

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PPRPG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
PPEAMB

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
LAMINAR COM BAIXO REYNOLDS GERADA PELO SOLO,  
VEGETAÇÃO E CULTURA SEMIÁRIDAS**

**TAIZA KARLA ALVES SOUZA**

Orientador: José Ramon Barros Cantalice

Coorientador: Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

**RECIFE  
JULHO, 2021**

**TAIZA KARLA ALVES SOUZA**

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
LAMINAR COM BAIXO REYNOLDS GERADA PELO SOLO,  
VEGETAÇÃO E CULTURA SEMIÁRIDAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental para fins de obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice

Coorientador: Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

**RECIFE  
JULHO, 2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S729r

Souza, Taiza Karla Alves

RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM ESCOAMENTO SUPERFICIAL LAMINAR COM BAIXO REYNOLDS  
GERADA PELO SOLO, VEGETAÇÃO E CULTURA SEMIÁRIDAS / Taiza Karla Alves Souza. - 2021.  
52 f. : il.

Orientador: Jose Ramon Barros .

Coorientador: Luiz Guilherme Medeiros Pessoa.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2021.

1. resistência hidráulica. 2. ondas gravitacionais . 3. escoamento superficial laminar. 4. baixo número de Reynolds . I. , Jose Ramon Barros, orient. II. Pessoa, Luiz Guilherme Medeiros, coorient. III. Título

CDD 620.8

---

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM ESCOAMENTO SUPERFICIAL LAMINAR  
COM BAIXO REYNOLDS GERADA PELO SOLO, VEGETAÇÃO E CULTURA  
SEMIÁRIDAS**

**TAIZA KARLA ALVES SOUZA**

Data de defesa: 29/07/2021

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**MEMBROS**

---

Dr. José Ramon Barros Cantalice  
Presidente e Orientador  
PPEAMB/UFRPE  
Universidade Rural Federal de Pernambuco

---

Dr. Vicente de Paulo Silva  
Membro Interno  
PPEAMB / UFRPE  
Universidade Rural Federal de Pernambuco

---

Dr. Valdemir de Paula e Silva Júnior  
Membro Externo  
Doutor em Engenharia Agrícola pela UFRPE

Dedico

A minha vó e mãe, Generina Alves e Edvania Alves, por sempre me mostrar que apesar das adversidades da vida, devemos sempre levantar a cabeça e seguir. Sempre seguir.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, José Ramon Barros Cantalice, que sem suas contribuições técnicas, empenho, dedicação, compreensão e paciência esta dissertação não teria sido executada. Em minha passageira jornada com o Professor Ramon, aprendi que além de um excelente profissional, você deve ser um ser humano. Exemplo que levarei para sempre em minha vida. A você, Professor Ramon, minha admiração e eterna gratidão.

A minha amiga Willany Thayse (Lanyinha), que em todos os momentos de bloqueio, sempre me ajudava, até mesmo com uma conversa para desopilar a mente. Você foi essencial nesse capítulo da minha vida, mais uma vez.

Aos Docentes que fizeram parte dessa minha jornada, agradeço a todos em especial ao Professor Fernando Cartaxo que me marcou com seu jeito peculiar em ministrar aula, sempre buscando compartilhar suas experiências.

A todos os funcionários da UFRPE, em especial ao Sr. Ricardo dos Santos, que sempre me oferecia um bom dia sorridente, xícara de café e uma conversa agradável sobre fatos curiosos da formação da Universidade e de sua vida.

Ao Programa de Pós-Graduação da UFRPE e ao PPEAMB pelo privilégio de viver essa experiência e por todo apoio.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, pela concessão da bolsa e pelo financiamento do projeto de dissertação.

## TÍTULO

### RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM ESCOAMENTO SUPERFICIAL LAMINAR COM BAIXO REYNOLDS GERADA PELO SOLO, VEGETAÇÃO E CULTURA SEMIÁRIDAS

## RESUMO

O fluxo superficial laminar raso é comum em lavouras e muitas vezes é associado à erosão em entressulcos, sendo determinado através dos números de Reynolds até 500 e o de Froude  $\leq 1$  ou  $> 1$ . Este trabalho teve o objetivo de investigar e verificar se de fato o número de Froude governa o fluxo raso com número de Reynolds na faixa de 1 a 100 e, portanto, se toda resistência hidráulica e energia gerada pelo arraste sobre o solo e a vegetação é governada pelas ondas gravitacionais, e assim captadas pelo número de Froude. Para tal foram considerados e analisados três experimentos realizados na região semiárida brasileira, com comportamento hidráulico de lâmina rasa com baixo número de Reynolds variando de 26 a 54, sob o uso das culturas agrícolas semiáridas Capim Elefante, Palma, Milho, consorcio Palma-Milho, e ainda, para a vegetação herbácea de ocorrência natural, Caatinga, e solo descoberto. A relação entre o coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) e o número de Froude se ajustam bem melhor que a relação coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) e o número de Reynolds, demonstrando que a resistência hidráulica gerada pelo arraste sobre o solo e a vegetação no escoamento laminar de baixo número de Reynolds é governada pelas ondas gravitacionais. Assim, os resultados aqui encontrados, suportam a relação encontrada por Cantalice et al. (2021) e suas afirmações de que o número de Froude governa o fluxo raso com baixos números de Reynolds.

## ABSTRACT

The shallow flow occurs typically under crops and is associated with interrill erosion, defined by Reynolds number until 500 and Froude number  $\leq 1$  or  $> 1$ . This work had to verify if the Froude number governs the shallow flow with low Reynolds, which means that all hydraulic resistance in shallow flow is dissipated by drag on the soil, and vegetation is governed by gravitational waves measured by Froude number. So, tree experiments were analyzed on Brazilian semiarid, in which were generated laminar surface flows with low Reynolds number varying among 26 to 54, under the following semiarid crops elephant grass, cactus, Cactus-Corn intercrops, and natural herbaceous vegetation, Shrub and bare soil. The Darcy-Weisbach coefficient and Froude number fitted much better the relationship between the Darcy-Weisbach coefficient and Reynolds number, showing the hydraulic resistance generated between shallow laminar flow with low Reynolds and drag on the soil and vegetation are governed by gravitation waves. Therefore, the present results support the relationship found by cantalice et al. (2021) that the Froude number governs the shallow laminar flow with low Reynolds.



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>2.1.</b>	<b>Geral</b> .....	14
<b>2.2.</b>	<b>Específicos</b> .....	14
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
<b>3.1.</b>	<b>Características hidráulica do escoamento superficial laminar</b> ....	15
<b>3.2.</b>	<b>Rugosidade criada pela vegetação no escoamento superficial laminar</b> .....	19
<b>3.3.</b>	<b>Coeficiente e tensão de arraste vegetal</b> .....	22
<b>3.4.</b>	<b>Transporte de massa induzido pelo fluxo</b> .....	23
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	26
<b>4.1.</b>	<b>Áreas do estudo</b> .....	26
<b>4.1.1.</b>	<b>Área Experimental 1</b> .....	26
<b>4.1.2.</b>	<b>Área Experimental 2</b> .....	27
<b>4.2.</b>	<b>Arranjo Experimental</b> .....	28
<b>4.2.1.</b>	<b>Tratamentos</b> .....	29
<b>4.3.</b>	<b>Avaliação das características hidráulicas do escoamento superficial raso</b> .....	31
<b>4.4.</b>	<b>Análise estatística</b> .....	33
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
<b>5.1.</b>	<b>Comportamento hidráulico dos escoamentos superficiais rasos ensaiados sob culturas agrícolas semiáridas e Neossolo descoberto</b> .....	34
<b>5.2.</b>	<b>Estudo da resistência hidráulica do escoamento superficial raso ensaiado sobre as diversas condições de culturas agrícolas semiáridas e solo descoberto</b> .....	37
<b>5.3.</b>	<b>Fluxo laminar governado pelo número de Froude para os escoamentos superficiais rasos sob condições de culturas semiáridas</b> .	40
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	48
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	49

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquematização da deformação de um elemento fluido entre duas placas. Fonte: Bernardino, 2005. ....	17
<b>Figura 2.</b> Mapa de localização dos municípios presentes na bacia hidrográfica do Pajeú, onde foram realizados os experimentos. ....	26
<b>Figura 3.</b> Aspecto da área experimental com montagem das parcelas experimentais sob o Neossolo Flúvico, e o Capim Elefante ao fundo em Tabira-PE. ....	29
<b>Figura 4.</b> Parcela experimental e simulador de chuvas montado sobre o Capim-Elefante com 45 dias de plantio em Tabira-PE (Pennisetum purpureum, Schum.). ....	30
<b>Figura 5.</b> Montagem do experimento na localidade de Carnaubinha em Triunfo - PE para o tratamento consórcio Palma e Milho. ....	31
<b>Figura 6.</b> Momento de execução do teste com simulação de chuva na parcela sob a Vegetação Herbácea (Triunfo - PE). ....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de solo descoberto, Capim-elefante, Milho e Palma em Neossolo Flúvico no município de Tabira-PE, experimento 1. Média de quatro repetições.....	34
<b>Tabela 2.</b> Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de solo descoberto, Capim Elefante com 45 dias e Capim Elefante com 180 dias em Neossolo Flúvico no município de Tabira-PE, experimento 2. ....	35
<b>Tabela 3.</b> Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de Vegetação herbácea de ocorrência natural, consorcio palma-milho e Caatinga em Cambissolo Háplico de Triunfo-PE, experimento 3.....	36
<b>Tabela 4.</b> Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 1 sob Capim Elefante; o Milho, a Palma e o Neossolo descoberto. Média de quatro repetições. ....	38
<b>Tabela 5.</b> Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 2 com Neossolo descoberto; Capim Elefante com 45 e 180 dias de plantados. Média de quatro repetições. ....	38
<b>Tabela 6.</b> Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 3, para vegetação herbácea natural; consorcio Palma-Milho e Caatinga. Média de quatro repetições. ....	39

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim Elefante ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1. ....	41
<b>Gráfico 2.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Milho ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1. ....	41
<b>Gráfico 3.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pela Palma ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1. ....	41
<b>Gráfico 4.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Neossolo descoberto ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1. ....	42
<b>Gráfico 5.</b> Análise conjunta de todos os fluxos laminares superficiais rasos do experimento 1, para todos os dados do experimento 1, ou seja, no escoamento sob o Capim Elefante, o Milho, a Palma, e Neossolo descoberto. ....	42
<b>Gráfico 6.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim-Elefante ( <i>Pennisetum purpureum</i> , Schum.) com 45 dias de plantado, ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2. ....	43
<b>Gráfico 7.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim-Elefante ( <i>Pennisetum purpureum</i> , Schum.) com 180 dias de plantado, ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2. ....	43
<b>Gráfico 8.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo Neossolo Flúvico descoberto ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2. ....	44
<b>Gráfico 9.</b> Análise conjunta de todos os fluxos laminar superficial rasos, para todos os dados do experimento 2, ou seja, para as condições hidráulicas sob o Capim Elefante com 45 e 180, e para o Neossolo Flúvico descoberto. ....	44
<b>Gráfico 10.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pela vegetação herbácea ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3. ....	45

<b>Gráfico 11.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pelo consórcio de Palma e Milho ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3. ....	45
<b>Gráfico 12.</b> Relação da resistência hidráulica gerada pela Caatinga ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3. ....	46
<b>Gráfico 13.</b> Análise conjunta de todos os fluxos laminar superficial rasos, para todos os dados do experimento 3, ou seja, para as condições hidráulicas sob a vegetação herbácea, consórcio de Palma e Milho e Caatinga. ....	46

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de avaliação e mitigação de impactos ambientais resultantes do manejo incorreto que acarreta pressão sobre os solos é imprescindível (Ayer et al., 2015). Problemas ambientais relacionados à erosão, transporte e deposição de sedimentos tem ganhado atenção especial. A erosão de solos cultivados tem sido exaustivamente investigada, devido a sua influência na perda da produtividade das mais variadas culturas (Higa et al., 2014).

A precipitação pluviométrica com alta intensidade e frequência, eleva as taxas de erosão. Quando associada as características de uma determinada região como relevo, solo (características físico-hídricas), uso e manejo incorreto do solo, a precipitação pluviométrica proporciona problemas ambientais, sociais e econômicos relevantes ao equilíbrio natural dos agrossistemas

O comportamento hidrológico da região semiárida brasileira apresenta características distintas e atua diretamente na dinâmica hidráulica da região (Cantalice et al., 2013).

A vegetação é de alta relevância no comportamento hidráulico do escoamento superficial. As espécies vegetais conseguem influenciar as características do fluxo como, a dinâmica, vazão e resistência do canal ao longo da coluna de água através dos seus indicadores estruturais que atuam sobre a resistência do escoamento, controle de erosões, transporte e deposição de sedimentos. Sua resistência ocorre através de suas características físicas como tamanho, formato, diâmetro, altura e forma de ramificação das raízes, ou seja, a vegetação age como um instrumento na retração hidráulica do escoamento superficial e no controle de erosão (Cantalice et al., 2017).

Cantalice et al. (2021) observaram a partir de muitos experimentos com escoamentos superficiais rasos em diversas condições de uso agrícola do solo/ ou cobertura vegetal do solo, que o coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) não se ajustam matematicamente bem com o número de Reynolds ( $Re$ ), como classicamente conhecida na literatura essa relação ou lei. Dessa forma, os supracitados autores encontraram e determinaram pela primeira vez, de que lâmina superficial rasa para baixos número de Reynolds de até 100, tem resistência hidráulica governada pelo número de Froude, ou seja, foi ajustada uma relação inédita entre a resistência hidráulica de Darcy-

Weisbach (f) e os valores de Froude para lâminas de escoamento raso com Reynolds até 100.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Investigar e verificar a aplicabilidade da relação encontrada por Cantalice et al. (2021) de que o número de Froude governa o fluxo raso com número de Reynolds na faixa de 1 a 100, quando toda resistência hidráulica e energia gerada pelo arraste sobre o solo e a vegetação é governada pelas ondas gravitacionais, e assim captadas pelo número de Froude.

### **2.2. Específicos**

- Avaliar se o comportamento do fluxo laminar raso é de fato governado pelo número de Froude para diferentes condições hidráulicas originadas por culturas agrícolas, conforme relação acima apresentada.
- Avaliar e comparar a resistência hidráulica através de regressão entre coeficiente de Darcy-Weisbach e os números de Reynolds e Froude;
- Avaliar o comportamento do coeficiente de rugosidade ( $f$ ) para diferentes culturas agrícolas;
- Avaliar a influência das diferentes culturas na atuação das forças gravitacionais por meio do número de Froude.



### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Características hidráulica do escoamento superficial laminar

O fluxo superficial raso sobre o solo pode ser definido (Aguilar e Ponce, 2014), como o escoamento que ocorre sobre o solo na forma de lâmina rasa claramente sem concentração em canais definidos, sendo esse tipo de fluxo a primeira forma do escoamento superficial que hidrológicamente muda tomando a forma de fluxo em canais e fluxo fluvial.

Ponce (2014), relata que a teoria de fluxo superficial raso usa métodos determinísticos para descrever o fluxo em planos, com base em estabelecidos princípios de mecânica de fluidos, com o fluxo laminar e fluxo turbulento, conservação de massa e energia, e ainda fluxo superficial livre e instável, por meio de equações diferenciais que descrevem o comportamento espacial e temporal, entregando soluções numéricas de grande relevância e aplicações práticas.

Assim e ainda segundo Ponce (2014), é possível equacionar o fluxo de superfície laminar através de equação de continuidade em resolução unidimensional, conforme Equação (1):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = ql \quad (1)$$

em que:  $ql$  é o fluxo lateral por unidade de comprimento ( $m^2 s^{-1}$ );  $Q$  é a descarga de água ( $m^3 s^{-1}$ );  $x$  é o comprimento na direção do fluxo (m);  $A$  é a área do contorno ( $m^2$ ) e  $t$  é o tempo (s). Esta equação unidimensional considera que o fluxo ocorre em uma superfície plana com comprimento (L) e largura infinita para inclinação (S).

Segundo Cantalice et al. (2017), as principais forças físicas atuantes no processo de fluxo superficial são a viscosidade cinemática da água, velocidade média do fluxo, e a vazão de água por unidade de largura. Através desses parâmetros hidráulicos citados acima, pode-se determinar outros parâmetros como fator de perda de carga, os números de Reynolds e Froude e a altura do fluxo da folha.

Há diversas forças que atuam sobre o escoamento, podendo-se destacar as forças de inércia, forças gravitacionais e forças viscosas (Bernardino, 2005). As forças de inércia que atuam no transporte de sedimento ainda são pouco

conhecidas. De acordo com Zhang et al., (2016), a inércia atua em três processos na dispersão do sedimento em canais abertos turbulentos, baseado na teoria de mistura bifásica para expressão teórica de velocidade: turbulência de mistura (sedimento e água), movimento aleatório de partícula e colisões entre partículas.

De acordo com Bernardino (2005), força de inércia ( $\vec{F}_i$ ), podem ser escritas como:

$$\vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho V_{ol} \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2)$$

A força da gravidade ( $\vec{F}_g$ ), pode ser descrita como:

$$\vec{F}_g = m \vec{g} = \rho V_{ol} \vec{g} \quad (3)$$

em que  $\rho$  é massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $V_{ol}$  é o volume do elemento fluido considerado ( $\text{m}^3$ );  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

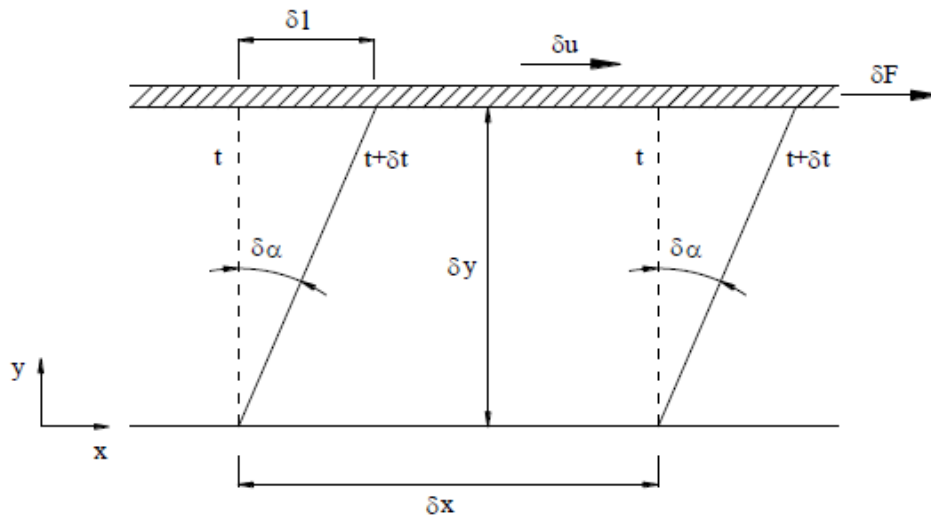
Para classificar o regime de escoamento, alguns adimensionais para as forças de inércia e gravitacional em função da massa específica, velocidade média na seção (ou aceleração da gravidade) e uma dimensão característica  $L$ , podem ser reescritas como:

$$F_i = \rho L^2 U^2 \quad (4)$$

$$F_g = \rho L^3 g \quad (5)$$

em que  $U$  é a velocidade média do escoamento da seção considerada;  $\rho$  é massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $g$  é a gravidade ( $\text{m/s}^2$ ); e  $L$  é uma dimensão linear específica típica.

Para equacionar forças viscosas, deve-se definir viscosidade, empregase a definição que o fluido se deforma continuamente sob ação de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ). A deformação continua pode ser exemplificada por um elemento fluido entre duas placas infinitas, onde a placa superior se move com velocidade constante  $\delta u$ , sob ação de uma força constante  $\delta F_x$ .



**Figura 1.** Esquematização da deformação de um elemento fluido entre duas placas. Fonte: Bernardino, 2005.

O presente plano definido do eixo  $y$ , primeiro índice, demonstra a atuação da tensão de cisalhamento  $\tau_{yx}$  ( $\text{N/m}^2$ ), e o segundo índice indica a direção ( $x$ ), na qual a tensão atua:

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A_y \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} \quad (6)$$

em que  $\delta A_y$  é a área do elemento fluido em contato com a placa.

A água pertence ao grupo dos fluidos newtonianos, onde, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional a taxa de deformação ( $\frac{du}{dy}$ ), ou seja, não variam com o tempo. A constante proporcional é chamada de viscosidade dinâmica ( $\mu$ ):

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}, \text{ ou seja,}$$

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (7)$$

É possível classificar os fluidos de acordo com os efeitos da viscosidade da gravidade. Portanto, as forças viscosas podem ser descritas como:

$$F_v = \mu \frac{du}{dy} A \quad (8)$$

em que  $\mu$  é a viscosidade dinâmica; o  $\frac{du}{dy}$  é a taxa de deformação; e  $A$  é a área molhada.

Quando utilizada com termos de velocidade média na seção, utilizando a dimensão característica  $L$ , pode-se descrever como:

$$F_v = \mu UL \quad (9)$$

em que  $\mu$  é a viscosidade dinâmica; o  $U$  é a velocidade média na seção; e  $L$  dimensão linear específica típica.

De acordo com Singh (1983), quando o escoamento raso e a consequente erosão são analisados em um plano inclinado que está sujeito a uma chuva constante de duração indefinida, pode ser derivada em das partes, o fluxo raso e fluxo de sedimentos, podendo ser descritos através de equações unidimensionais que funcionam para condição de largura unitária.

Singh (1981), aborda o escoamento superficial raso e a erosão em entressulcos ocorrente nas vertentes das bacias hidrográficas segundo a teoria da onda cinemática. As equações da teoria da onda cinemática consistem na equação de continuidade, relação de descarga de profundidade cinemática e equação de continuidade para sedimento. A modelagem requer especificações da geometria, equações cinemáticas, entrada, e condições iniciais e de limite. Portanto, esse fluxo raso é formulado conforme as equações 10 a 11.

Assim, para o fluxo de água a equação pode ser descrita como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha n h^{n-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q \quad (10)$$

$$Q = uh = \alpha h^n \quad (11)$$

em que  $h$  é profundidade de fluxo (L);  $u$  velocidade de fluxo de (L/T);  $Q$  descarga de água por unidade de largura (L<sup>2</sup>/T);  $q$  precipitação efetiva (L/T);  $t$  tempo;  $x$  coordenada espacial positiva na direção do fluxo;  $n$  expoente e um coeficiente de descarga de profundidade (L<sup>2</sup>/T).

As condições iniciais e de limite impostas na equação (10) será:

$$h(0, t) = 0, t \geq 0; \quad h(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (12)$$

As chuvas, tendo um período finito pode ser expresso como:

$$q(x, i) = q > 0, 0 < r < T; \quad q(x, t) = 0, t > T \quad (13)$$

em que:  $T > 0$  é a duração.

Para o sedimento, a equação pode ser descrita como:

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = Bq + \gamma(Kh^n - CQ) \quad (14)$$

em que  $C$  é concentração de sedimentos (F/L<sup>3</sup>);  $Q_s$  descarga de sedimentos por unidade de largura (F/TL) e é igual a  $CQ$ , coeficiente  $B$  (F/L<sup>3</sup>);  $\gamma$  é coeficiente (1/L); e  $K$  é coeficiente (F/TL<sup>1+n</sup>).

As condições iniciais e de limite impostas sobre a equação de sedimento são:  $C(0, t)$  é limitado por  $t > 0$  (15)

e  $C(x, 0)$  é limitado por  $x > 0$  (16)

### **3.2. Rugosidade criada pela vegetação no escoamento superficial laminar**

A taxa de infiltração em seu estado estacionário é fortemente influenciada pelas características da superfície do solo e pela quantidade de água que flui quando o solo atinge o ponto de saturação. A remoção da vegetação nativa e o manejo incorreto do solo acarreta alterações nas propriedades hidráulicas do solo (fluxo de escoamento e erosão), e chances de inundação (Leite et al., 2018).

A resistência hidráulica dos cursos d'água interferem no nível da água e a vazão na bacia (Wu et al., 1999). A resistência hidráulica gerada pela vegetação é fundamental para a restauração e conservação do solo. Apresentando ou não uma distribuição esparsa, a vegetação influencia no fluxo, transporte de sedimentos, distribuição de nutrientes e concentração de poluentes. Ela atua como fator de equilíbrio no sistema que está inserido entre o fluxo hidrodinâmico, transporte de massa e a geomorfologia. Porém, coloca (Cantalice et al., 2015), que efeito da vegetação gera complexidade aos processos hidrológicos. A compreensão da rugosidade gerada pela vegetação no escoamento é fundamental para entendimento e modelamento do fluxo em terras irrigáveis, canais e áreas úmidas.

A vegetação pode controlar o processo erosivo, mas há poucas informações de como a vegetação pode influenciar nesse controle em diferentes tipos de solo e cobertura. A compreensão da resistência hidráulica ao escoamento superficial é fundamental para o entendimento da dinâmica da erosão do escoamento impactada pela vegetação (Pan et al., 2016).

A presença de vegetação é capaz de alterar o campo de velocidade do fluxo em várias escalas, independentemente de sua população ou distribuição espacial. Ela desempenha um papel fundamental no comportamento do escoamento superficial laminar, por oferecer uma resistência ao movimento do fluxo decorrente de suas características físicas como tamanho, rigidez, diâmetro, altura, distribuição, densidade da planta e grau de submersão (Cantalice et al., 2017).

De acordo com Cantalice et al. (2019), há outros fatores que podem influenciar o fluxo através de resistência gerada pela vegetação como o número de Reynolds, morfologia da área, declividade e condições meteorológicas. Os autores ainda descrevem que é possível calcular a rugosidade hidráulica como uma função de velocidade ou regime do fluxo baseando-se na relação entre o coeficiente de arraste da planta ( $CD'$ ) e o número de Reynolds.

O escoamento laminar está associado a erosão entressulcos, resultante de quando o volume de precipitação se sobrepõe a taxa de infiltração do solo, após todos os processos como a interceptação das espécies vegetais, evaporação, retenção superficial e detenção (Cantalice et al., 2017).

Parâmetros hidráulicos, como a viscosidade cinemática da água, a velocidade do fluxo médio e a vazão da água por unidade de largura, são as principais forças físicas que atuam no fluxo das ondas (Cantalice et al., 2017). Esses parâmetros estão relacionados com outros parâmetros como o fator de perda de carga, os números de Reynolds e Froude e a altura do fluxo de chapa (Cantalice et al., 2019). A resistência ao fluxo exercida sobre a vegetação é geralmente classificada pela profundidade relativa do fluxo até a altura da vegetação (Wu et al., 1999).

Segundo Pan et al. (2016), os coeficientes de rugosidade hidráulica são importantes para calcular a velocidade do fluxo, profundidade da água e hidrogramas de escoamento. Os coeficientes de rugosidade são sensíveis aos processos hidrológicos terrestres. A dinâmica de erosão impulsionada pelo escoamento, como tensão de cisalhamento e potência de corrente unitária, são sempre um produto da velocidade do fluxo, profundidade da água e declive. O coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach e os coeficientes de Manning são frequentemente usados para descrever as características de rugosidade da superfície. O fator de atrito de Darcy-Weisbach é o coeficiente preferido na modelagem de escoamentos por apresentar expressões sem dimensões, possuir base teórica e ser utilizada em escoamentos laminares e turbulentos.

De acordo com Katz et al. (1995), a rugosidade do leito e o impacto da chuva afetam o atrito hidráulico no fluxo superficial. Em seu experimento os autores buscaram relacionar coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach com número de Reynolds e compará-los com pesquisas. Concluíram que é possível determinar o valor teórico fixo para escoamento, chegando ao valor 24 para

escoamento laminar suave. As medidas mostraram que a constante que relaciona o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach ao número de Reynolds pode se tornar maior do que o valor teórico para escoamento laminar suave. Tal resultado foi obtido através de uma análise da equação dinâmica, que mostrou que as forças de atrito eram muito maiores do que as forças resultantes de mudanças na pressão hidrostática e no momento.

Segundo Simons e Şentürk (1992) o número de Reynolds é definido através de uma comparação entre as forças inerciais e viscosas que atuam sobre o fluxo. É através de Reynolds que é possível determinar o tipo de escoamento presente do fluxo, podendo ser classificado como laminar, turbulento e de transição. O fluxo será caracterizado como laminar quando o número de Reynolds estiver abaixo de 500, o fluxo turbulento ocorre quando o número de Reynolds atinge o valor  $\geq$  a 2.000, e o fluxo de transição pode ocorrer quando o valor fica entre laminar e turbulento. O número de Reynolds é descrito como:

$$Re = \frac{U h}{\nu} \quad (17)$$

em que  $U$  é a velocidade média do escoamento;  $h$  é a altura da lâmina de escoamento; e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

O número de Froude ( $Fr$ ), adimensional responsável pela classificação do efeito da gravidade no canal, pode ser definida como a raiz quadrada da razão entre as forças de inércia com a da gravidade abaixo:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (18)$$

Assim, de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) é frequentemente utilizada devido à consistência nas dimensões, sendo determinada através da equação:

$$f = \frac{8ghS}{U^2} \quad (19)$$

em que  $h$  é a profundidade da água (m);  $U$  é a velocidade média ( $\text{ms}^{-1}$ );  $g$  é a aceleração devido à gravidade ( $\text{ms}^{-2}$ );  $S$  é a inclinação do declive da superfície (%) onde não existe aceleração de fluxo, ou seja, a superfície e as encostas do leito são paralelas; e  $q$  é a taxa unitária de fluxo ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

Dessa maneira, pode-se encontrar na literatura a lei entre o coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ) para

o escoamento superficial raso (Katz et al. 1995; Qian et al., 2016; Pan et al., 2016) na seguinte forma exponencial:

$$f = kRe^{-b} \quad (20)$$

em que  $k$  e  $b$  são coeficientes de ajuste para fluxo laminar com valor teórico de  $b$  igual a 1, e  $K$  sendo um valor teórico de resistência laminar com valor de 24.

Entretanto, Cantalice et al. (2021) observaram a partir de trinta e dois (32) escoamentos rasos em diversas condições de uso agrícola do solo/ ou cobertura vegetal do solo, um comportamento hidráulico de lâmina rasa com baixíssimo número Reynolds variando de 7 a 100 em que a relação entre o coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) e o número de Reynolds ( $Re$ ) não possuem um ajuste matemático.

A partir dessa constatação esses autores, buscando melhores ajustes da resistência hidráulica com os parâmetros de fluxo laminar raso encontraram e determinaram pela primeira vez, de que lâmina superficial rasa para baixos número de Reynolds tem resistência hidráulica governada pelo número de Froude, ou seja, toda energia gerada pelo fluxo em contato com os elementos vegetais, e com o solo é dissipada pelas ondas gravitacionais por conta da condição de lâmina muito delgada, tornando-se o fluxo um escoamento raso gravitacional ou fluxo dominado pelos efeitos gravitacionais.

### 3.3. Coeficiente e tensão de arraste vegetal

A vegetação é o meio mais eficiente para mitigar os impactos causados pela erosão em canais de irrigação e drenagem, bem como em margens de rios (Wilson, 2007). De acordo com Cantalice et al. (2019), o coeficiente de arraste vegetal ( $CD'$ ), representa a resistência gerada pela vegetação no fluxo em movimento. O ( $CD'$ ) pode ser expresso assumindo que a o força gravitacional atuante no processo será igual ao arraste vegetal e que o atrito presente na parte inferior do sistema analisado será insignificante quanto a presença de espécies vegetais, conforme a equação (21) apresentada abaixo:

$$C_D' = \alpha \frac{2gS}{U^2} \quad (21)$$

em que  $\alpha = h / y$ ; e  $y$  é a espessura da vegetação (m); e  $h$  a espessura de lâmina.

A força de resistência vegetal ou tensão de arraste vegetal, inicialmente foi estudada em canal de laboratório decorrente de um fluxo com segmento



vertical com espécies vegetais simuladas, em múltiplos arranjos espaciais e sendo definida como força ou tensão de resistência gravitacional vegetal total como:

$$\tau_{Drag} = \frac{C_D' \alpha \rho U^2}{2} \quad (22)$$

em que  $\tau_{Drag}$  ou  $F_{Drag}$  é a força de resistência vegetal ( $N\ m^{-3}$ );  $\alpha$  é a área total projetada da planta por unidade de volume ( $m^2\ m^{-3}$ ) dado o diâmetro das folhas;  $\rho$  é a densidade da água ( $kg\ m^{-3}$ );  $C_D'$  é o coeficiente de arraste vegetal ( $m^{-1}$ ); e  $U$  é a velocidade média do fluxo entre as plantas ( $m\ s^{-1}$ ).

Cantalice et al. (2021) também observaram que o coeficiente de arraste vegetal ( $C_D'$ ) foi dominado e governado pelas ondas gravitacionais, para lâmina de escoamento superficial raso sob baixo número de Reynolds, entre 7 a 100, considerando a resistência vegetal criada por Caatinga semi-arbustiva, Feijão Guandu e Batata Doce, além de terem avaliado também, o solo descoberto.

### 3.4. Transporte de massa induzido pelo fluxo

Os processos hidrológicos desempenham papéis importantes nos processos de erosão do solo (Qian et al., 2016). Existem fatores que influenciam o transporte de sedimentos induzido pelo fluxo, em destaque para inclinação, a cobertura do solo e a rugosidade da superfície, porém, o impacto da chuva através das gotas, é o principal fator que conduz a erosão em entressulcos, resultando na desagregação do solo e transporte do sedimento por indução do fluxo (Cantalice et al., 2019). O processo de desagregação está ligado à descarga de água por unidade de largura  $q$  ( $m^2\ s^{-1}$ ), expressa na seguinte modelagem do WEEP (Flanagan & Nearing, 1995):

$$D_i = K_i i^2 S_f C_i \quad (23)$$

em que  $D_i$  é a taxa de desprendimento do solo na erosão entre sulcos ( $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ );  $K_i$  é o fator de erodibilidade em entressulcos ( $kg\ s\ m^{-4}$ );  $i$  é a intensidade da chuva ( $m\ s^{-1}$ );  $S_f$  é o fator de inclinação (adimensional) e  $C_i$  é o coeficiente de cobertura vegetal (adimensional).

Quando os efeitos de infiltração da água, as taxas de desagregação do solo em entressulcos e o excesso de precipitação estão presentes na situação que está sendo analisada, a modelagem pode ser expressa conforma equação abaixo:

$$D_i = K_i I R S_f \quad (24)$$

em que  $I$  é a infiltração da água; e  $R$  é excesso de precipitação ( $\text{ms}^{-1}$ ).

De acordo com Cantalice et al. (2017), existem dois processos responsáveis pela erosão do solo causada pelo fluxo da água, são eles: a desagregação do solo e o fluxo superficial. Esses processos ocorrem devido a ação das gotas da chuva e o transporte de solo desprendido pelo fluxo laminar raso acarretando a erosão entressulcos.

A erosão do solo está associada ou manejo do solo em áreas agrícolas. Acredita-se que o uso incorreto como o preparo excessivo do solo, queima, criação de pasto, entre outros é responsável por 50% do processo erosivo em áreas cultivadas. Há três variáveis que estão interligadas e atuam fortemente sobre a potencialidade da erosão (taxa de erosão), sendo elas: a chuva, tipo de solo e a declividade. Diversos experimentos em campo e em laboratório chegaram à conclusão de que quanto maior a declividade, maior será a taxa de erosão. Eles afirmam que este processo está atribuído ao aumento de velocidade do fluxo e conseqüentemente o transporte de massa. O processo torna-se complexo quando há a inclusão de outras variáveis capazes de alterar o desprendimento e transporte de sedimento por fluxo e gotículas da chuva, como: a variação de infiltração, escoamento, saturação do solo (força coesa) e profundidade da água. A infiltração irá atuar diretamente nas relações entre erosão e declividade, sendo responsável pelo controle da descarga (Armstrong et al., 2011; Liu et al., 2011; Cantalice et al., 2017).

A erosão em entressulcos é uma importante fonte de sedimentos para terras sem cobertura vegetal, e identificado como o provedor da degradação da qualidade do solo e água. A erosão entressulcos pode ser caracterizada como o produto de dois subprocessos: respingo e dinâmica de lavagem, onde o respingo se sobressai ao processo da dinâmica de lavagem. A declividade atua diretamente no processo de lavagem quanto ao peso de partículas em solos compactados, ou seja, solos compactados podem afetar e relação entre a perda de lavagem e a inclinação gradiente (Fu et al., 2011).

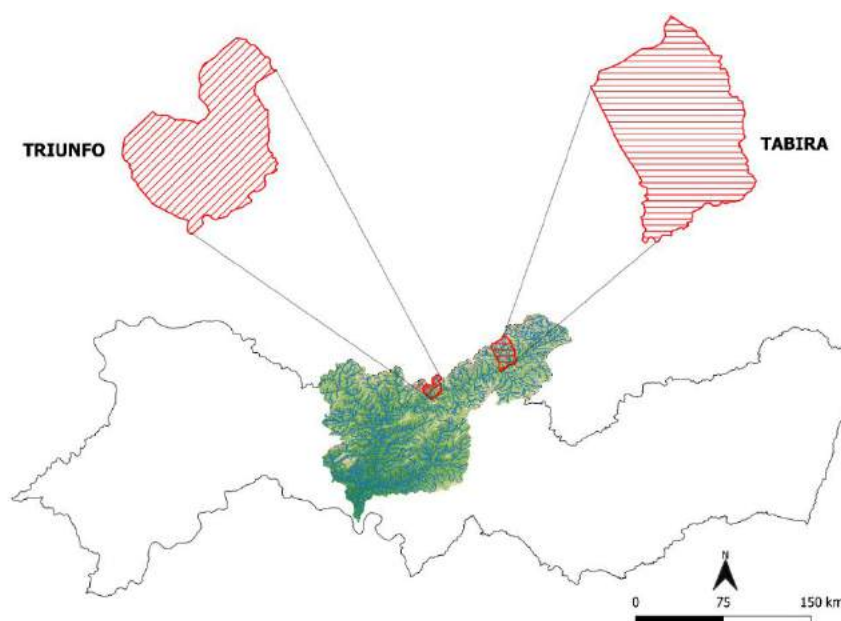
A erosão do solo é um obstáculo no desenvolvimento sustentável da agricultura, sendo o seu controle a principal questão ambiental discutida. A implementação eficiente de medidas de conservação do solo só é possível por meio de uma combinação de considerações científicas, socioeconômicas e

políticas. (Liu et al., 2011). Embora a inclinação e a erosão estejam relacionadas, processos relativos a quantidades e origem do escoamento, quanto a extensão, profundidade e distribuição de velocidade, podem aumentar as taxas de erosão do solo em encostas baixas (Wainwright et al., 2008).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Áreas do estudo

Foi realizado um levantamento de dados do Laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo, com experimentos que apresentassem escoamento laminar raso com baixo número de Reynolds. Foram selecionados 3 experimentos com parcelas experimentais submetidas a repetições, totalizando 40 parcelas, que foram conduzidas sob chuva simulada para geração de escoamento laminar raso, e o consequente estudo de seu comportamento hidráulico. Os experimentos foram executados na região de semiárido brasileiro, sendo dois desses experimentos realizados na localidade conhecida como Nova Espanha no município de Tabira, Pernambuco. O terceiro experimento foi realizado na localidade de Carnaubinha na cidade de Triunfo - PE, também no ambiente semiárido de Pernambuco.



**Figura 2.** Mapa de localização dos municípios presentes na bacia hidrográfica do Pajeú, onde foram realizados os experimentos.

#### 4.1.1. Área Experimental 1

De acordo com o CPRM (2005), o município de Tabira está localizado na parte boreal da mesorregião do Sertão Pernambucano, região semiárida, porção setentrional Estado de Pernambuco, situada a uma altitude de 380 metros,

estando inserido na bacia hidrográfica do rio Pajeú, tendo o Rio Pajeú 286 km de extensão (CPRM, 2005; Freire et al., 2011).

O município de Tabira tem como principal corpo hídrico de acumulação o açude Tabira, tendo como contribuintes da bacia os riachos do Morato, Cachoeira, Bandeira, Cachoeira Grande, Saco, do Saguim, da Barra, da Tabira e Alagadinho. Todos os corpos possuem regime de fluxo intermitente. A vegetação predominante do tipo caatinga Hiperxerófila. O clima é classificado como é semi-árido quente e tropical quente de acordo com a classificação de Koeppen, tendo temperatura média anual de 27°C, com pluviométrica anual é de 806 mm, tendo maiores ocorrências pluviométricas de março e abril (CPRM, 2005).

O experimento foi desenvolvido em uma propriedade privada na zona rural, Comunidade Nova Espanha no município de Tabira, coordenadas 7°32'12.22"S; 37°29'18.78"O, distando 8 km da sede do município.

O solo identificado nos experimentos de Tabira, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo da EMBRAPA (2013), foi um Neossolo Flúvico, e segundo a EMBRAPA (2018), são solos derivados de sedimentos aluviais com horizonte A assente sobre camada ou horizonte C e que apresentam caráter flúvico dentro de 150 cm a partir da superfície do solo, portanto, apresentando camadas estratificadas, identificadas por variações irregulares de granulometria ou de outros atributos do solo em profundidade, e do conteúdo de carbono orgânico em profundidade, não relacionada a processos pedogenéticos. São pouco evoluídos apresentando camadas de sedimentos sem relações pedogenéticas.

#### **4.1.2. Área Experimental 2**

A localidade de Carnaubinha localizada em Truinfo-PE, onde foi realizado o terceiro experimento georreferenciado como 07° 53' 40" S; 38° 03' 38" O; 490 m de altitude), localiza-se na baixada da Serra da Baixa Verde apresentando relevo plano, embora grande parte do município de Triunfo situe-se no topo da referida Serra. A região apresenta clima do tipo BSh, típico do Semiárido brasileiro, quente e seco, com temperatura média anual de 23,4 °C e precipitação média anual de 591,1 mm, APAC (2020), e vegetação Caatinga Hipoxerófila.

Triunfo encontra-se inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, com os riachos da Velha, da Carnaubinha e da Oiticica os principais cursos de água, com regime de escoamento intermitente com padrão de drenagem dendrítico (CPRM, 2005).

O solo identificado e classificado em Carnaubinha, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo da EMBRAPA (2013), foi um Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico, de acordo com a classificação realizada por Souza et al. (2010). Segundo a EMBRAPA (2018), esses solos são constituídos por material mineral com caráter carbonático em um ou mais horizontes ou com horizontes cálcicos. Apresentam teores de argila de atividade baixa e saturação por base  $\geq 50\%$ , na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.

#### **4.2. Arranjo Experimental**

Os experimentos em Tabira - PE, foram realizados no período de 04 e 07 de abril de 2017 e 19 a 23 de fevereiro de 2018, enquanto o experimento realizado na localidade de Carnaubinha em Triunfo, ocorreu entre os dias 11 e 12 de fevereiro de 2020.

Em todos os experimentos os escoamentos superficiais foram gerados por chuvas simuladas em parcelas experimentais sob o uso de culturas agrícolas semiáridas. As chuvas ocorreram sobre as parcelas experimentais com área de 2 m<sup>2</sup> (1 m de largura por 2 m de comprimento), delimitadas por chapas metálicas com 30 cm de altura, inseridas no solo a 20 cm de profundidade conduzidas em declive segundo o declive local. As parcelas possuíam uma abertura para saída e coleta do escoamento superficial e do sedimento transportado. Após realização dos experimentos as amostras foram direcionadas ao Laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo - LEMCS da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE.

O simulador de chuva foi desenvolvido no referido laboratório, de acordo com o modelo elaborado por Meyer e Harmon (1979). Consiste em um aspersor do tipo Veejet 80-150 oscilante com diâmetro interno de 1/2 polegada, montado em quatro pernas de alumínio que se estendem 3,1 m acima do solo e opera sob uma pressão constante de 41 Pa, proporcionando chuvas semelhantes em tamanho de gota e energia cinética de eventos de chuvas naturais. O simulador

foi abastecido por reservatórios localizados dentro das propriedades, por meio de uma bomba sápo, garantindo disponibilidade e vazão constante. A umidade inicial do solo foi determinada para cada tratamento, a partir de amostras de solo coletadas antes de cada ensaio experimental, as quais foram acondicionadas em recipientes, vedadas e direcionadas ao laboratório para determinação da umidade.

Os testes consistiram em chuvas simuladas em 4 repetições para cada experimento, totalizando 40 parcelas experimentais. A intensidade da precipitação em cada teste foi determinada a partir do volume coletado dos 10 pluviômetros colocados ao acaso ao lado das parcelas.

#### 4.2.1. Tratamentos

O primeiro experimento, realizado na localidade de Nova Espanha, Tabira adotou-se os seguintes tratamentos: Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 45 dias de desenvolvimento vegetativo após plantio, espaçado de 1 m entre as linhas e 0,4 m entre touceiras; Milho (*Zea mays* L.) com espaçamento de 1 m entre as linhas e 0,5 m entre plantas, apresentando altura de variando entre 0,50 a 0,70 m; Palma Forrageira (*Opuntia ssp*); e solo descoberto (Neossolo flúvico) (Figura 4).



**Figura 3.** Aspecto da área experimental com montagem das parcelas experimentais sob o Neossolo Flúvico, e o Capim Elefante ao fundo em Tabira-PE.

O segundo experimento, também realizado em Tabira, adotou os tratamentos descritos a seguir: Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 45 dias apresentando altura média de 0,8 m e, espaçados de 1 m entre linhas e 0,4 m entre touceiras (figura 5); Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 180 dias de cultivo, 1,6 m de altura e, espaçados de 1 m entre linhas e 0,4 m entre touceiras; solo descoberto (Neossolo flúvico) (Figura 5).



**Figura 4.** Parcela experimental e simulador de chuvas montado sobre o Capim-Elefante com 45 dias de plantio em Tabira-PE (*Pennisetum purpureum*, Schum.).

O terceiro experimento (Carnaubinha em Triunfo), adotou-se os tratamentos Caatinga Hipoxerófila semi-arbustiva; consórcio entre Palma Forrageira (*Opuntia ssp*) e Milho (*Zea mays L.*) apenas com 20 dias de plantio, com espaçamento de 1,5 e 1 m entre as linhas (Palma e milho), e em entrelinhas 0,40 e 0,5 mm entre plantas; e vegetação herbácea de ocorrência natural (Figura 7). O Milho apresentou plantas pouco desenvolvidas com altura de 0,10 m (Figura 6). A Vegetação herbácea natural. A vegetação herbácea ocorrida sob o Cambissolo constituiu-se de *Pteridófitas* e *Cyperaceas*.





**Figura 5.** Montagem do experimento na localidade de Carnaubinha em Triunfo - PE para o tratamento consórcio Palma e Milho.



**Figura 6.** Momento de execução do teste com simulação de chuva na parcela sob a Vegetação Herbácea (Triunfo - PE).

#### **4.3. Avaliação das características hidráulicas do escoamento superficial raso**

Conforme explanação no referencial teórico, o fluxo raso constituído de milímetros de chuva movendo-se na superfície do solo, sendo que essa caracterização se dá através dos parâmetros do número de Reynolds até 500, e

o número de Froude  $\leq 1$  ou  $> 1$  para o escoamento laminar. Assim o número de Reynolds e de Froude foram calculados conforme as equações (17) e (18).

A velocidade média do escoamento foi determinada através do método utilizado por Pan et al. (2016), que utiliza a velocidade superficial do escoamento superficial ( $V_s$ ) multiplicada por um fator de correlação  $\alpha$ , conforme a Equação (26):

$$U = \alpha V_s \quad (26)$$

em que  $U$  é a velocidade média ( $m\ s^{-1}$ );  $\alpha$  é o fator de correção Julgado pelo número de Reynolds do fluxo, a estrutura vertical do fluxo foi assumida como um regime laminar, assumindo o valor de 0,67.

A velocidade superficial ( $V_s$ ) do escoamento raso foi determinada em função do tempo ( $T_c$ ) em que um corante (azul metila) leva para percorrer a distância ( $D_c$ ) entre o ponto de aplicação e o vertedor de uma parcela amostral. A  $V_s$  é descrita como:

$$V_s = \frac{D_c}{T_c} \quad (27)$$

em que  $V_s$  ( $m^2\ s^{-1}$ ) é a velocidade de superfície;  $D_c$  (m) é a distância entre o ponto de aplicação o vertedor;  $T_c$  (s) tempo em que o corante percorre.

O fator de correção utilizado no experimento foi o mesmo utilizado por Bezerra e Cantalice (2006), em que utilizaram um  $\alpha = 2/3$  para obter-se a velocidade média do fluxo (m) em  $m\ s^{-1}$  de cada ensaio experimental.

A descarga líquida por unidade de largura ( $q$ ) foi determinada através do volume coletado (ml) na saída da parcela experimental durante intervalo cronometrado para coletas de 30, 15 e 10 segundos. Então, o volume coletado foi convertido para  $m^3\ s^{-1}$  e posteriormente dividido pela largura da parcela, resultando na vazão unitária em  $m^2\ s^{-1}$ .

A altura da lâmina foi determinada através do método proposto por Woolhiser & Liggett (1967)

$$h = \frac{q}{U} \quad (28)$$

em que  $h$  é a altura da lâmina de escoamento (m);  $q$  é a descarga líquida por unidade de largura ( $m^2\ s^{-1}$ ); e  $U$  é a velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ ).

As taxas de infiltração ( $T_i$ ,  $mm\ h^{-1}$ ) de água no solo foram obtidas pela diferença entre a intensidade de precipitação ( $mm.h^{-1}$ ) e a taxa de escoamento superficial (ES) convertida em ( $mm.h^{-1}$ ):

$$T_i = PT - ES \quad (29)$$

O coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach ( $f$ ) foi usado para determinar a resistência hidráulica no escoamento superficial, conforme equação (20).

O coeficiente de arraste vegetal ( $C_D'$ ), e a tensão de arraste ou força de resistência vegetal total, representam a resistência gerada pela vegetação no fluxo em movimento, conforme Equações (21) e (22).

#### **4.4. Análise estatística**

O delineamento dos experimentos adotado foi blocos ao acaso, sempre com 4 repetições para os tratamentos adotados nos 3 experimentos realizados. Os resultados obtidos foram submetidos à ANOVA e comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, por meio do emprego Software SISVAR 4.1, e o programa Excel para realização das regressões obtidas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Comportamento hidráulico dos escoamentos superficiais rasos ensaiados sob culturas agrícolas semiáridas e Neossolo descoberto

Diversos experimentos de hidráulica de fluxo superficial raso tem sido realizado com tratamentos em gradientes de declive variados, utilizam chuvas simuladas com a finalidade de compreender a dinâmica do solo, fluxo e transporte de componentes (Fu et al., 2021; Pan et al., 2016; Cantalice et al., 2019; Wang et al., 2017).

Assim, como se observa na tabela 1, a velocidade média do escoamento superficial ( $V_m$ ) no presente estudo, foi menor sob o solo descoberto, o que não é de se esperar, no entanto, isso deveu-se ao revolvimento do solo descoberto infiltrar mais água, o que ocasionou rebatimento na redução da velocidade média do escoamento superficial.

**Tabela 1.** Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de solo descoberto, Capim-elefante, Milho e Palma em Neossolo Flúvico no município de Tabira-PE, experimento 1. Média de quatro repetições.

Tratamento	$V_m$ ( $m\ s^{-1}$ )	$q$ ( $m^2\ s^{-1}$ )	$h$ (mm)	Taxa de infiltração ( $mm.h^{-1}$ )
Capim Elefante	0,037 ab	2,872-05 c	1,061 a	47,622 a
Milho	0,049 ab	3,744-05 bc	0,774 a	39,126 a
Palma	0,055 a	5,985-05 a	1,1400 a	2,754 b
Neossolo descoberto	0,033 b	4,386-05 a	1,380 a	17,198 ab

**Legenda:**  $V_m$  = velocidade média do escoamento;  $q$  = descarga líquida ( $m^2\ s^{-1}$ );  $h$  = altura da lâmina de escoamento (mm). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

A maior velocidade média ocorrida foi para o escoamento superficial sob a condição gerada pela palma, o que se deve ao fato de que a superfície do solo fica sem qualquer revolvimento nessa cultura, e como o mesmo permaneceu descoberto, possibilitou o desenvolvimento de uma crosta superficial que

impediu a infiltração (tabela 1) e, conseqüentemente, deu origem a uma maior descarga líquida com maior velocidade do escoamento superficial. O solo descoberto infiltrou mais água que a palma, pelo revolvimento que houve em sua superfície no preparo das parcelas experimentais, embora tenha sido igual a palma quanto a descarga líquida.

Os valores de altura de lâmina do escoamento superficial raso não diferiram, embora Zhao & Li (2013) terem afirmado que a altura da lâmina de escoamento é maior para solo coberto do que para solo descoberto.

Na tabela 2 encontram-se algumas das características hidráulicas do escoamento superficial raso ocorrido e gerado pelas simulações de chuva sobre o solo descoberto, o Capim Elefante com 45 dias e o Capim Elefante com 180 dias em um Neossolo Flúvico na localidade de Nova Espanha, Tabira-PE.

**Tabela 2.** Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de solo descoberto, Capim Elefante com 45 dias e Capim Elefante com 180 dias em Neossolo Flúvico no município de Tabira-PE, experimento 2.

Tratamento	Vm (m s <sup>-1</sup> )	q (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	h (mm)	Taxa de infiltração (mm.h <sup>-1</sup> )
Capim Elefante (45 dias)	0,0205 b	3,13E-05 ab	1,5647	a
Capim Elefante (180 dias)	0,0241 b	2,41E-05 b	1,0690	a
Neossolo descoberto	0,0451 a	4,55E-05 a	1,0307	a

**Legenda:** Vm = velocidade média do escoamento; q = descarga líquida (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>); h = altura da lâmina de escoamento (m). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

Observa-se na referida tabela acima, que neste experimento a velocidade média do escoamento superficial para os tratamentos vegetados, com o capim Elefante apresentaram valores menores que o Neossolo Flúvico descoberto, o que se deve ao porte denso do capim elefante que gera resistência hidráulica e dificuldade ao livre movimento escoamento superficial. A densidade e também, a estrutura na forma de dossel do capim Elefante além da diminuição da velocidade do escoamento, também causaram interceptação vegetal, que

resultou em diminuição da descarga líquida, o que se pode conferir na condição do capim elefante passando de 45 para 180 dias de plantio.

O mesmo efeito da interceptação vegetal observa-se nas taxas de infiltração de água no Neossolo Flúvico, quando os maiores valores infiltrados ficaram para o capim Elefante aos 180 dias de plantado. Como no experimento 1, a altura da lâmina do escoamento superficial raso, não apresentou diferença significativa entre a superfície do solo cultivado com o capim Elefante e descoberta, o que pode atribuir-se ao porte mais elevado do capim elefante, que intercepta bastante volume de chuva, mas não causa sobre-elevação da lâmina de escoamento.

Os resultados obtidos no experimento 2, afirmam a o que está de acordo com Cantalice et al. (2017), que relatam que a descarga por unidade de largura ( $q$ ), aumenta linearmente devido a pequenas coberturas do solo em encostas, e que o coeficiente de escoamento é maior em declives maiores, comprovando que a declive é fundamental na formação do escoamento superficial raso.

Na tabela 3, consta o comportamento hidráulico do escoamento superficial raso obtido no experimento 3 nas condições de vegetação herbácea natural com 20 dias, consorcio de Palma-milho e do Cambissolo descoberto.

**Tabela 3.** Características hidráulicas de escoamento superficial raso gerado pelas chuvas simuladas nas condições de Vegetação herbácea de ocorrência natural, consorcio palma-milho e Caatinga em Cambissolo Háplico de Triunfo-PE, experimento 3.

Tratamento	$V_m$ ( $m\ s^{-1}$ )	$q$ ( $m^2\ s^{-1}$ )	$h$ (mm)	Taxa de infiltração ( $mm.h^{-1}$ )
Vegetação herbácea	0,040 a	4,78E-05 a	1,176 b	36,157 a
Consorcio Palma e Milho	0,021 b	2,85E-05 b	1,398 ab	44,53 a
Caatinga	0,020 b	4,81E-05 a	2,567 a	37,612 a

**Legenda:**  $V_m$  = velocidade média do escoamento;  $q$  = descarga líquida ( $m^2\ s^{-1}$ );  $h$  = altura da lâmina de escoamento (m). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

Neste terceiro experimento a taxa de descarga superficial além de diferir, apresentou o menor valor para o consorcio Palma-milho, e a velocidade média dessa descarga líquida foi também menor para o consorcio Palma-Milho, acompanhado do escoamento sob a Caatinga.

Nesse experimento 3, a altura da lâmina de escoamento superficial raso foi alterada pela vegetação da Caatinga que lhe causou sobre-elevação, como é de se esperar (Zhao & Li, 2013). As taxas de infiltração de água foram iguais para as três situações estudadas, o que se deve por todas as três superfícies estarem cobertas com vegetação, pode-se supor.

Os valores infiltrados de água no experimento 3, não diferiram, por estarem as 3 superfícies cobertas por vegetação, no entanto, Juan et al. (2013) estudaram o processo de infiltração no solo e afirmam que o processo não se trata apenas por movimentos da água vertical, mas inclui também em seu processo uma mecânica ascendente e lateral. Os Principais parâmetros que influenciam o processo de infiltração da água no solo é a cobertura vegetal, tipo de vegetação, e gradiente de declive.

Ainda se observa que em todos em experimentos (tabelas 1, 2 e 3), as taxas de descarga líquida sempre foram maiores par o solo descoberto, o que se justifica pela ausência de resistência vegetal gerada pelas estruturas das vegetações.

## **5.2. Estudo da resistência hidráulica do escoamento superficial raso ensaiado sobre as diversas condições de culturas agrícolas semiáridas e solo descoberto**

Abaixo apresenta-se os resultados das análises de variância e testes de comparações de média das variáveis de resistência hidráulica determinada via o coeficiente de Darcy-Weisbach, números de Reynolds e Froude, e declividade, para uma serie de escoamentos laminar superficiais rasos gerados por chuvas simuladas, considerando-se para as culturas agrícolas semiáridas aqui já descritas, pela vegetação herbácea e pela Caatinga, além de um Neossolo descoberto.

O tratamento Milho, experimento 1 (tabela 4), apresentou um valor do coeficiente (f) menor que o Neossolo descoberto, o que resulta da velocidade

média, que apresentou o maior valor, conforme Tabela 1. Ou seja, quanto maior a resistência hidráulica gerada menor será a velocidade.

**Tabela 4.** Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 1 sob Capim Elefante; o Milho, a Palma e o Neossolo descoberto. Média de quatro repetições.

Tratamento	<i>f</i>		Re		Fr		S (m m <sup>-1</sup> )	
Capim Elefante	62,895	a	30,850	b	0,356	a	0,047	a
Milho	1,387	a	40,324	b	0,604	a	0,047	a
Palma	2,146	a	69,115	a	0,539	a	0,059	a
Neossolo descoberto	5,662	a	48,847	b	0,312	a	0,043	a

**Legenda:** *f* = rugosidade hidráulica (coeficiente de Darcy Weisbach); Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; S = Declividade (m/m). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

O tratamento Solo descoberto, experimento 2, apresentou a menor resistência hidráulica e o resultado se dá pela ausência de estruturas vegetais, ou seja, ausência da resistência gerada pela vegetação no fluxo em movimento, conforme resultados de Cantalice et al. (2017).

**Tabela 5.** Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 2 com Neossolo descoberto; Capim Elefante com 45 e 180 dias de plantados. Média de quatro repetições.

Tratamento	<i>f</i>		Re		Fr		S (m m <sup>-1</sup> )	
Capim Elefante (45 dias)	21,4981	a	34,8784	ab	0,1843	b	0,0524	a
Capim Elefante (180 dias)	13,5830	ab	26,8286	b	0,2698	b	0,0595	a
Neossolo descoberto	3,1066	b	50,617	a	0,5146	a	0,0619	a

**Legenda:** *f* = rugosidade hidráulica (coeficiente de Darcy Weisbach); Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; S = Declividade (m/m) Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.



No experimento 2 (tabela 5), houve diferença estatística entre os tratamentos, o resultado é justificado pelo desenvolvimento da cultura, onde o *Pennisetum purpureum*, Schum com 45 dias apresenta uma maior rugosidade hidráulica, sendo justificada pelo maior contato entre estruturas vegetais e superfície do solo, e que conseqüentemente interceptam a chuva.

**Tabela 6.** Características de resistência hidráulica, de movimento e gravitacionais do escoamento superficial raso do experimento 3, para vegetação herbácea natural; consorcio Palma-Milho e Caatinga. Média de quatro repetições.

Tratamento	<i>f</i>		Re		Fr		S (m m <sup>-1</sup> )	
Vegetação herbácea	4,360	a	54,191	a	0,386	a	0,074	a
Consortio Palma e Milho	22,289	a	32,296	b	0,215	b	0,074	a
Caatinga	54,218	a	54,619	a	0,152	b	0,073	a

**Legenda:** *f* = rugosidade hidráulica (coeficiente de Darcy Weisbach); Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; S = Declividade (m/m). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey a 5%.

Os valores do número de Re apresentados em todos os tratamentos variam de 26 a 69, confirmando sua caracterização como fluxo laminar, conforme afirmações de Katz et al. (1995); Pan et al. (2016); Cantalice et al. (2017) e Catalice et al. (2021), onde escoamentos com  $Re < 500$  são classificados como laminar.

Os números de Fr em todos os tratamentos apresentaram valores inferiores a 1, sendo classificados com regimes de fluxo subcríticos. Tal afirmação vai de acordo com Pan et al. (2016), que descreve os tipos de regimes como fluxo subcríticos ( $Fr < 1$ ), e supercríticos ( $Fr > 1$ ). Os autores afirmaram que o Fr tende a aumentar conforme a S aumenta, tendo os resultados obtidos de acordo com as afirmações dos autores. Os valores para o Número de Froude (Fr), diminuem conforme a rugosidade hidráulica (*f*) e a declividade (S) aumentam, sendo o inverso ao número de Re.

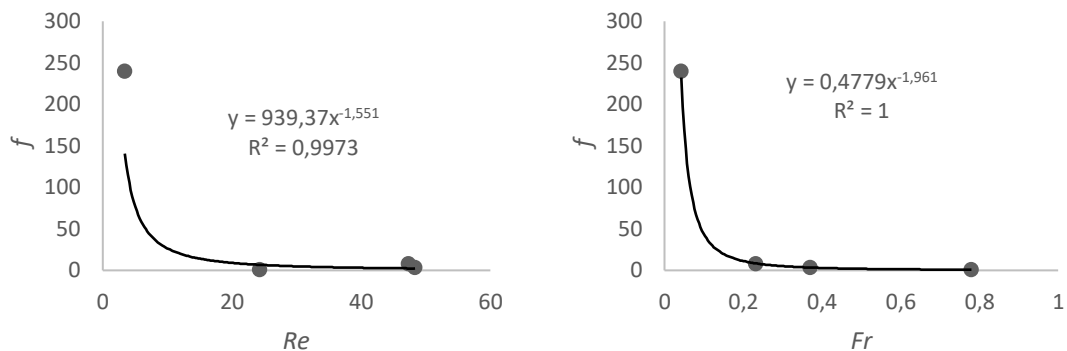
Ao analisar os resultados obtidos quanto ao escoamento superficial raso, nos experimentos 1 e 3 (tabelas 4 e 6), a rugosidade hidráulica não diferiu,

estatisticamente, para as diferentes condições hidráulicas influenciadas pelo solo e culturas semiáridas.

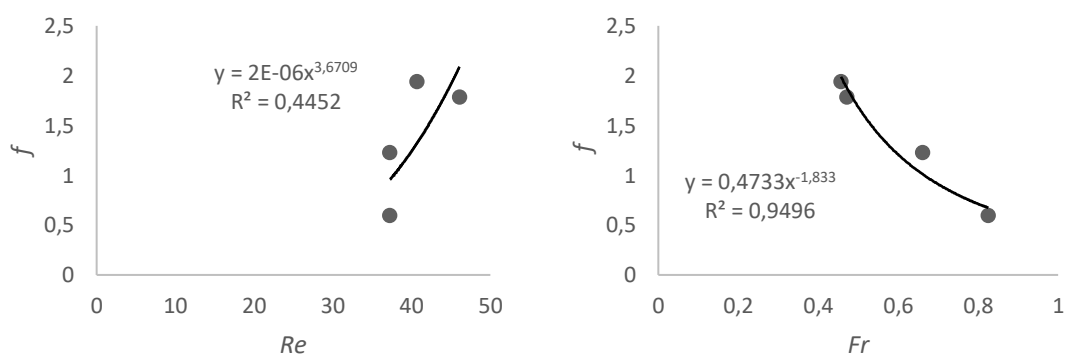
### **5.3. Fluxo laminar governado pelo número de Froude para os escoamentos superficiais rasos sob condições de culturas semiáridas**

Abaixo apresenta-se um estudo de regressão (gráficos de 1 a 12) entre a resistência hidráulica determinada via o coeficiente de Darcy-Weisbach, e os valores dos números de Reynolds e Froude, obtidos em uma serie de escoamentos laminar superficiais rasos gerados por chuvas simuladas, para as culturas agrícolas semiáridas aqui consideradas, pela vegetação herbácea e pela Caatinga, além de um Neossolo descoberto.

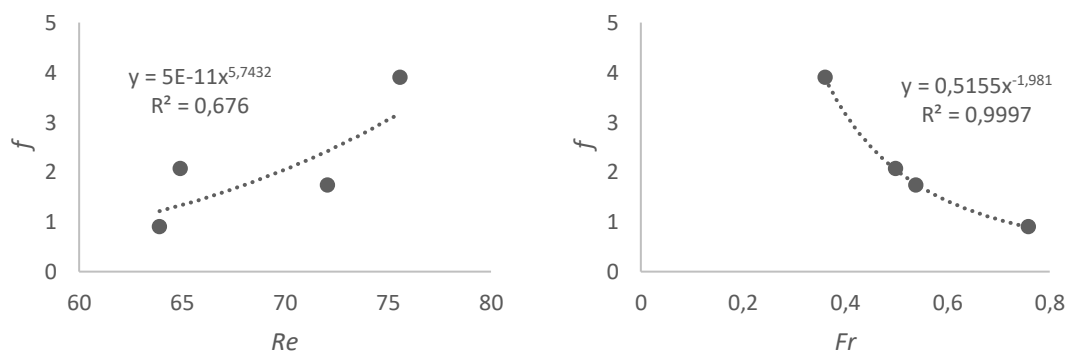
No experimento 1 a análise de regressão global para todos os escoamentos sob o Capim Elefante, o Milho, a Palma, e Neossolo descoberto teve um coeficiente de determinação mais elevado de 0,999 para a regressão da resistência hidráulica com o número de Froude. A regressão com o número de Reynolds de forma global também foi boa, com um coeficiente de determinação de 0,994. No entanto, para os escoamentos laminar raso sob as condições do Milho e da Palma, as regressões do coeficiente de Darcy-Weisbach com os números de Reynolds apresentaram coeficientes de determinação bem menores, que a regressão do coeficiente de Darcy-Weisbach com os números de Froude. Portanto para o experimento 1, pode-se afirmar, que a dispersão de energia se correlacionou com o número de Froude, comprovando que as ondas gravitacionais governam o escoamento laminar superficial raso, conforme afirmações de Tritton (2012) e Cantalice et al. (2021).



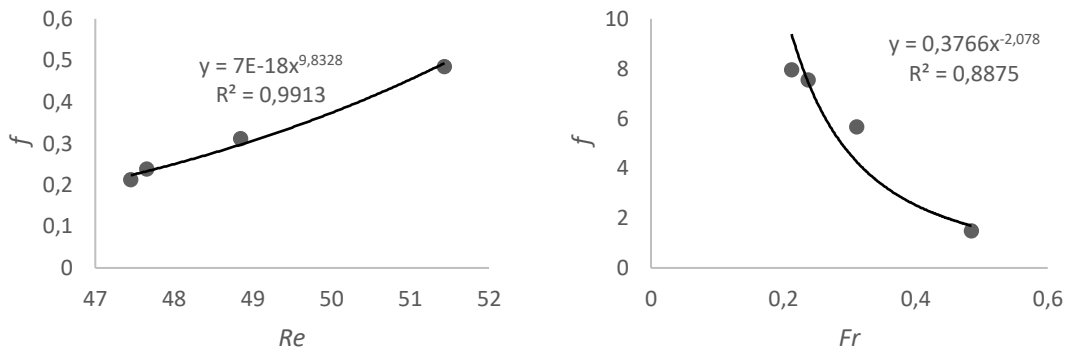
**Gráfico 1.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim Elefante ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1.



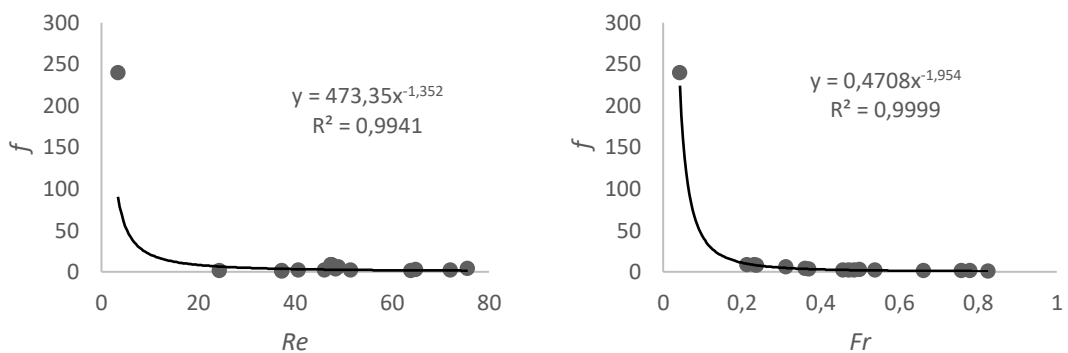
**Gráfico 2.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Milho ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1.



**Gráfico 3.** Relação da resistência hidráulica gerada pela Palma ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1.



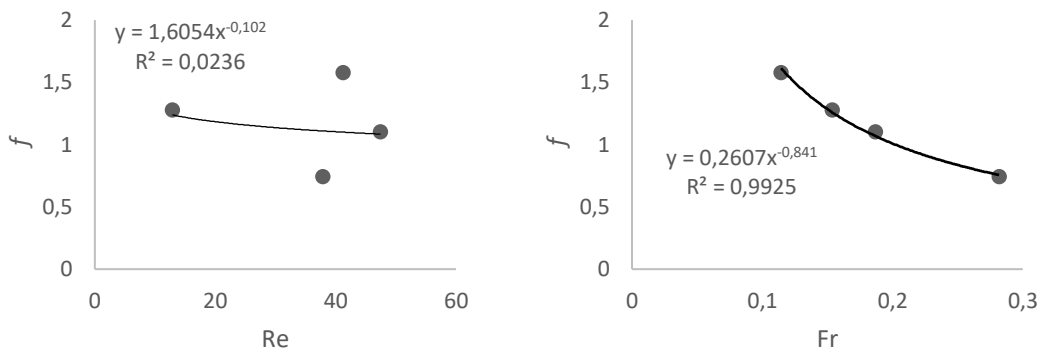
**Gráfico 4.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Neossolo descoberto ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 1.



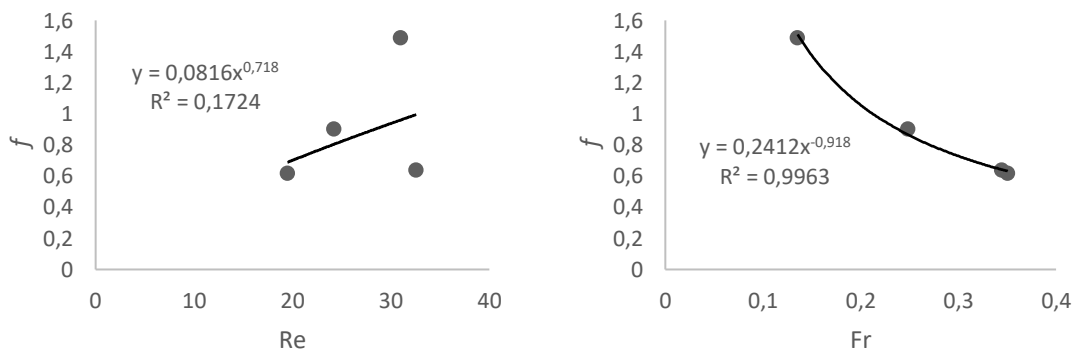
**Gráfico 5.** Análise conjunta de todos os fluxos laminares superficiais rasos do experimento 1, para todos os dados do experimento 1, ou seja, no escoamento sob o Capim Elefante, o Milho, a Palma, e Neossolo descoberto.

Para o experimento 2, a análise de regressão conjunta para todos os escoamentos superficiais raso, ou seja, para as condições hidráulicas sob o Capim Elefante com 45 e 180, e para o Neossolo Flúvico descoberto, apontou que a resistência hidráulica é totalmente relacionada com o número de Froude por meio de um coeficiente de determinação de 0,9925, enquanto a regressão do mesmo coeficiente com o número de Reynolds foi de apenas 0,0236. Para as regressões isoladas ( Capim Elefante com 45 e 180 e Neossolo descoberto) da resistência hidráulica com o número de Reynolds também produziram baixíssimos coeficientes de determinação, demonstrando que nessas condições

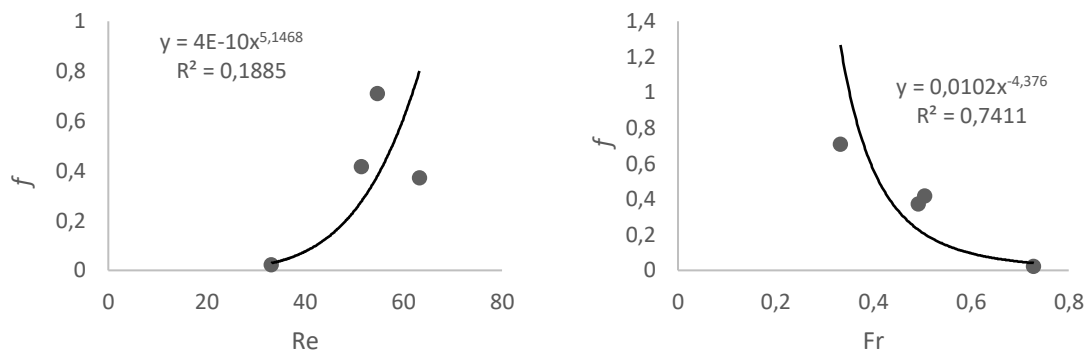
de escoamentos com baixos números de Reynolds (nesse caso com Reynolds até 69), quem governa o escoamento superficial raso de fato são as ondas gravitacionais, como demonstra as boas regressões da resistência hidráulica com o número de Froude, e estando estes resultados, tanto do experimento 1, como do experimento 2, em concordância com as afirmações de Cantalice et al. (2021).



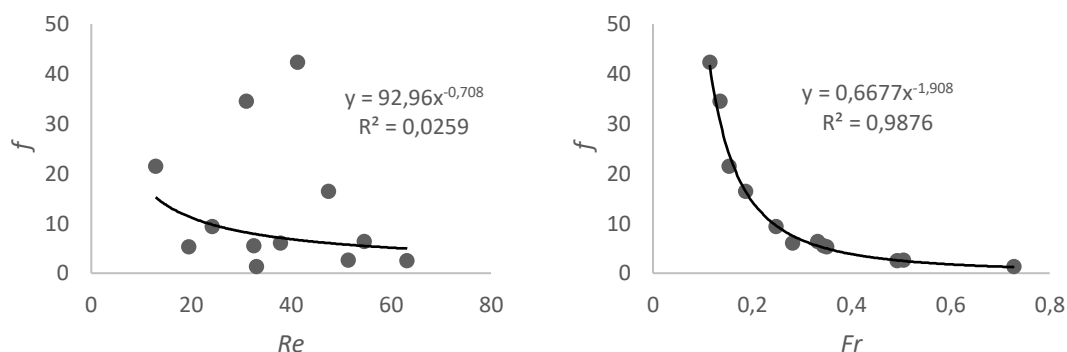
**Gráfico 6.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 45 dias de plantado, ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2.



**Gráfico 7.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 180 dias de plantado, ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2.



**Gráfico 8.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo Neossolo Flúvico descoberto ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 2.

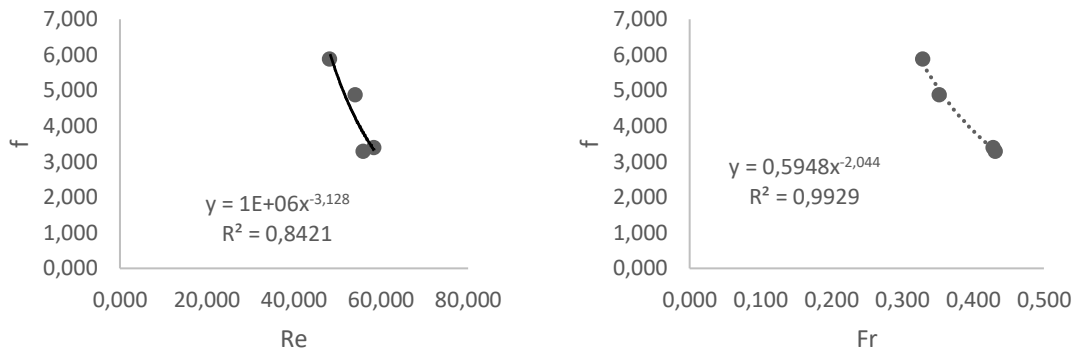


**Gráfico 9.** Análise conjunta de todos os fluxos laminar superficial rasos, para todos os dados do experimento 2, ou seja, para as condições hidráulicas sob o Capim Elefante com 45 e 180, e para o Neossolo Flúvico descoberto.

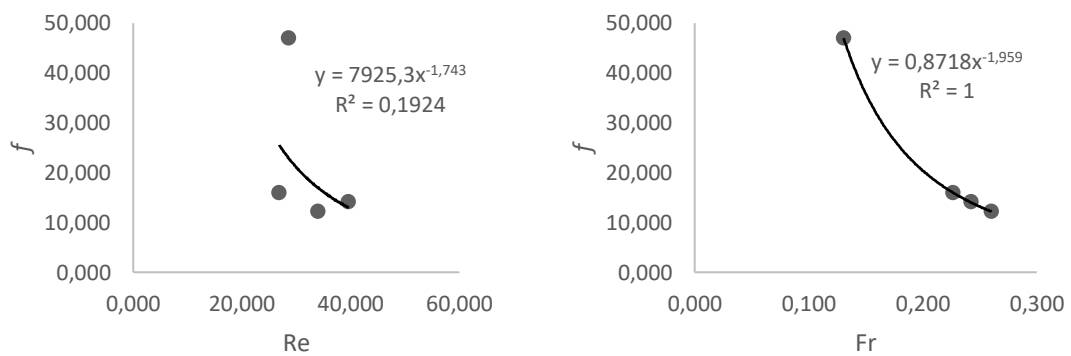
Os experimentos realizados no Neossolo Flúvico, apresentaram os melhores resultados, principalmente por serem compostos com o Capim-Elefante, mesmo o tratamento que possuía o desenvolvimento intermediário, tendo parte de suas estruturas vegetacionais em contato com a superfície do solo, resultou em uma elevada rugosidade hidráulica, como já citado.

No experimento 3, novamente a análise de regressão global com todos os dados, ou seja, para as condições hidráulicas sob a vegetação herbácea, consórcio de Palma e Milho e Caatinga, a resistência hidráulica foi melhor correlacionada com o número de Froude (0,9376), em detrimento da regressão

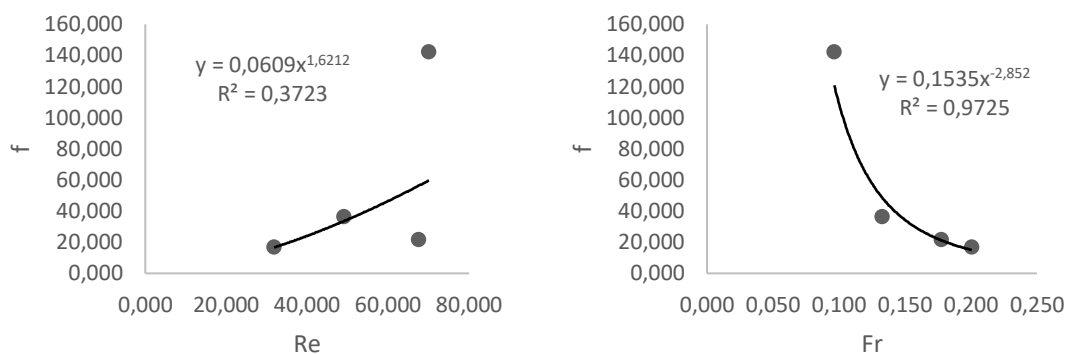
da rugosidade com o número de Reynolds (0,0666). Estes resultados também concordam com os resultados e afirmações de Cantalice et al. (2021).



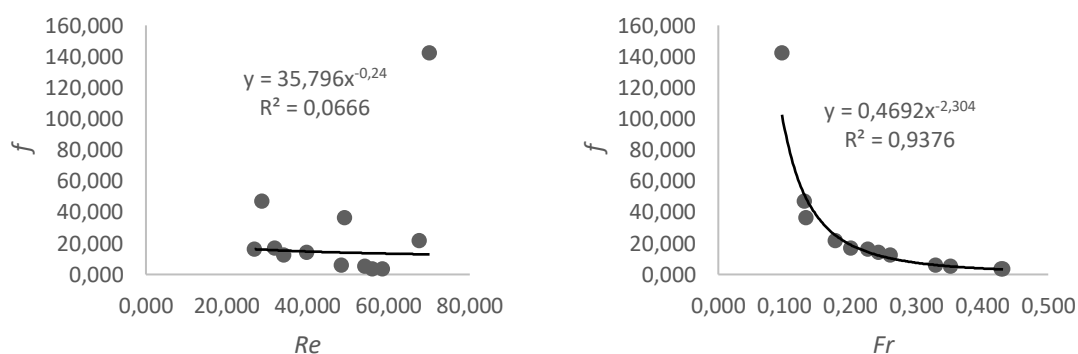
**Gráfico 10.** Relação da resistência hidráulica gerada pela vegetação herbácea ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3.



**Gráfico 11.** Relação da resistência hidráulica gerada pelo consórcio de Palma e Milho ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3.



**Gráfico 12.** Relação da resistência hidráulica gerada pela Caatinga ao escoamento laminar superficial raso, com os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) obtidos no experimento 3.



**Gráfico 13.** Análise conjunta de todos os fluxos laminares superficiais rasos, para todos os dados do experimento 3, ou seja, para as condições hidráulicas sob a vegetação herbácea, consórcio de Palma e Milho e Caatinga.

Estudo como Juan et al. (2013) e Panachuki et al. (2011), apresentam a importância da cobertura vegetal, demonstrando sua relevância em reduzir os danos da energia cinética das gotas de chuva na estrutura da superfície do solo e a potencialidade das estruturas físicas vegetacionais em manter a taxa de infiltração do solo elevada por um longo período. As raízes das plantas podem formar estruturas de poros no solo que diferem de acordo com o tipo de planta, o que pode influenciar a infiltração do solo. O tipo de vegetação também é um fator importante para a infiltração excedente.

A vegetação possui a capacidade mecânica de diminuir a velocidade do escoamento, o que afeta diretamente as taxas de infiltração do solo, reduzindo diretamente a descarga líquida, como pode se observar nas tabelas (1 e 2), e



consequente o número de Reynolds, conforme relatado por Cantalice et al. (2021).

Todos os resultados encontrados neste trabalho apresentaram sempre a resistência hidráulica muito melhor ajustada ao número de Froude, para as condições de fluxos gerados com baixos números de Reynolds até 69. Esses resultados concordam, com as afirmações de Cantalice et al. (2021), de que o número de Froude governa o fluxo raso com número de Reynolds na faixa de 1 a 100, quando toda resistência hidráulica e energia gerada pelo arraste sobre o solo e a vegetação é governada pelas ondas gravitacionais.

Os presentes resultados ainda vão de encontro a Katz et al. (1995), Zhao et al. (2015) e Qian et al. (2016) que consideraram todos os escoamentos laminares superficiais rasos na faixa de número de Reynolds até 500, e até 900 para Pan et al. (2016).

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo permite as seguintes afirmações:

As culturas agrícolas com maior porte e densidade como o Capim elefante, Milho, o consórcio Milho-Palma, e a Caatinga semi-arbustiva foram responsáveis por impor maior interceptação vegetal e condições hidráulicas de retardo do escoamento superficial raso, que se traduziram em redução da velocidade do escoamento superficial e da descarga líquida.

As relações de potência encontradas para os escoamentos superficiais laminares de baixos número de Reynolds para as condições impostas pelas culturas agrícolas semiáridas, pela vegetação herbácea, pela Caatinga e pelo solo demonstram que conforme a rugosidade hidráulica aumenta os valores do número de Froude diminuem, comprovando a influência da ação da gravidade neste tipo de escoamento.

A relação entre o coeficiente de resistência hidráulica de Darcy-Weisbach ( $f$ ) e o número de Froude se ajustam bem melhor do que quando ajustada com o número de Reynolds, demonstrando que a resistência hidráulica gerada pelo arraste sobre o solo e a vegetação no escoamento laminar de baixo número de Reynolds é governada pelas ondas gravitacionais.

Portanto, os resultados aqui encontrados, suportam a relação encontrada por Cantalice et al. (2021) e suas afirmações de que o número de Froude governa o fluxo raso com baixos números de Reynolds.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, R. D., and V. M. Ponce, 2014. Onlineoverland: Overland flow using the diffusion wave method. Online program.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Monitoramento pluviométrico. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 06/06/2021.

Armstrong A., Quinton J.N., Heng B.C.P., Chandler J.H., 2011. Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surf. Process. Landf.* 36, 97-106.

Andrade, D. S. Infiltração da água em neossolo flúvico cultivado com capim elefante. Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós - Graduação em Produção Agrícola, Garanhuns, BR - PE, 2019.

Ayer, J. E. B.; Olivetti, D.; Mincato, R. L.; Silva, M. L. N. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. *Pesq. Agropec. Trop.*, v. 45, n. 2, p. 180-191, 2015.

Bernardino, J. C. M. Estabilidade de cursos d'água escoando sobre leitos aluvionares não coesivos. Dissertação (Engenharia Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Bezerra, S. A.; Cantalice, J. R. B. Erosão Entre Sulcos Em Diferentes Condições De Cobertura Do Solo, Sob Cultivo Da Cana-De-Açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 1, p. 565–573, 2006.

Cantalice, J. R. B.; Cunha Filho, M.; Stosic, B. D.; Piscocoy, V. C.; Guerra, S. M. S.; Singh, V. P. Relationship between bedload and suspended sediment in the sand-bed Exu River, in the semi-arid region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 58, p. 1-14, 2013.

Cantalice, J. R. B.; Dias, I. C. G. M.; Andrade, D. S.; Assis Filho, F. M.; Souza, W. L. S.; Nunes, E. O. S.; Guerra, S. M. S.; Silva Junior, V. P.; Sartori, L.; Freitas, F. J.; Cavalcante, D. M.; Lima, J. R.; Barros Junior, G., (2021): Hydraulic resistanceto overland flow governed by Froude number on semiarid hillslopes under shrubs and crops, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2021.1947506.

Cantalice, J.R.B., Silveira, F.P.M., Singh, V.P., Silva, Y.J.A.B, Cavalcante, D.M., Gomes, C., 2017. Interrill erosion and roughness parameters of vegetation in rangelands. *Catena* 148, 11-116.

Cantalice, J.R.B.; Nunes, E.O.S. ; Cavalcante, D.M. ; Barbosa, B. ; Barros Junior, G. ; Guerra, S.M.S. ; Rolim Neto, F.C., 2019. Vegetative-hydraulic parameters generated by agricultural crops for laminar flows under a semiarid environment of Pernambuco, Brazil. *Ecological Indicators*, v. 106, p. 105496, 2019.

CPRM - Serviço Geológico Do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Bezerros. Ministério de Minas e Energia, Recife, 2005.

CPRM - Serviço Geológico Do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Triunfo. Ministério de Minas e Energia, Recife, 2005.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, 2018.

Flanagan, D. C.; Nearing, M. A. United States Department of Agriculture-USDA: Water Erosion Prediction Project. West Lafayette: National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL, 1995. (Technical documentation, 10).

Freire, M. S.; Ramos, R. R. D.; Lopes, H. L.; Sobra, M. C.; Montenegro, S. M. G. L.; Accioly, L. J. O. Avaliação do uso e cobertura do solo na bacia do Pajeú –

Fu, S., Liu, B., Liu, H., Xu, L., 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena* 84, 29-34.

Higa, L. T.; Schlichting, A. F.; Catalani, T. G. T.; Grigio, A. M.; Gamarra, R. M.; Paranhos Filho, A. C. Modelo de Estabilidade dos Solos a Erosão. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, Vol. 37, p. 05-15, 2014. .

Juan, W.; Pute, W.; Xining, Z. Soil infiltration based on bp neural network and grey relational analysis. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 97-105, 2013.

Katz, D.M., Watts, F.J., Burroughs, E.R., 1995. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. *J. of Hydraul. Eng.*, 121(7), 546-553.

Leite, P.A.M., de Souza, E.S., dos Santos, E.S., Gomes, R.J., Cantalice, J.R., Wilcox, B.P., 2018. The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology* 11 (3), e1910.

Liu, X., Zhang, S., Zhang, X., Ding, G., Cruse, R.M., 2011. Soil erosion control practices in Northeast China: A mini-review. *Soil and Till. Res.* 117, 44-48.

Meyer, L. D.; Harmon, W. C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 1979. p. 100-103.

Pan, C., Ma L., Wainwright J., Shangguan, Z., 2016. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall. *Water Resour. Research* 52, 2490-2512.

Panachuki, Elói et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 35, n. 5, 2011.

Ponce, V. M. 2014. *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. Online edition.

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. of Hydrol. Hydromech.* 64, 237-245.

Simons D.B., Şentürk F. (1992) *Sediment transport technology: water and sediment dynamics* Water Resources Publication.

Singh, V. P. Analytical solutions of kinematic equations for erosion on a plane: I. Rainfall of indefinite duration. *Advances in Water Resources*, Vol. 6, 1983.

Singh, V.P., 1983. Analytical solutions of kinematic equations for erosion on a plane II. Rainfall of finite duration. *Advances in Water Resources* 6, 88-95.

Souza, R. V. C. C.; Ribeiro, M. R.; Junior, V. S. S.; Corrêa, M. M.; Almeida, M. C.; Campos, M. C. C.; Filho, M. R. R.; Shulze, S. M. B. B. Caracterização de solos em uma topoclimosequência no maciço de triunfo - sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1259-1270, 2010.

Tritton, D.J., 2012. *Physical fluid dynamics*. Springer Science & Business Media. 344p.

Wainwright, J. Parsons, A.J., Müller, E.N. et al., 2008. A transport-distance approach to scaling erosion rates: 1. Background and model development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 813-826.

Wang, J.; Jiang, Y.; Zhang, C.; Zhang Y.; Huang, D.; Yan, S.; Sun, T.; Mao, Y.; Cai, Y. Leaching behavior and transformation of total mercury and methylmercury from raw and lime-conditioned sewage sludge under simulated rain. *Chemosphere*, v. 262, 2017.

Wilson, C. 2007. Flow resistance models for flexible submerged vegetation. *J. of Hydrol.* 342, 213-222.

Woolhiser, D.A., Liggett, J.A., 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane—The rising hydrograph. *Water Resources Research*, Vol. 3, NO. 3 Third quarter.

Wu, F.C., Shen, H.W., Chou, Y.J., 1999. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *J. of Hydr. Engin.* 125, 934-942.

Zhang, W.; Cui, Y.; Santos, A. I.; Hanebuth, T. J. J. Storm-driven bottom sediment transport on a high-energy narrow shelf (NW Iberia) and development of mud depocenters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Volume 121, 2016.

Zhao, Hongtao.; Li, Xuyong. Understanding the relationship between heavy metals in road-deposited sediments and washoff particles in urban stormwater using simulated rainfall. *Journal of Hazardous Materials*, volumes 246-247, pages 267-276, 2013.