UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

GEAN CARLOS PEREIRA DE LUCENA

HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO CONCENTRADO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EM SULCOS DE EROSÃO SOB USO AGRÍCOLA

RECIFE - PERNAMBUCO DEZEMBRO/2024

GEAN CARLOS PEREIRA DE LUCENA

HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO CONCENTRADO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EM SULCOS DE EROSÃO SOB USO AGRÍCOLA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister/Doctor Scientiae*.

Orientador: *Post. Doctorate* Jose Ramon Barros Cantalice Coorientador: Dr. Vicente de Paulo Silva

RECIFE - PERNAMBUCO DEZEMBRO/2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

٦

Г

L935h	Lucena, Gean Carlos Pereira de. Hidráulica do escoamento concentrado e parâmetros de resistência em sulcos de erosão sob uso agrícola / Gean Carlos Pereira de Lucena. – Recife, 2024. 42 f.; il.
	Orientador(a): José Ramon Barros Cantalice. Co-orientador(a): Vicente de Paulo Silva.
	Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR- PE, 2025.
	1. Solos - Erosão. 2. Hidráulica agrícola. 4. Canais (Engenharia hidráulica) 5. Solo rural - Uso. I. Cantalice, José Ramon Barros, orient. II. Silva, Vicente de Paulo, coorient. III. Título
	CDD 620.8

GEAN CARLOS PEREIRA DE LUCENA

HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO CONCENTRADO E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA EM SULCOS DE EROSÃO SOB USO AGRÍCOLA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de dezembro de 2024.

Dr. José Ramon Barros Cantalice Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Sandro Augusto Bezerra Membro Externo – IFPE Campus Vitória de Sto. Antão

> Dr. Victor Casimiro Piscoya Membro Interno – DTR/UFRPE

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho e por me abençoar sempre.

Agradeço aos meus pais, minha avó, irmãos e sobrinhos pelo amor, apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida.

Ao professor José Ramon Barros Cantalice, expresso minha sincera gratidão pelo apoio e orientação segura e paciente durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores do PPEAMB, em especial, Vicente de Paulo e Victor Piscoya, agradeço pelos ensinamentos, ajuda no experimento e pela amizade construída ao longo do curso.

À Walkiria Brito, secretária do PPG, pelo acolhimento, eficiência e cordialidade durante todo o mestrado.

Aos amigos e colegas, que tornaram a jornada mais leve e prazerosa, em especial a Maria Eduarda, Fabrynne Mendes, Wesley Belo, Mateus Normande, José Luiz e Isaac Teles.

Carlos André, Wilson Aragão, Márcio Faustino, João Gabriel e Marcondes foram pessoas mais que especiais, e que por vários momentos serviram como irmãos para mim, deixo aqui, como forma de registro, minha gratidão pelos momentos de apoio e companheirismo.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 para realização do trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Rural do Pernambuco, à FACEPE pelo financiamento da bolsa, a EECAC- UFRPE e ao Laboratório de Manejo e Conservação do solo pela infraestrutura para a realização deste estudo.

"Tal como uma montanha que se eleva a cada tempestade, a mente humana se fortalece a cada desafio".

(Autor desconhecido)

RESUMO

LUCENA, Gean Carlos Pereira, M.Sc./D.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, Dezembro de 2024. **Hidráulica do escoamento concentrado e parâmetros de resistência em sulcos de erosão sob uso agrícola**. Orientador: *Post. Doctorate* José Ramon Barros Cantalice. Coorientador: Dr. Vicente de Paulo Silva.

Compreender os processos físicos da erosão do solo é essencial para minimizar sua ocorrência, assim a resistência do solo nos sulcos de erosão tem sido amplamente reconhecido como uma preocupação ambiental resultante de atividades antrópicas inadequadas, que podem afetar adversamente a saúde do solo. Dessa forma, foram pré-formados sulcos de erosão em um Argissolo sobre uso com a cana-de-açúcar nos quais foram ensaiadas escoamentos concentrados em níveis crescentes de 20, 40, 60 e 75 L.min⁻¹ com o objetivo de avaliar as variáveis hidráulicas que se desenvolvem no escoamento concentrado nos sulcos de erosão, e de determinar a tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) e a erodibilidade do solo em sulcos (K_r) destes sulcos. Os fluxos aplicados nos sulcos resultaram em um escoamento turbulento subcrítico, sendo essa condição hidrodinâmica característica dos sulcos de erosão. Os significativos raios hidráulicos que se desenvolveram pela aplicação dos fluxos crescentes e tensões de cisalhamento resultantes foram responsáveis pelas taxas de desagregação nos sulcos, possibilitando a determinação dos parâmetros de resistência para o Argissolo estudado de 8,75 Pa para tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}), e 0,0007 kg m⁻² s⁻¹ para erodibilidade em sulcos (K_r).

Palavras-chave: Erodibilidade em sulcos, Tensão Crítica de cisalhamento, hidráulica de canais, uso agricola.

ABSTRACT

LUCENA, Gean Carlos Pereira, M.Sc./D.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, December, 2024. Concentrated flow hydraulics and resistance parameters from rill erosion under agricultural use. Adviser: *Post. Doctorate* José Ramon Barros Cantalice. Co-advisers: Dr. Vicente de Paulo Silva.

The physical processes of soil erosion understanding are essential to control its occurrence. Therefore, rill erosion has been recognized as an environmental issue due to anthropic use that can decrease soil health. Therefore, were pre-formed rills erosion in an Ultisol under Sugar Cane use, in which increasing flow levels from 20, 40, 60, and 75 L.min⁻¹, objecting to the flow hydraulics and the resistance parameters of critical shear stress (τ_{cr}) and rill erodibility (K_r). The applied flow produced turbulent and subcritical flows featuring a hydrodynamic condition common in rill erosion. The increasing flow levels applied generated increasing radius hydraulics and shear stresses responsible for detachment rates in rills to 8.75 Pa of critical shear stress (τ_{cr}) and 0.0007 kg m⁻² s⁻¹ for rill erodibility (K_r) from this Ultisol.

Keywords: rill erodibility, critical shear stress, hydraulic channels, agricultural use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da Estação Experimental da UFRPE em Carpina — PE.

Figura 2 – Medição do sulco com perfilômetro

Tabela 1 - variáveis hidráulicas do escoamento concentrado nos sulcos de erosão

Figura 3. Relação entre a velocidade media do fluxo do escoamento concentrado nos sulcos de erosão e e rugosidade hidráulica calculada nos mesmos.

Figura 4 – Relação entre as velocidades médias e as vazões de resposta obtidas nos sulcos preformados sob Argissolo.

Figura 5 – Relação exponencial entre a área e o raio hidráulico obtidos dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados sobre o Argissolo.

Tabela 2 – Parâmetros de resistência do solo ao comportamento hidráulico dos canais.

Figura 6 – Relação exponencial entre a taxa de desagregação de solo e as tensoes de cisalhamento obtidas dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados sobre o Argissolo.

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>g</i>	Aceleração da gravidade (m.s ⁻²)
h	Altura da lâmina de escoamento (m)
Α	Área do sulco (m²)
f	Coeficiente de Darcy (Adm)
L	Comprimento do sulco (m)
С	Concentração (Kg. L ⁻¹)
S	Declividade (m)
α	Fator de correção (Adm)
t	Intervalo de tempo (s)
Fr	Número de Froude (Adm)
Re	Número de Reynolds (Adm)
PS	Perda de solo (Kg.m ⁻²)
Pm	Perímetro molhado (m)
Y	Peso específico da água (N.m ⁻³)
Rh	Raio hidráulico (m)
Dc	Taxa de desagregação em sulcos (Kg.m ⁻² s ⁻¹)
Dr	Taxa de desagregação pelo escoamento concentrado (Kg.m ⁻² s ⁻¹)
Kr	Taxa momentânea de desagregação (Kg.N ⁻¹ s ⁻¹)
τ _c	Tensão de cisalhamento (Pa)
τ _{cr}	Tensão crítica de cisalhamento (Pa)
Q	Vazão (m ³ /L)
Vm	Velocidade média (m.s ⁻¹)
Vs	Velocidade superficial (m.s ⁻¹)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃ	013				
2. OBJETIVOS.					
2.1. Objetivo	geral				
2.1. Objetivos	específicos				
3. REVISÃO DE	LITERATURA				
3.1. Erosão	em solos agrícolas16				
3.3. Erosão	em sulcos17				
3.3. Erodib	lidade (K _r) e tensão crítica de cisalhamento (τ_c)18				
3.4. Veloci	lades de fluxo				
4. MATERIAL E MÉTODOS					
4.1. Área de	e estudo				
4.2. Determ erosão 21	inação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento nos canais e/ou				
4.3. Análise	estatística do experimento em sulcos pré-formado26				
5. RESULTADO	5. RESULTADOS E DISCUSSÃO				
5.1. Vari	áveis hidráulicas do escoamento concentrado nos sulcos de erosão27				
5.2. Parâme critica de cisa	tros de resistências do solo em sulcos: erodibilidade do solo (K _r) e tensão hamento (τ <i>cr</i>)31				
CONCLUSÕES					
REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.				

1. INTRODUÇÃO

A erosão representa uma ameaça global, levando à degradação das terras, à perda de biodiversidade e à diminuição da capacidade de produção dos ecossistemas, com consequências diretas para a segurança alimentar e o desenvolvimento socioeconômico (Meliho *et al.*,2019).

Modelos de erosão de base física aplicados a solos agrícolas dependem dos conceitos sulcos e entressulcos, os quais requerem diferentes relações e algoritmos para cada componente. A erosão em sulcos ocorre devido a desagregação e transporte das partículas do solo e dos agregados pelo escoamento concentrado, assim, a erosão em sulcos é um fenômeno complexo afetado por vários fatores, como contribuição do fluxo lateral (entressulcos), taxa de fluxo concentrado e elementos físicos no caminho do fluxo concentrado (Cantalice *et al.*, 2005).

A erodibilidade do solo em sulcos (canais de menor dimensão) é tida como um parâmetro chave para susceptibilidade do solo a erosão hídrica e essencial para predição das perdas de solo e para avaliação dos efeitos ambientais. A erodibilidade em sulcos (Kr) pode ser obtida a partir de parcelas experimentais, ou ainda de relações que incluam textura, coesão, resistência ao cisalhamento, conteúdo de argila e estabilidade dos agregados (Xiao *et al.*, 2017).

Nguyen *et al.*, (2017) colocam que o coeficiente de erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento são parâmetros típicos para avaliar as taxas de erosão e dependem do tipo de solo, mineralogia, percentagem de argila, composição iônica da água no espaço poroso, conteúdo de umidade e estrutura. As taxas de erosão de um solo sob o escoamento concentrado aumentam e a tensão crítica decisalhamento diminuem com o aumento do conteúdo de água.

O estudo de resistência do solo a erosão hídrica tem sido amplamente reconhecido como uma preocupação ambiental resultante de atividades antrópicas inadequadas, que podem afetar adversamente a saúde do solo, a produção e a qualidade da água, intensificando seriamente a degradação da terra, o que ameaça o desenvolvimento sustentável da agricultura e a estabilidade social (Shainberg *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 2021; Montanarella *et al.*, 2016). Dessa forma, fica claro a pertinência da pesquisa sobre a resistência de canais e/ou solo para um melhor embasamento no dimensionamento de canais e obras hidráulicas de conservaçãodo solo. Compreender os fenômenos físicos da erosão do solo é essencial para minimizar sua ocorrência, mitigar seus impactos e adotar práticas sustentáveis, no entanto, entender o processo de erosão é desafiador devido à alta variabilidade dos seus fatores. Diversos trabalhos, incluindo resultados de pesquisas e desenvolvimento de modelos, têm correlacionado as características das precipitações no sentido de entender, prever e apresentar soluções ao problema erosivo.

No entanto, entender e dominar as condições hidráulicas, como também compreender o mecanismo de desagregação em canais/ sulco é, portanto, um procedimento crucial para desenvolver modelos de erosão com base física para mitigar a erosão hídrica, para assim determinar a eficiência do manejo da terra ou das medidas de conservação do solo, tendo em vista a importância de se obter conhecimentos adicionais sobre a erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento, bem como a hidráulica do escoamento do solo em diferentes condições.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Conhecer a hidráulica do escoamento concentrado em canais, bem como determinar os parâmetros de resistência de erodibilidade do solo em canais/sulcos e, a tensão crítica de cisalhamento de um solo sob uso agrícola ou de canais de terra para uso agrícola.

2.1. Objetivos específicos

• Avaliar as variáveis hidráulicas que se desenvolvem no escoamento concentrado nesses canais e/ou sulcos de erosão;

Determinar os seguintes parâmetros de resistência: a tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr})
 e a erodibilidade (K_r) do solo em canais sob uso agrícola ou dos sulcos de erosão;

• Identificar as velocidades críticas suportadas pelos canais na forma de sulcos de erosão, por meio de análises de regressão entre as variáveis hidráulicas e os parâmetros de resistência, durante os eventos de erosão desses canais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Erosão em solos agrícolas

O escoamento superficial pode ser definido como sendo o fluxo de água sobre a superfície do solo (Lima *et al.*, 2014). Segundo Griebeler *et al.*, (2001), se inicia quando a intensidade de precipitação supera a taxa de infiltração da água no solo, após supridas as abstrações hidrológicas como a interceptação vegetal, detenção e retenção superficial, demanda matricial do solo e evaporação, causando erosão e perdas de solo.

A perda de solo em diferentes sistemas de cultivo é influenciada por uma complexa interação de fatores, incluindo práticas de manejo e atributos intrínsecos dos solos, os quais variam significativamente entre diferentes regiões geográficas (Myers & Wagger, 1996; Basic *et al.*, 2001). A configuração do sentido dos cultivos em diferentes práticas de preparo têm diferentes efeitos sobre a erosão do solo, por exemplo, em um sistema longitudinal de sulcos, os sulcos funcionam como sub-bacias que drenam o escoamento superficial entre os cumes adjacentes, já o cultivo em camalhões é geralmente considerado uma prática de conservação do solo, que pode reduzir a erosão retendo o escoamento nos sulcos e reduzindo a energia do fluxo (Wang *et al.*, 2018).

Autores como Go´mez & Nearing, (2005) e Mirzaei *et al.*, (2008) concordam que a erosão e o escoamento superficial são fortemente influenciados pela rugosidade do solo, um fator chave que descreve a variação na elevação da superfície. Outras características como coesão e estabilidade do solo também exercem influência. O padrão, a direção, o sistema de cultivo e o gerenciamento de resíduos são os principais fatores que afetam o direcionamento do escoamento nos sistemas de cultivo e, consequentemente, influenciam a erosão do solo (Wang *et al.* 2021).

A mobilização intensa e frequente do solo por meio do preparo agrícola em um sistema de preparo longitudinal promove a redução, a fragmentação dos agregados, remoção dos resíduos agrícolas e o aumento da quantidade de partículas desagregadas. Essa condição favorece o transporte de partículas pelo escoamento, reduzindo a capacidade do solo de reter e infiltrar água, intensificando o escoamento superficial e a erosão (Burwell *et al.*, 1966; Allmaras *et al.*, 1967; Burwell & Larson, 1969; Cogo, 1981).

3.3. Erosão em sulcos

No que diz respeito à erosão, caracteriza-se como um processo natural e complexo que resulta da interação de inúmeros fatores, compreendendo as fases distintas de desagregação, transporte e deposição (Coelho, 2000). Apresenta quatro principais tipos, entressulcos, em sulcos, ravinas e voçorocas sendo que a erosão em sulcos é conhecida como uma das principais fontes de sedimentos em áreas agrícolas (De Baets *et al.*, 2006).

Diferente do que ocorre na erosão em entressulcos, em que o solo ainda não apresenta incisões na superfície realizadas pelo escoamento concentrado, e que o transporte do solo desagregado pelo impacto da gota de chuva e fluxo superficial parece não ter força para transportar o sedimento produzido, a erosão em sulcos forma-se a partir do aumento da concentração do volume de água com uma velocidade maior que o escoamento difuso, gerando assim pequenas e evolutivas incisões no terreno, o que acaba gerando o aumento do transporte de sedimentos (Govers, 1996).

No processo de desagregação das partículas, há várias forças atuantes, destacam-se as influenciadas pela chuva, pelo escoamento superficial e pelas características do solo, como a força de impacto da gota de chuva (FR), a força de empuxo do fluxo (FD), a força de elevação do fluxo (FL), a gravidade do solo (G) e a força de adesão do solo (N) (Ban *et al.*, 2017; Gime'nez & Govers, 2008).

Além disso, o processo é caracterizado na ocorrência de três subprocessos erosivos: a desagregação do solo no perímetro molhado do sulco, o desmoronamento das paredes laterais do sulco devido a desagregação e transporte das partículas do solo e dos agregados pelo escoamento concentrado, assim, a erosão em sulcos é um fenômeno complexo afetado por vários fatores, como contribuição do fluxo lateral (entressulcos), taxa de fluxo concentrado e elementos físicos no caminho do fluxo concentrado (Cantalice et al., 2005).

Quando o deslocamento do solo dos sulcos é tal que uma camada de solo menos erodível é alcançada, os sulcos tendem a alargar-se à medida que as laterais do canal sofrem erosão e formam o que é muitas vezes referido como uma "ravina efémera" porque o canal provavelmente será obliterado pela lavoura subsequente (Douglas Mankin *et al.*, 2020).

A quantidade de sedimentos transportados em sulcos de erosão é influenciada pelos parâmetros de resistência do canal, são eles a tensão crítica de cisalhamento e a erodibilidade. Para simular esses processos de erosão em sulcos, as equações empíricas comumente empregam parâmetros hidráulicos e de resistência do solo, visando compreender os mecanismos que controlam o desprendimento e o transporte de partículas (Cerdan *et al.*, 2002; Shen *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2019). Segundo Govers *et al.*, (2007) e Qian *et al.*, (2016), a erosão em sulcos sofre grande influência das características hidráulicas (velocidade do fluxo, regime de fluxo, potência de fluxo e resistência hidráulica). Em regimes considerados turbulentos, o efeito do fluxo dentro do canal do sulco, resultou em uma maior desagregação e eventual modificação da geometria (Larionov *et al.*, 2008).

A desagregação e o transporte de sedimentos nos sulcos de erosão ocorrem pela ação da tensão cisalhante do escoamento concentrado, sendo assim, a erosão em sulcos é a principal fonte de sedimentos nas encostas, embora seja muito complexo e difícil de quantificar (Nach-tergaele *et al.*, 2002; Knapen *et al.*, 2007).

3.3. Erodibilidade (Kr) e tensão crítica de cisalhamento (τc)

A erodibilidade do solo e a tensão de cisalhamento crítica são índices importantes para avaliar o grau de vulnerabilidade do solo à erosão e a capacidade de resistir à deformação por cisalhamento devido ao fluxo de água, que foram adotados como indicadores importantes no modelo WEPP (Nearing *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 2013). A erodibilidade se refere a resistência do solo, tanto pela desagregação causada pelo impacto das gotas de chuva, quanto pelo escoamento superficial concentrado,é considerada por vários autores como um fator essencial na determinação dasusceptibilidade do solo a erosão, devido às diferenças peculiares de cada classe desolo e também parâmetros físicos, geoquímicos ou biológicos (Le Bissonnais & Singer, 1988, Morgan 2005, Grabowski *et al.*, 2011).

O parâmetro de erodibilidade do solo é definido como o aumento na taxa desagregação para cada unidade adicional de tensão de cisalhamento. A erodibilidade do solo em sulcos (Kr) pode ser obtida a partir de parcelas experimentais, ou ainda de relações que incluam textura do solo, coesão do solo, resistência ao cisalhamento, conteúdo de argila e estabilidade dos agregados (Xiao *et al.*, 2017).

Segundo Bastos (1999), a tensão crítica de cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desagregação de suas partículas, estando esta associada diretamente ao escoamento concentrado.

Quando o valor de tensão crítica de cisalhamento é alcançado, a erosão em sulcos é iniciada (Rose *et al.*, 1983). Gilley *et al.*, (1993) sugeriram a relação entre o parâmetro de

erodibilidade do solo e a capacidade de desagregação do no sulco, delineando um método de cálculo correspondente por meio de experimentos de campo. Enriquez *et al.*, (2015) apontam que a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento são determinadas por métodos indiretos, baseados em propriedades físico-químicas dos solos, ou por métodos diretos, a partir da relação entre a taxa de desagregação do solo e tensão cisalhante.

Al-Madhhachi *et al.*, (2013) conduziram um experimento de erosão para demonstrar que a taxa de desprendimento do solo e a tensão de cisalhamento do escoamento dependem das condições hidráulicas próximas à superfície. Xing Chen *et al.*, (2018) e Singh *et al.*, (2016) propuseram que mudanças no teor de umidade do solo levam a mudanças rápidas na tensão de cisalhamento crítica. Esses estudos indicam que as mudanças nas condições hidráulicas próximas à superfície afetam fortemente a erodibilidade do solo, o que, por sua vez, desencadeia intensa erosão do solo.

Para Léonard & Richard (2004), a tensão crítica de cisalhamento é o limiar entre a estabilidade do solo e o início do processo de erosão, o qual está relacionado á condicionantes como, a relação entre coloides minerais e orgânicos, que determina, a coesão em pequenos agregados, o tamanho, a forma e organização espacial de partículas, a presença de raízes e rifas que ajudam na construção de grandes agregados.

3.4. Velocidades de fluxo

Ao analisar os processos de erosão do solo, é fundamental considerar os diferentes tipos de fluxos de escoamento. O escoamento de fluxo laminar caracteriza-se por uma velocidade baixa e um movimento ordenado da água, com pouca ou nenhuma mistura entre as camadas de água. Por outro lado, o escoamento de fluxo turbulento apresenta uma velocidade maior, um movimento caótico da água e intensa mistura entre as camadas. Essa turbulência promove uma maior desagregação das partículas do solo, intensificando os processos erosivos (Suguio & Bigarella, 1990).

A velocidade do fluxo altera as forças atuantes no processo de desagregação das partículas. Segundo Yang (1977), a velocidade do fluxo é um fator chave na determinação do movimento incipiente de partículas de sedimento e, em seguida, à formação e desenvolvimento de sulcos.

A maioria das equações de transporte de sedimentos requer parâmetros baseados nesse movimento, os quais são geralmente obtidos a partir do equilíbrio de forças ou momentos atuantes sobre as partículas, considerando também a tensão de cisalhamento (Lei *et al.*, 1998; Nearing *et al.*, 1999; Mancilla, 2001). A literatura científica apresenta um consenso sobre a relação positiva entre a velocidade do fluxo e as taxas de perda de solo, evidenciando a importância deste parâmetro na avaliação da susceptibilidade à erosão em diferentes ambientes geomorfológicos. Portanto, a frequência e a intensidade da erosão em canais são determinadas pela distribuição da velocidade do fluxo sobre a superfície do solo.

A erosão em sulcos é um processo dinâmico marcado pela constante interação entre o fluxo e a morfologia do canal. O alargamento e a curvatura do canal, resultantes do colapso das paredes laterais, aumentam a rugosidade do leito e diminuem a velocidade do fluxo (Stefanovic & Bryan, 2009). Essa relação é bidirecional: a velocidade do fluxo molda a forma do canal (Zhang *et al.*, 2016), ao mesmo tempo em que a forma do canal influencia a velocidade do fluxo (Han *et al.*, 2021). Essa complexa interação controla a influência e a capacidade erosiva do escoamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O experimento foi realizado em Setembro de 2023, no município de Carpina, localizado na mesorregião Zona da Mata e microrregião da Mata Setentrional de Pernambuco, possuindo uma área de aproximadamente 147,017 km² (IBGE, 2023). O clima da região é caracterizado como quente, úmido, pseudotropical, de acordo com a classificação de Köppen. Existem duas estações distintas: uma estação chuvosa de março a agosto e uma estação seca de setembro a fevereiro (Moura *et al.*, 2007). O solo da área de estudo foi classificado, por Santos *et al.*, (2013), como Argissolo Vermelho Amarelo Tb Distrófico, A moderado, textura média/muito argilosa.





Fonte: Autor, 2025.

4.2. Determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento nos canais e/ou erosão

Sob o solo de uma encosta, da estação experimental de Carpina da Universidade Federal Rural de Pernambuco, foram realizados ensaios de simulação de fluxo superficial concentrado na forma de parcelas experimentais, que foram compostas por uma área de 8 m² (2 m de largura e 4 m de comprimento), ficando a maior dimensão no sentido de declive do terreno. Os sulcos foram pré-formados com a utilização de uma enxada utilizando-se da extremidade cortante de formato triangular e mantendo-se a inclinação natural do terreno.

As dimensões dos sulcos foram de 4 m de comprimento, 0,3 m de largura e profundidade de 0,1 m. Na parte inferior de cada parcela foi instalada uma calha para coleta do escoamento superficial concentrado e do sedimento desagregado. A divisão aconteceu em 4 blocos com 4 sulcos cada bloco, e imediatamente submetidos aos testes de erosão em sulcos com aplicação dos níveis de vazão. Nestes sulcos foram aplicados os seguintes níveis de fluxo por 20 minutos, ou os fatores experimentais: de Q1 = 20, Q2 = 40, Q3 = 60 e Q4 = 75 L.min⁻¹.

A água foi conduzida aos sulcos por gravidade e através de mangueira de polietileno calibrada pela vazão, proveniente de um reservatório com capacidade de 1000 L, mantido sob carga constante, e abastecido por pipa. Na extremidade superior dos sulcos/canais foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes plásticos circulares, de tal forma que a borda superior do recipiente ficou ao nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegou aos sulcos pelo transbordamento dos recipientes. Na extremidade inferior dos sulcos instalou-se uma calha coletora metálica para auxiliar na coleta das amostras de descargas liquida e sólida.

Para determinação da velocidade no escoamento superficial, obteve-se através da cronometragem do tempo gasto pelo corante azul de metileno percorrendo a 2 metros centrais dos sulcos, os valores da velocidade superficial obtidos foram expressos em m.s⁻¹. As velocidades superficiais (Vs) foram medidas de 5 em 5 minutos, a partir da formação da lâmina do escoamento, e no mesmo intervalo determinou-se a descarga líquida e sólida. A velocidade média do escoamento superficial (m.s⁻¹) foi obtida multiplicando os valores registrados durante os testes de velocidade superficial por $\alpha = 0,67$, que é um fator de correção atribuído às variações da velocidade do escoamento superficial com profundidade do escoamento decorrente do atrito com o solo (Lafayette *et al.*, 2011).

As determinações da área, perímetro molhado e raio hidráulico foram obtidas utilizando o perfilômetro (Figura 2), através das medições das seções transversais do fluxo do sulco, sendo o mesmo constituído de 30 hastes plásticas espaçadas de 0,02 m, e acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura. Foram realizadas duas medições a primeira com 5 minutos antes do início do teste e a segunda 5 minutos antes

do termino do teste. As medições no sulco foram localizadas a 50 cm da entrada e a 50 cm da saída do sulco. Com o perfilômetro nivelado e na posição vertical, foi transportado para junto do sulco na posição descrita acima, em seguida, soltaram-se suavemente as hastes plásticas até a superfície do solo, para depois serem fixadas as estruturas, desenhando desta maneira a forma da seção transversal do sulco retratado em cartolina colocada entre as hastes plásticas e a estrutura de acrílico, e desenhadas as dimensões dos sulcos com pincel atômico em escala real.



Figura 2 – Medição do sulco com Perfilômetro

Fonte: Autor, 2025.

No Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e Água, as amostras do escoamento superficial que estavam acondicionadas em potes plásticos com as descargas líquida e sólidas ficaram em repouso para que ocorresse a sedimentação das partículas, e em seguida os potes foram pesados com o sedimento depositado no fundo. Posteriormente, os potes foram levados à estufa com temperatura de 60° C, por um período, até a secagem completa dos sedimentos. Depois dos recipientes com os sedimentos totalmente secos, pesaram-se novamente os potes para obtenção da massa de sedimento, no qual foi expressa em grama (g).

A partir da amostragem em potes plásticos de 1 L da massa de solo e água, e da duração das coletas, pôde-se determinar as taxas de desagregação de solo nos canais/sulcos, obtidas através da seguinte relação (1):

$$Dc = \frac{Q.C}{L.Pm} \tag{1}$$

Na qual Dc = taxa de desagregação do solo em sulcos (kg.m⁻².s⁻¹); Q = descarga líquida (L.s⁻¹); C = concentração (kg L⁻¹); Pm = perímetro molhado (m) e L = comprimento do sulco (m). Admitindo-se que na erosão em sulcos com adição de vazões, a carga de sedimentos é muito maior que a capacidade de transporte, pode-se utilizar a equação da capacidade de desagregação do escoamento em sulcos (Kr), para a determinação das taxas momentâneas de desagregação do escoamento, expressão (2) abaixo. Desta forma a erodibilidade do solo nos canais/sulcos será determinada da análise de regressão para o modelo linear entre os valores médios de tensão cisalhante (τ C) e de desagregação do solo (Kr) obtidos para cada vazão aplicada, conforme o modelo de predição WEPP, descritas a seguir. As taxas de desagregação pelo escoamento concentrado podem ser obtidas quando a tensão de cisalhamento excede a tensão crítica de cisalhamento do solo, como reportado por Thomas *et al.*, (2008) e apresentado pelo WEPP:

$$Dr = Kr \left(\tau c - \tau_{cr}\right) \tag{2}$$

Sendo Dr a desagregação pelo escoamento concentrado (kg m⁻² s⁻¹), Kr a erodibilidade do solo (kg N⁻¹s⁻¹) em oposição a tensão cisalhante do escoamento τ_c (N m⁻² ou Pa) e τ_{cr} a tensão crítica de cisalhamento do solo (N.m⁻² ou Pa). Assim, a tensão cisalhante do escoamento τ_c pode ser obtida pela expressão (3):

$$\tau c = \gamma RhS$$
 (3)

Em que S = declividade do solo, Rh = ao raio hidráulico e γ constitui-se do peso especifico da água (N.m⁻³). A tensão crítica de cisalhamento do solo pelo fluxo (τ_{cr}) corresponderá ao valor do intercepto da tensão de cisalhamento média τ_c igualar-se a taxa de desagregação do solo de zero (Kr = 0) (Laflen; Thomas, 1987). As perdas totais de solo durante os 20 minutos de duração do teste serão calculadas a partir dos dados de concentração instantânea de sedimentos do escoamento superficial e da taxa de descarga líquida pela expressão abaixo (4), citada por Cantalice *et al.*, (2005):

$$PS = \frac{\sum(QCt)}{A} \tag{4}$$

(2)

Sendo: PS = perda total de solo (kg m⁻²); Q = taxa de descarga líquida (L min⁻¹); C = concentração de sedimentos (Kg.L⁻¹); t = intervalo entre amostragens (min) e A = área do sulco em m². O delineamento experimental utilizado será o de blocos casualizados, sendo utilizadas as médias referentes as 4 repetições dos tratamentos que serão para cada tipo de solo as diferentes coberturas vegetais cultivadas.

Para a caracterização do regime hidráulico do escoamento superficial gerado, será determinado o número de Reynolds (Re) (5), bem como o número e Froude (Fr) (6), por meio das equações propostas por Simons & Senturk (1992):

$$Re = \frac{Vm.h}{v}$$
(5)

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g.h}} \tag{6}$$

Em que: Vm = velocidade média do escoamento (m.s⁻¹); h = altura da lâmina de escoamento (m); g = aceleração da gravidade (m.s⁻²); e ν = viscosidade cinemática da água (m². s⁻¹). A viscosidade da água será calculada por meio da equação desenvolvida por Julien (1995): ν = [1,14 – 0,031 (T – 15) + 0,00068 (T – 15) 2]x 10–6 (6) em que: ν = viscosidade cinemática da água (m².s⁻¹) e T = temperatura da água (°C). A resistência ao escoamento será determinada por meio do coeficiente deresistência de Darcy-Weisbach, de acordo com a equação abaixo (7):

$$f = \frac{8 \text{ghS}}{v^2} \tag{7}$$

Em que: f = coeficiente de Darcy-Weisbach (adimensional); g = aceleração da gravidade (m. s⁻²); h = altura da lâmina do escoamento (m); S = inclinação do declive (m.m⁻¹); V = velocidade do escoamento (m.s⁻¹). Por fim, análises de regressão serão buscadas para identificação das velocidades críticas suportadas pelos canais/sulcos sob uso agrícola, associadas as tensões críticas de cisalhamento.

4.3. Análise estatística do experimento em sulcos pré-formado

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC) no qual se utilizou as médias referentes às repetições dos tratamentos. Para analisar a significância das variáveis estudadas neste trabalho foram submetidos a um teste de checagem da normalidade da distribuição dos dados e da homogeneidade das variâncias, e para essa finalidade foram realizados os testes de Shapiro Wilk. O teste de Shapiro-Wilk é considerado como sendo eficiente para diferentes distribuições e tamanhos de amostras (Shapiro; Wilk, 1965; Cirillo; Ferreira, 2003). Os resultados obtidos da erosão em sulcos foram analisados com o Programa estatístico Rstudio. As comparações entre as médias obtidas foram realizadas pelo teste de Tukey, a 1% de significância. Na análise de regressão dos dados utilizou-se o programa computacional Excel, onde obteve o reajuste das equações de cada regressão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5. 1. Variáveis hidráulicas do escoamento concentrado nos sulcos de erosão

A Tabela 1 contém o comportamento hidráulico gerado pela aplicação de fluxos de magnitude crescente em sulcos pré-formados e o resultado da comparação das médias para cada tratamento da erosão em sulcos sobre o Argissolo. Os testes estatísticos aplicados revelaram que as médias dos atributos hidráulicos diferiram significativamente entre os diferentes tratamentos experimentais. No entanto, não foram observadas diferenças significativas para o parâmetro de declividade.

Variávais	Respostas aos fluxos aplicados			
v al laveis	1	2	3	4
$Q(Lmin^{-1})$	19,36 d	40,67 c	59,01 b	73,59 a
$V_m \ (m \ s^{-1})^2$	0,206 b	0,262 ab	0,304 a	0,314 a
Re(Adm)	3591,86 d	6031,87 c	7980,31 b	9885,11 a
Fr(Adm)	0,532 a	0,587 a	0,637 a	0,602 a
n	0,361	0,277	0,239	0,240
f	1,73	1,50	1,33	1,47
$P_m(m)$	0,0378d	0,0741c	0,1023b	0,1579a
$R_{h}\left(m ight)$	0,015 d	0,020 c	0,023 b	0,028 a
$A(m^2)$	0,000579d	0,001490c	0,002351b	0,004331a
$S(m m^{-1})$	0,0600a	0,0640a	0,0620a	0,0660a

Tabela 1 - Variáveis hidráulicas do escoamento concentrado nos sulcos de erosão.

¹Todas as variáveis apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk a nível de 1% de probabilidade.. Sendo: Q – descarga líquida, Vm – velocidade média, Re – número de Reynolds, Fr – número de Froude, n – coeficiente de Manning, f – coeficiente de Darcy-Weisbach, Pm – perímetro molhado, Rh – Raio hidráulico, A – área, S – declividade.

Em todos os testes o número de Reynolds demonstrou diferenças entre médias e valores de 3591,86 para a menor vazão e 9885,11 para a maior vazão, apresentando valores na faixa de $(2.872 \le Re \ge 12.945)$ o que caracteriza com um comportamento turbulento, já os valores de Froude (*Fr*) apontaram um fluxo subcrítico com valores abaixo de 1, mas não apresentou diferenças entre médias. O número de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) são variáreis hidráulicas críticas para o regime do fluxo em sulcos. O Re representa a ação das forças viscosas no fluxo, enquanto o Fr representa a ação das forças gravitacionais no fluxo (Guo *et al.*, 2013). Observa-

se que os valores da rugosidade hidráulica obtidos pelo coeficiente de Darcy-Wiesbach (*f*) não apresentaram diferenças significativas em relação aos fluxos aplicados, no entanto, os valores de velocidade média nos sulcos foram significativos a rugosidade hidráulica observada nos sulcos sob uso agrícola (Figura 3).





A Figura 3 acima demonstra uma redução exponencial da velocidade média do escoamento concentrado nos sulcos para elevação da rugosidade hidráulica representada pelo coeficiente de Darcy-weisbach. A rugosidade hidráulica apresentada representa a rugosidade gerada pelo solo, que na verdade estavam descobertos sem qualquer cobertura vegetal, quando então os agregados do solo em contato com a lâmina de escoamento foram capazes de imprimir uma redução da velocidade média do escoamento, o que coincide com os resultados de Tian, Pei *et al.*, (2022) que teve velocidade mais lenta, com o aumento do coeficiente de resistência Darcy-Weisbach.

Da mesma forma, da velocidade média do escoamento concentrado nos sulcos foram significativas para os fluxos crescentes aplicados, como se demostra a seguir. Com base nas determinações de tempos das velocidades médias e de vazão dos sulcos, foi estabelecida uma relação entre as duas, cujos resultados foram apresentados na Figura (4). A partir da análise do gráfico, observa que o aumento gradual da vazão nos experimentos resultou em um correspondente aumento da velocidade média do escoamento nos canais, evidenciando uma relação de proporcionalidade direta entre essas duas variáveis, além disso, a análise de regressão

apresentou um indicador de coeficiente de determinação (R²) aceitável, isto é, a variável independente representada pela vazão aplicada explica 66,97% da variância da velocidade média do escoamento. Foi então obtida a relação entre vazão e velocidade média do escoamento e os dados foram ajustados por um modelo potencial dado pela Equação:

$Vm = 0,0795Q^{0,3219}$ e R² = 0,6697

O valor do expoente da equação apresentou valor de 0,3219, relações de expoentes semelhantes foram encontradas por Cantalice (2001) com valor de 0,3254 para um Argissolo vermelho distrófico típico, Piscoya (2012) 0,331 no Cambissolo, e Souza (2015) 0,3464 também em Argissolo. A literatura científica apresenta um consenso sobre a existência de uma relação direta entre a vazão e a velocidade média do escoamento em sulcos, corroborada por diversos estudos, conforme destacado por Qian *et al.*, (2016), a velocidade do fluxo é um parâmetro fundamental na avaliação dos processos erosivos. Neste estudo, as velocidades médias variaram entre 0,206 e 0,314 m/s nas diferentes condições experimentais.



Figura 4 – Relação entre as velocidades médias e as vazões de resposta obtidas nos sulcos pré-formados sob Argissolo.

O aumento das vazões e, a consequente elevação da velocidade do escoamento, podem gerar cisalhamento de grandes agregados que são formados durante o preparo da área para a implantação de culturas e o consequente tr ansporte das partículas individualizadas a partir desse momento, implicando maiores perdas de solo. e transporte dos mesmo (Bezerra *et al.*, 2010).

A morfologia do sulco é a representação mais intuitiva das características do processo do seu desenvolvimento (Wirtz *et al.*, 2013). A análise dos dados demonstra que a variação da vazão exerceu influência direta na geometria dos canais pelas tensões de cisalhamento geradas, sendo observadas diferenças estatísticas significativas nos valores de área, perímetro molhado e raio hidráulico entre os diferentes tratamentos, o que também foi observado por Cantalice *et al.*, (2005), Bezerra et al. (2010) e Piscoya (2012). Conforme Bezerra *et al.*, (2010), o incremento da vazão induz à desestabilização dos canais, promovendo a desagregação das paredes e do fundo, o que resulta no aumento do perímetro molhado, raio hidráulico e, consequentemente, da área da seção transversal, de acordo com Cantalice *et al.*, (2005), esse processo intensifica o transporte de sedimentos. O mesmo processo pode-se observar na figura 5.



Figura 5 – Relação exponencial entre a área e o raio hidráulico obtidos dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados sobre o Argissolo.

A Figura 5 apresenta a diferenciação dos raios hidráulicos dos sulcos com a aplicação dos fluxos crescentes e tensões de cisalhamento, para posterior diferenciação das taxas de desagregação e das perdas do solo, também numa relação exponencial em função dos incrementos de área dos sulcos pré-formados. Pode-se observar que as características hidráulicas do fluxo de encosta, que se mostraram como seu aumento na turbulência, resistência

e tensões de cisalhamento, foram responsáveis pelo desenvolvimento de sulcos nas áreas sob uso agrícola.

5.2. Parâmetros de resistências do solo em sulcos: erodibilidade do solo (K_r) e tensão critica de cisalhamento (τ_{cr})

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da tensão de cisalhamento do escoamento, taxa de desagregação e perda de solo para aos fluxos aplicados nos canais. Os resultados de comparação entre os fluxos aplicados para tensão de cisalhamento e taxa de desagregação teve diferença, no entanto, não houve diferença significativa para perda de solo (*PS*), que apresentaram poucas influências em relação ao aumento de vazão, a variação se deve ao fato de que se constituem em uma variável integrativa, ou seja, os valores de perdas são somados durante todo o período de ensaio.

 Tabela 2 – Parâmetros de resistência do solo ao comportamento hidráulico dos canais.

 Respostas aos fluxos aplicados

Variávois	Respostas aos nuxos aplicados			
v al laveis	1	2	3	4
$Kr (Kg m^{-2}s^{-1})$	0,00002b	0,0004b	0,00005b	0,00069a
τ (Pa)	7,17c	11,29b	11,50b	13,83a
$PS(t ha^2)$	18,93	25,29	22,47	20,38

¹Todas as variáveis apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk a nível de 1% de probabilidade. Sendo *Dr* – Taxa de desagregação, τ- tensão cisalhamento e *PS* – Perda de solo.

A. Knapen *et al.*, (2006) em estudos de revisão sobre erodibilidade, concluíram que os parâmetros hidráulicos simples e de resistência $\tau_c \ e \ Kr$, como um dos principais preditores de desagregação mais universalmente usados, mostrando uma boa relação entre si. Para todas os sulcos, a relação foi crescente e linear entre a Taxa de desagregação e a Tensão de cisalhamento, apresentando uma correlação positiva, como mostra o gráfico da Figura 6, mostrando que essas variáveis são diretamente proporcionais, com um razoável coeficiente de determinação (R²), indicando um bom ajuste de modelo.



Figura 6 – Relação exponencial entre as taxas de desagregação de solo e as tensoes de cisalhamento obtidas dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados sobre o Argissolo.

A análise de regressão linear apresentou um indicador significativo de coeficiente de determinação (R²), visto que a variável independente de tensão de cisalhamento (τ c) explica 51% da variância da taxa de desagregação (Kr). O coeficiente angular da reta, o qual determina a erodibilidade (Kr) do solo, foi de 0,0007 kg m⁻² s⁻¹. Além disso, a tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}), que representa o intercepto entre a reta e a abcissa, foi de 8,75 Pa.

O valor da erodibilidade 0,0007 kg m⁻² s⁻¹, foi menor comparado aos de Gonçalves (2008) que obteve valor de 0,0268, Dantas *et al.*, (2014) 0,00615, Nascimento (2017) 0,0176 Kg N⁻¹ s⁻¹. A variabilidade da erodibilidade do solo é evidente em diferentes regiões. Geng *et al.*, (2017) encontraram uma ampla faixa de valores de erodibilidade (Kr) em 12 tipos de solos no Leste da China, variando de 0,000456 a 0,826 kg N⁻¹ s⁻¹. Essa ampla variação corrobora os resultados de Elliot *et al.*, (1989), que em um estudo com 36 solos dos Estados Unidos, obtiveram valores de Kr entre $0,6.10^{-3}$ a 45,3.10⁻³ kg N⁻¹ s⁻¹, e valores de tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) entre 0,4 a 6,6 N m⁻². Esses resultados demonstram a complexidade da erodibilidade do solo e a importância de considerar as características específicas de cada região e tipo de solo.

Os resultados apresentados na Tabela 2 contribuem para a compreensão da variabilidade da tensão de cisalhamento em Argissolos. Ao comparar nossos resultados com os de estudos anteriores Tian *et al.*, (2022); Zhang *et al.*, (2023); Tingint Tao *et al.*, (2024), que reportaram valores de τc entre a faixa de 10,19 a 18,498 Pa, portanto, observa-se que a faixa de valores de τc para esses solos é ampla.

Para os valores de τ_{cr} encontrados na literatura para Argissolos apresentam grande variabilidade, como demonstrado pelos estudos de Nascimento (2017) e Reichert *et al.*, (2001), que reportaram valores de 4,72 Pa e 2,30 Pa, respectivamente. Os resultados deste estudo divergem dos valores encontrados, e aproxima mais do Griebeler *et al.*, (2005) e Tao Tingint *et al.*, (2024) com 7,5 Pa e 7,532 Pa. As discrepâncias nos valores de tensão crítica de cisalhamento para solos pertencentes à mesma classe podem ser explicadas por heterogeneidades mineralógicas e por fatores associados aos procedimentos experimentais empregados. Kulesza (2024) quantificou a (τ_{cr}) de 36 solos nos Estados Unidos e indicou o mesmo que Singh & Thompson (2016) que a τ_{cr} poderia ser prevista pelo conteúdo de argila, coeficiente de extensibilidade linear e conteúdo de água do solo, e que muitos apresentaram variabilidade entre os resultados.

CONCLUSÕES

- Os elevados fluxos aplicados nos sulcos resultaram em regimes de escoamento turbulento, caracterizados por números de Reynolds entre 3591,86 a 9885,11 e números de Froude abaixo de 1, resultando em um escoamento turbulento subcrítico, sendo essa condição hidrodinâmica característica dos sulcos de erosão.
- Todos os raios hidráulicos foram diferentes em função das vazões aplicadas, o que elevou as significativamente as tensões cisalhantes, possibilitando a determinação dos parâmetros de resistência para o Argissolo estudado de 8,75 Pa para tensão crítica de cisalhamento (τ*cr*), e 0,0007 kg m⁻² s⁻¹ para erodibilidade em sulcos (Kr).
- A análise dos dados revelou que a rugosidade hidráulica, quantificada pelo coeficiente de Darcy-Weisbach, está intimamente relacionada com a dinâmica do escoamento. A maior rugosidade aumenta a dissipação de energia, diminuindo a velocidade do fluxo e, consequentemente, influenciando processos hidrológicos como a infiltração e as taxas da erosão em sulcos.

AL-MADHHACHI, A.T.; HANSON, G.J.; FOX, G.A.; TYAGI, A.K.; BULUT, R. Derivation of parameters of a fundamental detachment model for cohesive soils from jet and trough erosion tests. **ASABE Transactions**, v.56, n. 2, p.489-504, 2013.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; HOLT, R. F. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. **Soil Science Society of America Journal**, v. 31, n. 4, p. 550-556, 1967.

BAN, Y. Y. et al. Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow. **Catena**, v. 148, p. 153-159, 2017.

BARBOSA, M. A. B. Hidráulica do escoamento superficial no processode erosão em sulcos de um argissolo. 2015.

BASIC, F. et al. Runoff and soil loss under different tillage methods on Stagnic Luvisols in central Croatia. **Soil and Tillage Research**, v. 62, n. 3-4, p. 145-151, 2001.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 1999.

BEZERRA, Sandro Augusto et al. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um cambissolo do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1325-1332, 2010.

BURWELL, Edward L. Multiple tracers establish waterflood flow behavior. **Oil Gas J.;(United States)**, v. 64, n. 48, 1966.

BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 3, p. 449-452, 1969.

CANTALICE, José Ramon Barros. Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo. 2001.

CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. O. Hidráulica do Escoamento e Transporte de sedimentos em sulcos em solo Franco Argilo Arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29,p.597 - 607, 2005.

CERDAN, Olivier et al. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. **Soil and Tillage Research**, v. 67, n. 1, p. 99-108, 2002.

CIRILLO, M. A.; FERREIRA, D. F. Extensão do teste para normalidade univariado baseado no coeficiente de correlação quantil-quantil para o caso multivariado. Revista de Matemática e Estatística, v. 21, n. 3, p. 67-84, 2003.

COELHO SILVA, J. R. (2000) "Erosão e produtividade do solo no semi-árido". Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido – Fortaleza. Ed. Folha de Viçosa: Soc. Brasileira de Ciência do solo, p. 169 -213.

COGO, NEROLI PEDRO. Effect of residue cover, tillage-induced roughness, and slope length on erosion and related parameters. Purdue University, 1981.

DANTAS, J. S., Filho, M. V. M., Júnior, J. M., Resende, J. M. do A., Teixeira, D. D. B., Barbosa, R. S., & Siqueira, D. S. (2014). Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcosde Argissolos coesos estimado pela cor do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(9), 700–707. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900006

DE BAETS, S., POESEN, J., GYSSELS, G., KNAPEN, A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. Geomorphology, Amsterdam, v. 76, n. 1–2, p. 54–67, 2006.

DECHEN, S. C. F. et al. Losses and costs associated with water erosionaccording tosoil cover rate. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 2015.

DI STEFANO, Costanza et al. Flow resistance equation for rills. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 15, p. 2793-2801, 2017.

ELLIOT, William John. **A process based rill erosion model**. Iowa State University, 1988. DOUGLAS-MANKIN, Kyle R. et al. A comprehensive review of ephemeral gully erosion models. **Catena**, v. 195, p. 104901, 2020.

ENRIQUEZ, A. G.; SILVA, D. P. da; PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; CECON, P. R. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem em Estrada rural não pavimentada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 2, p. 160-165, 2015.

FOSTER, G.R.; MEYER, L.D.; ONSTAD, C.A. Na erosion equation derived from basicerosion principles. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng**, v.19, p.678- 682,1976.

GENG, Ren et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China. **Catena**, v. 152, p. 18-28, 2017.

GÓMEZ, J. A.; NEARING, M. A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. **Catena**, v. 59, n. 3, p. 253-266, 2005.

GONÇALVES, Flávio Aparecido. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa-MG. 2007.

GOVERS, G. Soil erosion process research: A state of the art. Brussel: Paleis der Academien, 53p. Klasse der Wetenschappen, Jaargang 58, n.1. 1996.

GOVERS, Gerard; GIMÉNEZ, Rafael; VAN OOST, Kristof. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. **Earth-Science Reviews**, v. 84, n. 3-4, p. 87-102, 2007.

GUO, T.; WANG,Q.; LI, D.; ZHUANG, J.; WU, L. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. **Catena**, v. 107, p. 145-153, 2013.

GILLEY, J.E.; ELLIOT, W.J.; LAFLEN, J.M.; SIMANTON, J.R. Critical shear stress and critical flows for starting drilling. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, v. 30, n.5,1993.

GIMÉNEZ, Rafael; GOVERS, Gerard. Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics. **Catena**, v. 72, n. 2, p. 214-223, 2008.

GRIEBELER, N. P. et al. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 411-417, 2001.

GRIEBELER, Nori P. et al. Equipamento para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 166-170, 2005.

HAN, Jianqiao et al. Mechanistic understanding of linear erosion under concentrated flow based on laboratory simulations. **Catena**, v. 207, p. 105708, 2021.

HUDSON, N. Soil conservation. 3.ed. Ames: Iowa State UniversityPress, 1995. 391 p.
IBGE. Carpina (PE). *Cidades e Estados*, IBGE, s.d. Disponível em: www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/carpina.html. Acesso em: 10 out. 2023.

JELOUDAR, F. T.; SEPANLOU, M. G.; EMADI, S. M. Impact of land use change on soil erodibility. **Global J. Environ. Sci. Management**, v.4, n.1,p.59-70, 2018.

JIANG, Fangshi et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. **Catena**, v. 169, p. 46-58, 2018.

JULIEN, P.Y. Erosion and sedimentation Cambridge University Press. 2010. 280 p.

KIMARO, D. N. et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion. **Catena**, v. 75, n. 1, p. 38-44, 2008.

KNAPEN, Anke et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 80, n. 1-2, p. 75-109, 2007.

KULESZA, S. E. et al. Critical shear stress variability in claypan soils with depth. **Journal** of Soil and Water Conservation, v. 79, n. 2, p. 66-77, 2024.

LAFLEN, J. M.; THOMAS, A. W. Cropland experiments for the WEPP project. International winter meeting of the American society of agriculturalengineers. **Anais**...San Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 198

LARIONOV, G.A.; GENDUGOV, V.M.; DOBROVOL'SKAYA, N.G., KIRYUKHINA, Z.P., LITVIN, L.F. Mechanisms of lateral erosion in rills onslopes. **Eurasian Soil Science**, **v.**41, p.294-301, 2008.

LEE, Sanghyun et al. Modeling soil erodibility and critical shear stress parameters forsoil loss estimation. **Soil and Tillage Research**, v. 218, p.105292, 2022.

LEE, S.; CHU, M. L.; GUZMAN, J. A.; FLANAGAN, D. C.. Modeling soil erodibilityand critical shear stress parameters for soil loss estimation. *Soiland Tillage Research*, v.218, p.105292, 2022.

LEI, Tingwu et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. **Water resources research**, v. 34, n. 11, p. 3157-3168, 1998.

LEI, T.W.; ZHANG, Q.W.; YAN, L.J.; ZHAO, J.; PAN, Y.H. A rational method for estimating the erodibility and critical shear stress of an erodedgroove. **Geoderma**,v.144, n.3, p.628-633, 2008.

LÉONARD, J. e RICHARD, G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. Catena, Amsterdam, v. 57, n. 3, p. 233-249, 2004.

LIMA JÚNIOR, José Carlos. Estudo do desempenho de barreiras de geotêxtil para contenção de sedimentos carreados pelo escoamento superficial. 2014.

MANCILLA, G. A. **Prediction of rill density, transport capacity and associated soil loss of different tillage systems under winter conditions**. 2001. Tese de Doutorado. MS thesis, College of Engineering and Architecture, Washington State University.

MELIHO, M. et al. Assessment of soil erosion rates in a Mediterranean cultivated and uncultivated soils using fallout 137Cs. **Journal of environmental radioactivity**, v. 208, p. 106021, 2019.

MYERS, J. L.; WAGGER, M. G. Runoff and sediment loss from three tillage systems under simulated rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 39, n. 1-2, p. 115-129, 1996.

MONTANARELLA, L. World's soils are under threat. Soil, v.2, p.79-82,2016.

MOURA, Ariadne do Nascimento; DANTAS, Ênio Wocyli; BITTENCOURT-OLIVEIRA,

Maria do Carmo. Structure of the phytoplankton in a water supply system in the State of Pernambuco-Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, p. 645-654, 2007.

NACHTERGAELE, J. et al. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 10, p. 1935-1953, 2002.

NEARING, Mark A. et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.

NEARING, M. A. et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, v. 24, n. 8, p. 677-686, 1999.

NASCIMENTO, Rennan Cabral et al. Modelagem de erosão em voçoroca de base física em bacia hidrográfica semiárida. 2017.

NGUYEN, Hong Hanh et al. Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1-11, 2017.

NIU, Yaobin et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions. **Journal of soils and sediments**, v. 19, p. 1708-1723, 2019.

MIRZAEI, Mohammadreza et al. Changes of soil surface roughness under simulated rainfall evaluated by photogrammetry. In: **Geophysical Research Abstracts**. 2008.

PISCOYA, Victor Casimiro et al. Manejo em bacia hidrográfica do riacho Jacu: produção de sedimentos, dimensionamento de faixa de vegetação ciliar e salinidade da água em barragem subterrânea. 2012.

PISCOYA, V. C. et al. Abordagem WEPP em erosão do solo para bacias hidrográficas do semiárido brasileiro. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 3, p. 835-843, 2020.

SANTOS, H. G. DOS; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B. DE; LUMBRERAS, J. F.;

ANJOS, L. H. C. DOS; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. Á. DE. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2013.

QIAN, F.; CHENG, D.; DING, W.; HUANG, J.; LIU, J. Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the ThreeGorges Reservoir Area, China. Journal of Hydrology and Hydromechanics, v.64, p.237-245, 2016.

REICHERT, José Miguel et al. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 965-973, 2001.

ROSE, C.W.; WILLIAMS, J.R.; SANDER, G.C.; BARRY, D.A. A mathematical model ofsoil erosion and deposition processes: I. Theory fora flat terrain element1. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, n.5, p.991-995,1983.

SHAINBERG, I.; LAFLEN, J.M.; BRADFORD, J.M; NORTON, L.D. Fluxo hidráulico e qualidade da água características da erosão em sulcos. **Soil Science of America Journal**, v.58, n.4, p.1007-1012, 1994

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHEN, Haiou et al. Rill network development on loessial hillslopes in China. Earth Surface **Processes and Landforms**, v. 45, n. 13, p. 3178-3184, 2020.

SIMONS, D.B.; ŞENTÜRK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics Water Resources Publication, 1992.

SINGH, H.V.; THOMPSON, A.M. Effect of antecedent soil moisture contento on soil critical shear stress in agricultural watersheds. **Geoderma**, v.262, p.165-173, 2016.

SINGH, V.P. Analytical solutions of kinematic equations for erosion on aplane II. Rainfall of finite duration. **Advances in Water Resources**, v.6, p.88-95, 1983.

SOUZA, Waldemir Pereira de. Abordagem física do WEPP na erosão em solos em ambiente semiárido. 2015.

STEFANOVIC, Jovan R.; BRYAN, Rorke B. Flow energy and channel adjustments in rills developed in loamy sand and sandy loam soils. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 1, p. 133-144, 2009.

SU, Z.G.; XIONG, D.H.; ZHANG, J.H. ZHOU, T; YANG, H.K.; DONG, Y.F.; FANG, H.D.; SHI, L.T.Variation in the vertical zonality of erodibility and critical shear stress of streamerosion in the Hengduan Mountains of China. **Earth surface processes and landforms**, v.44, n.1, p.88-97, 2019.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. Ambientes fluviais. 2. ed. Florianópolis:Ed. da UFSC, 1990.

TIAN, Pei et al. Comparing erosion and rill development processes by simulated upslope inflow in two red soils from subtropical China. **Catena**, v. 213, p. 106139, 2022.

TAO, Tingting et al. Characteristics of rill development and dynamic mechanisms in intermittent field runoff scouring experiments. **Catena**, v. 242, p. 108120, 2024.

UTLEY. B. C.; WYNN. T. M. Cohesive soil erosion: Theory and practice. In: PROC.ASCE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS.

Reston. ASCE, 2008. Disponível

https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40976%28316%29289. Acesso em:19 jun. 2023.

Van-Nghia, N.; Jean-Robert, C.; Patrick, P.; Hanène, S.; Jean-Marie, F. Using an Improved Jet-Erosion Test to Study the Influence of Soil Parameters on the Erosion of a Silty Soil. **American Society of Civil Engineers**. Simons D.B., Şentürk F.(1992) Sediment transport technology:water and sediment dynamics Water Resources Publication. 2017.

XIAO, Haibing et al. Soil erosion-related dynamics of soil bacterial communities and microbial respiration. **Applied Soil Ecology**, v. 119, p. 205-213, 2017.

XING, H.; CHEN, X.Y.; HAN, Z.; HUANG, Y.C.; LI, Y.H. Comparison of hydrodynamiccharacteristics and resistance to flow under furrow erosion between saturated and unsaturated loess soil. **Journal of Soil and WaterConservation**, v.32, n.3, p.92-97, 2018.

XING, H.; HUANG, Y.H.; CHEN, X.Y.; LUO, B.L.; MI, H.X. Comparative study of soilerodibility and critical shear stress between loess and purple soils. **Journal of Hydrology**, v.558, p.625-631, 2018.

XU, Ximeng; ZHENG, Fenli; WILSON, Glenn V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions. **Catena**, v. 203, p. 105359, 2021.

ZHANG, Pan et al. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope. **Catena**, v. 137, p. 536-544, 2016.

ZHANG, Jie et al. Field simulation experiment on the relationships between hydrodynamics and soil detachment rate in formed rills. **Catena**, v. 233, p. 107540, 2023.

WANG, Bin et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. **Geomorphology**, v. 187, p. 1-10, 2013.

WANG, Yi et al. Modelling soil detachment of different management practices in the red soil region of China. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 5, p. 1496-1505, 2017. WANG, Bing et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 266, p. 68-75, 2018.

WANG, Jilei et al. Responses of runoff and soil erosion to planting pattern, row direction, and straw mulching on sloped farmland in the corn belt of northeast China. Agricultural Water Management, v. 253, p. 106935, 2021.

em:

WIRTZ, Stefan et al. Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. **Catena**, v. 101, p. 61-78, 2013.

YANG, Chih Ted. The movement of sediment in rivers. **Geophysical surveys**, v. 3, n. 1, p. 39-68, 1977.