obtidas pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{C Q}{L P_m} \quad (27)$$

em que, D_r é a taxa de desagregação do solo nos sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Q é a descarga líquida (L s^{-1}); C é a concentração de sólidos no escoamento (kg L^{-1}); P_m é o perímetro molhado (m); L é o comprimento do sulco (m).

A capacidade de transporte de sedimentos do fluxo (T_c) foi determinada utilizando-se metodologia proposta, para resolução da Equação de Yalin, por Cerquetani & Martins Filho (2006).

A carga média de sedimentos do fluxo em sulco foi calculada pela expressão (Braida, 1994):

$$G = \frac{PS}{P_m t} \quad (28)$$

em que, G é a carga média de sedimentos do fluxo ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); PS é a perda total de solo (kg); P_m é o perímetro molhado médio da secção transversal do fluxo (m); t é o tempo de duração do teste (s).

A erodibilidade do solo em sulcos foi determinada pela análise de regressão entre os valores médios da tensão de cisalhamento (τ) e de desagregação do solo (D_r) obtidos para cada vazão aplicada. A tensão cisalhante média do escoamento (τ) foi obtida com a equação (22).

Portanto, a erodibilidade em sulcos (K_r) consistiu-se no coeficiente b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo (τ). A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) correspondeu ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Laflen & Thomas, 1987).

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o programa Statistica (STATSOFT, 1994).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os valores médios dos atributos físicos em locais trafegados (T) e não-trafegados (NT) (Tabela 1), verificou-se maior macroporosidade em locais não-trafegados (NT) com valores médios variando de 10,03% a 10,13% e menores densidade com valores médios variando de 1,50% a 1,42%, também para condição NT, este fato pode ser explicado devido tratar-se de áreas onde não ocorrem os efeitos do trânsito constante de máquinas e equipamentos. Nas áreas T não ocorreu macroporosidade acima de 10 %, ideal para as raízes da maioria das culturas poderem se desenvolver (Klein e Libardi, 2002). A redução da macroporosidade tende a se refletir na porosidade total e no aumento de densidade de solo (Spera et al., 2006), o que ocorreu nas áreas trafegadas em relação às não-trafegadas.

Ressalta-se que os valores de densidade do solo obtidos em locais T estão acima da faixa de 1,51 a 1,59 Mg m⁻³ considerados máximos por Sá et al. (2016) e Oliveira et al. (2012) ao avaliarem a compactação em Latossolo de textura argilosa a muito argilosa. A densidade do solo relativamente mais elevada nesses locais é provavelmente devido ao tráfego pesado de máquinas durante o plantio e colheita da cana-de-açúcar. Esses achados podem ser explicados pelo incremento na Ds e redução da macroporosidade nas áreas trefegadas.

Todos os atributos físicos do solo em locais não-trafegadas (NT) e trafegadas (T) apresentaram diferenças significativas (Tabela 1, $p < 0,05$). Com a degradação da estrutura do solo há modificações no arranjo de suas partículas, o que diminui o tamanho dos poros, especialmente daqueles de maior tamanho como os macroporos (Alves et al., 2007). A relação entre macro (Ma) e microporos (Mi) foi de 9 para NT e 12 para T, quando para um solo ideal deveria ser 1:2 para suficiente aeração, permeabilidade e armazenamento de água para o bom desenvolvimento vegetal. Esta condição não ocorreu para NT e T.

Tabela 1. Atributos físicos do solo, em Latossolo Vermelho eutrófico em condições de consolidação/compactação, para locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Profundidade	Condição	Ma	Mi	VTP	Ds
0,00-0,10	NT	10,03 a	41,19 a	51,22 a	1,50 c
0,10-0,20	NT	10,13 a	39,09 a	49,22 a	1,42 c
0,00-0,10	T	4,02 b	37,51 a	41,53 b	3,25 a
0,10-0,20	T	3,26 b	40,53 a	43,79 b	2,80 b

Ma = macroporosidade do solo (%); Mi = microporosidade do solo (%); VTP = volume de poros totais (%); Ds = densidade do solo (Mg m^{-3}). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e, maiúscula na coluna, para uma mesma variável, não diferem, estatisticamente, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Todas as variáveis hidráulicas dos escoamentos gerados pela aplicação da chuva (C), chuva + fluxos adicionais ($C + F_n$, para $n = 1, 2, 3$) e fluxos extras de água (F_n , para $n = 1, 2, 3$) na ausência da chuva, nos sulcos pré-formados, em solo não-trafegado (NT) e trafegado (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada, são apresentadas na Tabela 2.

Pode-se observar que as variáveis hidráulicas v , a , P_m , R_h , R_e , F_r , n e U^* apresentaram diferenças significativas entre os eventos C, $C + F_1$, $C + F_2$, $C + F_3$, F_1 , F_2 e F_3 . Tais diferenças, provavelmente, foram proporcionadas pela hidráulica do escoamento gerada pelos eventos aplicados. As variáveis hidráulicas citadas acima, com praticamente não apresentaram diferenças significativas entre as áreas T e NT. A observação da Tabela 2 permite concluir que, nas situações de máxima vazão nos sulcos ($C + F_2$ e $C + F_3$ para área de secção; $C + F_1$, $C + F_2$, $C + F_3$ para P_m), houve diferença significativa, para a e P_m , comparando-se as áreas NT e T.

A velocidade média do fluxo superficial (V) variou de 0,234 a 0,891 ms^{-1} para sulcos NT (SNT) e 0,244 a 0,899 ms^{-1} para sulcos T (ST). Não se observou diferenças significativas entre SNT e ST, apenas houveram diferenças significativas dentre os tratamentos para uma mesma condição (NT ou T), com tendência para valores de V na seguinte ordem $C+F_n > C > F_n$ ($n = 1$ a 3).

Tabela 2. Características hidráulicas do escoamento em sulcos, obtidas em Latossolo Vermelho eutroférico em condições de consolidação/compactação, em locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Variável hidráulica	Condição	Chuva	C+F ₁	C+F ₂	C+F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
V (m s ⁻¹)	NT	0,535 bA	0,591 bA	0,695 aA	0,891 aA	0,234 cA	0,254 cA	0,272 cA
	T	0,464 bA	0,802 aA	0,851 aA	0,899 aA	0,244 cA	0,267 cA	0,304 cA
a (m ²)	NT	0,0002 dA	0,0005 cdA	0,0014 bA	0,0024 aA	0,0005 cdA	0,0006 cA	0,0008 cA
	T	0,0003 aB	0,0007 abA	0,0008 aB	0,0009 aB	0,0007 aA	0,0008 aA	0,0010 aA
P _m (m)	NT	0,026 cA	0,050 cA	0,121 bA	0,181 aA	0,099 bcA	0,112 bcA	0,126 bcA
	T	0,036 bA	0,067 abB	0,071 abB	0,076 abB	0,097 aA	0,101 aA	0,107 aA
R _h (m)	NT	0,0067 cA	0,0100 bA	0,0125 bA	0,0139 aA	0,0052 cA	0,0058 cA	0,0064 cA
	T	0,0094 cA	0,0110 bA	0,0121 abA	0,0130 aA	0,0070 cA	0,0077 cA	0,0090 cA
S (m m ⁻¹)	NT	0,072 aB	0,072 aB	0,072 aB	0,072 aB	0,072 aB	0,072 aB	0,072 aB
	T	0,085 aA	0,085 aA	0,085 aA	0,085 aA	0,082 aA	0,082 aA	0,082 aA
R _e	NT	4248 cdA	6424 cA	9623 bA	13691 aA	1367 dA	1646 dA	1936 dA
	T	5073 bcA	9554 abA	11137 aA	12617 aA	1901 cA	2287 cA	3110 cA
F _r	NT	2,089 aA	1,942 aA	2,015 aA	2,451 aA	1,038 bA	1,067 bA	1,088 bA
	T	1,533 bA	2,553 aA	2,605 aA	2,655 aA	0,937 cA	0,975 cA	1,023 cA
f	NT	0,148 bB	0,186 bA	0,188 bA	0,104 bA	0,557 aB	0,528 aA	0,502 aA
	T	0,426 aA	0,161 bA	0,169 bA	0,142 bA	0,748 aA	0,691 aA	0,632 aA
n	NT	0,018 bB	0,022 bA	0,023 bA	0,018 bA	0,035 aA	0,035 aA	0,034 aA
	T	0,032 bA	0,020 bA	0,021 bA	0,020 bA	0,043 aA	0,042 aA	0,041 aA
U* (m s ⁻¹)	NT	0,068 cB	0,083 bA	0,094 bA	0,099 aA	0,061 cB	0,064 cB	0,067 cB
	T	0,087 bcA	0,094 aA	0,099 aA	0,102 aA	0,075 cA	0,078cA	0,085 bcA

V = velocidade média; a = área de secção; P_m = perímetro molhado; R_h = raio hidráulico; S = razão de inclinação; R_e = número de Reynolds; F_r = número de Froude; f = fator de fricção de Darcy-Weisbach; n = coeficiente de rugosidade de Manning; U* = velocidade de cisalhamento. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e, maiúscula na coluna, para uma mesma variável, não diferem, estatisticamente, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. Chuva (C) = 65 mm h⁻¹; Fluxo 1 (F₁) = 25 L min⁻¹; Fluxo 2 (F₂) = 52 L min⁻¹; Fluxo 3 (F₃) = 125 L min⁻¹.

Resultados de análise de correlação indicam que V foi significativamente relacionada a taxa de vazão do fluxo (Q) com coeficiente de 0,74 ($p < 0,01$). Já a relação entre V e a razão de inclinação (S) foi menor que entre V e Q ($R = 0,27$, $p < 0,05$). A relação entre V , Q e S pode ser descrita por uma função potência como demonstrado pela Equação (28). Resultados similares foram relatados por Foster et al. (1984), Di Stefano et al. (2013), Peng et al. (2015) e Ma et al. (2020).

$$V = 87,189 Q^{0,521} S^{0,521} \quad (R^2 = 0,58^{**}) \quad (28)$$

Os números de Reynolds (Re) e Froude (Fr) foram utilizados para identificar o regime do fluxo superficial. O Re variou de 1367 a 13691 nos SNT e de 1901 a 12617 nos ST, respectivamente. Não houve diferenças significativas para Re entre NT e T, mas sim entre $C+F_2$ e $C+F_3$ e os demais tratamentos. Para o Fr os tratamentos $C+F_n$ ($n = 1$ a 3) e C diferiram dos demais nas duas condições NT e T. O fluxo foi considerado laminar quando o número de Reynolds resultou em $Re < 1000$, turbulento transicional quando $Re > 1000$ e completamente turbulento quando $Re > 2000$, conforme Guo et al. (2013) e Reichert e Norton (2013). Conforme Grant (1997), os fluxos foram considerados subcríticos quando o número de Froude (Fr) foi inferior a 1,00 e, supercrítico para $Fr > 1,00$. Nos SNT 57,1% do total de fluxos foram completamente turbulentos supercríticos e 42,9% foram classificados como turbulentos transicionais supercríticos. Já nos ST 71,4% do total de fluxos foram completamente turbulentos supercríticos, 14,3% foram transicionais turbulentos subcríticos e os outros 14,3% foram completamente turbulentos subcríticos. Os resultados indicam que com o aumento de V há uma mudança no regime do fluxo de transicional subcrítico para completamente turbulento supercrítico ($Re \times V$; $r = 0,90$; $p < 0,01$). Tais resultados atestam que as condições experimentais foram as de fluxos turbulentos subcríticos e supercríticos, característicos de sulcos sob o processo de erosão em sulcos.

O cálculo de f variou de 0,104 a 0,557 nos SNT e de 0,142 a 0,748 nos SN com médias de 0,316 e 0,424, as quais se enquadram em resultados obtidos por Nearing et al. (1999) que obtiveram f variando de 0,4 a 2,5. Entretanto, os valores médios obtidos neste trabalho são inferiores ao obtido por Ma et al. (2020) e igual a 1,35.

Com relação ao coeficiente de rugosidade de Manning (n) este variou de 0,018 a 0,035 nos SNT e de 0,020 a 0,043 nos ST, com maiores e significativos valores

para os tratamentos F_n ($n=1$ a 3) em relação aos demais (Tabela 1). Em média os SNT e ST apresentaram n iguais a $0,026$ e $0,031$ os quais não difere entre si ($p<0,05$), respectivamente. A rugosidade hidráulica dos sulcos, representada por n , segundo Cantalice et al. (2005), é aquela conjunta das partículas e agregados do solo e forma do canal. Valores de n da ordem de $0,0067$ a $0,084$, segundo Simons e Senturk (1992), correspondem a canais sem vegetação e declivosos, com cascalho no fundo. Assim, as rugosidades obtidas de $0,018$ a $0,043$ (Tabela 1) correspondem àquela conferida por agregados grandes, o que pôde ser constatado por observação visual da forma e deformação dos sulcos ocorrida nos testes, a semelhança do observado por Cantalice et al. (2005).

Alguns estudos relataram que a resistência ao fluxo (f e n) pode ser modelada em função do número de Reynolds (Re) como $f = a Re^{-b}$ (Foster et al., 1984; Qian et al., 2016), o que é apresentado na Tabela 3. As regressões entre f e Re e n e Re demonstraram que o número de Reynolds pode não ser um parâmetro hidráulico independente adequado para estimar n e f . Estes resultados se justificam pelos baixos valores de R^2 obtidos ($0,31$ para SNT e $0,47$ para ST) e são concordantes com observações de Peng et al. (2015) e Qian et al. (2016).

Quanto a velocidade de cisalhamento (U^*) ela foi significativamente menor em $57,1\%$ dos tratamentos nos SNT em relação ST (C , F_1 , F_2 e F_3). Nos demais tratamentos não houveram diferenças significativas, ou seja, num total de $42,8\%$ dos casos. Este resultado era esperado pela menor densidade das áreas NT em relação a T (Tabela 1), o que pode ter possibilitado uma menor resistência à ação cisalhante do fluxo.

Tabela 3. Modelagem dos coeficientes Darcy-Weisbach (f) e Manning (n) como função do número de Reynolds (Re).

Resistência ao fluxo	Função	a	b	R^2
f	$f = a Re^{-b}$	7,853	-0,389	0,31**
n	$n = a Re^{-b}$	0,362	-0,307	0,47**

a e b são coeficientes de regressão que são influenciados pelo regime do fluxo e gradiente de declive.

Verifica-se que embora a capacidade de transporte do escoamento (T_c) tenha apresentado diferenças significativas entre os eventos (tratamentos) para uma mesma condição do solo, o mesmo praticamente não ocorreu com as relações $[1-(G/T_c)]$ (Tabela 4). Isto era esperado, uma vez que, o fluxo de água adicionado não continha carga de sedimento (G). Com relação à G , não houve diferença significativa entre os eventos para a área T; para a área NT, houve diferença apenas entre C + F_1 e os demais tratamentos. A relação G/T_c , indica quanto da capacidade de transporte do fluxo está sendo ocupada com o transporte de sedimentos. Neste trabalho, verificou-se que a carga média de sedimentos transportados pelo fluxo foi sempre inferior à da sua capacidade de transporte, independentemente da condição avaliada para determinar T_c . Cumpre salientar que, os resultados de $[1-(G/T_c)]$ apresentados na Tabela 4 foram positivos e utilizados na determinação das taxas de desagregação em sulcos (D_r), Tabela 5.

Tabela 4. Valores de carga e capacidade de transporte de sedimentos, obtidas em Latossolo Vermelho eutroférrico em condições de consolidação/compactação, em locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Transporte de Sedimento	Condição	Chuva	C+F ₁	C+F ₂	C+F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
T_c	NT	0,680 cB	1,172 bA	1,606aA	1,905 aA	0,404 cA	0,473 cA	0,559 cB
	T	1,245 cdA	1,584 bcA	1,865 bA	2,078 aA	0,735 dA	0,880 dA	1,139 dA
G	NT	0,347 bA	0,681 aA	0,504 bA	0,381 bA	0,190 bA	0,214 bA	0,192 bA
	T	0,325 aA	0,413 aA	0,463 aA	0,456 aA	0,357 aA	0,388 aA	0,443 aA
$1-(G/T_c)$	NT	0,489 abA	0,444 bA	0,686 abA	0,795 aA	0,579 abA	0,576 abA	0,654 abA
	T	0,740 aA	0,745 aA	0,765 aA	0,786 aA	0,495 aA	0,531 aA	0,590 aA

G - Carga de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); T_c - capacidade de transporte de sedimento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e, maiúscula na coluna, para uma mesma variável, não diferem, significativamente, pelo teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade. Chuva (C) = 65 mm h⁻¹; Fluxo 1 (F₁) = 25 L min⁻¹; Fluxo 2 (F₂) = 52 L min⁻¹; Fluxo 3 (F₃) = 125 L min⁻¹.

A observação da Tabela 5 permite supor que os resultados obtidos para tensão cisalhante não diferiram significativamente entre SNT e trafegados ST, com exceção dos eventos C e F₃ para os quais as tensões em ST foram significativamente

maiores que em SNT. Mesmo assim, as taxas de desagregação foram semelhantes entre SNT e ST, para todos os eventos aplicados. Em função do exposto, com base na avaliação das dimensões da secção transversal dos sulcos (Tabela 2) e das taxas de desagregação obtidas com a chuva (C), chuva + fluxos adicionais (C + F_n) e apenas fluxos adicionais (F_n), estimou-se a erodibilidade em sulcos (K_r) para SNT de 0,0063 kg N⁻¹ s⁻¹ e ST de 0,0055 kg N⁻¹ s⁻¹ e, ainda, valores de tensão cisalhante crítica (τ_c) iguais a 2,984 Pa para SNT e igual a 4,218 Pa para ST (Figura 2).

Tabela 5. Tensão cisalhante média (τ) e taxa média de desagregação em sulcos (D_r), num Latossolo Vermelho eutroférico em condições de consolidação/compactação, para locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Variável	Condição	Chuva	C+F ₁	C+F ₂	C+F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
τ	NT	4,752 cB	7,029 bA	8,881 abA	9,835 aA	3,690 cA	4,103 cA	4,539 cB
	T	7,670 bA	8,926 abA	9,868 aA	10,571 aA	5,549 cA	6,124 bcA	7,205 bcA
D _r	NT	0,0094 bA	0,0184 bA	0,0421 aA	0,0474 aA	0,0049 dA	0,0070 bA	0,0096 bA
	T	0,0169 bcA	0,0254 abA	0,0325 aA	0,0345 aB	0,0091 cA	0,0105 cA	0,0172 bcA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e, maiúscula na coluna, para uma mesma variável, não diferem, significativamente, pelo teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade. Chuva (C) = 65 mm h⁻¹; Fluxo 1 (F₁) = 25 L min⁻¹; Fluxo 2 (F₂) = 52 L min⁻¹; Fluxo 3 (F₃) = 125 L min⁻¹.

As duas regressões lineares apresentadas na Figura 2 foram testadas quanto ao paralelismo e coincidência das retas. O teste de paralelismo demonstrou que os coeficientes angulares dos dois modelos são iguais estatisticamente ($p < 0,05$). Portanto, K_r para SNT e ST não diferem significativamente entre si. Logo, a compactação e/ou consolidação não alteraram a erodibilidade em sulcos do solo significativamente. Quanto a coincidência dos modelos, os coeficientes lineares são iguais estatisticamente ($p < 0,05$). Logo, não é possível afirmar que há diferença significativa entre τ_c nos SNT e ST.

Os resultados expressos na Figura 4 permitem supor que a erosão em sulcos iniciar-se-á primeiro, em condições semelhantes de fluxos, nos locais não-trafegados em face ao menor valor de τ_c . O valor de τ_c nos SC foi 1,4 vezes o valor de τ_c nos ST. Logo, é provável que as linhas de plantio de cana-de-açúcar (NT) sejam mais sensíveis à erosão em sulcos, quando comparadas com as entrelinhas da cultura

(T). Martins Filho (1994) e Martins Filho et al. (2001) já haviam constatado um aumento no valor da tensão cisalhante crítica para locais intensivamente trafegados, em comparação aos não-trafegados. Os valores de K_r iguais a $0,0063 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para SNT e $0,0055 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para ST e, os valores de τ_c iguais a 2,984 Pa e 4,218 Pa, nesta ordem, para áreas NT e T (Figura 4) são compatíveis com valores observados por Martins Filho (1994) num Latossolo Vermelho distroférico em Jaboticabal (SP). O citado autor determinou valores de τ_c igual a 4,42 Pa e de K_r igual a $0,00692 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, em solo compactado. Portanto, os efeitos avaliados da consolidação/compactação do solo nos seus atributos nas linhas (NT) e entrelinhas (T) da cultura de cana-de-açúcar não foram significativos para alterar K_r e τ_c .

Alguns autores como Braida e Cassol (1996) e Schäfer et al. (2001) determinaram, para Argissolos similares, valores de τ_c iguais a 4,810 Pa e 2,650 Pa, respectivamente. Já os valores de K_r foram iguais a $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Braida e Cassol, 1996) e $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Schäfer et al., 2001). É possível observar que os valores de K_r e τ_c são variáveis e, no Brasil, a maior parte das informações disponíveis é para solos do Rio Grande do Sul. Schäfer et al. (2001) e Cantalice et al. (2005) apontam que, tais informações, ainda são insuficientes para conclusões sobre a relação destes dois parâmetros de erosão do solo com as suas propriedades. Entretanto, o presente trabalho pode representar uma contribuição no sentido de relacionar erosão e compactação/consolidação do solo com K_r e τ_c , os quais representam a RSE (Knapen e Poesen, 2010).

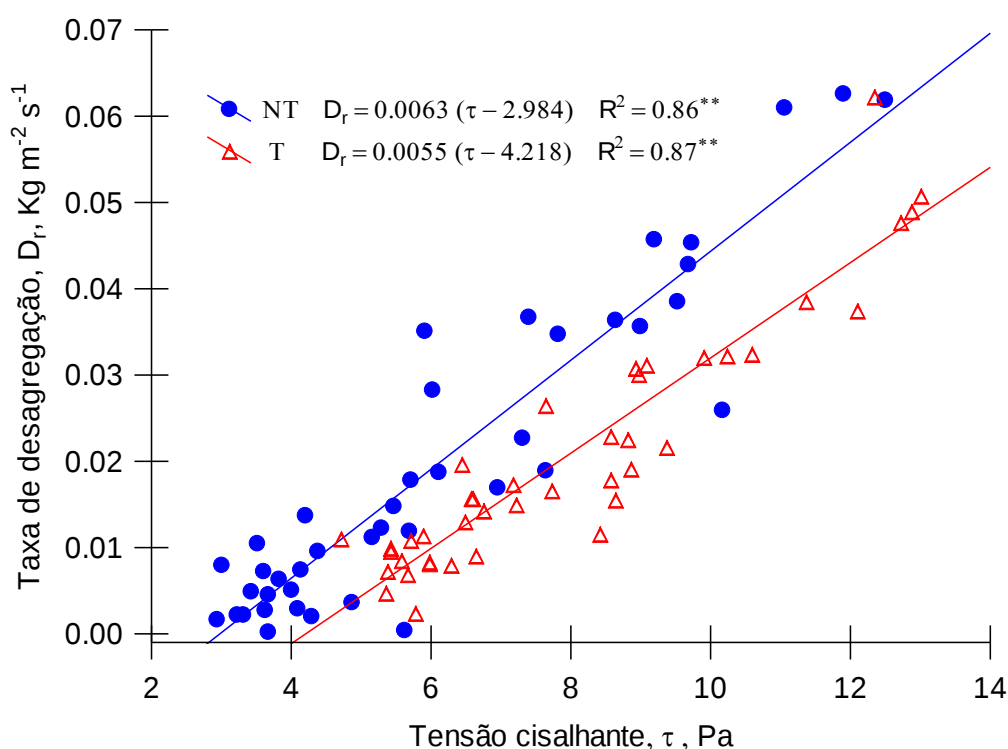


Figura 4. Taxa de desagregação em sulcos em função da tensão cisalhante aplicada nos sulcos para locais não-trafegados (NT) e trafegados (T).

Quanto às concentrações de nutrientes nos sedimentos erodidos por erosão em sulcos estas não diferiram significativamente entre sulcos NT e T (Tabela 6). É possível observar que a condição do solo (NT e T) não teve influência sobre o transporte de nutrientes por erosão em sulcos. Isto provavelmente ocorreu visto que os sulcos transportam os sedimentos em entressulcos que derivam para eles, bem como transportam os sedimentos gerados nos sulcos pelo fluxo concentrado de água como apontado por Foster (1982).

Embora não tenha havido diferenças significativas para as concentrações e taxas de enriquecimento (ER) médias de MO, P, K, Ca e Mg, os valores de ER foram maiores que 1,00 para NT e T (Tabela 6). Valores $ER > 1,00$ indicam para a degradação do solo nas áreas NT e T ocorreu com o processo de erosão implicando num empobrecimento. ER refere-se à relação entre a concentração de um nutriente no sedimento erodido e a sua correspondente concentração no solo original.

Tabela 6. Concentração média de nutrientes no solo original e no sedimento erodido, obtidas em Latossolo Vermelho eutroférico em condições de consolidação/compactação, em locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Solo/Sulco	Condição	MO	P	K	Ca	Mg
		%	meq / 100 cm ³			
Solo	Original	2,80	0,23	0,30	2,6	1,0
1	NT	3,08	0,79	0,32	3,69	1,23
2	NT	3,25	0,92	0,33	4,08	1,27
3	NT	3,39	0,83	0,37	3,94	1,10
4	NT	3,54	0,87	0,34	3,91	1,15
5	NT	3,25	0,92	0,33	4,08	1,27
6	NT	3,15	0,81	0,34	3,81	1,24
	Média	3,28 a	0,86 a	0,34 a	3,92 a	1,21 a
	ER	1,17 a	3,73 a	1,12 a	1,51 a	1,21 a
1	T	3,54	0,87	0,34	3,91	1,15
2	T	3,01	0,83	0,31	3,83	1,26
3	T	3,15	0,81	0,34	3,81	1,24
4	T	3,43	0,84	0,35	4,41	1,29
5	T	3,37	0,97	0,33	4,21	1,28
6	T	3,31	0,82	0,36	3,90	1,15
	Média	3,30 a	0,86 a	0,34 a	4,01 a	1,22 a
	ER	1,18 a	3,73 a	1,13 a	1,54 a	1,23 a

ER é a taxa de enriquecimento. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para uma mesma variável, não diferem, significativamente, pelo teste de Duncan, ao nível de 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

Os regimes de escoamentos nos sulcos de erosão caracterizaram-se como completamente turbulentos e supercríticos, regimes típicos de sulcos sob processo de erosão em sulcos, em condição de solo consolidado/compactado ou não, para locais não-trafegados (NT) e trafegados (T), em área com cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada.

Para o Latossolo Vermelho eutroférico do presente estudo, as taxas de desagregação do solo variaram linearmente com as tensões cisalhantes. Os valores de K_r e τ_c foram $0,0063 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $2,984 \text{ Pa}$ para local NT e, $0,0055 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $4,218 \text{ Pa}$ para local T, respectivamente.

A tensão cisalhante crítica (τ_c) é maior nos locais T, o que indica as áreas NT como os prováveis locais de início da erosão em sulcos em áreas com colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar. A erodibilidade em sulcos (K_r) não difere entre áreas NT e T.

Há degradação do solo nas áreas NT e T com o processo de erosão em sulcos implicando num empobrecimento do solo devido às perdas de nutrientes (MO, P, K, Ca e Mg).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberts EE, Nearing MA, Weltz MA, Risse LM, Pierson FB, Zhang XC, Laflen JM, Simanton JR (1995) Soil component. USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report 10.

Almeida de WS, Seitz S, de Oliveira LFC, & de Carvalho DF (2021) Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates. **International Soil and Water Conservation Research**, 9:69-75.

Alvarez JW et al. (1995) Erosão hídrica e perda de sedimentos, água e elementos químicos durante chuvas em duas bacias hidrográficas rurais. **Investig. Agrar.** San Lorenzo 16:113-123.

Alves MC, Suzuki LGA, Suzuki LEAS (2007) Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico em recuperação. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 31:617-625.

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.

Batey T (2009) Soil compaction and soil management—a review. **Soil use and management**, 25:335-345.

Bashagaluke JB, Logah V, Opoku A, Sarkodie-Addo J, Quansah C (2018) Soil nutriente loss through erosion: Impact of different cropping systems and soil amendments in Ghana. **PLoS ONE** 13: e0208250.

Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, Schlunegger F (2010) Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, 35:1456–1467.

Berhe AA, Barnes RT, Six J, Mar E (2018) Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: carbon, nitrogen, and phosphorus. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences** 46:521–548.

Bertol I, Cogo NP, Levien R (1997). Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21:409-418.

Bertol I, González, AP, Vázquez EV (2007) Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 42:103- 110.

Bertol I, Guadagnin JC, Cassol PC, AmaraL AJ, Barbosa FT (2004) Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:485-494.

Bertol I, Luciano RV, Bertol C, Bagio B (2017) Nutrient and organic carbon losses, enrichment rate, and cost of water erosion. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 41: e0160150.

Bertoni J, Lombardi Neto F (2017) Conservação do solo – São Paulo 10ª edição.

Borrelli P, Robinson DA, Panagos P, Lugato E, Yang JE, Alewell C, Wuepper D, Montanarella L, Ballabio C (2020) Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070) **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 117:21994-22001.

Bradford JM, Ferris JE, Remley PA (1987) Interrill soil erosion processes: I. effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment. **Soil Science Society of America Journal** 51:1566-1570.

Bradford JM, Foster GR (1996) Interrill soil erosion and slope steepness factors. **Soil Science Society of America Journal** 60:909-915.

Braida JA (1994) **Relações da erosão entressulcos, com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em solo podzólico vermelho-escuro**. 152f Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Braida JA, Cassol E (1996) Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 20:127-134.

Braida JÁ, Cassol, EA (1999) Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduos vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23: 711-721.

Brown LC, Norton LD (1994) Surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and formation. **Transactions of the ASAE** 37:1515–1524.

Brown LC, West LT, Beasley DB, Foster GR (1990) Rill erosion one year after incorporation of crop residue. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, 33:1531-1540.

Bryan RB (2000) Soil erodibility and processes of water erosion on hillslopes. **Geomorphology**, Amsterdam, 32:385-415.

Cantalice JRB (2002) **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo** 141f Tese (Doutorado em ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Cantalice JRB, Cassol EA, Reichert JM, Borges ALO (2005) Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:597-607.

Cardoso DP, Silva MLN, Carvalho GJde, Freitas DAFde, Avanzi JC (2012) Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16:632-638.

Carlson EJ, & Enger PF (1962), Studies of tractive forces of cohesive soils in earthcanals. US Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, USA, Report No. Hyd-504.

Cassol EA, Cantalice JRB, Reichert JM, Mondardo A (2004) Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39:685-690.

Cavichiolo SR (2005) **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de Pinus taeda**. 152f Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Cerquetany GE, Martins Filho MV (2006) Rotina computacional e equação simplificada para modelar o transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola** 26:617-626.

Chaplot VA & Le Bissonnais Y (2003) Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope. **Soil Science Society of America Journal**, 67:844-851.

Chen Y, Tarchitzky J, Brouwer J, Morin J, Banin J (1980) Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. **Soil Science** 130:49-55.

Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Tormena CA, Cerri CEP, Davies CA et al. (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, 267, 156–168.

Cochrane, BHW, Reichert, JM, Eltz FL., & Norton LD (2005) Controlling soil erosion and runoff with polyacrylamide and phosphogypsum on subtropical soil. **Transactions of the Asae**, 48:149-154.

Cortez LA, Marques Junior J, Peluco RG, Siqueira DS, Siansi FL, Barbosa RS, Furlani CEA, Camargo LA, Silva LS, & Gomes RP (2020) Subsoiling of an oxisol at fixed and varying depth in areas under sugarcane. **Precision Agriculture**, 21:1351-1365.

Dai C, Liu Y, Wang T, Li Z, Zhou Y (2018) Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in southern China. *Agricultural Water Management* 210:41–48. in-situ observation in the red soil region, Southern China. **Journal Hydrology**, 539:457–467.

Dangler EW, El-Swaify SA (1977) Erosion of selected Hawaii soils by simulated rainfall. **Soil Science Society of America Journal**, 40:769-773.

Darvishan AK, Banasik K, Hamidreza Sadeghi S, Gholami L, & Hejduk L (2015) Effects of rain intensity and initial soil moisture on hydrological responses in laboratory conditions. **International Agrophysics**, 29:165-173.

Denardin JE (1990) **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos** 113f Tese (Doutorado em Solos e Nutrição) - USP-Esalq, Piracicaba.

Deviren Saygin S, Huang CH, Flanagan DC, & Erpul G (2018) Process-based soil erodibility estimation for empirical water erosion models. **Journal of Hydraulic Research**, 56:181-195.

Di Stefano C, Ferro V, & Pampalone V (2016) Measuring field rill erodibility by a simplified method. **Land Degradation & Development**, 27:239-247.

Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V (2015) Modeling rill erosion at the sparacia experimental area. **Journal of Hydrologic Engineering**, 20:6.

Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, Sanzone F (2013) Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. **Catena**, 101: 226–234.

Ding W, & Huang C (2017) Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. **Geomorphology**, 295:801-810.

Dunkerley DL (2019) Rainfall intensity bursts and the erosion of soils: an analysis highlighting the need for high temporal resolution rainfall data for research under current and future climates. **Earth Surface Dynamics**, 7:345-360.

Dunn IS (1959) Tractive resistance of cohesive channels. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division** Volume 85, Issue SM3, Pages 1-24.

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

Embrapa - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (1979) Serviço Nacional de levantamento e conservação de solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, não paginado.

Fagundes EAA, Da Silva TJA, Bonfim-Silva EM (2014) Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 18:188-193.

Fang H, Sun L, & Tang Z (2015) Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. **Hydrological Processes**, 29:2649-2658.

FAO (2017) Soil Organic Carbon: the hidden potential. Roma: Organization of the United Nations.

Fattet M, Fu Y, Ghestem M, Ma W, Foulonneau M, Nespoulous J, Le BY, Stockes A (2011) Effect of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength. **Catena** 87:6069.

Flanagan DC, Livingston SJ (1995) USDA - Water erosion prediction project: WEEP user summary. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – **Agricultural Research Service** 11: 25-26.

Foster GR (1982) Modeling the erosion process. In: Haan CT, Johnson HP, Brakensiek DL. Hydrologic modeling of small watersheds. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 296-380. (ASAE. Monograph, 5)

Foster GR, Flanagan DC, Nearing MA, Lane LJ, Risse MM, Finkner SC (1995) Hillslope erosion component. In: Flanagan, D.C., Nearing, M.D. (Eds.), USDA–Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation, NSER Report 10. **National Soil Erosion Research Laboratory**, West Lafayette.

Foster GR, Huggins LF, Meyer LD (1984) A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng** 27:790-796.

Gebhardt S, Fleige H, & Horn R (2009) Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 172:688-695.

Gilley JE, Woolheiser DA, & McWhorter D (1985) Interrill Soil Erosion, Part I. Development of Model Equations. Biological Systems Engineering: Papers and Publications, 133.

Govers G, Giménez R, & Van Oost K (2007) Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. **Earth-Science Reviews**, 84:87-102.

Grant GE (1997) Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. **Water Resources Research** 33:349–358.

Guerra AJT, Jorge MdoCO (2017) Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. Oficina de Textos.

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.

Horn R, Domżzał H, Słowińska-Jurkiewicz A, & Van Ouwerkerk C (1995) Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, 35:23-36.

Hu L, & Flanagan DC (2013) Towards new-generation soil erosion modeling: Building a unified omnivorous model. **J. Soil Water Conserv** 68:100-103.

Julian JP, Torres R (2006) Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. **Geomorphology**, 76:193-206.

Jiang Y, Zheng F, Wen L, & Shen HO (2019) Effects of sheet and rill erosion on soil aggregates and organic carbon losses for a Mollisol hillslope under rainfall simulation. **Journal of Soils and Sediments**, 19:467-477.

Jourgholami M, Labelle ER, & Feghhi J (2019) Efficacy of leaf litter mulch to mitigate runoff and sediment yield following mechanized operations in the Hyrcanian mixed forests. **Journal of Soils and Sediments**, 19:2076– 2088.

Julien PY (1995) Erosion and sedimentation. Milbourne: Cambridge University Press, 280p.

Kimiaghalam N, Clark SP, Ahmari H (2016) An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soil on critical shear stress and erosion rate. **International Journal of Sediment Research** 31:1–15.

Kinnell P.I.A. (2020) The influence of time and other factors on soil loss produced by rain-impacted flow under artificial rainfall. **Journal of Hydrology**, 125004.

Kinnell P.I.A., Cummings D (1993) Soil/slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers** 36:381-387.

Klein VA, Libardi PL (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência Solo** 26:857-867.

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

Knapen A, Poesen J, Debaets S (2007) Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for loess-derived soil under two contrasting tillage practices. **Soil and Tillage Research** 94:425-440.

Knapen A, Poesen J, Govers G, & De Baets S (2008) The effect of conservation tillage on runoff erosivity and soil erodibility during concentrated flow. **Hydrological Processes**, 22:1497-1508.

Kumar H, Ganesan SP, Bordoloi S, Sreedeeep S, Lin P, Mei G, Garg A, & Sarmah AK (2019) Erodibility assessment of compacted biochar amended soil for geo-environmental applications. **Science of the Total Environment**, 672:698-707.

Laflen JM, Elliot WJ, Simanton JR, Holzhey CS, & Kohl KD (1991) WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, 46:39-44.

Laflen JM, Thomas AW, Welch R (1987) Cropland experiments for the WEPP project. Saint Joseph: ASAE 14p.

Laflen JM, Lane LJ, Foster GR (1991) WEPP: a new generation of erosion prediction technology J. **Soil Water Conserv**, 46:34-38.

Lal R, Elliot W (1994) Erodibility and erosivity In: Lal R. Soil erosion research methods, 2nd edn, Ankeny, SWCS, 181-208.

Lane LJ, Nearing MA (1989) *USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation*. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – **Agricultural Research Service** pS1-B1. (NSREL. Report, 2).

Lei TW, Zhang Q, Yan LJ, Zhao J, Pan YH (2008) A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of na eroding rill. **Geoderma**, Amsterdam,144:628-633.

Li J, Cai Q, Liying et al., (2010) Reviewing on factors and threshold conditions of rill erosion. **Progress in Geography** 29:1319–1325.

Li L, Nearing MA, Polyakov VO, Nichols MH, Pierson FB, & Cavanaugh ML (2020) Evolution of rock cover, surface roughness, and its effect on soil erosion under simulated rainfall. **Geoderma**, 379:114622.

Li M, Hai X, Hong H, Shao Y, Peng D, Xu W, Yang Y, Zheng Y, & Xia Z (2019) Modelling soil detachment by overland flow for the soil in the Tibet plateau of China. **Scientific reports**, 9:1-9.

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.

Li ZW, Zhang GH, Geng R, H. Wang H, Zhang XC (2015) Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China **Catena**, 124:9-17.

Lima CLRD, Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki LEAS, Dalbianco L (2007). Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural** 37:1166-1169.

Lima JM, Curi N, Resende M, Santana DP (1990) Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta do material da erodibilidade de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 14:85-90.

Lima RPde, León MJfde, Silva Arda (2013) Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres** 60:16-20.

Liu H, Li Q, Meng Y, Han Y, Chen J, & Qiu L (2019) Effects of Rainfall Intensity on Runoff and Sediment Yield in Black Soil Slope. **International Conference on Unmanned Systems and Artificial Intelligence (ICUSAI)** 227-231.

Liu X, Zhang Y, & Li P (2020) Spatial Variation Characteristics of Soil Erodibility in the Yingwugou Watershed of the Middle Dan River, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17:3568.

Liyong S, Haiyan F, Deli Q, Junlan L, Qiangguo C (2013) A review on rill erosion process and its influencing factors. **Chinese Geographical Science** 23:389–402.

Luo J, Zheng Z, Li T, & He S (2018) Changes in micro-relief during different water erosive stages of purple soil under simulated rainfall. **Scientific reports**, 8:1-10.

Luo J, Zheng Z, Li T, & He S (2018a) Assessing the impacts of microtopography on soil erosion under simulated rainfall, using a multifractal approach. **Hydrological Processes**, 32:2543-2556.

King KW, Flanagan DC, Norton LD, Laflen JM (1995) Rill Erodibility parameters influenced by long-term management practices published by the **American Society of agricultural and biological engineers**, st. Joseph, Michigan transactions of the ASAE. 38:159-164.

Ma Q, Zhang K, Cao Z, Wei M, Ynag Z (2020) Soil detachment by overland flow on steep cropland in the subtropical region of China. **Hydrological Processes**, 34:1810-1820.

Martins Filho MV (1994) **Erodibilidade inter e intra-sulcos dum Latossolo Vermelho-escuro textura argilosa da região de Jaboticabal - SP** 143f Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

Martins Filho MV, Pereira VP, Marques Júnior J (2001) Efeitos da densidade do solo na erosão de um Latossolo Vermelho devido ao tráfego. **Engenharia Agrícola** 21:23-31.

McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, & Meyer LD (1989) Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. **Trans. ASAE** 32 1571– 157.

Meyer LD, Harmon WC (1989) How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers** 32:639-644.

Miller WP (1987) Infiltration and soil loss of three gypsum-amended Ultisols under simulated rainfall. **Soil Science Society of America Journal** 51:1314-1320.

Mirzaee S, & Ghorbani-Dashtaki S (2018) Deriving and evaluating hydraulics and detachment models of rill erosion for some calcareous soils. **Catena**, 164:107-115.

Moore DC, & Singler MJ (1990) Crust formation effects on soil erosion processes. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, 54:1117-1123.

Morais LFB, Cogo NP (2001) Comprimentos críticos de rampa para diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um Argissolo Vermelho da Depressão Central (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25: 1041-1051.

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** 23:27–544.

Mouzai L, & Bouhade M (2019) On the Fixed Rainfall Intensity: Effects on Overland Flow Resistance, Shear Velocity and on Soil Erosion. **International Journal of Environmental and Ecological Engineering**, 13:475-481.

Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC (1989) A process-based soil erosion model for USDA-Water erosion prediction project technology. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineer** 32:1587-1593.

Nearing MA, West LT, Bradford JM (1988a) Consolidation of an unsaturated illitic clay soil. **Soil Science Society of America Journal** 52:929-933.

Nearing MA, West LT, Brown LC (1988b) A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 31:696-700.

Nearing MA, Simanton JR, Norton LD, Bulygin SJ, & Stone J (1999) Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. **Earth Surface Processes and Landforms**, 24:677-686.

Niu Y, Gao Z, Li Y, Lou Y, Zhang S, Zhang L, Du J, Zang X, & Luo K (2020) Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment. **Soil and Tillage Research**, 202:104655.

Oliveira JGRde, Rolisch R, Guimaraes MdeF, Barbosa GMdeC, Filho JT (2012) Erosão no plantio direto: perda de solo, água e nutrientes. **Bol. Geogr.** 30:91-98.

Oliveira LCde, Bertol I, Barbosa FT, Campos ML, Mecabô Junior J (2015) Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma estrada florestal na Serra Catarinense. **Ciência Florestal** 25:655-665.

Oliveira PR, Centurion JF, Centurion MAPC, Franco HBJ, Pereira FS, Bárbaro Júnior LS, Rossetti KV (2012) Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 36:587-597.

Organização Das Nações Unidas Para A Alimentação E A Agricultura (FAO). (2019) Diretrizes Voluntárias para a Gestão Sustentável dos Solos. Roma.

Owen MW (1975) Erosion of Avonmouth mud. Report No. INT 150, Hydraulic Research Station, Wallingford, UK.

Panachuki E, Bertol I, Alves Sobrinho T, Vitorino ACT, Souza CMA, Urchel MA (2010) Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 34:443-441.

Parhizkar M, Shabanpour M, Zema DA, Lucas-Borja ME (2020) Rill Erosion and Soil Quality in Forest and Deforested Ecosystems with Different Morphological Characteristics. **Resources**, 9:129.

Parker DB, Michel TG, & Smith JL (1995) Compaction and water velocity effects on soil erosion in shallow flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 121:170-178.

Peng W, Zhang Z, Zhang K (2006) Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrol Process.* 2015;29:3677–3686. Produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 28:533-542.

Peng W, Zhang Z, Zhang K (2015) Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. **Hydrol Process**, 29:3677–3686.

Pintaldi E, Hudek C, Stanchi S, Spiegelberger T, Rivella E, Freppaz M (2017) Sustainable Soil Management in Ski Areas: Threats and Challenges. **Sustainability**, 9:2150.

Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C (2003) Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. **Catena** 50:91-133.

Prats SA, Malvar MC, Coelho COA, & Wagenbrenner JW (2019) Hydrologic and erosion responses to compaction and added surface cover in post-fire logged areas: Isolating splash, interrill and rill erosion. **Journal of Hydrology**, 575:408-419.

Pruski FF, Rodrigues LN, Silva DDda (2001) Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 5:301-307.

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. **J Hydrol Hydromechanics** 64:237–245.

Raij BV, Quaggio JÁ, Cantarella H, Ferreira ME, Lopes AS, Bataglia OC (1987) Análise química do solo para fins de fertilidade. **Campinas Fundação Cargill**, 1987-170.

Ramos JC, Bertol I, Barbosa FT, Marioti J, Werner RdeS (2014) Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um Cambissolo Húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:1587-1600.

Reichert JM, Norton LD (2013) Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. **Soil Res** 51:1–9.

Reichert JM, Schäfer MJ, Cassol EA, & Norton LD (2001) Interrill and rill erosion on a tropical sandy loam soil affected by tillage and consolidation. **Sustaining the Global Farm**, 601-605.

Renard KG, Foster GR, Weessies GA, McCool DK (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) In: Yoder DC, editor US Department of Agriculture, Agriculture Handbook 703.

Resende SA, Dias Junior MS, Leite FP (2011) Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, 35:547-554.

Robichaud PR, Wagenbrenner JW, & Brown RE (2010) Rill erosion in natural and disturbed forests: 1. Measurements. **Water Resources Research**, 46:10.

Rockwell DL (2011) Headcut erosive regimes influenced by groundwater on disturbed agricultural soils. **J. Environ. Manage** 92:290-299.

Sá MAC, Santos Junior JDG, Franz CAB, Rein TA (2016) Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51:1610-1622.

Saggau P, Kuhwald M, & Duttman R (2019) Integrating soil compaction impacts of tramlines into soil erosion modelling: a field-scale approach. **Soil Syste**

Schäfer MJ, Reichert JM, Cassol EA, Eltz FLF, Reinertm DJ (2001) Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:419-430.

Santos HG, et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

Schick J (1999) **Erosão hídrica em cambissolo húmico álico submetido a diferentes sistemas de manejo e cultivo do solo**.114p (Tese de Mestrado) Lages, Centro de Ciências Agroveterinárias- Universidade para o Desenvolvimento do Estado de Santa Catarina.

Schick J, Bertol I, Batistela O, Balbinot Junior AA (2000) Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:427-436.

Seitz S, Goebes P, Puerta VL, Pereira EIP, Wittwer R, Six J, van der Heijden MGA, & Scholten T (2019) Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. **Agronomy for Sustainable Development**, 39:1-10.

Severiano EC, Oliveira GC, Dias Junior MS, Castro MB, Oliveira LFC, Costa KAP (2010) Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola** 30:414-423.

Shen H, Zheng F, Wen L, Han Y, & Hu W (2016) Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. **Soil and Tillage Research**, 155:429-436.

Shen HO, Zheng FL, Wang L, & Wen LL (2019) Effects of rainfall intensity and topography on rill development and rill characteristics on loessial hillslopes in China. **Journal of Mountain Science**, 16:2299-2307.

Shen N, Wang Z, Wang S (2016) Flume experiment to verify WEPP rill erosion equation performances using loess material. J Soils Sediments. **Journal of Soils and Sediments** 16:2275–2285.

Sheridan GJ, So HB, Loch RJ, Walker CM (2000) Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. **Australian Journal of Soil Research**, 38:129-136.

Shi ZH, Yue BJ, Wang L, Fang NF, Wang D (2012) Effects of mulch over rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 77:257–267.

Silva EA, Gomes JBV, Araújo Filho JC, Vidal-Torrado P, Cooper M, Curi N (2012) Morphology, mineralogy and micromorphology of soils associated to summit depressions of the Northeastern Brazilian coastal plains. **Ciência e Agrotecnologia** 36:507-517.

Silva SR, Barros NF, Costa LM (2006) Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 10:842-847.

Simons DB, Senturk F (1992) Sediment transport technology: water and sediment dynamics. Denver: Water Resources Publications 897p.

Singh HV, & Thompson AM (2016) Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds. **Geoderma**, 262:165-173.

Smerdo ET, Beasley RP (1961) Critical tractive forces in cohesive soils. **Agric. Eng.** 42:26–29.

Smith DD, Wischmeier WH (1957) Factors affecting sheet and rill erosion. **Transactions - American Geophysical Union** 38:889–896.

Spera ST, Santos HP, Fontanell RS, Tomm GO (2006) Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 28:533-542.

STATSOFT. Statistica: Quick reference. Tulsa: StatSoft, 1994. 148 p.

Sun L, Fang H, Qi D, Li J, Cai Q (2013) A review on rill erosion process and its influencing factors. **Chinese Geographical Science**, Yangling, 23:389-402.

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

Ta N, Zhang C, Ding H & Zhang Q (2020) Effect of tillage, slope, and rainfall on soil surface microtopography quantified by geostatistical and fractal indices during sheet erosion. **Open Geosciences**, 12:232-241.

Tang ZJ, Lei TW, Zhang QW, Zhao J (2004) A method for determining critical shear stress of soil in eroding rill with REE tracers. **Acta Pedologia Sinica**, Taiwan, 41: 28-34.

Telak LJ, Dugan I, & Bogunovic I (2021) Soil Management and Slope Impacts on Soil Properties, Hydrological Response, and Erosion in Hazelnut Orchard. **Soil Systems**, 5, 5.

Thomaz EL (2013) Rill erosion on an oxisol influenced by a thin compacted layer. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 37:1383-1392.

Thomazini A, Azevedo HC, Azevedo H, Mendonça EdeS (2012) Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas conservacionistas e convencionais de café no sul do estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agroecologia** 7:150-159.

Thorn MFC, & Parsons JG (1980) Erosion of cohesive sediments in estuaries: an engineering guide. **Proc. of the Int. Symp. on Dredging Technol**, 349-358.

Tian P, Xu X, Pan C, Hsu K, & Yang T (2017) Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes. **Journal of Hydrology**, 548:24-39.

Vaezi AR, & Vatani A (2015) Determining rill erodibility in some soils in Zanjan province under simulated rainfall. **Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources**, 19:59-68.

Vahabi J, & Nikkami D (2008) Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. **International Journal of Sediment Research**, 23:376-386.

Vermang J, Norton LD, Huang C, Cornelis WM, Da Silva AM, & Gabriels D (2015) Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall. **Soil Science Society of America Journal**, 79:903-916.

Wang B, Steiner J, Zheng F, & Gowda P (2017) Impact of rainfall pattern on interrill erosion process. **Earth Surface Processes and Landforms**, 42:1833-1846.

Wang B, Zhang GH, Yang YF, Li FF, Liu JX (2018) Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. **Agric. Ecosyst. Environ.** 266:68–75

Wang C, Wang B, Wang Y, Wang Y, Zhang W (2020) Improved interrill erosion prediction by considering the impact of the near-surface hydraulic gradient. **Soil Tillage Res.** 203:104687.

Wang JG, Feng SY, Ni SM, Wen H, Cai CF, Guo ZL (2019) Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of southeast China. **Catena** 183:104235.

Wang K, Wang YJ, Wang B, Zhang SH, Wang YQ (2018). Study on soil detachment rate on a yellow-soil hillslope. **Resource and Environment in the Yangtze Basin** 27:2114–2121.

Wang L, Shi ZH, Wang J, Fang NF, Wu GL, Zhang HY (2014) Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. **J Hydrol** 512:168–176

West LT, Miller WP, Bruce RR, Langdale GW, Laflen JM, Thomas AW (1992) Cropping system and conservation effects on rill erosion in the Georgia Piedmont. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 58:1238-1243.

Wilson GV, Zhang T, Wells RR, & Liu B (2020) Consolidation effects on relationships among soil erosion properties and soil physical quality indicators. **Soil and Tillage Research**, 198:104550.

Wirtz S, Seeger M, Zell A, Wagner C, Wagner JF, Ries JB (2013) Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills. **PLoS One** 8: e64861.

Xiao H, Li Z, Chang X, Huang J, Nie X, Liu C, Liu L, Wang D, Dong Y, Jiang J (2017) Soil erosion-related dynamics of soil bacterial communities and microbial respiration. **Applied Soil Ecology** 119:205-213.

Xin Y, Xie Y, Liu Y, Liu H, Ren X (2016) Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments. **Journal of Hydrology**, 543:651–658.

Xiong M, Sun R, Chen L (2018) Effects of Soil Conservation Techniques on Water Erosion Control: A Global Analysis. **Science of the Total Environment Science** 645: 753-760.

Xu X, Tan Y, Yang G (2013) Environmental impact assessments of the three gorges project in China: issues and interventions. **Earth. Rev** 124:115–125.

Yan Xin, Yun Xie, Yuxin Liu, Hongyuan Liu, Xiaoyu Ren (2016) Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments. **Journal of Hydrology**, 543:651-658.

Yao C, Lei T, Elliot WJ, MCCool DK, Zhao J, Chen S (2008) Critical conditions for rill initiation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, 5:107-114.

Zaho J (2000) Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamics strength of brittle rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Amsterdam, 37:1115-1121.

Zambon N, Johannsen LL, Strauss P, Dostal T, Zümmer D, Neumann M, Cochrane TA, & Klik A (2020) Rainfall Parameters Affecting Splash Erosion under Natural Conditions. **Applied Sciences**, 10:4103.

Zhang GH, Liu GB, Tang KM, Zhang XC (2008) Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China. **Transactions American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, 51:883-890.

Zhang Q, Zhao L, Wang J, & Wu FQ (2014) Spatiotemporal variability and simulation of tilled loess microtopography in water erosion. **Journal of Soil and Water Conservation**, 69:343–351.

Zhang S, Grip H, & Lövdahl L (2006) Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. **Soil and Tillage Research**, 90:117-125.

Zhang XC, Nearing MA, Miller WP, Norton LD, West LT (1998) Modeling interrill sediment delivery. **Soil Science Society of America Proceedings** 62:438-444.

Zhang XC, Zheng FL, Chen J, Garbrecht JD (2020) **Characterizing detachment and transport processes of interrill soil erosion Geoderma**, 376:114549.

Zhao B, Zhang L, Xia Z, Xu W, Xia L, Liang Y, & Xia D (2019) Effects of rainfall intensity and vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope. **Advances in Civil Engineering**, 2019:14.

Zhao L, Hou R, & Wu F (2018) Effect of tillage on soil erosion before and after rill development. **Land Degradation & Development**, 29:2506-2513.

Ziadat FM, & Taimah AY (2013) Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. **Land Degradation & Development**, 24:582-590.