



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

GABRIELLA MOREIRA CAMPOS

**PARÂMETROS HIDROSEDIMENTOMÉTRICOS EM CONDIÇÃO DE FLUXO
TRANSIENTE DE CANAL COM PAREDE VEGETADA EM AMBIENTE
SEMIÁRIDO**

**RECIFE - PE
2022**

Gabriella Moreira Campos

Parâmetros hidrossedimentométricos em condição de fluxo transiente de canal com parede vegetada em ambiente Semiárido

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Monteiro Cavalcante

Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente

Linha de Pesquisa: Gestão Ambiental de Recursos Hídricos

RECIFE - PE
2022

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)

C198p

Campos, Gabriella Moreira

Parâmetros hidrossedimentométricos em condição de fluxo transiente de canal com parede vegetada em ambiente semiárido / Gabriella Moreira Campos. - 2022.
66 f. : il.

Orientador: Douglas Monteiro Cavalcante.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2022.

1. Canal aberto. 2. Transporte de sedimentos. 3. Resistência hidráulica. 4. Coeficiente de arrasto. I. Cavalcante, Douglas Monteiro, orient. II. Título

CDD 620.8

Gabriella Moreira Campos

Parâmetros hidrossedimentométricos em condição de fluxo transiente de canal com parede vegetada em ambiente Semiárido

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Aprovada em 21 de fevereiro de 2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Douglas Monteiro Cavalcante
Presidente da Banca e Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Monaliza Alves dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Mais um trabalho chega ao fim, e não poderia deixar de agradecer aos que estiveram comigo ao longo desses dois anos de curso de Mestrado em Engenharia Ambiental. Deixo, aqui, os meus sinceros agradecimentos:

A minha família, em nome da minha mãe (Goretti), meu pai (Paulo) e minha irmã (Ingrid), por apoiar, almejar e confiar nas minhas decisões, e por se fazerem presentes em todos os momentos sem medir esforços para que eu alcançasse esse objetivo.

Aos meus colegas da turma 2020.1, que mesmo diante de um período atípico e desafiador, conseguimos manter uma amizade virtual, compartilhando experiências construtivas para os próximos desafios que possamos encontrar.

Ao meu orientador, Professor Dr. Douglas Monteiro Cavalcante, que, diante de tantas dificuldades ao longo do curso, conseguiu exercer seu papel de professor, orientador e amigo de uma forma fiel e respeitosa, mostrando-se um grande profissional.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco por essa oportunidade de cursar uma Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Ambiental.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE por sua contribuição e incentivo à educação de nível superior, mostrando-se eficaz na sua missão de promover o desenvolvimento da educação.

Parâmetros hidrossedimentométricos em condição de fluxo transiente de canal com parede vegetada em ambiente Semiárido

RESUMO

A vegetação, quando presente nos cursos d'água, desempenha um papel fundamental nos processos hidrodinâmicos, principalmente pela resistência ao fluxo, reduzindo as forças cisalhantes do escoamento, bem como, a concentração de sólidos em suspensão e o transporte de carga do leito. Este trabalho tem por objetivo revisar e discutir a complexa interação entre vegetação, fluxo de água e o transporte de sedimentos de canal efêmero em bacia hidrográfica semiárida. Durante o período chuvoso foram realizadas quinze campanhas de medições direta à vau, onde, determinou-se os parâmetros hidrossedimentométricos, vegetativos e de resistência gerada pela espécie *Ipomoea pé-caprae* (Salsa de praia). O regime de escoamento foi caracterizado como Turbulento Fluvial, segundo os números de Reynolds (Re) e Froude (Fr). Os resultados revelam que a velocidade máxima (U_{max}) na região não vegetada foi em média 40% superior em relação à observada (U), e na região vegetada, margem direita e esquerda, a diferença entre U_{max} e U_{veg} foi muito brusca, em média 63% superior. A distribuição da tensão cisalhante, assim como, para os perfis de velocidade, apresentou picos na região central da seção transversal, ausente de vegetação. Os maiores valores das variáveis de resistência convencionais, número de Manning (n) e coeficiente de Darcy–Weisbach (f) concentraram-se na margem esquerda da seção transversal, onde ocorreu a maior concentração de hastes de *I.pes-caprae*. Número de hastes e densidade de plantas teve impacto notável na estrutura do fluxo, observado nos coeficientes de resistência vegetal ou de arrasto vegetal, F_D e C'_D , na região com maior vegetação. De modo geral, a vegetação presente nas margens influenciou as estimas do fluxo e o transporte de sedimentos, deslocando a velocidade e as tensões máximas para região central e níveis mais baixos, sendo parâmetro de vital importância para a avaliação, estudo e mitigação de eventos extremos, como as cheias ou inundações.

Palavras-chave: Canal aberto; Transporte de sedimentos; Resistência hidráulica; Coeficiente de arrasto.

Hydrosedimentometric parameters in transient flow condition of channel with vegetated wall in semiarid environment

ABSTRACT

Vegetation, when present in watercourses, plays a fundamental role in hydrodynamic processes, mainly due to flow resistance, reducing the shear forces of the flow, as well as the concentration of suspended solids and the bed load transport. This work aims to review and discuss the complex interaction between vegetation, water flow and ephemeral channel sediment transport in a semiarid watershed. During the rainy season, fifteen campaigns of direct measurements were carried out, where the hydrosedimentometric, vegetative and resistance parameters generated by *Ipomoea pes-caprae* (Beach Morning Glory) species were determined. The flow regime was characterized as Fluvial Turbulent, according to the Reynolds (Re) and Froude (Fr) numbers. The results reveal that the maximum velocity (U_{max}) in the non-vegetated region was on average 40% higher than the observed (U), and in the vegetated region, right and left margins, the difference between U_{max} and U_{veg} was very sharp, on average 63% higher. The distribution of shear stress, as well as for the velocity profiles, showed peaks in the central region of the cross-section, without vegetation. The highest values of the conventional resistance variables, Manning number (n) and Darcy-Weisbach coefficient (f) were concentrated in the left bank in the cross-section, where the highest concentration of *I. pes-caprae* stems occurred. Number of stems and plant density had a notable impact on the flow structure, observed in the coefficients of plant resistance or plant drag, F_D and C'_D , in the region with greater vegetation. In general, the vegetation present on the banks influenced the estimates of the flow and transport of sediments, shifting the velocity and maximum tensions to the central region and lower levels, being a parameter of vital importance for the evaluation, study and mitigation of extreme events, such as floods or inundations.

Keywords: Open channel; Sediment transport; Hydraulic resistance; Drag coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo erosivo das margens do rio.	15
Figura 2 - Transporte de sedimentos em um rio.	16
Figura 3 - Comportamento do fluxo em três diferentes regimes: a) fluxo da camada limite; b) fluxo com vegetação submersa; c) fluxo com vegetação emergente.	19
Figura 4 - Equilíbrio de forças na direção do fluxo do rio com condições de vegetação emergente e submersa.	21
Figura 5 - Hietograma da cidade de Tabira em 2019. Dados obtidos na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE).	22
Figura 6 - Seção transversal de monitoramento do riacho Cachoeira.	23
Figura 7 - Forma média da seção transversal da microbacia do riacho Cachoeira, Tabira, PE.	25
Figura 8 - a) Medição da velocidade do fluxo com micromolinete fluviométrico; b) Amostragem de sedimento suspenso com o amostrador DH-48 (Hidromec®); c) Amostragem de sedimentos de carga de leito com o amostrador US BLH-84.	26
Figura 9 - Distribuições e perfis de velocidade em diferentes campanhas de medição na mesma seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Letras de a – o, são referentes as 15 campanhas.	32
Figura 10 - Mapa de contorno da distribuição de velocidade de fluxo longitudinal ($m s^{-1}$), em leito com paredes vegetadas.	35
Figura 11 - Mapa de contorno da distribuição do número de Reynolds (adm.), em leito com paredes vegetadas.	36
Figura 12 - Mapa de contorno da distribuição do número de Froude (adm.), em leito com paredes vegetadas.	36
Figura 13 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de resistência ao fluxo de Manning (n ; $m^{-1/3} s$), em leito com paredes vegetadas.	38
Figura 14 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de Darcy–Weisbach (f ; adm.), em leito com paredes vegetadas.	38
Figura 15 - Distribuições e perfis de tensão de cisalhamento do fluxo em diferentes campanhas de medição na mesma seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE.	40
Figura 16 - Mapa de contorno da distribuição de tensão de cisalhamento do fluxo longitudinal ($N m^{-2}$) em leito com paredes vegetadas.	43

Figura 17 - Mapa de contorno da distribuição da força de arrasto vegetal F_D (N), em leito com paredes vegetadas.	44
Figura 18 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de arrasto vegetal C'_D (m^{-1}), em leito com paredes vegetadas.	45
Figura 19 - A velocidade média do fluxo em função do coeficiente de arrasto vegetal (C'_D) de <i>I. pes-caprae</i> (Cavalcante <i>et al.</i> , 2021).	46
Figura 20 - Mapa de contorno da distribuição da descarga sólida em suspensão Q_{SS} ($t\ dia^{-1}$), em leito com paredes vegetadas.	48
Figura 21 - Mapa de contorno da distribuição da descarga sólida do leito Q_{Bed} ($t\ dia^{-1}$), em leito com paredes vegetadas.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da espécie vegetal presente na seção transversal.	24
Tabela 2 - Caracterização geométrica da seção transversal da microbacia do riacho Cachoeira, Tabira, PE.	25
Tabela 3 - Parâmetros de medição da velocidade média do fluxo de acordo com a profundidade.	25
Tabela 4 - Caracterização geral de variáveis hidráulicas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira, PE.	29
Tabela 5 - Caracterização geral de variáveis sedimentométricas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira, PE.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
2.1. Objetivo Geral	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1. Erosão Fluvial	14
3.2. Impactos da vegetação em sistemas fluviais	18
3.3. Coeficiente de arraste vegetal	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Área experimental	22
4.2. Medição das características hidrodinâmicas e morfométricas da vegetação	23
4.2.1. Seção Transversal	23
4.2.2. Monitoramento hidrossedimentométrico	24
4.3. Análise estatística	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. Interações entre vegetação, fluxo de água e transporte de sedimentos	29
5.2. Análise do perfil ou distribuição de velocidade do fluxo	29
5.3. Efeitos da vegetação nas características do fluxo	35
5.4. Interação entre vegetação e transporte de sedimentos	46
6. CONCLUSÃO	50
7. REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Os rios são agentes geológicos indispensáveis para o desenvolvimento das sociedades, além de desempenharem um papel relevante na dinâmica espacial das paisagens. Esses ambientes ribeirinhos concedem valor importante para a instalação das cidades e para o desenvolvimento econômico, em virtude da disponibilização dos requisitos básicos necessários à sobrevivência dos seres vivos, sejam na disponibilização hídrica e/ou uso e ocupação do solo.

A influência das atividades antrópicas, como o desmatamento da vegetação ciliar, executadas sem um adequado gerenciamento (SADEGHI; NAJAFI; BAKHTIARI, 2017), sobretudo quando praticadas próximo às margens e planícies dos seus canais fluviais (CASTRO; DE CAMPOS; ZANCOPE, 2019), acabam proporcionando alterações na dinâmica fluvial, contribuindo com o processo de transporte e deposição de sedimentos, além de comprometer o equilíbrio ambiental desses ecossistemas.

Uma das consequências geradas em virtude do estresse antropogênico, provocado por alterações rápidas nos usos da terra agrícola e ribeirinha, é a erosão fluvial acelerada (OKEKE *et al.*, 2020). Também conhecida como erosão da margem do rio, a erosão fluvial é um processo natural que ocorre em todos os cursos do rio (SANTOS; DE SOUZA, 2020), e é geralmente resultado da migração lateral de riachos e rios sinuosos (SPIEKERMANN *et al.*, 2017).

Esse tipo de erosão acarreta em modificações na morfologia do leito do rio em seções transversais, afetando a velocidade do fluxo local, a profundidade da água e, conseqüentemente, a tensão de cisalhamento do leito (PHAM VAN; CHUA, 2020), contribuindo, assim, com a carga de sedimentos na bacia hidrográfica (TERMINI, 2016). Ainda assim, esse acúmulo de sedimentos, ocasionado pelo processo erosivo, aumenta consideravelmente os problemas de poluição do rio (ABIDIN; SULAIMAN; YUSOF, 2017).

Em estudo realizado por Hooke (1980), foram registradas as primeiras pesquisas sobre erosão das margens dos rios (SUNDBORG, 1956; CRICKMAY, 1960; EVERITT, 1968; BLUCK, 1971; HICKIN; NANSON, 1975) estas ocorreram em rios localizados em regiões com características de clima continental e temperados. Segundo Rocha e Souza Filho (2008), os estudos realizados sobre a estabilidade das margens fluviais são predominantes em regiões de clima temperado e rios de pequenas bacias hidrográficas. Coelho e Andrade (2020) destacam que, no Brasil, as pesquisas acadêmicas referentes à dinâmica fluvial atuam, sobretudo, nas bacias do Amazonas, Paraná, Araguaia e São Francisco.

Embora a necessidade do conhecimento sobre tais processos, bem como da importância dos rios para esta região, estudos sobre erosão fluvial, na região Semiárida, ainda são incipientes (LIMA; PEREZ FILHO; CUNHA, 2013; COELHO; ANDRADE, 2020). Os processos erosivos em rios semiáridos, por consequência das baixas vazões e do fluxo sazonal, são mais dominantes no período de precipitação acima da média, geralmente, apresentando fluxo rápido e intenso (CAVALCANTE, 2018).

O monitoramento de sedimentos em regiões como o Semiárido brasileiro, com área de aproximadamente um milhão de Km² (PEREIRA E SILVA *et al.*, 2019), cujos rios são majoritariamente intermitentes (LIMA NETO; WIEGAND; DE ARAÚJO, 2011), torna-se mais crítico em razão da irregularidade das chuvas ao longo do ano (COELHO; ANDRADE, 2020) e da carga anual transportada em curto período de tempo (MEDEIROS *et al.*, 2014).

A vegetação do curso d'água também faz parte do sistema dinâmico do rio (WU FU-SHENG, 2008), desempenhando papel importante na retenção de sedimentos, na alteração de fluxos locais (YAN *et al.*, 2020) e outros serviços ecossistêmicos (NEPF, 2012). Alguns desses serviços, que incluem fornecimento de alimento e abrigo para muitos organismos (LI; XIE, 2011; WU LONG-HUA; YANG XIAO-LI, 2014; MANNING; JULIAN; DOYLE, 2020), também interfere na resistência hidráulica ao fluxo (JALONEN; JÄRVELÄ, 2014), no transporte de material dissolvido e particulado (TANINO; NEPF, 2008), além de afetar a variabilidade espacial de canais sinuosos (GÜNERALP; RHOADS, 2011).

Segundo Termini (2016), as interações entre fluxo e vegetação são consideradas de difícil entendimento e dependem das características da planta (morfologia, rigidez, concentração, distribuição) e do fluxo (velocidade, turbulência, intensidade). Outro fator relevante, nesse contexto, é o grau de emersão (WU; SHEN; CHOU, 1999; NEPF; VIVONI, 2000; FOLLETT; NEPF, 2012; WANG, WEI-JIE *et al.*, 2015; WANG, WEI-JIE *et al.*, 2018; DEVI; SHARMA; KUMAR, 2019) ou submersão (WU; SHEN; CHOU, 1999; NEPF; VIVONI, 2000; PUJOL *et al.*, 2010; LI; XIE, 2011; LI *et al.*, 2014; WANG, HAO *et al.*, 2015; DEVI; KUMAR, 2016; SHAN *et al.*, 2017; HU *et al.*, 2018; PU *et al.*, 2019) da vegetação, que também influencia na resistência ao fluxo.

Em canais abertos, a resistência hidráulica é resultado do arrasto viscoso e de pressão sobre o canal fluvial (WU; SHEN; CHOU, 1999). A tensão de cisalhamento também é alterada, causando redução do movimento inicial do sedimento, do transporte da carga do leito e da concentração de sólidos em suspensão (TANG *et al.*, 2014). Múltiplas pesquisas sobre o arraste vegetal têm sido realizadas em laboratório, em que, as plantas aquáticas são,

geralmente, modeladas como uma matriz de cilindros circulares rígidos com diâmetro uniforme (d), e o efeito desta vegetação no fluxo são determinados pela resistência adicional, podendo ser quantificada pelo coeficiente de arrasto - C'_D (LIU *et al.*, 2020). Assim, o C'_D representa um parâmetro capaz de quantificar a força de resistência da vegetação ao fluxo (TANG *et al.*, 2014).

Dessa forma, o estudo da relação entre fluxo de água, vegetação e sedimentos é uma condição fundamental para o entendimento das funções do ecossistema e definição do manejo adequado dos sedimentos nos sistemas fluviais.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Revisar e discutir a complexa interação entre vegetação, fluxo de água e o transporte de sedimentos de canal efêmero de pequena bacia hidrográfica da região Semiárida do estado de Pernambuco.

2.2. Objetivos Específicos

- » Definir o regime de escoamento fluvial;
- » Identificar os perfis de velocidade, turbulência e tensão de cisalhamento;
- » Estimar a descarga líquida (vazão) e sólida (em suspensão e do leito);
- » Avaliar o efeito da vegetação nos parâmetros hidrossedimentométricos, através dos coeficientes de resistência vegetal na seção transversal de controle;
- » Aplicar e analisar o método de visualização gráfica da distribuição espacial dos parâmetros hidrossedimentométricos e de resistência vegetal.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Erosão Fluvial

As forças hidráulicas do fluxo de água que agem sobre as partículas de um canal fluvial, principalmente por meio de forças de sustentação e arrasto, são fundamentais no regime de sedimento de um rio. Esse regime consiste em três etapas: a desagregação (conhecido como erosão), por meio do qual as partículas são retiradas de um estado de repouso; transporte, em que as partículas se deslocam a alguma distância ao longo do leito do rio ou na coluna d'água; e deposição (ou sedimentação), dado que a potência de fluxo é insuficiente para manter a partícula em movimento, fazendo com que ocorra a deposição no fundo do leito (RHEINHEIMER; YARNELL, 2017).

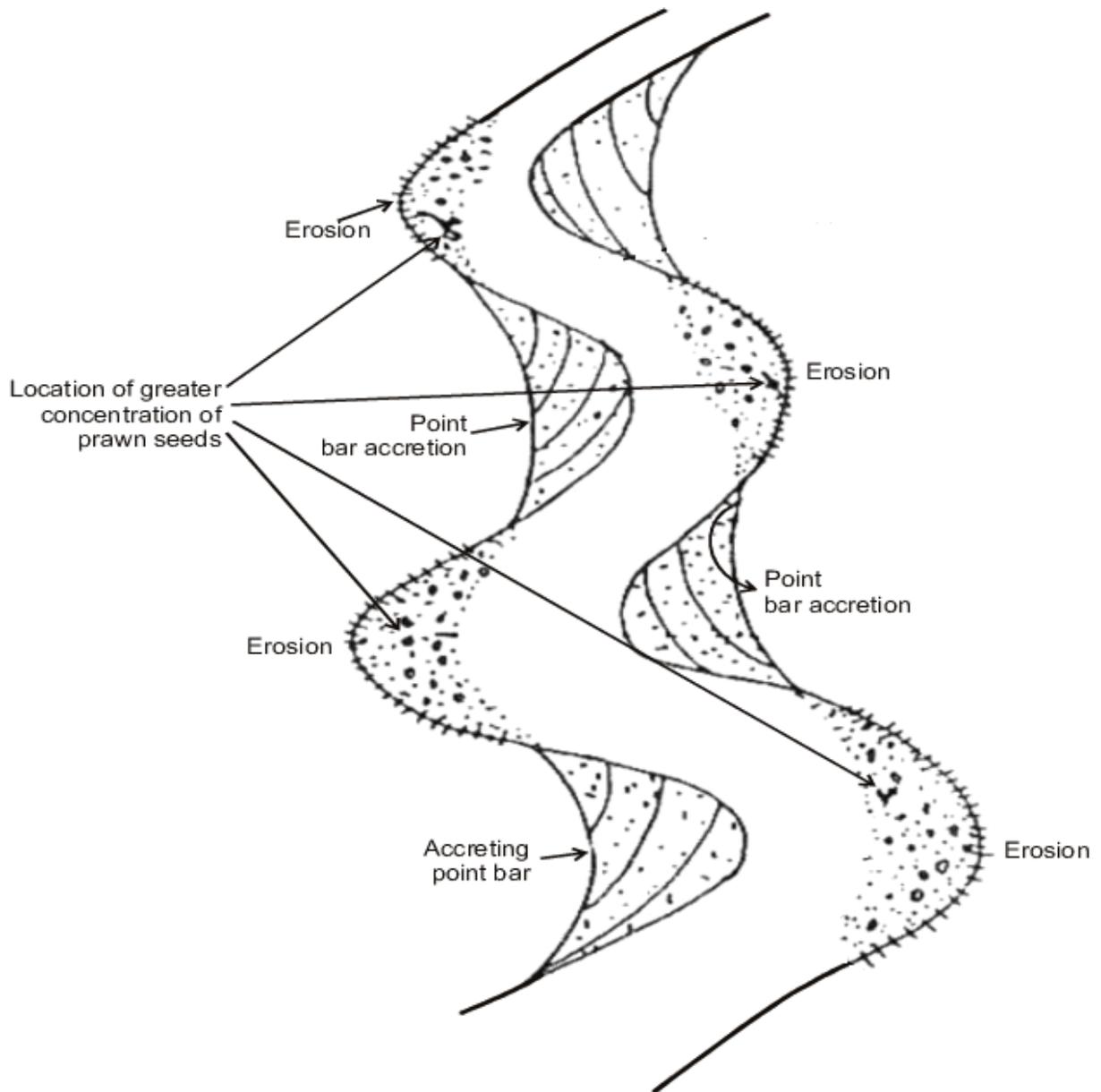
Deste modo, erosão fluvial refere-se às profundas alterações na calha fluvial como a degradação do leito ou erosão das margens, devido aos processos atuantes, sendo estes associados às condições geomorfológicas e hidrodinâmicas específicas, no qual exercem uma relevante função à evolução da calha fluvial.

Autores como Casado *et al.*, (2002), qualificam a erosão das margens do rio, ou erosão marginal, como componente da erosão fluvial que executa uma função relevante no aumento da largura do canal, destruindo as margens do rio. Magalhães (2010) reconhece que é um fenômeno natural, resultante do processo de adaptação do rio ao vale, em que, está situado ou às condições do escoamento, podendo estar integrado ao ciclo natural do curso d'água ou resultar da intervenção antrópica.

Para Konsoer *et al.* (2015) é um processo fundamental que estimula a mudança da calha fluvial ao longo dos rios sinuosos e que contribui com sedimentos, em que estes podem afetar diretamente níveis de turbidez, concentrações de nutrientes e contaminantes e a qualidade dos ecossistemas ribeirinhos.

A erosão marginal (**Figura 1**) é considerada o principal fator no controle do deslocamento do canal fluvial e na evolução da planície, provocando prejuízos às terras ribeirinhas e agrícolas, bem como danos à infraestrutura (KONSOER *et al.*, 2015). O recuo da margem é desencadeado por meio da integração do intemperismo, erosão hidráulica (LEYLAND *et al.*, 2015), como também, por meio da fragmentação do material da margem sobrejacente, com a subsequente remoção do material danificado (KONSOER *et al.*, 2017).

Figura 1 - Representação do processo erosivo das margens do rio.



Fonte: Adaptado de DAS e DATTA (2014).

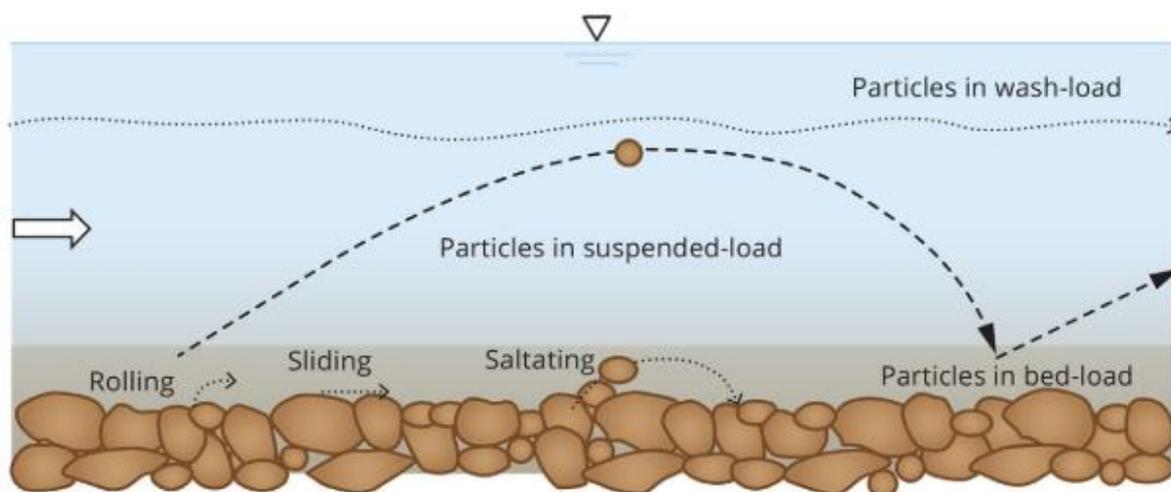
Em diferentes intervalos de tempo, é possível observar os processos por meio da formação de meandros e planícies de inundação, migração do canal após o recuo da margem, bem como do transporte de sedimentos dentro da bacia hidrográfica (CHASSIOT; LAJEUNESSE; BERNIER, 2020).

A interação do fluxo, sedimento e leito do rio resulta em processos fluviais. O leito do rio controla o fluxo e o transporte de sedimentos, o que, por sua vez, aumenta as mudanças na calha fluvial (DEY, 2014). O sedimento erodido cedido para os rios contribui

significativamente para as mudanças às respostas hidrológicas de muitas bacias hidrográficas (OKEKE *et al.*, 2020), o que implica nas decisões frente à engenharia, planejamento e manejo ambiental.

Os sedimentos transportados em bacias hidrográficas são classificados em sedimentos suspenso e de fundo. Quando a fração de sedimentos é mais fina, capaz de ser carregada pelo fluxo, considera-se carga suspensa; enquanto a fração mais grossa, que se move perto do fundo rolando, saltando e deslizando, classifica-se como carga de fundo (**Figura 2**) (GONZÁLEZ-AGUIRRE; CASTRO; MORALES DE LUNA, 2020).

Figura 2 - Transporte de sedimentos em um rio.



Fonte: Rheinheimer e Yarnell (2017)

As partículas de sedimento em suspensão, geralmente composta de partículas menores, são transportadas pela corrente turbulenta, movendo-se a jusante com, aproximadamente, a mesma velocidade da água. Ao passo que, os sedimentos mais grossos, comumente denominados de cascalhos e pedras, se movem ocasionalmente permanecendo em repouso a maior parte do tempo (EDWARDS; GLYSSON, 1988; RHEINHEIMER; YARNELL, 2017).

Com isso, o tamanho e densidade do sedimento, a viscosidade e densidade da água são funções que influenciam na velocidade de sedimentação das partículas em um canal fluvial. À medida que a velocidade do fluxo diminui, o sedimento mais grosso é inicialmente depositado, seguido por partículas mais finas, resultando na classificação do material do leito ao longo do canal. Vale salientar que, apesar do tamanho da partícula influenciar diretamente na velocidade de sedimentação, esta também é afetada pela composição do sedimento e pelas forças de arrasto associadas (RHEINHEIMER; YARNELL, 2017).

São inúmeros os problemas relacionados ao transporte e aumento desses sedimentos em ambientes fluviais: comprometimento da qualidade das águas superficiais; ameaça ao ecossistema aquático; degradação do habitat de alguns seres vivos (BOTERO-ACOSTA *et al.*, 2017); mudança na morfologia do leito do rio (DEY, 2014); transporte de nutrientes e contaminantes (ACHITE; OUILLON, 2007); eutrofização e assoreamento dos corpos hídricos (COTE *et al.*, 2020; PLAMBECK, 2020). Em contrapartida, existem alguns benefícios associados à condução de sedimentos, tais como: transporte de matéria orgânica e nutriente, beneficiando microrganismos aquáticos; em alguns casos, reestrutura a morfologia do canal, e também aumentando a sua capacidade de fluxo (CARVALHO *et al.*, 2000).

Em rios situados em regiões Semiáridas, que normalmente apresentam baixas vazões e fluxo sazonal, os processos erosivos são mais atuantes em períodos de grandes precipitações (ANDRADE; MAIA, 2018). A vazão, por exemplo, é uma variável relevante nesse processo, estando relacionada diretamente com o comportamento das chuvas, que em áreas semiáridas caracterizam-se por serem mal distribuídas no tempo e no espaço, sendo bem acentuadas e de pouca duração, favorecendo alterações na dinâmica do canal fluvial (CAVALCANTE, 2018).

Devido a esse comportamento pluviométrico da região, os rios semiáridos têm problemas relacionados às irregularidades e ausência de fluxo durante o período de estiagem. Em síntese, a dinâmica fluvial semiárida revela que os rios passam a maior parte do ano seco; Contudo, quando ocorrem precipitações em períodos chuvosos, estes ganham força capaz de gerar escoamento superficial (SOUZA; ALMEIDA, 2015), acarretando em mudanças geomorfológicas e influenciando diretamente os processos aluviais.

Outra característica importante da erosão fluvial nas margens dos rios do Semiárido brasileiro são as intervenções estruturais realizadas pelo homem. Os diferentes usos do solo nas margens, a construção de barragens e reservatórios, sejam para acúmulo de água ou controle da vazão do rio (TERMINI; SAMMARTANO, 2012), podem intensificar os processos erosivos em qualquer época do ano, em virtude da gestão dos recursos hídricos, uma vez que a quantidade de água liberada do reservatório para o corpo d'água pode ocasionar maior produção de sedimentos (ANDRADE, 2016; CAVALCANTE, 2018).

Poucos são os trabalhos que abordam os processos fluviais em regiões semiáridas, principalmente quando relacionados ao território brasileiro (SOUZA; ALMEIDA, 2015). As pesquisas relacionadas ao tema prevalecem em áreas de clima tropical, seguindo ordens de grandeza e relevância no cenário mundial e nacional (COELHO; ANDRADE, 2020). Ainda assim, algumas pesquisas foram realizadas no contexto hidrossedimentológico, na bacia do

Jaguaribe situada no Estado do Ceará (ANDRADE, 2016; CAVALCANTE, 2018; QUEIROZ *et al.*, 2018), bem como, em outros estados da região (SOUZA; CORRÊA, 2012; LIMA, 2012).

Quando se trata de pesquisa, a estimativa da taxa de transporte de sedimentos é desafiadora, dado que as partículas podem se mover de formas variadas. Em relação ao transporte do material do leito, pode-se considerar um processo determinístico ou estocástico, e os resultados obtidos com diferentes abordagens são comumente divergentes uns dos outros, bem como incompatíveis com as observações de campo. À vista disso, a morfodinâmica do rio pode ser afetada por diferentes fatores externos, incluindo a variedade de regimes de fluxo, possíveis ações antrópicas e a presença da vegetação (TERMINI, 2015).

3.2. Impactos da vegetação em sistemas fluviais

Um elemento importante dos sistemas fluviais é a vegetação. Esta desempenha um significativo papel no processo de transporte de sedimentos e contaminantes, afetando a erosão, o transporte e, conseqüentemente, a deposição em bacias hidrográficas, devido à capacidade de controle do fluxo no canal fluvial (NEPF; VIVONI, 2000; PAN *et al.*, 2019).

Diversas alterações na calha fluvial são provocadas em virtude da presença da vegetação em rios. Mudanças na rugosidade local e na resistência da margem são conseqüências dessa característica. Estudos também confirmam que a vegetação impacta a estrutura de turbulência do fluxo, a força da corrente secundária e as características de tensão de cisalhamento de limite hidráulico (SHNAUDER; SUKHODOLOV, 2012; TERMINI, 2016), interferindo na morfodinâmica do corpo hídrico (PERUCCA; CAMPOREALE; RIDOLFI, 2007).

Embora os efeitos benéficos da vegetação sejam relevantes, há contribuições negativas sobre os recursos hídricos. Há plantas de suspensão, exóticas e invasivas, que proporcionam a obstrução dos canais de irrigação e acabam dificultando a navegação (HUIAI *et al.*, 2012), pela modificação da morfologia do leito. Em pesquisas realizadas por Zong e Nepf (2010), a vegetação, em conseqüência da retenção de partículas, ocasiona aumento da matéria orgânica, nutrientes e metais pesados dentro do canal fluvial. Masterman e Thorne (1992) afirmam que a vegetação das margens também influencia significativamente a redução da capacidade de descarga de rios naturais e canais de controle de enchentes, sendo fator expressivo na redução da velocidade do fluxo.

Em ambientes ribeirinhos, a vegetação divide-se em submersa, emergente e vegetação suspensa. Quando comparada à vegetação submersa e emergente, a vegetação suspensa não

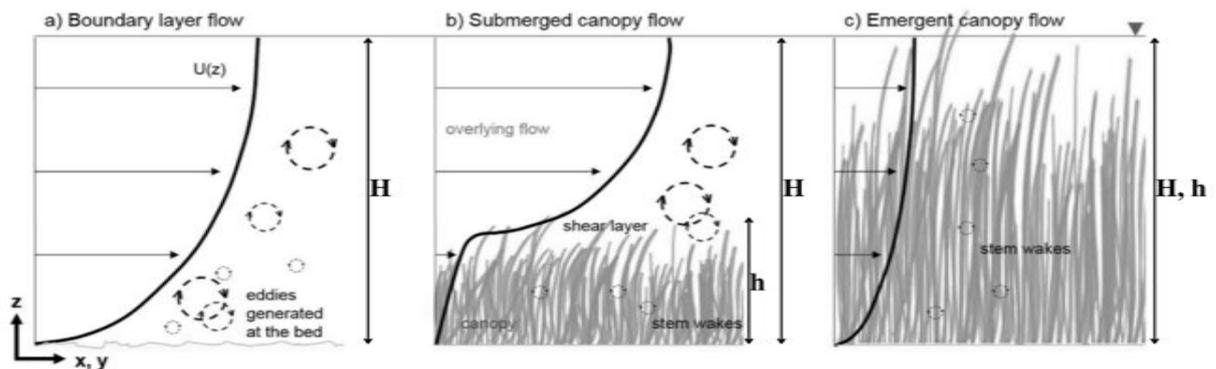
se enraíza na lama e pode flutuar dentro de um fluxo (HUAI *et al.*, 2012). Alterações na característica e distribuição da vegetação ripária interferem significativamente na redução da taxa de fluxo volumétrico nos canais, em virtude da resistência hidráulica adicional, e conseqüentemente, no transporte de sedimentos dissolvidos e particulados (TANINO; NEPF, 2008; TERMINI, 2018).

Diferente da perda de energia devido aos sedimentos granulares, que está associado ao arrasto viscoso na superfície do leito, as perdas de energia em razão dos elementos da vegetação estão associadas ao arrasto viscoso e de pressão (ABERLE; JÄRVELÄ, 2013). Impulsionado pela tensão turbulenta no topo da cobertura vegetal pelos gradientes de pressão e inclinação do leito (NEPF, 2012), o fluxo em áreas vegetadas divide-se em condições emergentes e submersas, pois o campo de fluxo altera conforme profundidade do fluxo excede a altura da vegetação (ABERLE; JÄRVELÄ, 2013).

Em um canal fluvial com cobertura vegetal emergente (**Figura 3c**), a profundidade da água (H) é toda preenchida e, normalmente, penetra através da superfície da água. A vegetação emergente estabelece uma estrutura tanto no fluxo médio quanto no turbulento em toda a coluna d'água. É comumente encontrada em ambientes como pântanos, florestas de algas marinhas, prados de ervas marinhas durante os períodos de maré baixa (NEPF, 2011).

Para canais com vegetação submersa (**Figura 3b**), em que a profundidade da água (H) é maior quando comparada a altura da vegetação (h) (NEPF; VIVONI, 2000), a velocidade, assume um comportamento dependendo da profundidade relativa de submersão, definida pela razão da profundidade da água e altura média da vegetação (H/h) (NEPF, 2011). O aumento na resistência ao fluxo e subsequente redução na capacidade de transporte é considerado o principal impacto que a vegetação submersa exerce em um canal fluvial (NEPF *et al.*, 2007).

Figura 3 - Comportamento do fluxo em três diferentes regimes: a) fluxo da camada limite; b) fluxo com vegetação submersa; c) fluxo com vegetação emergente.



H = profundidade da água (m); h = altura média da vegetação (m); $U(z)$ = velocidade do fluxo ($m\ s^{-1}$); **Fonte:** Adaptado de Beudin *et al.* (2017).

Vários estudos são realizados ao redor do mundo determinando os parâmetros e investigando a influência da vegetação na hidrodinâmica dos rios. A grande maioria desses estudos é realizada em laboratórios com ambientes controlados com cilindros, plantas e canais artificiais (NEPF, 1999; WU; SHEN; CHOU, 1999; HUI e XING, 2010; ZHAO; HUAI, 2016, De Serio *et al.*, 2018; WANG, WEI-JIE *et al.*, 2019).

A relação fluxo-vegetação é complexa, dado que dependem das características da planta (morfologia, rigidez, concentração, distribuição, entre outros fatores) e das características do fluxo (velocidade, turbulência, intensidade, entre outros fatores) (TERMINI, 2016). O fluxo, em um canal fluvial, raramente está isento de efeitos provocados pela presença da vegetação (AFZALIMEHR *et al.*, 2011).

Experimentos, em canais abertos, foram realizados buscando entender melhor como o fluxo é impactado pela vegetação dentro do canal fluvial (NEPF; VIVONI, 2000). Estudos sobre as caracterizações da estrutura de turbulência e dos processos de transporte relacionadas à presença da vegetação ficaram mais evidentes (LÓPEZ; GARCÍA, 2001), reconhecendo que o efeito turbulento dentro de um canal fluvial vegetado não é um processo aleatório (RAUPACH; FINNIGAN; BRUNET, 1996).

3.3. Coeficiente de arraste vegetal

Estimar a resistência ao fluxo é complexo, dado que este parâmetro está relacionado às características da vegetação, quando presentes, como o tamanho das folhas, morfologia das árvores (ABERLE; JARVELA, 2013), além da forma, rugosidade, rigidez e tipo de superfície das paredes dos canais, condições hidrodinâmicas (HUAI *et al.*, 2012) e meteorológicas locais (LEE *et al.*, 2004).

A vegetação em sistemas fluviais desempenha papel importante nos aspectos ambientais e ecológicos (LIU; ZENG, 2017). Segundo esses autores, a vegetação aumenta a resistência ao fluxo e, com isso, afeta a velocidade da água, aumenta o nível de água local, reduz a descarga de enchentes e controla o transporte dos sedimentos. Além disso, a vegetação pode atuar diretamente por captura e transformação biológica.

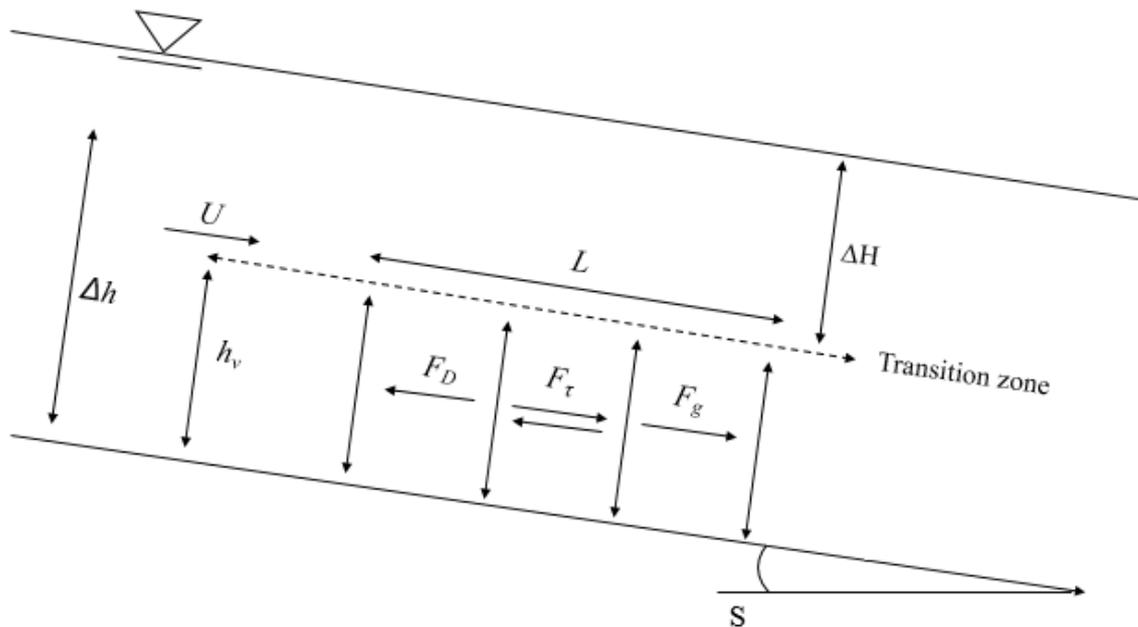
O impacto da vegetação no arrasto, intensidade de turbulência e difusividade foi inicialmente baseado em modelos físicos para estimar esses parâmetros (NEPF, 1999). Neste aspecto, a variação dos coeficientes de rugosidade também foi estudada para vegetação não submersa e submersa com a profundidade do fluxo (WU; SHEN; CHOU, 1999).

A resistência vegetativa varia com a profundidade do fluxo ou o grau de submersão (WU; SHEN; CHOU, 1999). O impacto da vegetação é amplamente determinado pelo arrasto adicional que ela fornece, o qual pode ser caracterizado por um coeficiente de arrasto médio. Segundo Afzalimehr *et al.* (2010), para determinar o transporte de sedimentos fluviais e a resistência ao fluxo, tanto a tensão de cisalhamento quanto a velocidade são normalmente necessárias.

Esses autores desenvolveram metodologias e modelos para determinar a intensidade de arrasto e turbulência por meio do coeficiente de arrasto vegetal (C'_D) e da força de arrasto vegetal (F_D), e sua influência na hidrodinâmica em rios e canais vegetados nas mais diversas condições de fluxo e resistência, como o modelo simplificado baseado no equilíbrio de forças de Wu, Shen e Chou (1999) (**Figura 4**), nas condições de vegetação emergente e submersa.

Desse modo, na atual estratégia de preservação dos recursos hídricos em rios intermitentes do Semiárido, faz-se necessário quantificar e compreender a contribuição de cada processo, mesmo diante da complexidade, no qual envolve medir ou estimar um grande número de variáveis.

Figura 4 - Equilíbrio de forças na direção do fluxo do rio com condições de vegetação emergente e submersa.



h = profundidade do fluxo (m); h_v = altura média da vegetação (m); H = altura do fluxo acima da vegetação; U = velocidade média do fluxo ($m\ s^{-1}$); L = comprimento médio acamado (m); S = declive inferior do canal ($m\ m^{-1}$); F_D = força de arrasto exercida sobre a vegetação (N); F_τ = força de cisalhamento (N); F_g = componente de peso (N). Adaptado de Wu, Shen e Chou (1999).

4.2. Medição das características hidrodinâmicas e morfométricas da vegetação

4.2.1. Seção Transversal

As medições de campo, vegetativas e hidrodinâmicas (velocidade do fluxo e nível de água) foram realizadas durante a estação chuvosa. A seção transversal selecionada foi utilizada durante todas as campanhas de monitoramento, na qual apresentava boas condições de acesso para instalação e uso dos equipamentos necessários, perfil longitudinal regular e afastado das confluências para evitar os efeitos de remanso (**Figura 6**). Na seção transversal, a espécie *Ipomoea pes-caprae*, conhecida popularmente como salsa-da-praia e pé-de-cabra, foi encontrada apenas nas margens do rio, sendo avaliada como vegetação flexível nas condições de emersão e submersão. Pertencente à família Convolvulaceae, apresenta distribuição principalmente tropical com representantes em climas subtropicais e temperados. Apresentando-se na forma arbustiva e hábito lianescente com sistema de caule longo, que pode atingir até 40 metros de comprimento e capaz de fixar dunas e areias costeiras. Os parâmetros vegetativos obtidos por meio de medição direta nas plantas são mostrados na **Tabela 1**.

Figura 6 - Seção transversal de monitoramento do riacho Cachoeira.



Tabela 1 - Características da espécie vegetal presente na seção transversal.

Espécie		<i>Ipomoea pes-caprae</i>	
		Margem Direita	Margem Esquerda
Número de hastes (N)	un	16	30
Espaçamento médio entre plantas (ΔS)	m	0,2	0,09
Altura média (h_v)	m	0,22	0,26
Comprimento médio acamado (L)	m	0,98	0,98
Projeção média da planta (a)	m ⁻¹	2,40	23,96
Diâmetro médio do caule (d)	m	0,006	0,006
Densidade média da população (ad)	adm.	0,014	0,144

4.2.2. Monitoramento hidrossedimentométrico

Na determinação das descargas líquidas e sólidas, foi usado o método Igual Incremento de Largura (IIL) (EDWARDS; GLYSSON, 1988). A seção transversal foi dividida em uma série de dez verticais igualmente espaçadas, variando de acordo com a largura total do fluxo de água no momento da medição. Em seguida, a batimetria foi realizada na posição central de cada segmento por meio de uma régua linimétrica. A área da seção transversal (A_{CS} ; m²) foi calculada em cada setor delimitado por duas verticais:

$$A_{CS} = \left(\frac{h_1}{2}\right) B_1 + \left(\frac{h_1+h_2}{2}\right) B_2 + \left(\frac{h_2+h_3}{2}\right) B_3 + \dots + \frac{h_i}{2} B_i \quad (1)$$

onde: $B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_i = B$ é a largura da seção transversal (m); h é a profundidade do fluxo na vertical (m). O raio hidráulico (R_h ; m) foi calculado por:

$$R_h = \frac{A_{CS}}{P_m} \quad (2)$$

onde: P_m é o perímetro molhado (m). A caracterização geométrica e a forma média da seção transversal são mostradas na **Tabela 2** e **Figura 7**, respectivamente. A velocidade média do fluxo foi obtida utilizando-se micromolinete fluviométrico (**Figura 8a**). O número de posições para as quais o medidor de corrente eletromagnética foi ajustado em cada vertical, foi definido de acordo com Back (2006), como demonstrado na **Tabela 3**. A descarga líquida ou vazão em cada segmento vertical (Q_i ; m³ s⁻¹), foi obtida por:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = A_i U_i \quad (3)$$

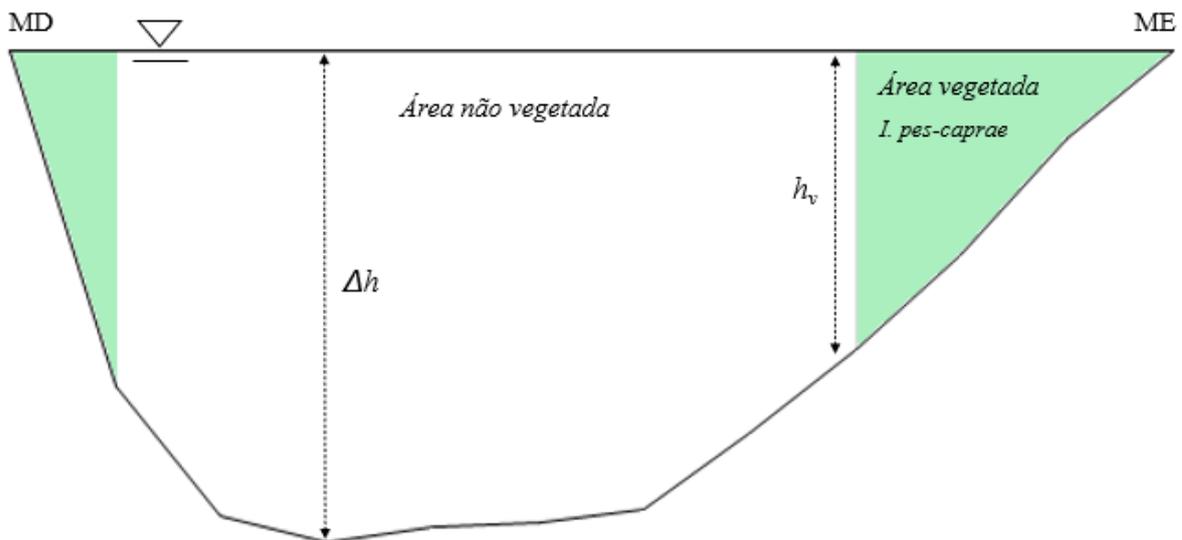
onde: A_i é a área de influência do segmento vertical; U_i é a velocidade média do fluxo no segmento vertical amostrado.

Tabela 2 - Caracterização geométrica da seção transversal da microbacia do riacho Cachoeira, Tabira, PE.

Variáveis	h	B	A_{CS}	P_m	R_h	S
	m	m	m^2	m	m	$m\ m^{-1}$
Média	0,24	3,3	0,82	3,55	0,22	0,0044
Máximo	0,54	4,0	1,56	4,67	0,38	-
Mínimo	0,02	2,2	0,24	2,47	0,10	-
Desvio padrão	0,08	0,8	0,40	0,80	0,07	-

h = profundidade do fluxo; B = largura da seção transversal; A_{CS} = área da seção transversal; P_m = perímetro molhado; R_h = raio hidráulico; S = declive inferior do canal; n = 15.

Figura 7 - Forma média da seção transversal da microbacia do riacho Cachoeira, Tabira, PE.



MD = margem direita; ME = margem esquerda; h = profundidade do fluxo (m); h_v = altura média da vegetação (m).

Tabela 3 - Parâmetros de medição da velocidade média do fluxo de acordo com a profundidade.

h (m)	Position	U ($m\ s^{-1}$)
< 0,60	0,6h	$U_{0,6h}$
0,60 – 1,20	0,2h e 0,8h	$(U_{0,2h} + U_{0,8h})/2$
1,20 – 2,00	0,2h; 0,6h e 0,8h	$(U_{0,2h} + U_{0,6h} + U_{0,8h})/2$
2,00 – 4,00	0,2h; 0,4h; 0,6h e 0,8h	$(U_{0,2h} + U_{0,4h} + U_{0,6h} + U_{0,8h})/2$
> 4,00	I_p ; 0,2h; 0,4h; 0,6h; 0,8h e F_p	$(U_{I_p} + 2(U_{0,2h} + U_{0,4h} + U_{0,6h} + U_{0,8h}) + U_{F_p})/10$

h = profundidade do fluxo; I_p = fluxo superficial; F_p = fundo do rio; 0,2h, 0,4h, 0,6h e 0,8h são as respectivas posições 20%, 40%, 60% e 80% da profundidade do fluxo onde o micromolinetete foi posicionado; $U_{0,2h}$, $U_{0,4h}$, $U_{0,6h}$ e $U_{0,8h}$ são as velocidades do fluxo em 20%, 40%, 60% e 80% da profundidade do fluxo.

Na quantificação das variáveis de transporte de sedimentos, o sedimento em suspensão (SS) foi coletado com amostrador DH-48 (Hidromec®), calibrado com bocal de entrada de

aço inoxidável de ¼ de diâmetro (**Figura 8b**). O tempo de amostragem do sedimento em suspensão (T_{SS} ; s) (MERTEN; POLETO, 2006) foi calculado pela expressão:

$$T_{SS} = \frac{2h}{U_t} \quad (4)$$

onde: U_t é a taxa de trânsito ($m\ s^{-1}$), calculada pelo produto da velocidade do fluxo (U_i) e a constante do bico $K = 0,4$ (USGS, 2005). As concentrações de sedimento em suspensão (C_{SS} ; $mg\ L^{-1}$) foram obtidas pelo método de evaporação (USGS, 1973). O sedimento de carga do leito (Bed) foi coletado com amostrador US-BLH 84 (**Figura 8c**), conforme o método IIL, no qual, os sedimentos arrastados pelo fluxo para o amostrador com abertura de entrada de $7,5 \times 7,5\ cm$, em intervalo tempo pré-estabelecido e foram retidos em bolsa de náilon com malha de diâmetro ($\phi = 1\ mm$). As descargas de sedimentos suspensos (Q_{SS} ; $t\ dia^{-1}$) - (HOROWITZ, 2003) e de carga do leito (Q_{Bed} ; $t\ dia^{-1}$) - (GRAY, 2005) foram calculadas pelas expressões, respectivamente:

$$Q_{SS} = \sum(C_{SS_i} Q_{l_i}) 0.0864 \quad (5)$$

$$Q_{BedS} = \sum \frac{m}{wt} B_i 0.0864 \quad (6)$$

onde: w é o diâmetro do bico (m); t é o tempo de amostragem (s); e B_i é a largura em cada vertical (m).

Figura 8 - a) Medição da velocidade do fluxo com micromolinete fluviométrico; b) Amostragem de sedimento suspenso com o amostrador DH-48 (Hidromec®); c) Amostragem de sedimentos de carga de leito com o amostrador US BLH-84.



Fonte: Cavalcante *et al.* (2021)

4.2.3. Parâmetros hidráulicos, coeficiente de arrasto e força de resistência da vegetação

A caracterização hidráulica foi determinada pelos números de Reynolds (Re ; adm.) e Froude (Fr ; adm.) (SIMONS; SENTÜRK, 1992):

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (9)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (10)$$

onde: g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); ν é a viscosidade cinemática da água ($m^2\ s^{-1}$) (JULIEN, 1995), calculada por:

$$\nu = [1.14 - 0.031(T - 15) + 0.00068(T - 15)^2]10^{-6} \quad (11)$$

onde: T é a temperatura da água ($^{\circ}C$). A resistência hidráulica do canal foi quantificada pelo número de Manning (n ; $m^{-1/3}\ s$), coeficiente de Darcy-Weisbach (f ; adm.) e por meio de tensão de cisalhamento (τ ; $N\ m^{-2}$), respectivamente por:

$$n = \frac{1}{U} h^{2/3} S^{1/2} \quad (12)$$

$$f = \frac{8ghS}{U^2} \quad (13)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (14)$$

onde: ρ é a massa específica de água ($f(T; ^{\circ}C)$) ($kg\ m^{-3}$); S é a inclinação do canal ($m\ m^{-1}$).

A avaliação da resistência induzida por vegetação para *I. pes-caprae* na seção transversal foi determinada de acordo com a razão de submersão (Sr ; adm.), pela expressão:

$$Sr = \frac{h}{h_v} \quad (15)$$

onde: h_v é a altura média da vegetação (m). A partir da relação entre U e Sr , as condições de vegetação emergente ($h < h_v$; $Sr < 1$) e submersa ($h > h_v$; $Sr > 1$) foram caracterizadas. A partir do modelo simplificado baseado no equilíbrio de forças (WU, SHEN; CHOU, 1999) (**Figura 4**), foram determinados o coeficiente de arrasto vegetal (C'_D ; m^{-1}) e a força de arrasto exercida sobre a vegetação (F_D ; N) nas condições de vegetação emergente e submersa:

$$C'_{DE} = \frac{2gS}{U^2} \quad (16)$$

$$C'_{DS} = \left(\frac{h}{h_v}\right) \frac{2gS}{U^2} \quad (17)$$

$$F_{Dx} = C'_D(Nadh_vBL) \frac{\rho U^2}{2} \quad (18)$$

onde: N é o número de hastes; ad é a densidade populacional (adm.); Nad representa o volume fracionário do domínio de fluxo ocupado pelas plantas (NEPF, 1999); L é o comprimento médio acamado (m).

4.3. Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise descritiva, analisados usando o software estatístico para Microsoft Excel XLSTAT (versão 2019.3.2) (ADDINSOFT, 2019). Para analisar a distribuição espacial das variáveis hidrossedimentométricas na seção transversal, os dados foram interpolados pelo método de Krigagem com uso do software SURFER® (versão 22.2.175) (GOLDEN SOFTWARE, 2021).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Interações entre vegetação, fluxo de água e transporte de sedimentos

Na **Tabela 4** estão os valores médios das variáveis hidráulicas relacionados a quinze campanhas de medição direta na seção transversal do riacho Cachoeira, onde foram analisados os efeitos da vegetação presente (*Ipomoea pes-caprae*) nas características do fluxo.

Tabela 4 - Caracterização geral de variáveis hidráulicas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira, PE.

Variáveis	U	Q _l	$\nu \cdot 10^{-6}$	ρ	Re	Fr	f	n	τ
	m s ⁻¹	m ³ s ⁻¹	m ² s ⁻¹	kg m ⁻³	adm.			m ^{-1/3} s	N m ⁻²
Máximo	0,27	0,39	0,92	997,30	121.007,16	0,24	2,81	0,16	17,12
Mínimo	0,21	0,01	0,84	995,90	30.914,68	0,11	0,64	0,06	4,78
E. Padrão	0,02	0,13	0,022	0,43	22.411,85	0,03	0,49	0,02	3,34
Média	0,24	0,15	0,88	996,76	66.634,65	0,16	1,46	0,11	10,47
Soma									

U = velocidade do fluxo; Q_l = descarga líquida/vazão; ν = viscosidade cinemática da água; ρ = massa de água específica; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; f = coeficiente de Darcy-Weisbach; n = número de Manning; τ = tensão de cisalhamento; C_{SS} = concentração de sedimento em suspensão; Q_{SS} = descarga de sedimentos em suspensão; Q_{Bed} = descarga de sedimentos do leito. n = 15.

5.2. Análise do perfil ou distribuição de velocidade do fluxo

Considerando os perfis de velocidade determinados na direção do fluxo em diferentes amostragens, observa-se na **Figura 9** que, em geral, quanto menor a altura do fluxo, os valores concentram-se próximos ou acima da profundidade de fluxo médio (0,24 m).

A posição da velocidade máxima localizou-se entre as verticais 2-7 (ausentes de vegetação) e a altura do fluxo (h) variando de 0,13 m – 0,52 m, com U_{max} (0,09 – 0,47 m s⁻¹; 0,27 ± 0,08) e vazão (Q_l) (0,01 – 0,10 m³ s⁻¹; 0,03 ± 0,02) (mínimo – máximo; média ± erro padrão). As mudanças nos perfis de velocidade nessa faixa não foram suaves, de modo que a diferença entre U_{max} e a velocidade observada (U) foi em média 40% superior, variando entre 14% e 61%. Segundo Graf e Altinakar (1998), a velocidade máxima (U_{max}), considerando o escoamento uniforme, pode ser localizada na superfície livre. Entretanto, para um fluxo uniforme sobre um leito cascalhento e bancos ou paredes vegetadas, a localização da U_{max} pode depender da distância das paredes da calha fluvial (AFZALIMEHR; DEY, 2009).

A estrutura do fluxo é muito afetada pela presença de vegetação, comportando-se como um fluxo não uniforme, ou seja, a tensão aumenta e a velocidade flutua devido ao efeito da vegetação. Em outras palavras, sob condições de fluxo uniformes uma distribuição logarítmica pode ser usada em toda a profundidade do fluxo; no entanto, a presença de cobertura vegetal impede esta aplicação sobre a profundidade total, podendo induzir a erros na explicação da distribuição de velocidade (KIRONOTO; GRAF, 1995).

Levando em consideração a posição da velocidade máxima e a velocidade na presença da cobertura vegetal nas paredes (U_{veg}), a diferença entre U_{max} e U_{veg} foi muito brusca, em média 63% superior, variando entre 22% e 87%, com U_{veg} ($0,00 - 0,33 \text{ m s}^{-1}$; $0,13 \pm 0,01$). A redução dos valores de velocidade do fluxo na região vegetada demonstra a influência da vegetação nos perfis de velocidade (**Figura 7**). Alguns pesquisadores (KIRONOTO; GRAF, 1995; GUO; JULIEN, 2001, 2008; AFZALIMEHR *et al.*, 2011) afirmam que a posição da U_{max} pode ser encontrada bem abaixo da superfície livre se a relação entre a largura do leito (B) e a profundidade (h) de um canal aberto, for menor do que um certo valor. No presente estudo, a relação B/h foi 7,41, apresentando U_{max} bem abaixo da zona de fluxo livre e próximo ao leito do canal (**Figuras 9 e 10**).

Segundo Guo e Julien (2008), quando a relação B/h diminui, a distribuição da velocidade no plano central é influenciada pelas paredes laterais e a velocidade máxima ocorre abaixo da superfície livre. Nezu e Rodi (1986) afirmaram que esse fenômeno ocorre quando a relação B/h é menor que 5, como também, Ferro (2003) revela que para uma dada relação B/h, esse fenômeno ocorre do eixo central em direção às paredes laterais; No entanto, o efeito desaparece para valores da relação B/h maiores que 5,5. Além disso, Graf e Altinakar (1998) também afirmaram que para razões B/h menores que 5, o fluxo é tridimensional e a velocidade máxima está abaixo da superfície livre.

Huai *et al.* (2009) descobriram que as correntes secundárias não podem ser criadas quando a relação B/h é menor que 5. Em contrapartida, segundo Afzalimehr *et al.* (2010), a relação de B/h igual a 5 não deve ser considerada como critério para determinar se ocorre ou não uma corrente secundária, especialmente para os canais naturais.

Afzalimehr e Dey (2009) relataram que em um fluxo sobre leito de cascalho com e sem cobertura vegetal nas paredes, a principal causa para a ocorrência da velocidade máxima abaixo da superfície da água, pode ser a presença de correntes secundárias, e que, a localização da U_{max} torna-se mais próxima da superfície livre devido ao enfraquecimento do efeito dos fluxos secundários. Ainda, segundo esses autores, a característica mais importante relacionado aos fluxos secundários em um canal estreito e aberto é que a velocidade máxima não aparece na superfície livre, como observado no presente trabalho.

Por outro lado, em canais naturais, mesmo que B/h seja igual 7, o efeito das correntes secundárias pode ser observado próximo às margens e a U_{max} próximo à margem está sob a superfície da água (AFZALIMEHR *et al.*, 2010). Ghisalberti e Nepf (2004) relatam que os fluxos secundários não são gerados pelas paredes da calha; eles são bastante inerentes aos

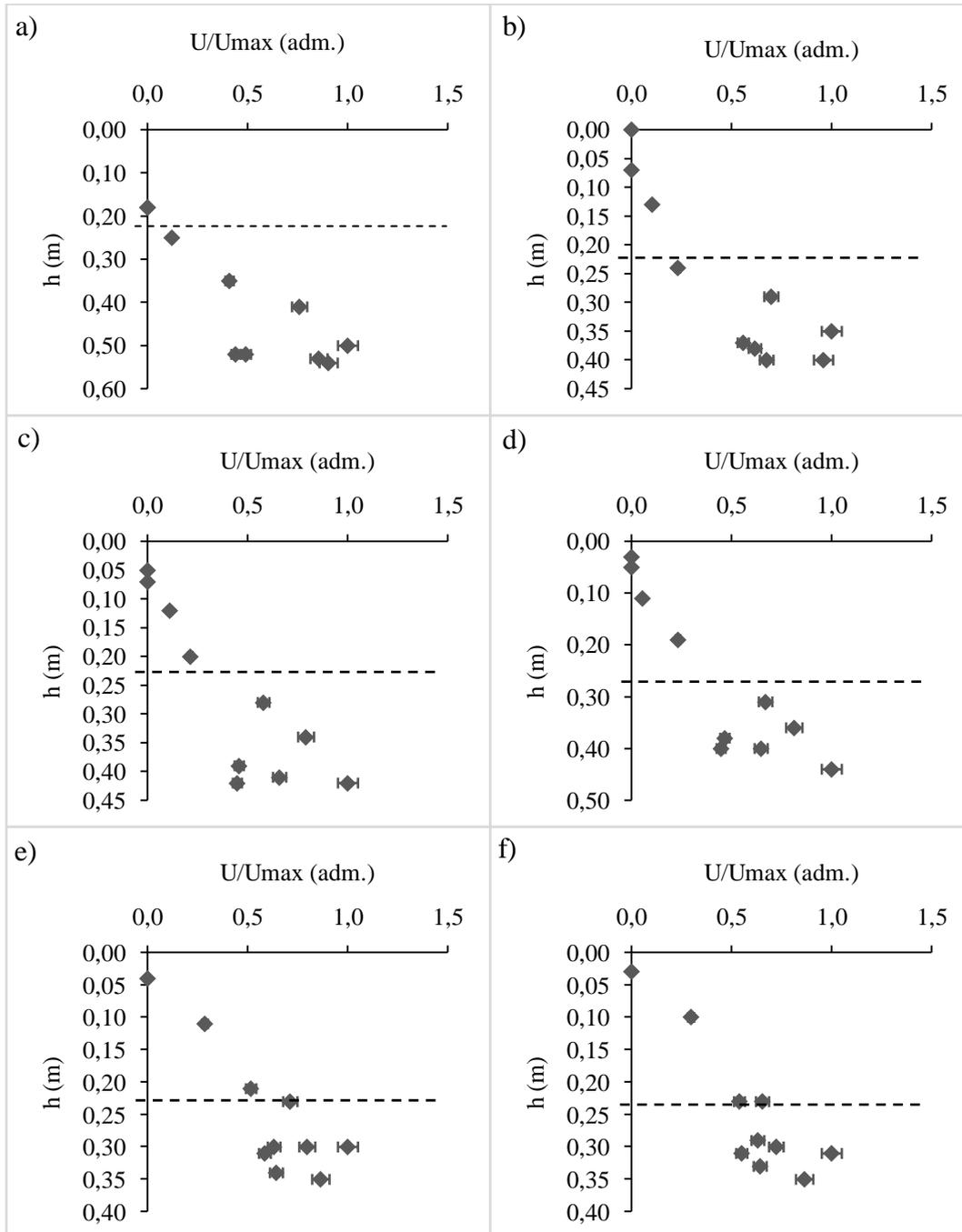
fluxos sob condição de vegetação submersa. A rugosidade hidráulica do leito influencia a distribuição de velocidade, pois os elementos de rugosidade geram redemoinhos (vórtex), com tamanhos característicos na ordem dos elementos de rugosidade que afetam a estrutura de turbulência e, conseqüentemente, a velocidade do fluxo (Van Rijn, 1993). Além disso, as correntes secundárias em uma calha reta com leito fixo são desenvolvidas como resultado da não homogeneidade da seção transversal (AFZALIMEHR *et al.*, 2011).

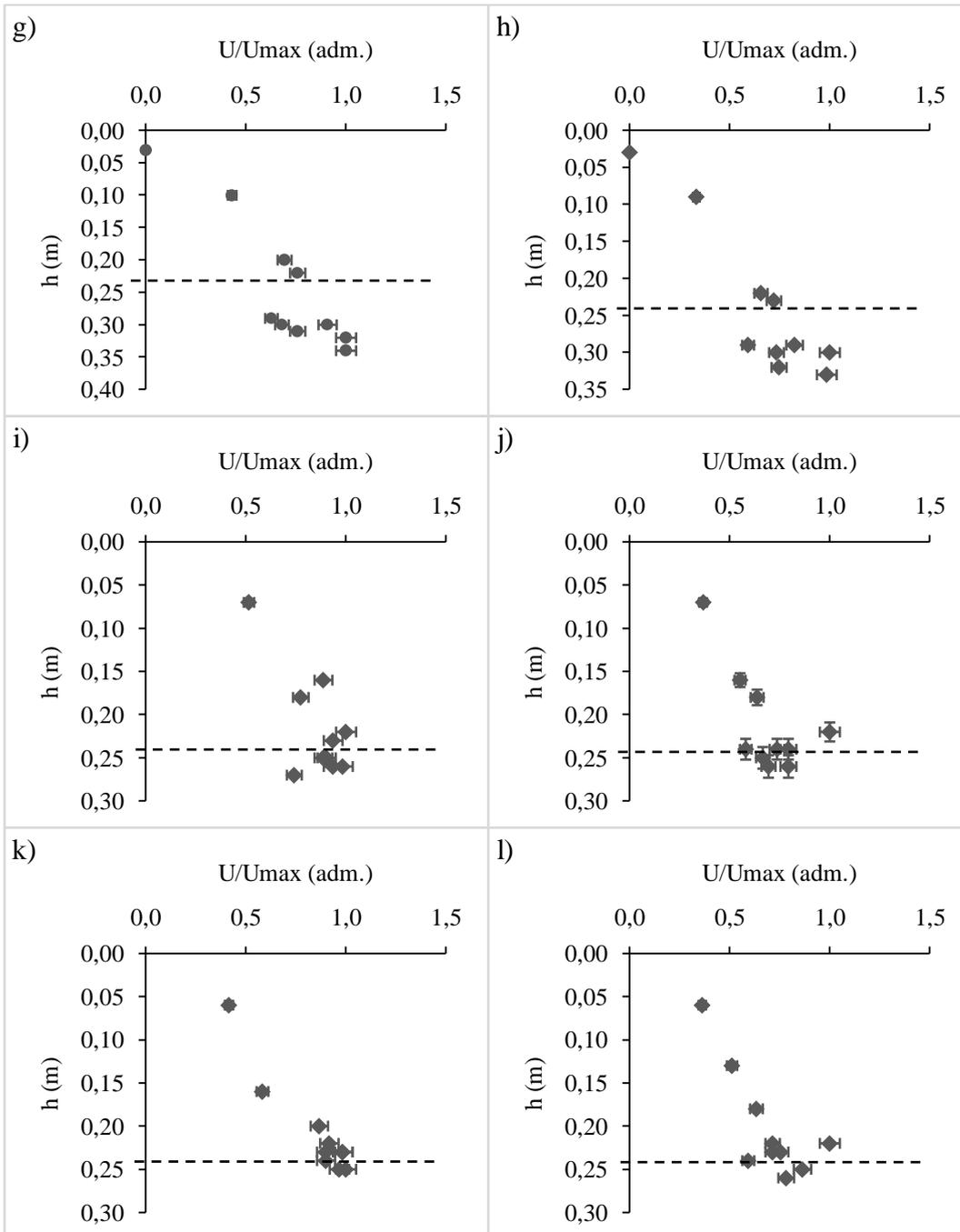
Apesar das alegações anteriores, Afzalimehr e Dey (2009) afirmaram que quando as paredes da calha fluvial se encontram vegetadas, não existe uma localização fixa para U_{max} na distribuição de velocidade. Por causa do efeito das paredes da calha fluvial, um forte componente de velocidade lateral é direcionado perto da superfície da água, no sentido da parede lateral para o centro do canal, e o fluxo descendente (valor negativo para o componente vertical da velocidade), ocorrendo a partir da superfície livre (NEZU; RODI, 1985). Conforme esses autores, esta diferença de componentes de velocidade lateral e vertical produz um forte vórtice na superfície livre e a ocorrência da U_{max} abaixo da superfície da água. Os diferentes tipos de vegetação utilizados, bem como, a realização em laboratório dos estudos citados, podem ser responsáveis por resultados diferentes do que os encontrados em nosso experimento.

No entanto, a localização de U_{max} depende ou pode estar diretamente relacionada à vazão e a relação de submersão (S_r), ou seja, da relação entre a profundidade do fluxo e a altura da vegetação que determina as condições de vegetação submersa e emersa, bem como, as zonas de cisalhamento ($h < H_v$; $S_r < 1$) e fluxo livre ($h > H_v$; $S_r > 1$), como observado e descrito por Cavalcante *et al.* (2021).

De modo geral, a velocidade do fluxo concentra-se distante da parede vegetada, principalmente na margem direita, a razão é atribuída ao fato de que as paredes vegetadas, com maior densidade de plantas na margem esquerda, conduzem e concentram o fluxo próximo ao leito induzido pela rugosidade da vegetação, favorecendo a formação de estruturas de fluxo secundário, ocasionando a erosão do talude (TERMINI; SAMMARTANO, 2012; TERMINI, 2013; TERMINI, 2014; TERMINI, 2016) (**Figura 10**).

Figura 9 - Distribuições e perfis de velocidade em diferentes campanhas de medição na mesma seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Letras de a – o, são referentes as 15 campanhas.





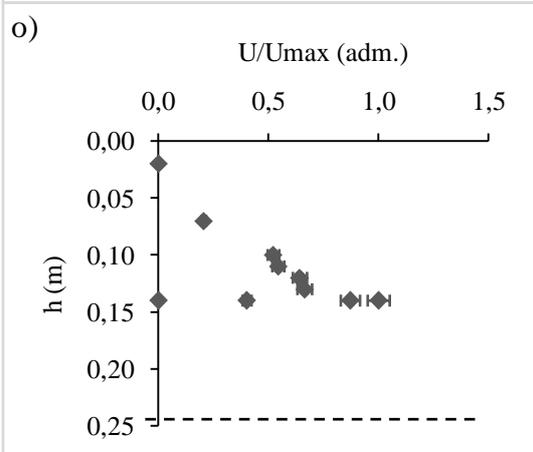
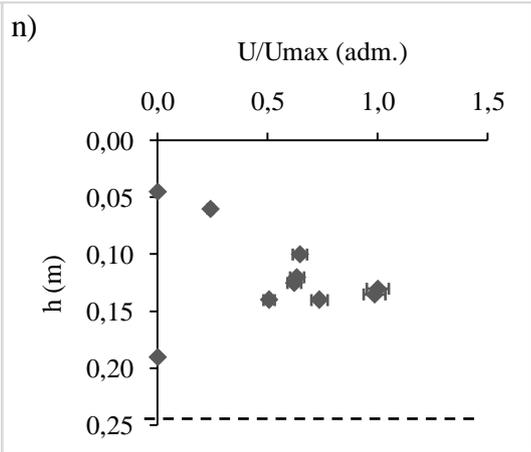
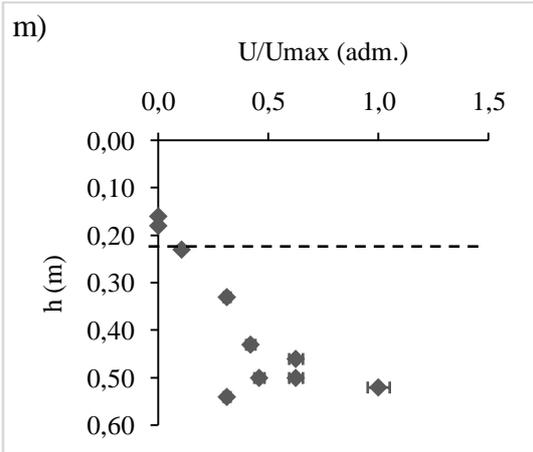
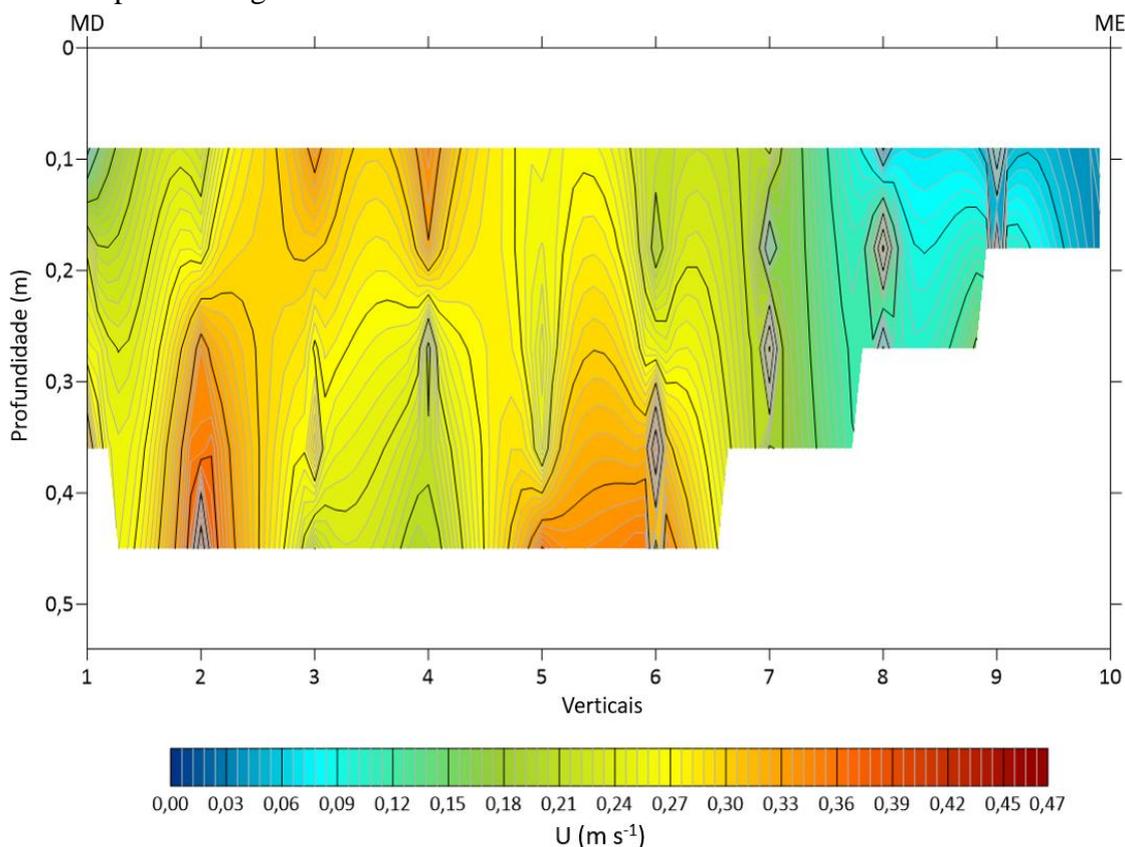


Figura 10 - Mapa de contorno da distribuição de velocidade de fluxo longitudinal (m s^{-1}), em leito com paredes vegetadas.



5.3. Efeitos da vegetação nas características do fluxo

A vegetação desempenha um papel importante na ecologia e afeta os recursos hídricos, sendo de grande importância identificar e avaliar os processos físicos que dominam a complexa interação entre o fluxo de água e a vegetação (SCHONEBOOM *et al.* 2010). O impacto da vegetação no fluxo de água é determinado principalmente pela resistência induzida pela vegetação (WU; SHEN; CHOU, 1999; BAPTIST *et al.*, 2007; NEPF, 2012), no qual, pode afetar a caracterização hidrodinâmica da água.

A resistência de um canal é comumente descrita pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n) ou pelo fator de atrito de Darcy-Weisbach (f), dentre os quais o n de Manning é amplamente utilizado no cálculo do escoamento em canal aberto. Em geral, o regime do fluxo foi caracterizado como fluxo turbulento e subcrítico (SIMONS; SENTÜRK, 1992), frequentemente observado em canais aluviais naturais, como indicado por $Re > 2.500$, média de 66.634,65 adm. (30.914,68–121.007,16 adm.; $\pm 22.411,85$) e $Fr < 1$, média de 0,16 adm. (0,11–0,24 adm.; $\pm 0,03$), respectivamente. A distribuição espacial dos números de Re e Fr na seção transversal de controle, pode ser observada nas **Figuras 11 e 12**.

Figura 11 - Mapa de contorno da distribuição do número de Reynolds (adm.), em leito com paredes vegetadas.

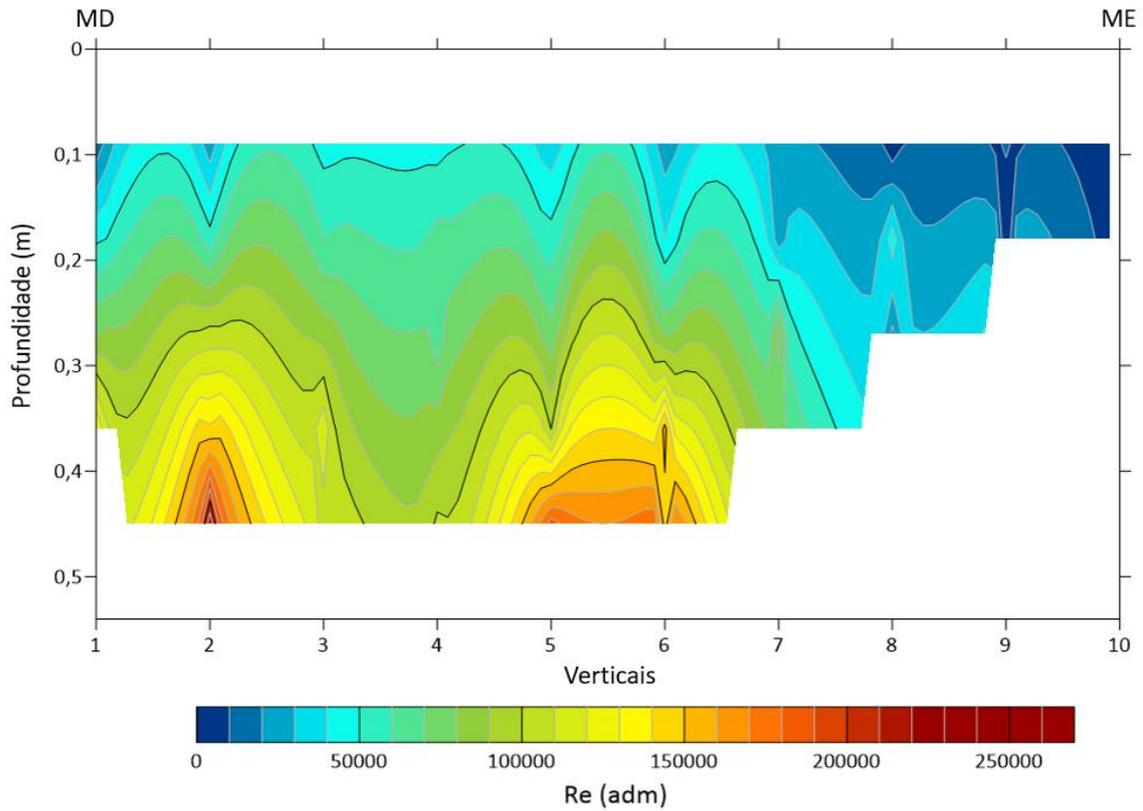
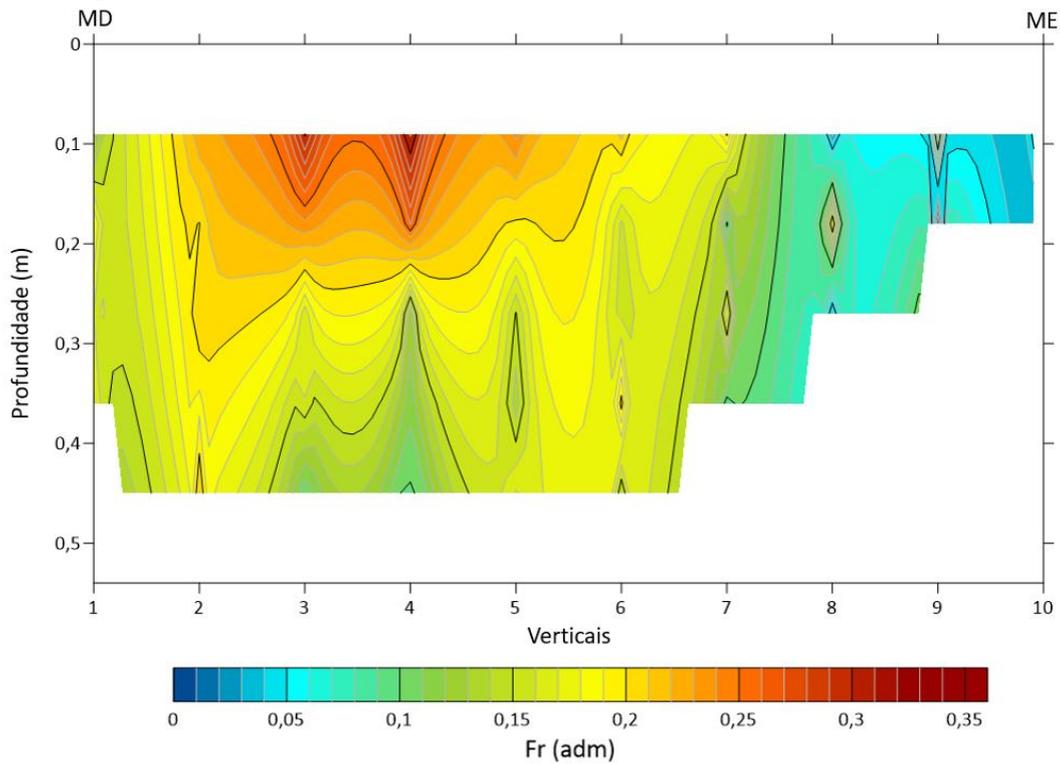


Figura 12 - Mapa de contorno da distribuição do número de Froude (adm.), em leito com paredes vegetadas.



Os maiores valores do número de Reynolds que caracterizam o regime turbulento do fluxo, localizaram-se entre as verticais 2-7, ausentes de vegetação e próximo ao leito (**Figura 11**), com Re (22.471,50– 261.444,05 adm.; $93.733,40 \pm 50.924,32$) e na presença da vegetação com Re (0,00 – 151.958,93 adm.; $29.579,58 \pm 4.363,08$) (mínimo – máximo; média \pm erro padrão).

O regime fluvial ou subcrítico, caracterizado pelos valores do número de Froude, apresentou maiores valores entre as verticais 2-7, ausentes de vegetação e na superfície livre (**Figura 12**), com Fr (0,06 – 0,35 adm.; $0,16 \pm 0,05$) e na presença da vegetação com Fr (0,00 – 0,19 adm.; $0,09 \pm 0,01$). Diferente dos condutos forçados, em que a pressão é considerada constante na seção transversal, no caso de escoamento em canais livres, há grande variação de pressão com a variação de profundidade, bem como, com a presença de vegetação, assim, uma dada profundidade, pode ser crítica, subcrítica ou supercrítica dependendo da vazão transiente no canal. Entretanto, a resistência ao fluxo causada pela vegetação em um canal irregular é independente dos efeitos gravitacionais quando o número de Froude é menor que 1,6 (KOLOSEUS; DAVIDIAN, 1966; LIU; ZENG, 2016, 2017).

As variáveis de resistência convencionais, considerando toda a seção transversal, apresentaram valores médios do número de Manning (n): $0,11 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ($0,06\text{--}0,16 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$; $\pm 0,02$); coeficiente de Darcy–Weisbach (f): 1,46 adm. ($0,64\text{--}2,81$ adm.; $\pm 0,49$), e tensão de cisalhamento (τ): $10,47 \text{ N m}^{-2}$ ($4,78\text{--}17,12 \text{ N m}^{-2}$; $\pm 3,34$).

Entre as verticais 2-7, ausentes de vegetação, os valores de n e f foram: ($0,04\text{--}0,31 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$; $0,12 \pm 0,05$) e ($0,30\text{--}10,79$ adm.; $1,88 \pm 1,73$), respectivamente (**Figuras 13 e 14**). Entretanto, na região vegetada, foi possível observar a concentração dessas forças, principalmente na margem esquerda, onde ocorreu a maior concentração de hastes de *Ipomoea pes-caprae*, com valores de n e f : ($0,00\text{--}0,59 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$; $0,11 \pm 0,02$) e ($0,00\text{--}57,12$ adm.; $3,87 \pm 1,28$), respectivamente.

Esses coeficientes de resistência, principalmente o de Manning, não são projetados especificamente para canais vegetados e, portanto, seus valores de resistência são frequentemente subestimados (JÄRVELÄ, 2005). Os coeficientes estimados são muito afetados pela relação B/h , de submersão, granulometria do leito, bem como da presença de cobertura vegetal e suas diferentes composições nos canais naturais (flexibilidade do caule, altura da planta e a porosidade da vegetação, etc.) (AFZALIMEHR *et al.*, 2010).

Figura 13 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de resistência ao fluxo de Manning (n ; $m^{-1/3} s$), em leito com paredes vegetadas.

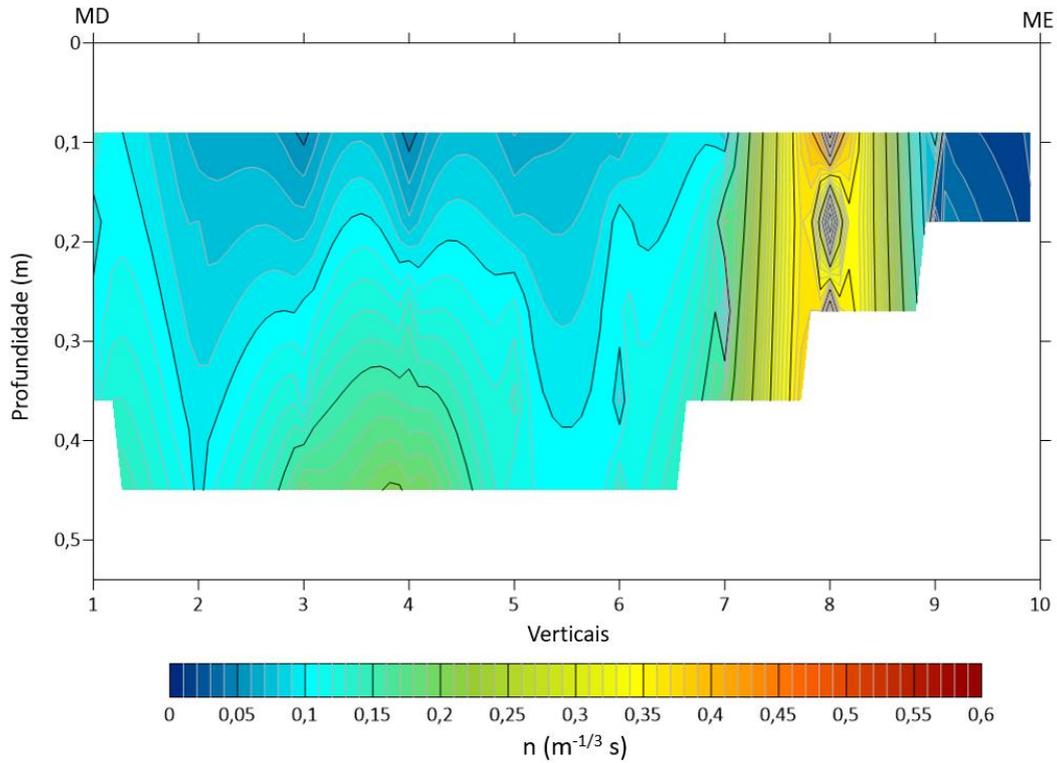
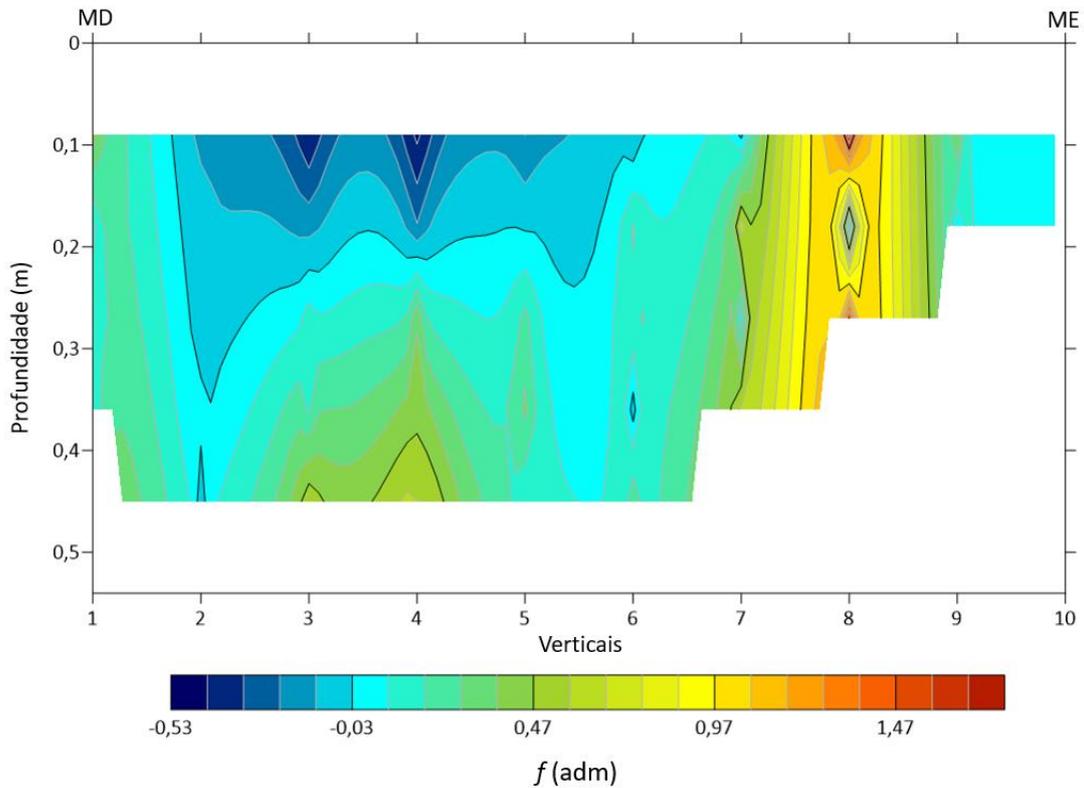


Figura 14 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de Darcy–Weisbach (f ; adm.), em leito com paredes vegetadas.

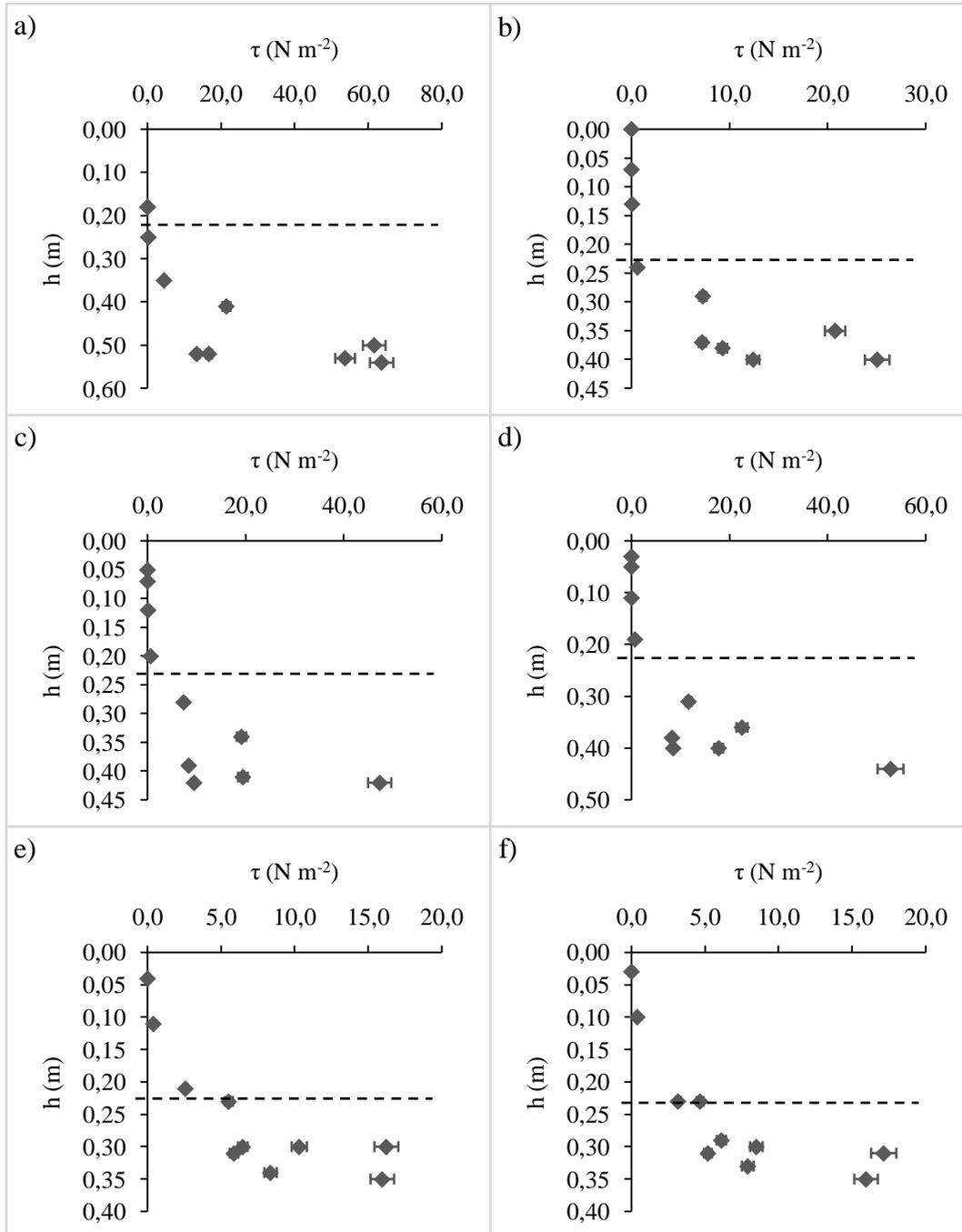


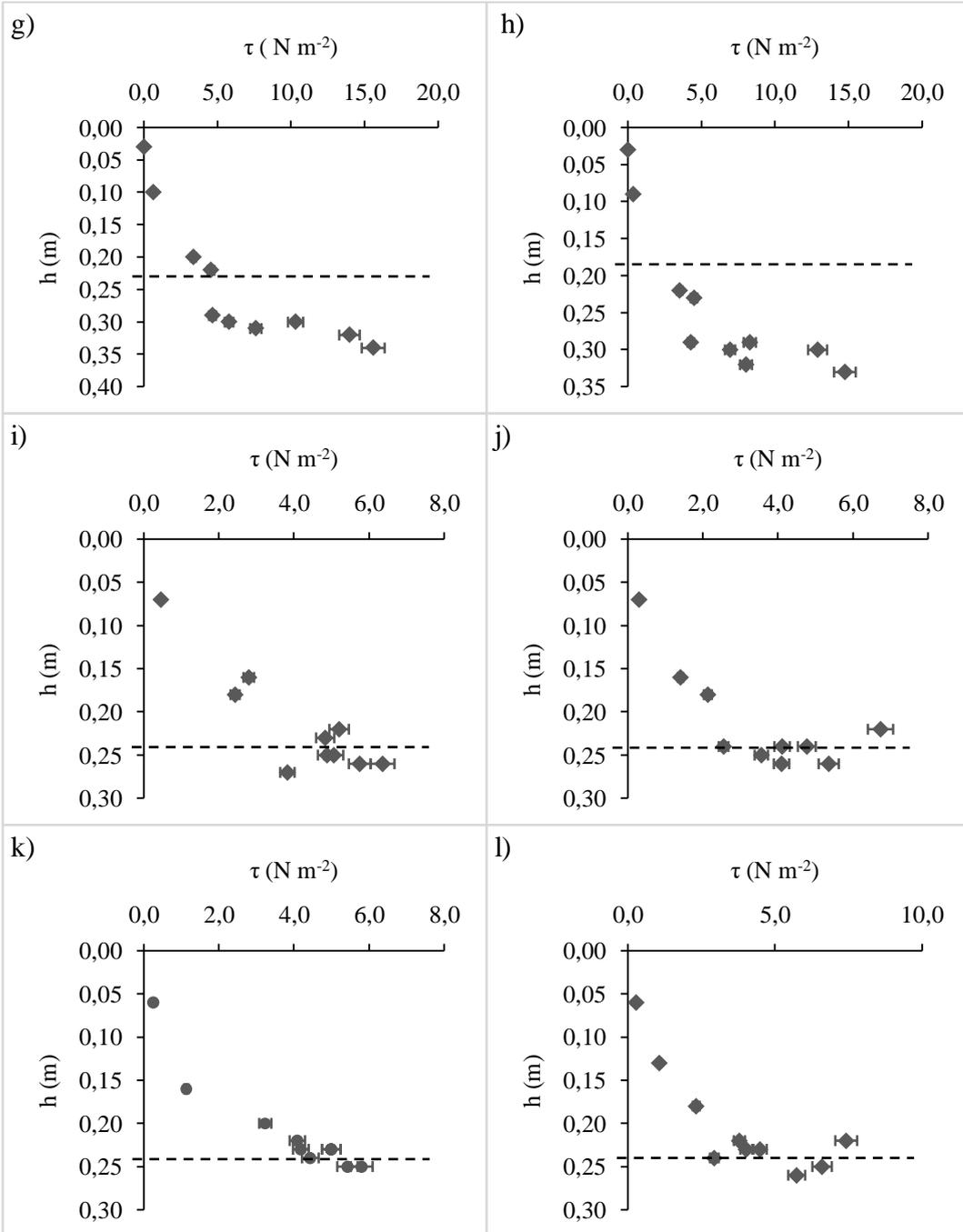
Assim como, para os perfis de velocidade, a **Figura 15** mostra que o pico das distribuições de tensão de cisalhamento (τ) localizou-se entre as verticais 2-7 (ausentes de vegetação) e altura do fluxo (h) variando de 0,13 m – 0,52 m, com τ (0,00 – 76,05 N m⁻²; 11,59 ±14,24). Os resultados indicam que a tensão de cisalhamento máxima ou mínima é afetada pela parede vegetada, profundidade do fluxo e descarga (**Figura 16**), ou seja, com τ (0,00 – 21,40 N m⁻²; 2,14 ± 0,46).

Do mesmo modo e, como já delegado para os perfis de velocidade, os resultados sobre condição de fluxo uniforme, a tensão é linear; Entretanto, mesmo se o fluxo for uniforme, a estrutura do fluxo é muito afetada pela presença de vegetação e se comporta como um fluxo não uniforme. A **Figura 15** revela que, para um caso de fluxo não uniforme (vazão e profundidade do fluxo não constante ao longo da calha) com cobertura vegetal ao longo das paredes, a distribuição de tensão é não linear e segue uma forma parabólica. A partir da **Figura 16**, observa-se que a resistência causada pela vegetação no fluxo, pode induzir turbulência adicional ao fluxo, deslocando as tensões máximas para níveis mais baixos. Na verdade, a velocidade é substancialmente desacelerada perto da zona de vegetação e uma forte camada de cisalhamento lateral é gerada na região central e lateral direita e, devido a um gradiente de pressão, uma distribuição vertical é gerada, tendo o valor máximo da tensão de cisalhamento no leito e o valor mínimo localizado na superfície livre (**Figura 16**).

Verificou-se que as variações ou descontinuidades observadas nas distribuições de velocidade e tensão cisalhante (**Figuras 9 e 15**), são atribuídas à presença de cobertura vegetal na parede da calha fluvial, resultando da interação complexa entre fluxo e vegetação, como já citado. Em outras palavras, a forma de distribuição irá depender da uniformidade ou não uniformidade do fluxo. A turbulência do escoamento e a presença de correntes secundárias no canal também contribuem para a não uniformidade da distribuição da tensão de cisalhamento (AFZALIMEHR; DEY, 2009). Além disso, a distribuição da tensão de cisalhamento afeta a estrutura do fluxo, nesse caso, a geração de turbulência induzida por uma região com vegetação em relação a uma região sem vegetação, conseqüentemente, influenciando o transporte de sedimentos, contaminante e as estimativas de resistência ao fluxo, parâmetros de vital importância para a avaliação, estudo e mitigação de eventos extremos, como as cheias ou inundações.

Figura 15 - Distribuições e perfis de tensão de cisalhamento do fluxo em diferentes campanhas de medição na mesma seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. (Letras de a – o, são referentes às 15 campanhas).





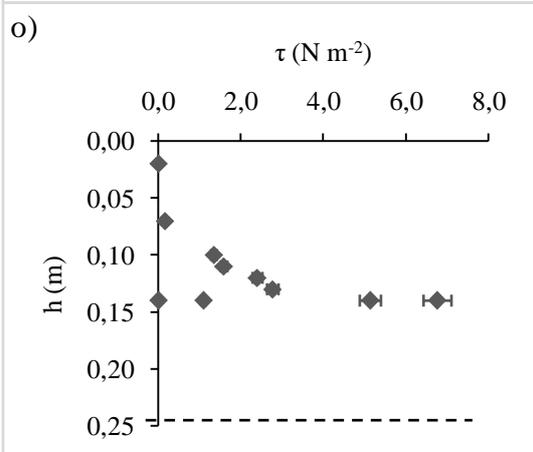
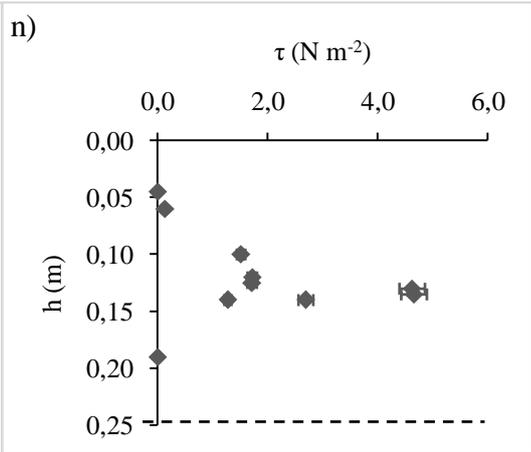
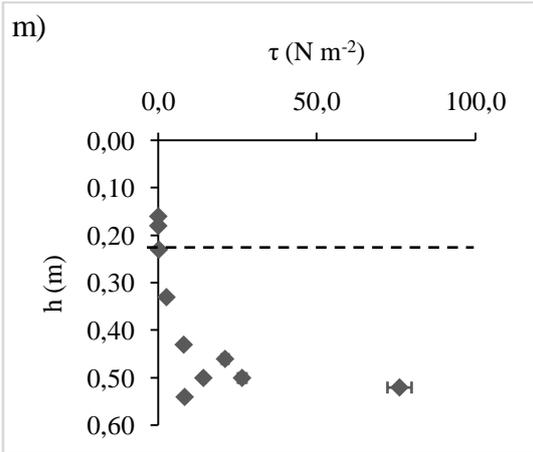
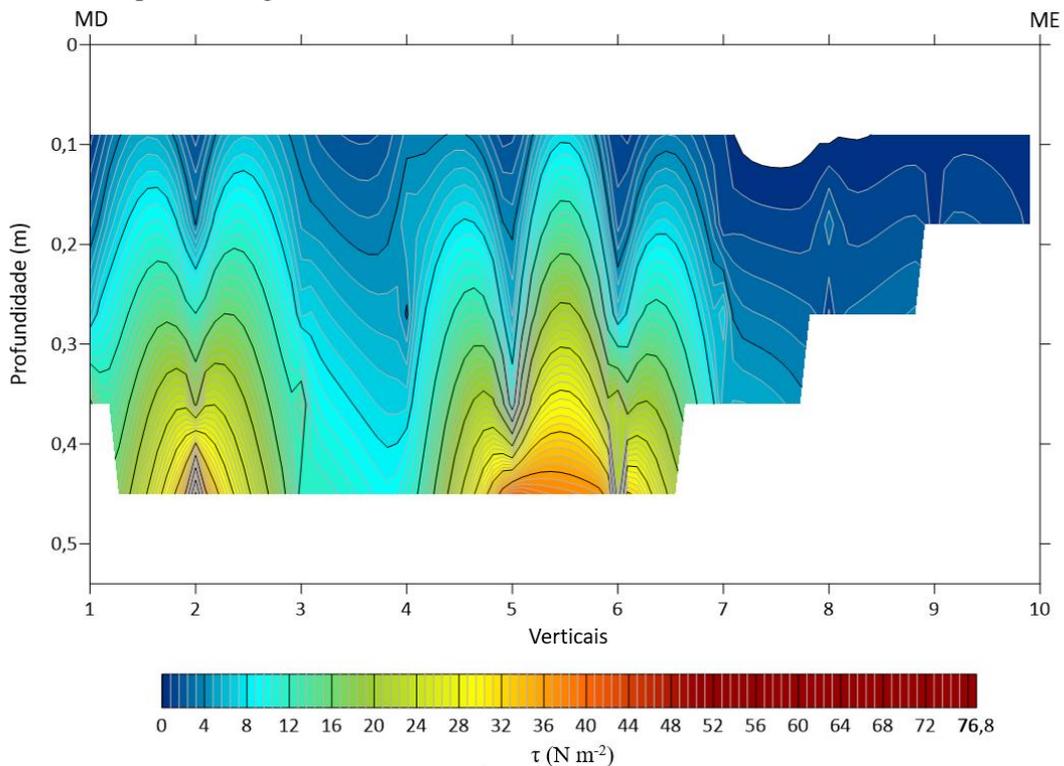


Figura 16 - Mapa de contorno da distribuição de tensão de cisalhamento do fluxo longitudinal (N m^{-2}) em leito com paredes vegetadas.



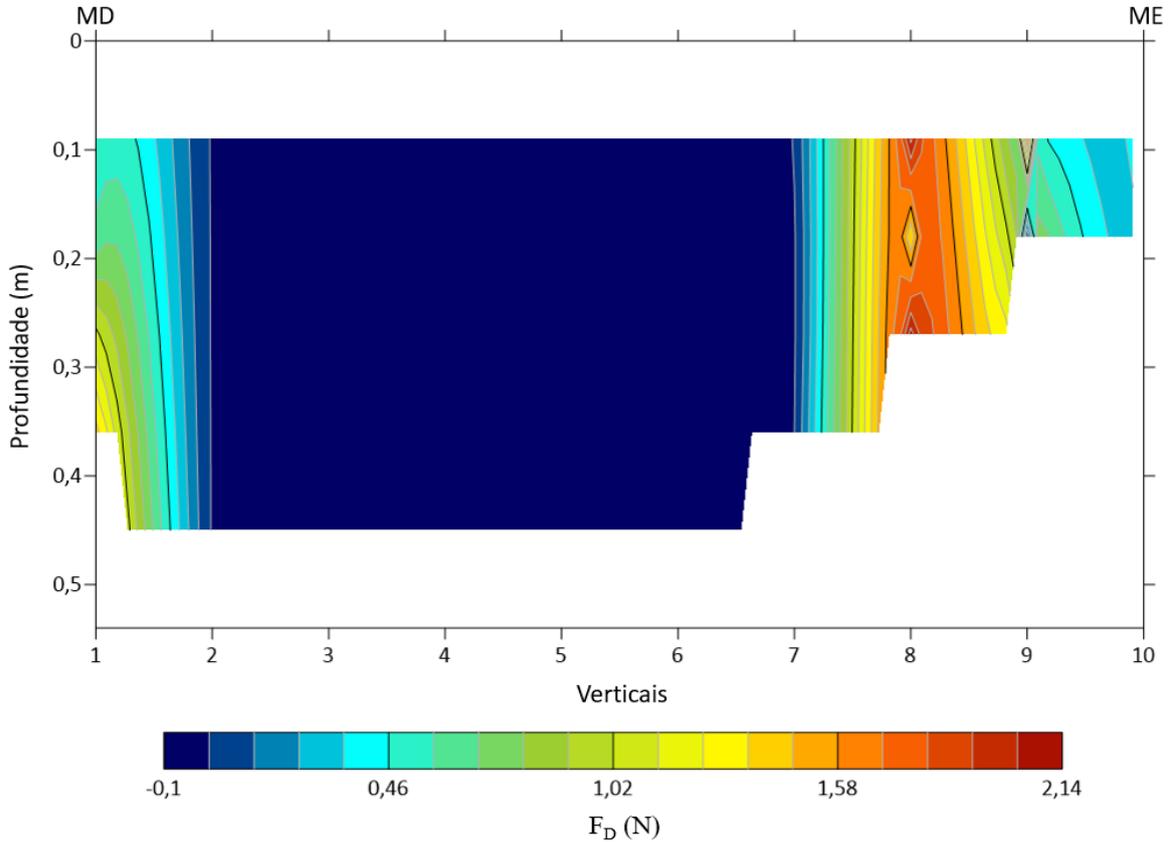
A intensidade da turbulência é um parâmetro importante, pois reflete a estrutura da turbulência. Comparada com a região sem vegetação, a intensidade de turbulência do fluxo no corpo d'água com vegetação distribui-se obviamente diferente; Entretanto, embora a velocidade do fluxo médio possa ser reduzida com o aumento da densidade da vegetação, a turbulência pode permanecer inalterada ou mesmo aumentar.

Nas características de escoamento influenciadas pela vegetação, a força de arrasto (F_D) é um fator muito importante. A teoria da F_D é experimentalmente baseada no escoamento que transpassa um ou conjunto de cilindros; Entretanto, em condições de campo, é definida como arrasto de atrito resultante da vegetação e que atua na direção oposta ao fluxo. A relação entre a estrutura do fluxo, a força de arrasto e as características da vegetação tem sido bem explorada na literatura (NEPF; VIVONI, 2000; FOLLETT; NEPF, 2012; TANG *et al.*, 2014; DEVI; SHARMA; KUMAR, 2019).

A força de arrasto média exercida sobre a vegetação (F_D) estimada para ambas as margens foi de 0,95 N (0,00 – 2,10 N; $\pm 0,10$), na MD foi de 0,86 N (0,47–1,67 N; $\pm 0,10$) e para a ME foi de 0,98 N (0,00 – 2,10 N; $\pm 0,13$). As características da vegetação têm um impacto notável na estrutura do fluxo, como observado nos maiores valores de F_D na margem esquerda

(Figura 17), resultante da maior densidade da vegetação que, conseqüentemente, aumenta significativamente a resistência ao fluxo ou as forças de cisalhamento.

Figura 17 - Mapa de contorno da distribuição da força de arrasto vegetal F_D (N), em leito com paredes vegetadas.



O coeficiente de arrasto vegetal (C'_D) médio estimado para as características da vegetação presente (*Ipomoea pes-caprae*), para ambas as margens foi de $6,92 \text{ m}^{-1}$ ($0,00 - 129,81 \text{ m}^{-1}$; $\pm 2,46$), na MD foi de $3,61 \text{ m}^{-1}$ ($1,22 - 12,46 \text{ m}^{-1}$; $\pm 0,96$) e para a ME foi de $8,02 \text{ m}^{-1}$ ($0,00 - 129,81 \text{ m}^{-1}$; $\pm 3,25$). Esses resultados mais uma vez demonstram o efeito da vegetação, principalmente na margem esquerda (Figura 18), com o efeito da densidade de plantas no ambiente aquático aumentando a resistência ao fluxo, afetando a distribuição de velocidade do fluxo e resultando na sua redução, como observado por Liu e Zeng (2016) e Cavalcante *et al.* (2021), por meio da relação $C'_D \times U$ (Figura 19). Segundo Wu (2008), o C'_D é considerado o parâmetro chave para entender a distribuição vertical da velocidade do escoamento; Enquanto que Cassan *et al.* (2017) destacam que as variações no perfil de velocidade, estão diretamente ligadas aos elementos rugosos do leito e ao coeficiente de arrasto vegetal.

De acordo com Lee *et al.* (2004), as características vegetativas que influenciam a rugosidade vegetal exercida sobre o escoamento, são principalmente a distribuição espacial, forma, tamanho, rigidez e população de plantas por unidade de área.

Segundo Nepf (2012), galhos e caules com orientação perpendicular ao escoamento podem gerar turbulência. No entanto, como os espaçamentos médios entre hastes (ΔS ; MD = 0,20 m e ME = 0,09 m) foram maiores que o diâmetro médio das hastes ($d = 0,006$ m) (**Tabela 1**), a turbulência pode não ser gerada na escala ΔS , como afirmado por Tanino e Nepf (2008) e Nepf (2012). Esses resultados corroboram as alegações descritas sobre os perfis de velocidade e tensão de cisalhamento do fluxo, de que a vegetação presente nas margens pode desencadear a instabilidade do fluxo, levando à geração de estruturas (vórtices de Kelvin-Helmoltz, por exemplo, Raupach *et al.* 1996), que dominam a transferência de momento entre alta e baixa velocidade de fluxo, o que pode resultar em maior dispersão de sedimentos, além do efeito erosivo nas margens do riacho.

Figura 18 - Mapa de contorno da distribuição do coeficiente de arrasto vegetal C'_D (m^{-1}), em leito com paredes vegetadas.

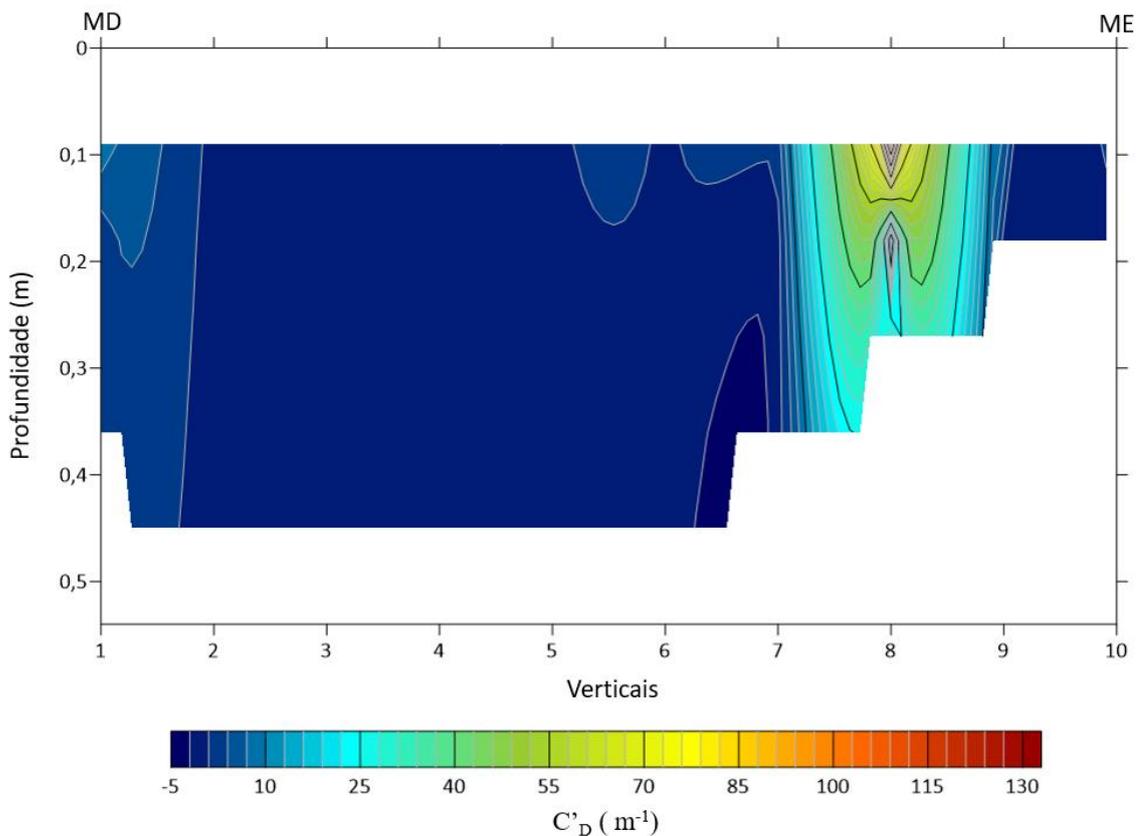
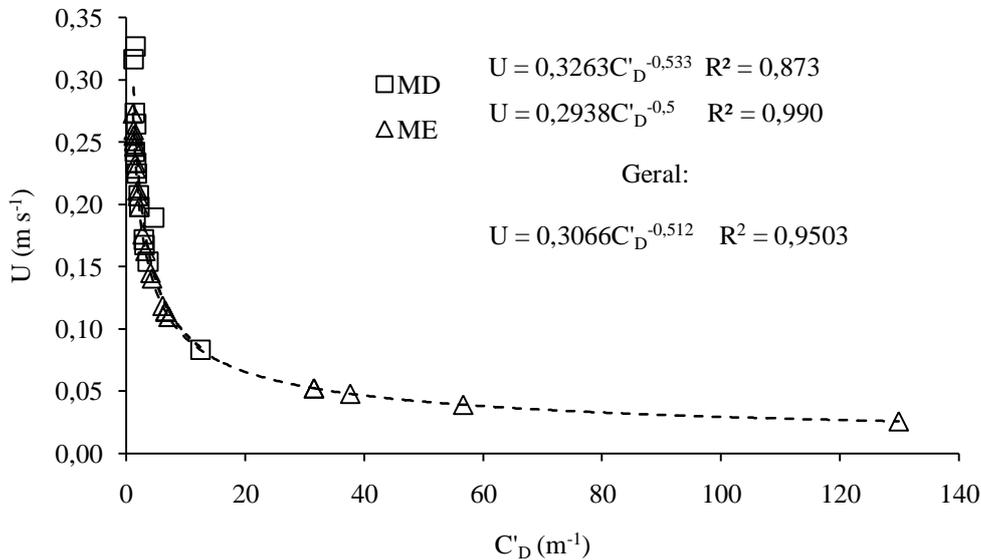


Figura 19 - A velocidade média do fluxo em função do coeficiente de arrasto vegetal (C'_D) de *I. pes-caprae* (Cavalcante *et al.*, 2021).



5.4. Interação entre vegetação e transporte de sedimentos

Na **Tabela 5** estão os valores médios das variáveis sedimentométricas relacionados a quinze campanhas de medição direta na seção transversal do riacho Cachoeira.

Tabela 5 - Caracterização geral de variáveis sedimentométricas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira, PE.

Variáveis	C_{SS} mg L ⁻¹	Q_{SS} t dia ⁻¹	Q_{Bed}
Máximo	1.021,50	12,41	0,39
Mínimo	59,81	0,34	0,011
E. Padrão	271,27	3,68	0,10
Média	409,41	6,23	0,069
Soma	6.141,13	93,47	1,03

C_{SS} = Concentração de sediment suspenso; Q_{SS} = Descarga sólida de sedimentos em suspensão; Q_{Bed} = descarga sólida do leito; n = 15.

A concentração de sedimento em suspensão (C_{SS}) apresentou valor médio e total de 409,41 mg L⁻¹ e 6.141,13 mg L⁻¹ (59,81–1021,50 mg L⁻¹; ±271,27), respectivamente. O transporte de sedimentos em suspensão é dinâmico e pode mudar de evento para evento (GAO; JOSEFSON, 2012).

As descargas de sedimento em suspensão (Q_{SS}) e do leito (Q_{Bed}) apresentaram valores médios de 6,23 t dia⁻¹ (0,34–12,41 t dia⁻¹; ±3,68) e 0,069 t dia⁻¹ (0,011–0,39 t dia⁻¹; ±0,10), respectivamente.

Os valores totais de 93,47 e 1,03 t dia⁻¹, corresponderam a 98,91% e 1,19% da descarga sólida total, respectivamente para Q_{SS} e Q_{Bed} . De acordo com Yang (1996), a taxa de sedimentos em suspensão é cerca de 75-95% do total de sedimentos transportados em um corpo d'água e a Q_{Bed} de um rio é cerca de 5-25% da Q_{SS} , com cerca de 90% de todo o sedimento em suspensão transportado em uma bacia hidrográfica durante a estação chuvosa (MERTEN; POLETO, 2006).

Um dos principais mecanismos por trás do efeito redutor da vegetação sobre os movimentos sedimentares é o seu efeito sobre a hidrodinâmica. A vegetação pode reduzir substancialmente a velocidade do fluxo de água e a turbulência em comparação com aquelas em áreas sem vegetação (PUJOL *et al.*, 2010; XU; LU, 2011). Quando a água flui pelos cursos d'água vegetados, as estruturas vegetativas bloqueiam e espalham o fluxo reduzindo a velocidade e a tensão de cisalhamento, enfraquecendo o transporte de sedimentos. Parte das partículas maiores se acomodam, o que eleva a superfície do leito. À medida que nas margens o fluxo é reduzido, o aumento da velocidade e tensão do fluxo na periferia da região vegetada e no centro da calha fluvial, favorece o processo erosivo do talude, modificando a conformação da seção transversal.

Entre as verticais 2-7, ausentes de vegetação, os valores de Q_{SS} e Q_{Bed} foram: (0,00 – 3,78t dia⁻¹; 0,83±0,70) e (0,00 – 0,071t dia⁻¹; 0,005±0,01), respectivamente (**Figuras 20 e 21**). Na região vegetada, foi possível observar a redução desses parâmetros, principalmente na margem esquerda, onde ocorreu a maior concentração de hastes de *I. pes-caprae*; Entretanto, os sedimentos do leito (Q_{Bed}) concentraram-se entre as verticais 7 e 8, tangencialmente a região de maior vegetação, com valores de Q_{SS} e Q_{Bed} : (0,00 – 1,02t dia⁻¹; 0,19±0,01) e (0,00 – 0,021 t dia⁻¹; 0,002±0,01), respectivamente.

Os parâmetros vegetativos, como o diâmetro e a densidade de hastes, são considerados características fundamentais no controle do transporte de sedimentos em canais abertos.

Assim, os resultados obtidos neste trabalho indicam que a vegetação presente no leito do rio, tem impacto hidráulico na capacidade de transporte do fluxo, como também observado por Busari e Li (2015) e Wang *et al.* (2015), ou seja, quanto maior a densidade de plantas, maior é coeficiente de resistência da vegetação ao fluxo (C'_D), o que diminui a capacidade de transporte de sedimentos.

Figura 20 - Mapa de contorno da distribuição da descarga sólida em suspensão Q_{SS} ($t \text{ dia}^{-1}$), em leito com paredes vegetadas.

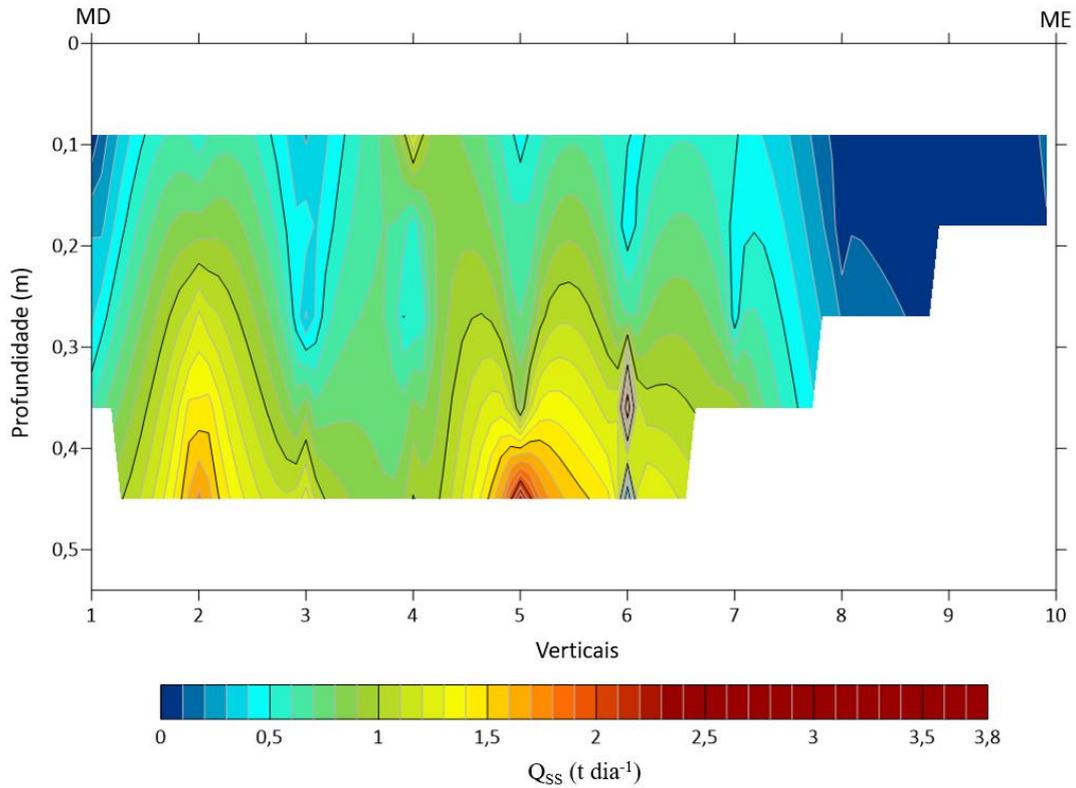
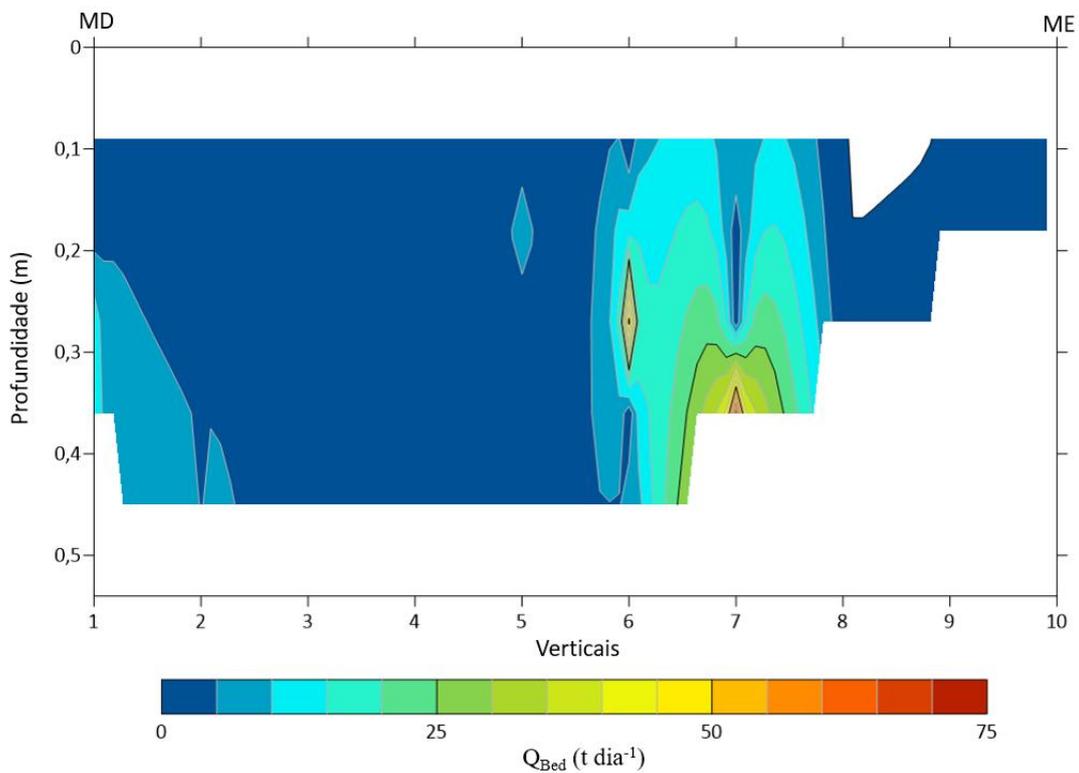


Figura 21 - Mapa de contorno da distribuição da descarga sólida do leito Q_{Bed} ($t \text{ dia}^{-1}$), em leito com paredes vegetadas.



No entanto, ainda existem algumas deficiências nas pesquisas existentes, o transporte de sedimentos e a deformação do leito em canais fluviais há pendências dependentes do espaço e do tempo. Desse modo, equipamentos mais modernos, maior número de amostragens e diversidade de situações, incluindo diferentes tipos de vegetação, podem levar ao aprimoramento metodológico e definição de procedimentos preditivos em resposta aos eventos extremos.

6. CONCLUSÃO

Os perfis de velocidade, as forças cisalhantes, a resistência hidráulica, bem como, o transporte de sedimentos no escoamento, mudam consideravelmente na presença de vegetação. Esses parâmetros aumentam das margens vegetadas em direção ao centro do canal, atingindo máximo valor próximo ao leito, ocasionando alterações na morfodinâmica do canal.

As características da vegetação, como a densidade e o arranjo da vegetação influenciam a velocidade do fluxo em graus variados e a resistência ao fluxo aumenta com o aumento da densidade da planta. Essas alegações são comprovadas pelos valores de F_D e C'_D , maiores e próximo a margem esquerda do canal, resultado da maior interação da densidade de hastes de *Ipomoea pes-caprae* com fluxo.

Os mapas de contorno obtidos pela técnica da Krigagem forneceram uma melhor visualização da distribuição dos parâmetros analisados.

7. REFERÊNCIAS

- ABERLE, J.; JÄRVELÄ, J. Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 51, nº. 1, pp. 33–45, 2013.
- ABIDIN, R. Z.; SULAIMAN, M. S.; YUSOFF, N. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia. **International Soil and Water Conservation Research**, vol. 5, pp. 26-35, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.002>
- ACHITE, M.; OUILLON, S. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). **Journal of Hydrology**, vol. 343, pp. 187-202, 2007. Elsevier B.V. DOI: <https://doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.026>.
- ADDINSOFT. XLSTAT 2019: Data Analysis and Statistical Solution for Microsoft Excel. 2019.
- AFZALIMEHR, H.; DEY, S. Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions. **International Journal of Sediment Research**, vol. 24, pp. 236-246, 2009.
- AFZALIMEHR, H.; SUI, J.; MOGHBEL, R. Hydraulic parameters in channels with wall vegetation and gravel bed. **International Journal of Sediment Research**, vol. 25, pp. 81-90, 2010.
- AFZALIMEHR, H.; MOGHBEL, R.; GALLICHAND, J. Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. **International Journal of Sediment Research**, vol. 26, nº. 3, pp. 269-282, 2011. DOI: [http://doi:10.1016/S1001-6279\(11\)60093-0](http://doi:10.1016/S1001-6279(11)60093-0).
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische**.vol. 22, nº. 6, pp. 711-728, 2014.
- ANDRADE, J. H. R. **Dinâmica de margens em rios semiáridos: aplicações metodológicas no Rio Jaguaribe – Ceará – Brasil**. Orientador (a): Prof. Dr. Celsemy Eleutério Maia. 2016.

102 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2016.

ANDRADE, J. H. R.; MAIA, C. E. Erosão de margens em rios semiáridos: estudo na sub-bacia do baixo Jaguaribe – Ceará – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4, p. 859-870, São Paulo, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1379>

BACK, A. J. Medidas de vazão com molinete hidrométrico e coleta de sedimentos em suspensão. Boletim Técnico, n.130, p. 58, Florianópolis – SC: EPAGRI (In Portuguese). 2006.

BAPTIST, M. J.; BABOVIC, V.; UTHURBURU, J. R.; KEIJZER, M.; UITTENBOGAARD, R. E.; MYNETT, A.; VERWEY, A. On inducing equations for vegetation resistance. **Journal Hydraulic Research**, vol. 45, nº. 4, pp. 435–50, 2007.

BEUDIN, A.; KALRA, T. S.; GANJU, N. K.; WARNER, J. C. Development of a coupled wave-flow-vegetation interaction model. **Computers & Geosciences**, vol. 100, pp. 76-86, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.12.010>

BLUCK, B. J. Sedimentation in the meandering River Endrick. **Scottish Journal of Geology**, vol. 7, pp. 93-138, 1971. DOI: 10.1144/sjg07020093

BOTERO-ACOSTA, A.; CHU, M. L.; GUZMAN, J. A.; STARKS, P. J.; MORIASI, D. N. Riparian erosion vulnerability model based on environmental features. **Journal of Environmental Management**, vol. 203, pp. 592-602, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.045>

BUSARI, A. O.; LI, C. W. A hydraulic roughness model for submerged flexible vegetation with uncertainty estimation. **Journal of Hydro-Environment Research**, vol. 9, nº. 2, pp. 268-280, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.06.005>

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA, J. N. P.; COUTINHO, S. P. M.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília, DF: 2000. p.103.

CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco (Perímetro irrigado Continguiba/Pindoba – SE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 26, nº. 1, pp. 231-239, 2002. DOI: 10.1590/s0100-06832002000100024

CASSAN, L.; ROUX, H.; GARAMBOIS, P. A semi-analytical model for the hydraulic resistance due to macro-roughness of varying shapes and densities. **Water**, vol. 9, nº. 9, pp. 637–655, 2017.

CASTRO, W. S.; DE CAMPOS, A. B.; ZANCOPE, M. H. C. A influência dos materiais das margens e da vegetação Ciliar na erosão de meandros: o caso do rio claro, afluente do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 20, nº. 3, pp. 623-640, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1584

CAVALCANTE, A. A. Geomorfologia fluvial no Semiárido brasileiro. **Revista de Geografia (RECIFE)**, vol. 35, nº. 4, pp. 254-268, 2018. ISSN 0048-7708

CAVALCANTE, D. M.; CHAVES, M. T. L.; CAMPOS, G. M.; CANTALICE, J. R. B.; BARROS JUNIOR, G. Sediment transport and roughness coefficients generated by flexible vegetation patches in the emergent and submerged conditions in a semiarid alluvial open-channel. **Ecological Indicators**, vol. 125, p. 107472, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107472

CHASSIOT, L.; LAJEUNESSE, P.; BERNIER, J. F. Riverbank erosion in cold environments: Review and outlook. **Earth-Science Reviews**, vol. 207, pp. 103231, 2020. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103231

COELHO, G. K. de S.; ANDRADE, J. H. Caracterização de feições morfológicas no canal do Rio Jaguaribe: trecho Limoeiro do Norte - Quixeré. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 21, nº. 2, pp. 343-363, São Paulo, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1531>.

COTE, S.; VIVILLE, D.; BERNARIOUMLIL, S.; ACKERER, P.; PIERRET, M. C. Impact of the hydrological regime and forestry operations on the fluxes of suspended sediment and bed load of a small middle-mountain catchment. **Science of the Total Environment**, vol. 743, p. 140228, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140228

CRICKMAY, C. H. Lateral activity in a river of northwestern Canada. **The Journal of Geology**, vol. 68, nº. 4, pp. 377-391, 1960. DOI: 10.1086/626672

DAS, G. K.; DATTAS, S. Man-Made Environmental Degradation at Sunderbans. **Reason - A Technical Journal**, vol. 13, pp. 89-106, 2014. DOI: 10.21843/reas/2014/89-106/108127

DE SERIO, F.; MEFTAH, M. B.; MOSSA, M.; TERMINI, D. Experimental investigation on dispersion mechanisms in rigid and flexible vegetated beds. **Advances in Water Resources**, vol. 120, pp. 98-113, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.005>

DEVI, T. B.; KUMAR, B. Flow characteristics in an alluvial channel covered partially with submerged vegetation. **Ecological Engineering**, vol. 94, pp. 478–492, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.018>

DEVI, T.B.; SHARMA, A.; KUMAR, B. Flow characteristics in a partly vegetated channel with emergent vegetation and seepage. **Ecohydrology & Hydrobiology**, vol. 19, pp. 93-108, 2019. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2018.07.006

DEY, S. Fluvial Processes: Meandering and Braiding. *In: Fluvial hydrodynamics. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, vol.4, chapter 9, pp. 529-562. DOI: 10.1007/978-3-642-19062-9_9

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. **Field methods for measurement of fluvial sediment**. In: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-531. Reston, Virginia, 1988. 132 p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/1986/0531/report.pdf>

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1979. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2018. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 356 p. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF.

EVERITT, B. L. Use of the cottonwood in an investigation of the recent history of a flood plain. **American Journal of Science**, vol. 266, n°. 6, pp. 417-439, 1968. DOI: 10.2475/ajs.266.6.417

FERRO, V. ADV measurements of velocity distributions in a gravel-bed flume. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 28, pp. 707–722. 2003.

FOLLETT, E. M.; NEPF, H. M. Sediment patterns near a model patch of reedy emergent vegetation. **Geomorphology**. vol. 179, pp. 141-151, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.006>

GAO, P.; JOSEFSON, M. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. **Journal of Hydrology**, vol. 427, pp. 17–27, 2012.

GHISALBERTI M.; NEPF H. M. The limited growth of vegetated shear layers. **Water Resources Research**, vol. 40, p. W07502, 2004.

GONZÁLEZ-AGUIRRE, J. C.; CASTRO, M. J.; MORALES DE LUNA, T. A robust model for rapidly varying flows over movable bottom with suspended and bedload transport: Modelling and numerical approach. **Advances in Water Resources**, vol. 140, pp. 103575, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103575>

GRAF, W. H.; ALTINAKAR, M. S. Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry. **Wiley**: New York. 1998.

GRAY, J. **Sediment Data Collection Techniques**. U.S. Geological Survey Training Course, WA: Castle Rock and Vancouver. 2005.

GÜNERALP, Í.; RHOADS, B. L. Influence of floodplain erosional heterogeneity on planform complexity of meandering rivers. **Geophysical Research Letters**, vol. 38, n°. 14, pp. 2–7, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL048134>

GUO, J.; JULIEN, P. Y. Turbulent velocity profiles in sediment-laden flows. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, vol. 39, n°. 1, pp. 11–23, 2001.

GUO, J.; JULIEN, P. Y. Application of the modified log-wake law in open-channels. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, vol. 1, n°. 2, pp. 17–23, 2008.

HICKIN, E. J.; NANSON, G. C. The Character of Channel Migration on the Beatton River, Northeast British Columbia, Canada. **Geological Society of America Bulletin**, vol. 86, n°. 4, pp. 487-494, 1975. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)862.0.CO;2

HOOKE, J. M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. **Earth Surface Processes**, vol. 5, n°. 2, pp. 143-157, 1980. DOI: 10.1002/esp.3760050205

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrological Processes**, vol. 17, n°. 17, pp. 3387–3409, 2003.

HU, Z.; LEI, J.; LIU, C.; NEPF, H. Wake structure and sediment deposition behind models of submerged vegetation with and without flexible leaves. **Advances in Water Resources**, vol. 118, pp. 28–38, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.06.001>

HUAI, W. X.; ZENG, Y. H.; XU, Z. G.; YANG, Z. H. Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation. **Advances in Water Resources**, vol. 32, n°. 4, pp. 487–492, 2009.

HUAI, W.; HU, Y.; ZENG, Y.; HAN, J. Velocity distribution for open channel flows suspended vegetation. **Advances in Water Resources**, vol. 49, pp. 56–61, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.001>

HUI, ER-QING.; HU, XING-E. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. **Journal of Hydrology**, vol. 22, n°. 3, pp. 329–337, 2010. DOI: 10.1016/S1001-6058(09)60062-7

JALONEN, J.; JÄRVELÄ, J. Estimation of drag forces caused by natural woody vegetation of different scales. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 26, n°. 4, pp. 608–623, 2014. DOI: 10.1016/S1001-6058(14)60068-8

JÄRVELÄ, J. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. **Journal of Hydrology**, vol. 307, n°. 1, pp. 233–241, 2005.

JULIEN, P.Y. **Erosion and Sedimentation**. Cambridge University Press, Melbourne, p. 280, 1995.

KIRONOTO, B. A.; GRAF, W. H. Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. **Water Maritime and Energy**, vol. 106, pp. 333–344, 1995.

KOLOSEUS, H. J.; DAVIDIAN, J. Free-surface instability correlations, and Roughness concentration effects on flow over hydrodynamically rough surfaces (n°. 1592-C, D). **Geological Survey (US)**, 1966.

KONSOER, K. M.; RHOADS, B. L.; BEST, J. L.; LANGENDOEN, E. J.; URSIC, M. E.; ABAD, J. D.; GARCIA, M. H. Length scales and statistical characteristics of outer bank roughness for large elongate meander bends: The influence of bank material properties,

floodplain vegetation and flow inundation. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 42, n°. 13, pp. 2024-2037, 2017. DOI: 10.1002/esp.4169

KONSOER, K. M.; RHOADS, B. L.; LANGENDOEN, E. J.; BEST, J. L.; URSIC, M. E.; ABAD, J. D.; GARCIA, M. H. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. **Geomorphology**, vol. 252, pp. 80-97, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.08.002

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. – Köppen, W., Geiger, R. (Eds.): **Handbuch der Klimatologie**. – GebruderBornträger, Berlin, vol. 1, pp. 1–44, part C, 1936.

LEE, J. K.; ROIG, L. C.; JENTER, H. L.; VISSER, H. M. Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida Everglades. **Ecological Engineering**, vol. 22, pp. 237 - 248, 2004.

LEYLAND, J.; DARBY, S. E.; TERUGGI, L.; RINALDI, M.; OSTUNI, D. A self-limiting bank erosion mechanism? Inferring temporal variations in bank form and skin drag from high resolution topographic data. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 40, n°. 12, pp. 1600-1615, 2015. DOI: 10.1002/esp.3739

LI, C. W.; XIE, J. F. Numerical modeling of free surface flow over submerged and highly flexible vegetation. **Advances in Water Resources**, vol. 34, n°. 4, pp. 468–477, 2011. DOI: 10.1016/j.advwatres.2011.01.00

LI, Y.; WANG, Y.; ANIM, D. O.; TANG, C.; DUB, W.; NI, L.; YUD, Z.; ACHARYA, K. Flow characteristics in different densities of submerged flexible vegetation from an open-channel flume study of artificial plants. **Geomorphology**, vol. 204, pp. 314–324, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.015>

LIMA NETO, I. E.; WIEDGAN, M. C.; DE ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques**, vol. 56, n°. 2, pp. 319-33, 2011. DOI:10.1080/02626667.2011.553616

LIMA, K. C. **Relações entre a rede de drenagem e as superfícies de aplainamento no semiárido: a bacia hidrográfica do Rio Bom Sucesso (Bahia)**. Orientador: Prof. Dr. Archimedes Perez Filho. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP, 2012

LIMA, K. C.; PEREZ FILHO, A.; DA CUNHA, C. M. L. Características morfológicas e morfométricas dos canais de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Bom Sucesso - semiárido sa Bahia/Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 14, nº. 4, pp. 309-317, 2013. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v14i4.362>

LIU, X.; ZENG, Y. Drag coefficient for rigid vegetation in subcritical open channel. **Procedia Engineering**, vol. 154, pp. 1124–1131, 2016.

LIU, X.; ZENG, Y. Drag coefficient for rigid vegetation in subcritical open channel. **Environmental Fluid Mechanics**, vol. 17, pp. 1035–1050, 2017.

LIU, MENG-YANG; HUAI, WEN-XIN; YANG, ZHONG-HUA; ZENG, YU-HONG. A genetic programming-based model for drag coefficient of emergent vegetation in open channel flows. **Advances in Water Resources**, vol. 140, pp. 103582, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103582>

LÓPEZ, F.; GARCÍA, M. H. Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, pp. 392-402, 2001.

MAGALHÃES, H. E. S. **Avaliação do estado de potencial erosão das margens de um curso de água. Aplicação a troços estuarinos de rios do norte de Portugal**. Orientador: Professor Doutor Rodrigo Maia. 2010. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

MANNING, A.; JULIAN, J. P.; DOYLE, M. W. Riparian vegetation as an indicator of stream channel presence and connectivity in arid environments. **Journal of Arid Environments**, vol.

178, p. 104167, 2019, p. 104167, 2020. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104167>.

MASTERMAN, R.; THORNE, C. R. Predicting Influence of Bank Vegetation on Channel Capacity. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 118, nº. 7, pp. 1052–1058, 1992.

MEDEIROS, P. H. A.; DE ARAÚJO, J. C.; MAMEDE, G. L.; CREUTZFELDT, B.; GUNTNER, A.; BRONSTERT, A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, vol. 14, pp. 1938–1948, 2014. DOI: 10.1007/s11368-014-0988-z

MERTEN, G. H.; POLETO, C. **Qualidade dos Sedimentos** (p. 397) Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. 2006.

NEPF, H. M. Drag, turbulence, and diffusion on flow through emergent vegetation. **American Geophysical Union**, vol. 35, nº. 2, pp. 479–489, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900069>.

NEPF, H. M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, vol. 44, pp. 123–142, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101048>

NEPF, H. M. Hydrodynamics of vegetated channels. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 50, nº. 3, pp. 262 – 279, 2012. DOI: 10.1080/00221686.2012.696559

NEPF, H.; GHISALBERTI, M.; WHITE, B.; MURPHY, E. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies. **Water Resources Research**, vol. 43, W04422, 2007. DOI:10.1029/2006WR005362.

NEPF, H. M.; VIVONI, E. R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, vol. 105, nº. C12, pp. 28547–28557, 2000.

NEZU, I.; RODI, W. Experimental study on secondary currents in open channel flow. **21st IAHR Congress**, Melbourne, Australia, pp. 115–119, 1985.

NEZU, I.; RODI, W. Open channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, vol. 112, n° 5, pp. 335–355, 1986.

OKEKE, C. A. U.; AZUH, D.; OGBUAGU, F. U.; KOGURE, T. Assessment of land use 728 impact and seepage erosion contributions to seasonal variations in riverbank stability: The Iju River, SW Nigeria. **Groundwater for Sustainable Development**, vol. 11, pp. 100448, 2020. Elsevier B.V. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100448>.

PAN, Y.; LI, Z.; YANG, K.; JIA, D. Velocity distribution characteristics in meandering compound channels with one-sided vegetated floodplains. **Journal of Hydrology**, vol. 578, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124068>

PEREIRA E SILVA, L.; XAVIER, A. P. C.; MARQUES DA SILVA, R.; SANTOS, C. A. G. Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**, vol. 21, p. e00811, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00811>

PERUCCA, E.; CAMPOREALE, C.; RIDOLFI, L. Significance of the riparian vegetation dynamics on meandering river morphodynamics. **Water Resources Research**, vol. 43, 2007. DOI: 10.1029/2006WR005234

PHAM VAN, C.; CHUA, V. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics and bed load transport in cross sections of two gravel-bed rivers based on one-dimensional lateral distribution method. **International Journal of Sediment Research**, vol. 35, n° 2, pp. 203–216, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.001>.

PLAMBECK, N. O. Reassessment of the potential risk of soil erosion by water on agricultural land in Germany: Setting the stage for site-appropriate decision-making in soil and water resources management. **Ecological Indicators**, vol, 118, pp. 106732, July, 2020. Elsevier Ltd. DOI: doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106732

PU, J.H., HUSSAIN, A., GUO, Y.-K., VARDAKASTANIS, N., HANMAIAHGARI, P. R., LAM, D. Submerged flexible vegetation impact on open channel flow velocity distribution: An analytical modelling study on drag and friction. **Water Science and Engineering**, vol.12, nº. 2, pp. 121-128, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.06.003>

PUJOL, D., COLOMER, J., SERRA, T., CASAMITJANA, X. Effect of submerged aquatic vegetation on turbulence induced by an oscillating grid. **Continental Shelf Research**, vol. 30, nº. 9, pp. 1019–1029, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.014>

QUEIROZ, P. H. B.; PINHEIRO, L. S.; CAVALCANTE, A. A.; TRINDADE, J. M. R. Caracterização multitemporal de barras e ilhas fluviais baixo curso do Rio Jaguaribe, Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 19, nº. 1. pp. 169-188, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19il.1282>

RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. J.; BRUNET, Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 78, pp. 351-382, 1996. DOI: 10.1007/BF00120941

RHEINHEIMER, D. E.; YARNELL, S. M. **Tools for sediment management in rivers**. *In: Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*, 2017, cap. 12, pp. 237-263. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00012-7>

ROCHA, P. C.; DE SOUZA FILHO, E. E. Erosão marginal e evolução hidrodinâmica no sistema rio-planície fluvial do alto Paraná-Centro Sul do Brasil. *In: João Osvaldo Rodrigues Nunes; Paulo César Rocha (Orgs.); Geomorfologia: aplicações e metodologias*. 1ª Ed., pp. 133-151, 2008. Ed Expressão Popular, São Paulo, 2008.

SCHONEBOOM, T.; ABERLE, J.; DITTRICH, A. Hydraulic resistance of vegetated flows: Contribution of bed shear stress and vegetative drag to total hydraulic resistance. *In: Proc. int. conf. on fluvial hydraulics river flow*. Braunschweig, Karlsruhe, Bundesanstalt für Wasserbau, Germany; pp. 269–276, 2010.

SADEGHI, S. H.; NAJAFI, S.; BAKHTIARI, A. R. Sediment contribution from different geologic formations and land uses in an Iranian small watershed, case study. **International Journal of Sediment Research**, vol. 32, n° 2, p p. 210–220, 2017.

SANTOS, C. J. S.; DE SOUZA, J. O. P. Análise da estabilidade lateral em trechos fluviais da bacia riacho do tigre, semiárido paraibano. **Revista Caminhos de Geografia**. vol. 21, n°. 75, pp. 15-33, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG217542320>

SHAN, Y.; LIU, X.; YANG, K.; LIU, C. Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation. **Advances in Water Resources**, vol. 108, pp. 170–183, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.021>

SHNAUDER, I.; SUKHODOLOV, A. N. Flow in a tightly curving meander Bend: effects of seasonal changes in aquatic macrophyte cover. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2012. DOI: 10.1002/esp.3234

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics**. WaterResourcesPublications, Colorado, p. 897, 1992.

SOUZA, J. O. R.; CORRÊA, A. C. B. Sistema fluvial e planejamento local no semiárido. **Mercator**, vol. 11, n°. 24, pp. 149-168, Fortaleza, CE, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.4215/rm2012.1124.0010>

SOUZA, J. O. P.; Almeida, J. D. M. Processos fluviais em terras secas: uma revisão. **Revista OKARA: Geografia em debate**, vol. 9, n°. 1, pp. 108-122, 2015.

SPIEKERMANN, R.; BETTS, H.; DYMOND, J.; BASHER, L. Volumetric measurement of river bank erosion from sequential historical aerial photography. **Geomorphology**. vol. 296, pp. 193-208, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.047>

SUNDBORG, A. The River Klarälven a Study of Fluvial Processes. **Geografiska Annaler**, vol. 38, n°. 2-3, pp. 125-316, 1956. DOI: 10.1080/20014422.1956.11880887

SURFER, version 22.2.1757.0. Golden Software, 2021. <http://www.goldensoftware.com>.

TANG, H.; TIAN, Z.; YAN, J.; YUAN, S. Determining drag coefficients and their application in modelling of turbulent flow with submerged vegetation. **Advance in Water Resources**, vol. 69, pp. 134-145, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.006>

TANINO, Y.; NEPF, H. M. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 134, n°. 1, pp. 34–41, 2008. DOI: [10.1061/_ASCE_0733-9429_2008_134:1_34_](https://doi.org/10.1061/_ASCE_0733-9429_2008_134:1_34_)

TERMINI, D. Experimental analysis of the effect of vegetation on flow and bed shear stress distribution in high-curvature bends. **Geomorphology**, vol. 274, pp. 1–10, 2016.

TERMINI, D. Fluvial eco-hydraulics and morphodynamics: new insights and challenges. **Advances in Water Resources**, vol. 81, pp. 1-3, 2015. Elsevier Ltd. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.04.003>

TERMINI, D. River processes and Links between fluvial and coastal systems in a changing climate. **Advances in Water Resources**, 1. out. 2018. Elsevier Ltd

TERMINI, D.; SAMMARTANO, V. Morphodynamic processes downstream of man-made structural interventions: Experimental investigation of the role of turbulent flow structures in the prediction of scour down stream of a rigid bed. **Physics and Chemistry of the Earth**, vol. 49, pp. 18–31, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2011.12.006>

TERMINI, D. Effect of vegetation on fluvial erosion processes: experimental analysis in a laboratory flume. **Procedia Environmental Sciences**, vol. 19, pp. 904 – 911, 2013.

TERMINI, D. Bank erosion and secondary circulation in a meandering laboratory flume. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, vol. 120, pp. 496 – 505, 2014.

USGS – United States Geological Survey, 1973. **Techniques of Water Resources Investigations**. Washington.

USGS – United States Geological Survey, 2005. **Techniques of Water Resources Investigation**. Washington.

Van Rijn, L. C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. **Aqua**. Publications: Amsterdam, 1993.

WANG, W.; HUAI, W.; THOMPSON, S.; KATUL, G. G. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation. **Water Resources Research**, vol. 51, pp. 10047–10064, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017658>

WANG, H.; TANG, H., ZHAO, H., ZHAO, X, LU, S. Incipient motion of sediment in presence of submerged flexible vegetation. **Water Science and Engineering**, vol. 8 n°.1, pp. 63-67, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.01.002>

WANG, W; HUAI, W.; THOMPSON, S.; PENG, W.; KATUL, G. G. Drag coefficient estimation using flume experiments in shallow non-uniform water flow within emergent vegetation during rainfall. **Ecological Indicators**, vol. 92, pp. 367–378, 2018. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.041

WANG, W.; HUAI, W.; LI, S.; WANG, P.; WANG, Y.; ZHANG, J. Analytical solutions of velocity profile in flow through submerged vegetation with variable frontal width. **Journal of Hydrodynamics**, vol.578, pp. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124088>

WU, F-C.; SHEN, H.W., CHOU, Y. Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering – ASCE.**, vol. 125, n°. 4, pp. 369-375, 1999.

WU, F.-S. Characteristics of flow resistance in open channels with non-submerged rigid vegetation. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 20, n°. 2, pp. 239-245, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60052-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60052-9)

WU, L-H.; YANG, X.-L. Influence of bending rigidity of submerged vegetation on local flow resistance. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, vol. 26, n°. 2, pp. 242–249, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60027-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60027-5)

XU, H.; LU, Y. Research advances of aquatic plants in water ecological restoration. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, vol. 27, n°. 3, pp. 413-416, 2011.

YAN, C.; SHAN, Y.; SUN, W.; LIU, C.; LIU, X. Modeling the longitudinal profiles of stream wise velocity in an open channel with a model patch of vegetation. **Environmental Fluid Mechanics**, pp. 1-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09747-5>

YANG, C. T. **Bedload transport. In: Sediment Transport: Theory and Practice.** McGraw-Hill, USA, pp. 90–121, 1996.

ZHAO, F.; HUAI, W. Hydrodynamics of discontinuous rigid submerged vegetation patches in open-channel flow. **Journal of Hydro-Environment Research**, vol. 12, pp. 148–160, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.05.004>

ZONG, L.; NEPF, H. Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation. **Geomorphology**, vol. 116, pp. 363 – 372, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.11.02