



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

CAMILA FARIAS VITORINO

**RESISTÊNCIA AO FLUXO DEVIDO A VEGETAÇÃO NUM TRECHO DO RIO
PITIMBU, NATAL-RN**

Natal- RN
2017

CAMILA FARIAS VITORINO

**RESISTÊNCIA AO FLUXO DEVIDO A VEGETAÇÃO NUM TRECHO DO RIO
PITIMBU, NATAL-RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *strictu sensu* em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira
Área de pesquisa: Hidráulica

**Natal-RN
2017**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Vitorino, Camila Farias.

Resistência ao fluxo devido a vegetação num trecho do Rio Pitimbu, Natal-RN / Camila Farias Vitorino. - 2017.
63 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira.

1. Vegetação macrófita - Dissertação. 2. Resistência ao fluxo - Dissertação. 3. Aninga - Dissertação. 4. Manning - Dissertação. I. Moreira, Lúcio Flávio Ferreira. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 581.526.32

CAMILA FARIAS VITORINO

**RESISTÊNCIA AO FLUXO DEVIDO A VEGETAÇÃO MACRÓFITA NUM TRECHO
DO RIO PITIMBU, NATAL-RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *strictu sensu* em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira – Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dr^a. Joana Darc Freire de Medeiros – Examinador UFRN
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dayse Luna Barbosa – Examinador Externo
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que ilumina nossos caminhos, permitindo que eu alcance meus objetivos, ampliando meus conhecimentos, possibilitando a realização desse trabalho, me fortalecendo a cada dificuldade.

À minha família, principalmente meus pais e irmãos, por todo apoio nas minhas escolhas e todo amor e cuidado que tem por mim.

Aos meus amigos, pelo incentivo e companhia, que me fizeram descontrair nos momentos mais tensos.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária.

Ao meu orientador Lucio Flavio, que me ajudou e me orientou nesse trabalho, sendo atencioso e dedicado a cada pedido de ajuda, pelos ensinamentos e todo apoio na pesquisa.

A equipe que me ajudou durante as coletas de campo: Jéssica Mitzi, Júlio Vitorino, Daniell Cavalcanti, Alina, Pedro Campos e o Professor Kleiton Cassimiro.

A IGARN, que contribuiu com a coleta de dados, disponibilizando equipamentos e uma equipe atenciosa com o meu trabalho.

RESISTÊNCIA AO FLUXO DEVIDO A VEGETAÇÃO NUM TRECHO DO RIO PITIMBU, NATAL-RN

RESUMO: A vegetação macrófita possui um papel importante na manutenção e equilíbrio dos ambientes aquáticos em rios e lagos nas regiões tropicais. Em cursos d'água de pequeno porte, essas plantas proporcionam benefícios ecológicos, pois atuam na sedimentação e retenção de nutrientes, propiciando melhoria nas propriedades físico-químicas da água. A presença de macrófitas na calha fluvial alteram o comportamento da velocidade e aumentam a resistência ao fluxo, com redução da velocidade na seção e aumento da profundidade. Em geral, o retardamento do escoamento está associado a fenômenos indesejáveis, tais como inundação de áreas ocupadas. O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento da resistência ao fluxo provocado pela presença de vegetação macrófita rígida emersa da espécie *Aninga (Montrichardia linifera)* num trecho do rio Pitimbu situado na região metropolitana de Natal. Para isso foram realizadas duas campanhas hidrométricas, realizadas em 12/04/2017 e 15/09/2017. A metodologia empregada consistiu na medição de variáveis hidráulicas e levantamento *in situ* das características da vegetação no trecho e análise da interação fluxo-vegetação. A análise da vegetação envolveu a delimitação de quatro quadrantes (4 m^2) definidos aleatoriamente na área de estudo. Nesses quadrantes foram levantadas as características morfológicas das plantas e a distribuição espacial. A medição das variáveis hidráulicas foi feita com a discretização das seções transversais em verticais, onde foram medidas as velocidades medias pontuais. A vazão e o número de Manning obtidos nas campanhas 1 e 2 foram $0,2467 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,069 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$; $0,2076 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,078 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ respectivamente. A densidade da distribuição espacial da vegetação era $8,12 \text{ plantas}/\text{m}^2$. O comportamento da velocidade na seção S1 demonstrou alta variabilidade espacial, com alguns valores acima da média. Esse comportamento estava associado a presença de vegetação. Foram registradas velocidades negativas em algumas regiões a jusante das plantas, indicando a geração de esteiras e fluxo reverso nestes locais. O padrão de distribuição espacial da vegetação era agregado em algumas regiões da comunidade de plantas. A interação fluxo-vegetação foi analisada a partir de uma sequência de registros fotográficos. Foi possível identificar o comportamento dos fluxos através das plantas: regiões de descolamento da camada limite, regiões de esteira e de formação de vórtices.

Palavras-chave: macrófita; resistência ao fluxo; *Aninga*; Manning

RESISTANCE TO FLOW DUE TO VEGETATION IN A STRETCH OF THE RIVER PITIMBU RIVER, NATAL-RN

ABSTRACT: Macrophyte vegetation plays an important role to keep balanced aquatic environments in rivers and lakes in tropical regions. In small water courses, these plants provide ecological benefits since they act on sedimentation and nutrients retention, leading to an improvement in the water physicochemical properties. The presence of macrophytes in the river channel changes the velocity behaviour and increases the resistance to flow, causing reduction in speed and increase of depth in the section. Generally, flow retardation is associated to unwanted events, such as flooding of occupied areas. The aim of this study was to investigate the hydraulic resistance behaviour to flow caused by the presence of rigid and emerged macrophyte vegetation of the species *Aninga* (*Montrichardia linifera*) in a section into Pitimbu River located in the metropolitan region in Natal. Two hydrometric campaigns were carried out on 04/24/2017 and 09/15/2017. The methodology used included measurement of hydraulic variables, *in situ* survey of vegetation characteristics and analysis of the flow-vegetation interaction. Vegetation analysis involved the delimitation of three quadrants (4 m^2) defined in the study area. In these quadrants, the morphological characteristics of the plants and the spatial distribution were raised. The hydraulic variables were measured with the discretization of the cross sections in verticals, where the average speeds were measured. Manning flow and number obtained in campaigns 1 and 2 were $0.2467 \text{ m}^3/\text{s}$ and $0.069 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$; $0.2076 \text{ m}^3/\text{s}$ and $0.078 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ respectively. The density of the spatial distribution of vegetation was $8.12 \text{ plants} / \text{m}^2$. The velocity behavior in section S1 showed high spatial variability, with some values above average. This behavior was associated with the presence of vegetation. Negative velocities were recorded in some regions downstream of the plants, indicating the generation of mats and reverse flow at these sites. The pattern of spatial distribution of vegetation was aggregated in some regions of the plant community. The flow-vegetation interaction was analyzed from a sequence of photographic records. It was possible to identify the behavior of the flows through the plants: regions of boundary layer detachment, belt regions and vortex formation.

Keywords: macrophyte; Resistance to flow; *Aninga*; Manning

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS DO ESTUDO	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Resistencia Hidráulica	13
3.2 Escoamento Turbulento	17
3.3 Escoamento em torno de cilindros	18
3.4 Escoamento em leitos com vegetação	22
3.5 Padrões de distribuição espacial da vegetação	26
3.6 Macrófitas Aquáticas.....	27
4. ÁREA DE ESTUDO	29
5. METODOLOGIA	33
5.1 Generalidades.....	33
5.2 Coleta de dados de campo: Vegetação.....	34
5.3 Distribuição espacial da vegetação	37
5.4 Densidade da Vegetação.....	37
5.5 Levantamento Hidrométricos.....	38
5.6 Levantamento da declividade longitudinal entre as seções	39
5.7 Determinação do coeficiente de Manning	40
5.8 Análise de Dados	40
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 Vegetação Macrófita	41
6.2 Distribuição Espacial das Macrófitas.....	44
6.3 Levantamento das variáveis Hidráulicas	45
6.4 Escoamento em torno da planta	53
7. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características do escoamento viscoso em regime turbulento em torno de um cilindro	20
Figura 2 - Modos de escoamento para dois cilindros dispostos lado a lado: (a) cilindros em contato, (b) razão s/d intermediária, (c) alta razão s/d).....	22
Figura 3 - Diferença da flexibilidade da vegetação e emersão.....	25
Figura 4 - Comportamento espacial da interação fluxo-planta isolada.....	25
Figura 5 - Representação dos modelos de distribuição espacial regular, agregada e aleatória.	26
Figura 6 - Delimitação da Bacia do Rio Pitimbu, em destaque a área objeto desse estudo..	29
Figura 7 - Trecho objeto de estudo.	31
Figura 8 - Localização dos quadrantes 1, 2, 3 e 4 para realização desse estudo.....	35
Figura 9 - Esquema de medição da planta.	36
Figura 10 - Equipamento de vazão ADV <i>FlowTracker</i>	38
Figura 11 - Esquema de captação de dados pelo equipamento ADV <i>FlowTracker</i> através do efeito Doppler.....	39
Figura 12 - Leitura de medição da declividade.....	40
Figura 13 - Boxplot das alturas das plantas Aninga nos quadrantes.....	42
Figura 14 - Boxplot dos diâmetros dos caules nos quadrantes	42
Figura 15 - Relação da altura – diâmetro do caule nos quatro quadrantes: (a) Quadrante 1, (b) Quadrante 2 (c) Quadrante 3, (d) Quadrante 4.	44
Figura 16 - Esquema de Distribuição espacial plantas para o quadrante 1, onde os círculos verdes representa a vegetação presente a cada subquadrado de 0,2m x 0,2 m.....	45
Figura 17 - Esquema da profundidade do fluxo Seção S1 (12/04/2017)	46
Figura 18 - Esquema da profundidade de fluxo da Seção S1 (15/09/2017).....	46
Figura 19 – Geometria da seção S2 (15/09/2017).....	47
Figura 20 - Velocidade média na vertical seção S1(12/04/2017).....	48
Figura 21 - Velocidades médias nas verticais da Seção 1. Campanha 15 de setembro de 2017	49
Figura 22 – Fotografias do comportamento do fluxo nas verticais-seção S1 (15/09/2017)...	50
Figura 23 - Registro da Seção S2.	51
Figura 24 - Presença de Resíduos sólidos no trecho estudado do Rio Pitimbu.	53
Figura 25 - Escoamento do fluxo em situação do caule isolado, caso no Rio Pitimbu/RN.	54
Figura 26 – Fotografia da distribuição espacial das plantas sentido montante-jusante.....	55
Figura 27 - Desvio do fluxo de uma região de dosséis agregados para uma região de dosséis mais livres.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados descritivos do diâmetro dos caules das plantas.	41
Tabela 2 - Dados descritivos da altura das plantas.	41
Tabela 3 - Dados hidrométricos coletados em campo (12/04/2017).	52
Tabela 4 - Dados hidrométricos coletados em campo (15/09/2017).	52

1. INTRODUÇÃO

Os escoamentos em superfícies livres representam um dos problemas mais comuns da mecânica dos fluidos. Na natureza o escoamento segue contornando obstáculos numa busca contínua pelo trajeto ótimo, no sentido da conservação ou dispêndio mínimo de energia. O escoamento é realizado graças à existência de certa quantidade de energia mecânica. Ela representa o trabalho necessário para contrabalancear a resistência hidráulica que consome energia à medida que o rio vai escoando (SILVA *et al.*, 2007). As equações de resistência são fundamentais na análise do escoamento em canais com superfície livre. Uma das equações mais utilizadas na engenharia é a Equação de Manning, devido a grande disponibilidade de dados na literatura. A definição da equação de Manning no processo de escoamento associa um coeficiente de resistência com o comportamento da velocidade na seção transversal, que depende de fatores hidráulicos, geométricos da calha fluvial e elementos de rugosidade (PORTO, 2006).

A vegetação presente no curso d'água representa um dos principais fatores de rugosidade que influencia no comportamento hidráulico de um rio (profundidade, condutância, capacidade de transporte de sedimentos, entre outras) (NIKORA *et al.* 2008).

A vegetação em rios de pequeno porte desempenha relevante papel ambiental. Essas plantas atuam como verdadeiros filtros do sedimento fino em suspensão, com capacidade de absorver nutrientes e contaminantes, além de servir de *habitat* para a biota aquática. Numa visão da hidráulica, essas plantas dissipam a energia cinética do fluxo através dos elementos de rugosidade das. Esta dissipação de energia está diretamente direcionada à formação de turbilhões, afeta a tensão de arrastamento e a intensidade turbulenta do escoamento (NEPF, 1999). A existência da tensão de arraste adicional, provocada pela presença de vegetação no escoamento, reduz a velocidade média do escoamento relativamente a escoamentos sem vegetação.

Na natureza, a vegetação presente nos cursos de água abrange uma ampla gama de variedade, desde gramíneas flexíveis, a arbustos densos, até árvores de pequeno porte. Nas últimas décadas, vários estudos têm sido realizados com o

objetivo de analisar o efeito da vegetação aquática na resistência dos escoamentos e no processo de transporte de sedimentos em diferentes tipos de vegetação, porém a maioria baseia-se em ensaios laboratoriais, onde se simulam as condições de escoamentos com vegetação rígida (NEPF 1999; TANINO e NEPF 2008) e com vegetação flexível (NEPF e VIVONI 1999, CAROLLO *et al.* 2005).

Este trabalho contempla o estudo experimental das interações que ocorrem entre o fluxo e a vegetação macrófita presente na calha fluvial baseado em medições *in situ*. A análise dessas interações envolve fatores ambientais, hidrológicos e biológicos, estes relacionados com as características das plantas. Neste estudo, a vegetação macrófita reúne características locais que influenciam a sua distribuição espacial ao longo da planície de inundação. Do ponto de vista hidrológico, este trabalho contempla um trecho do rio Pitimbu, localizado em Natal-RN. Trata-se de um rio de grande importância, pois é responsável por aproximadamente 30% do abastecimento da região sul de Natal. Ele é um rio de pequeno porte, perene, que se encontra submetido aos impactos associados à crescente urbanização na bacia hidrográfica.

A importância da abordagem do tema objeto deste trabalho está relacionada com a compreensão dos fenômenos hidráulicos para as condições específicas de vegetação macrófita no trecho de estudo. No trecho objeto de estudo, a vegetação emersa está presente ao longo de todo o perímetro molhado da calha fluvial.

2. OBJETIVOS DO ESTUDO

Esse trabalho tem como objetivo analisar a resistência hidráulica associada às características da vegetação aquática presente em um trecho do rio Pitimbu, Natal.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a. Caracterizar detalhadamente e quantificar o escoamento no interior de zonas povoadas com vegetação emersa rígida;
- b. Determinar experimentalmente o coeficiente de Manning no trecho de estudo;
- c. Analisar o efeito da morfologia e distribuição espacial da vegetação no escoamento;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resistencia Hidráulica

A resistência hidráulica está relacionada com a distribuição da velocidade na seção transversal. Uma estimativa do coeficiente de resistência exige a medição de variáveis hidráulicas em seções transversais situadas nas fronteiras do trecho de estudo (velocidade, profundidade, largura) levantamento dos elementos de rugosidade, geometria da calha fluvial e declividade da linha de energia (SUÁREZ; VALIA, 2000).

As equações da resistência permitem relacionar a condutância hidráulica do canal a um coeficiente que representa o efeito do atrito produzido pela rugosidade no perímetro molhado (PORTO, 2006). A literatura apresenta os coeficientes de resistência hidráulica utilizados na Hidráulica de Canais: o coeficiente de resistência de Manning n , Darcy-Weisbach f , e Chezy C . As equações de resistência citadas são válidas para escoamentos em regime permanente, canal prismático com declividade de fundo baixa. As considerações teóricas que embasam as equações de resistência consideram a condição de equilíbrio dinâmico envolvendo forças que atuam sobre a massa d'água no canal.

Em 1889, o engenheiro irlandês Robert Manning apresentou os resultados obtidos em estudos experimentais, chegando a amplamente utilizada fórmula de Manning. Essa equação de resistência é utilizada em estudos e projetos hidráulicos envolvendo canais projetados e cursos d'água naturais (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2003). Essa fórmula é válida para os escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, onde o fundo do canal é paralelo às linhas d'água e de energia, por essa razão, a declividade do fundo do canal foi adotada na Equação 1.

$$V = \frac{R_h^{2/3} I_0^{1/2}}{n} \quad (1)$$

Sendo n o coeficiente de rugosidade ($m^{-1/3}s$) R_h o raio hidráulico m , I_0 a declividade do fundo do canal (m/m) e V é a velocidade média na seção transversal (m/s).

No caso de canais naturais, não prismáticos, a declividade do fundo não é constante, ou seja, o regime é permanente e variado. No escoamento variado, as declividades das linhas d'água e de energia variam em função da geometria da seção transversal e declividade do canal. Nesse caso, deve ser utilizada a declividade da linha de energia (I_f) na Equação de Manning (2).

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

Segundo Porto (2006), deve-se observar que a fórmula de Manning, além de ter origem empírica, carrega um coeficiente n que não é um adimensional. Chow (1959), aponta uma série de fatores que influenciam a rugosidade num canal natural: características da vegetação (distribuição das plantas na calha, densidade, tamanho das folhas, flexibilidade do caule), morfologia do canal, obstruções como pontes, pilares, troncos, etc. Com o objetivo de estimar o número de Manning levando em conta os diferentes fatores que oferecem resistência ao escoamento num canal, foi desenvolvida uma metodologia que procura agrupar esses fatores, cujos valores podem ser obtidos em tabelas. Assim, uma vez levantadas as características, é possível estimar valor composto do número de Manning (Equação 3). De um modo geral, o valor do coeficiente de resistência reflete o efeito causado por diferentes tipos de obstáculos ao escoamento.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (3)$$

n_0 : valor do coeficiente correspondente ao tipo de textura de contorno

n_1 : valor acrescentado para considerar irregularidades

n_2 : valor correspondente às variações de forma e dimensão

n_3 : valor relativo às obstruções

n_4 : valor correspondente à vegetação

m : correção para sinuosidade ($m \geq 1,0$)

Chow (1959) apresentou tabelas extensas fornecendo valores numéricos para esses parâmetros.

O processo de resistência descrito anteriormente trata-se de um fenômeno distribuído ao longo da calha fluvial. Porém além das perdas de carga distribuídas, podem também ocorrer perdas localizadas em função de singularidades naturais ou construídas pelo homem e existentes nas calhas dos rios. Seus efeitos devem também ser considerados na determinação do coeficiente do trecho.

Aplicando a Equação de Bernoulli (4) para o trecho em estudo, a declividade da linha de energia pode ser determinada isolando a declividade da linha de energia na equação (5).

$$\frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + I_f \Delta x \quad (4)$$

$$I_f = \frac{(Z_1 - Z_2) + \frac{1}{2g} [v_1^2 - v_2^2]}{\Delta x} \quad (5)$$

onde I_f é a declividade da linha de energia, Z_1 e Z_2 são as cotas das superfícies d'água nas seções de montante e jusante, v_1 e v_2 são as velocidades médias nas seções de montante e jusante e Δx é o comprimento do trecho. Sabendo que a declividade da linha d'água é dada pela razão da diferença de nível da seção 1 e 2 pela distancia entre elas (Equação 6).

Assim, a determinação da declividade da linha de energia está apresentada na Equação 7,

$$Z_2 - Z_1 = I_w \Delta x \quad (6)$$

$$I_f = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \right) + I_w \quad (7)$$

onde, I_w é a declividade da superfície da linha d'água entre as seções de estudo.

O coeficiente de resistência de Manning pode ser determinado experimentalmente ao substituir a Equação 7 na equação do coeficiente de Manning 8:

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{v} \sqrt{\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \right)} + I_w \quad (8)$$

onde R é o raio hidráulico médio (m) das seções, e v é a velocidade média (m/s), obtida com base nas velocidades médias nas seções de estudo.

Estudos anteriores foram realizados com o objetivo de, com base em dados de campo, relacionar o coeficiente de Manning com variáveis hidráulicas. Vale ressaltar que esses estudos tem caráter empírico e representam condições específicas dos canais fluviais analisados. Estas equações podem ser utilizadas, com a devida precaução, para estimar o coeficiente de Manning em canais com características semelhantes. (COON, 1998).

O estudo desenvolvido por Bray (1979) permitiu obter uma equação que relaciona o coeficiente de Manning com a declividade da linha d'água (Equação 9).

$$n = 0.104I_w^{0,177} \quad (9)$$

Onde I_w é a declividade da linha d'água. Esta equação é baseada em 67 trechos de rios com leitos de granulometria grossa (cascalho) em Alberta, Canadá. Os rios selecionados não tinham vegetação significativa e nenhuma característica de forma do leito dominante.

Em 1990 Sauer (*apud* Coon, 1997), desenvolveu um estudo que permitiu relacionar o número de Manning com a declividade da linha d'água e o raio hidráulico (Equação 10).

$$n = 0,11I_w^{0,18} R_H^{0,008} \quad (10)$$

Onde R_H é o raio hidráulico dado em pés. Esta equação é válida para rios com raios hidráulicos menores que 19 pés, além de incorporar uma gama de características hidráulicas, fatores como irregularidades transversais, variações do tamanho e forma do canal e presença de vegetação (Coon, 1997). De acordo com Coon (1997), esta equação está restrita a aplicações específicas como canais estreitos e presença de vegetações densas.

Avaliar a resistência ao escoamento é importante, pois a incerteza desse parâmetro pode trazer erros na estimativa de vazão e assim um impacto negativo no dimensionamento de projetos de obras hidráulicas (SUÁREZ; VALIA 2000). A compreensão precisa das características hidráulicas em diferentes regiões diminui essas incertezas, sendo ela obtida através de estudos de casos em condições de campo e assim com parâmetros utilizados de forma mais eficaz.

3.2 Escoamento Turbulento

O escoamento de fluidos com uma superfície não confinada sujeita à pressão atmosférica representa um dos problemas mais comuns da mecânica dos fluidos. Este tipo de escoamento em canais, ou rios, é caracterizado pela existência de uma superfície de contato entre a corrente líquida e o meio gasoso, geralmente a atmosfera, denominada por superfície livre, conferindo a essa superfície pressão constante e igual à pressão no meio gasoso (BARBOSA, 1985).

Em geral os escoamentos com superfície livre presentes na natureza são turbulentos. A identificação do regime do escoamento surge quando se relaciona o mesmo segundo a ordem de grandeza da velocidade das partículas. Esta classificação conduz à identificação de regimes de escoamento como laminares, de transição ou turbulentos (BARBOSA, 1985).

A identificação do regime turbulento é reconhecida ao observar o movimento de um escoamento com velocidades gradualmente crescentes, quando este parte inicialmente do repouso. Lesieur, 1997, define um escoamento turbulento como um escoamento que é desordenado no tempo e no espaço. Já Tenekes e Lumley, 1972, atribuem à natureza do escoamento a dificuldade de uma definição precisa de turbulência, procurando listar algumas características do escoamento turbulento:

- a) Irregularidade: torna uma análise determinística impossível, usando-se métodos estatísticos;
- b) Difusividade: causa a mistura do fluido, aumenta a transferência de calor e massa e retarda a separação da camada-limite;
- c) Altos números de Reynolds: a turbulência se origina de instabilidades de escoamentos laminares, quando o número de Reynolds vai aumentando;
- d) Tridimensionalidade da Vorticidade: a turbulência é rotacional e tridimensional, com grandes níveis de flutuações tridimensionais de vorticidade;
- e) Dissipação: escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e a viscosidade transforma o movimento de pequenas escalas em calor;
- f) Meio contínuo: turbulência é um fenômeno contínuo e sua menor escala é maior que a escala molecular;
- g) Escoamentos turbulentos são escoamentos: a turbulência é uma característica do escoamento, não do fluido.

Escoamentos turbulentos são caracterizados por números de Reynolds muito altos, logo, é razoável esperar que qualquer descrição da turbulência funcione propriamente à medida que o número de Reynolds tende ao infinito. Dá-se o nome a esse critério de invariância assintótica e permite que se estabeleçam critérios como a similaridade através do número de Reynolds.

3.3 Escoamento em torno de cilindros

Para o estudo de escoamento em trechos com vegetação, em condições naturais, o dossel vegetal é considerado sendo constituído por uma superfície com propriedades de objetos geométricos conhecidos. No caso o escoamento em torno do caule rígido, corpo rombudo, se assemelha ao escoamento em torno de um cilindro.

Corpo rombudo é definido, segundo Meneghini, (2002), como sendo aquele que, ao ser imerso em uma corrente de fluido, gera separação do escoamento e esta ocorre em uma porção considerável da sua superfície. A ocorrência da separação causa a formação de duas camadas cisalhantes livres na região

imediatamente posterior ao corpo. Essas duas camadas possuem vorticidade de sinal oposto e a interação entre elas representa a razão principal da formação e desprendimento de vórtices atrás do corpo. O efeito da geometria do corpo torna-se importante, principalmente devido á possibilidade de ocorrência de diferentes ângulos na linha de corrente que se separa da parede do corpo. A magnitude desse ângulo é determinada pela natureza do processo de separação, o qual pode ocorrer em um canto vivo ou em uma superfície continua, com o fluido sujeito a um gradiente adverso de pressão. Nesse ultimo caso, a posição em que a separação ocorre é altamente dependente do numero de Reynolds (Re). Outro fator importante na formação e desprendimento de vórtices é a largura transversal da esteira, pois ela atua diretamente na comunicação entre as duas camadas cisalhantes. Uma maior distancia entre as camadas de cisalhamento implica em uma menor frequência de desprendimento de vórtices.

Os escoamentos sobre cilindros circulares enquadram-se no caso de superfícies continuas com gradiente adverso de pressão. Seus modos de desprendimento de vórtices podem ser classificados em função do número de Reynolds, definido pela Equação 11:

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (11)$$

Sendo U a velocidade da corrente livre, d o diâmetro do cilindro e ν a viscosidade cinemática da água a 25°.

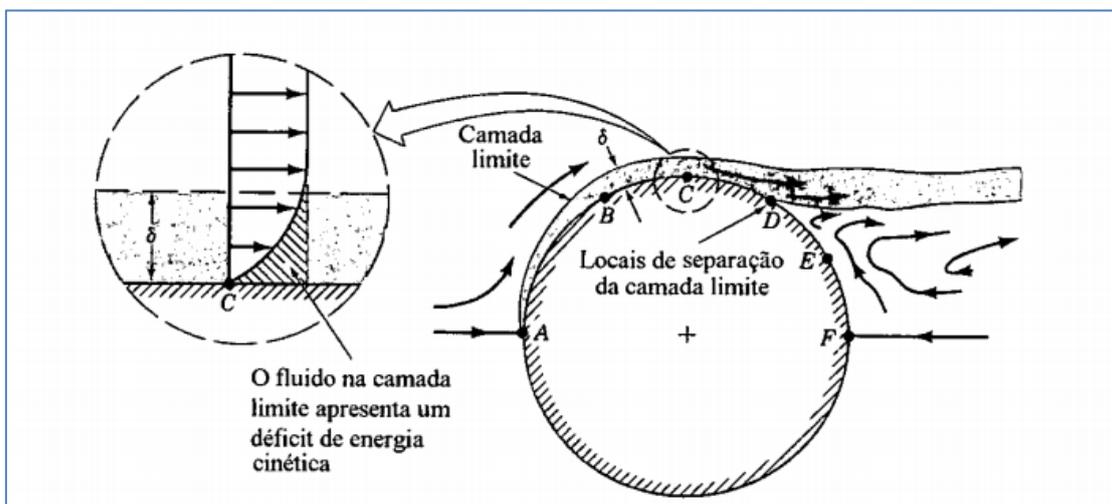
Os modos de desprendimento de vórtices são assim classificados, conforme Blevins (1990):

- Para valores $Re < 5$ o escoamento segue o contorno do cilindro. Nessas condições, o escoamento não apresenta deslocamento da camada limite e é conhecido como escoamento reptante (creeping flow);
- Na faixa $5 \leq Re < 45$, há a separação da camada limite atrás do corpo, onde se forma um par de vórtices simétricos conhecidos como vórtices de Föppl, que crescem com o aumento do número de Reynolds, podendo atingir uma

distância de até três vezes o diâmetro do cilindro na orientação do escoamento.

- Quando o número de Reynolds se encontra entre 45 e 150, o escoamento torna-se instável, forma-se uma esteira laminar periódica de vórtices desencontrados e de sinais de vorticidade opostos.
- Nas situações onde $150 \leq Re < 300$, os vórtices desprendidos do cilindro tornam-se turbulentos, embora a camada limite sobre o cilindro ainda permaneça laminar.
- A faixa $300 \leq Re < 1,5 \times 10^5$ é chamada de subcrítica. Nela, as camadas limites laminares se separam cerca de 80° em relação ao ponto de estagnação de montante e o desprendimento de vórtices é periódico.
- A faixa de transição, onde o número de Reynolds está entre $1,5 \times 10^5$ e $3,5 \times 10^6$, a camada limite do cilindro torna-se turbulenta e os pontos de separação movem-se para 140° . Nessa faixa, o ponto de transição à turbulência se aproxima muito do ponto de descolamento laminar que ainda o precede. As camadas cisalhantes tendem a colar novamente ao corpo, formando uma “bolha de separação-recolamento” (ponto D).
- Para $Re > 3,5 \times 10^6$ temos o regime supercrítico. Neste regime se restabelece o desprendimento de vórtices regular com uma camada limite turbulenta no cilindro.

Figura 1 - Características do escoamento viscoso em regime turbulento em torno de um cilindro



Fonte: Extraída do livro Fundamentos da Mecânica dos Fluidos, autores Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., 2002

Na Figura 1 mostra que o fluido na camada limite do cilindro apresenta um déficit de energia cinética devido a certa aderência entre o fluido e a superfície do corpo. Na camada limite, o regime laminar explica a predominância dos efeitos viscosos. A sua ocorrência reflete as propriedades do fluido de não escorregamento e viscosidade. No ponto D da Figura 1 as camadas limites laminares se separam ao ponto de estagnação de montante e o desprendimento de vórtices é periódico.

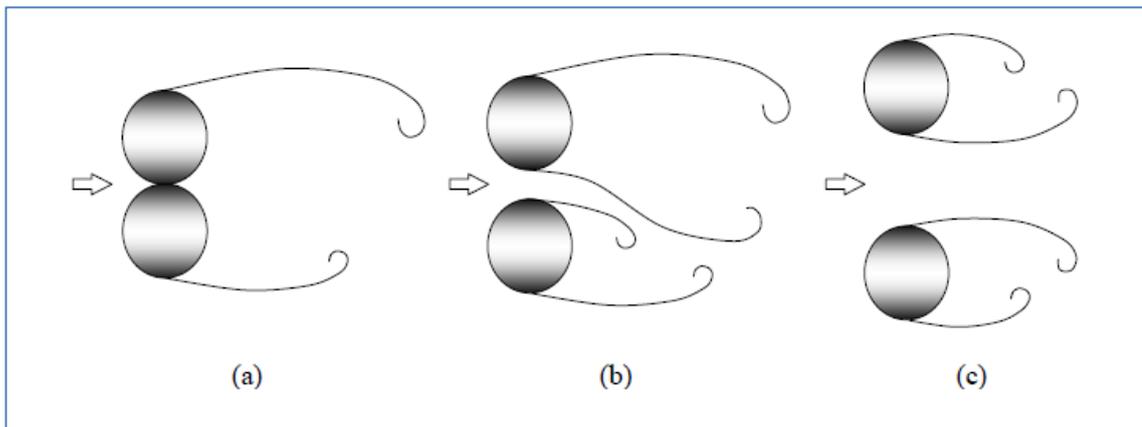
Sumner et. al., 1999, apresentam uma classificação de comportamento do escoamento ao redor de dois cilindros lado a lado conforme a razão de espaçamento s/d , sendo “s” a distância entre os centros dos cilindros e “d” o diâmetro.:

- Na situação onde a razão $s/d = 1$, os cilindros estão em contato e os dois cilindros comportam-se como um corpo rombudo com uma frequência de desprendimento de vórtices menor do que a de um único cilindro, em razão do aumento das camadas livres de cisalhamento (Figura 2.a).
- Para pequenos espaçamentos ($1,0 > s/d < 1,2$) o comportamento de corpo rombudo ainda é mantido, contudo a alta quantidade de movimento do fluido que escoava através da fenda formada entre tubos, aumenta a pressão à jusante dos tubos, reduzindo o arrasto em ambos os cilindros. A frequência de desprendimento, contudo, tende a permanecer aquela observada para $s/d = 1$, com uma esteira de vórtices simples, com desprendimento ocorrendo somente nas camadas de cisalhamento externas. Três padrões podem ser observados; o primeiro, com uma esteira próxima simétrica, formando uma esteira de vórtices e um escoamento da fenda desviado, embora uma esteira de vórtices simples ainda seja visualizada; e o terceiro, que apresenta um escoamento não significativo dentro da fenda.
- Em razões de espaçamento intermediárias ($1,2 < s/d < 2,2$) identifica-se no escoamento a formação de duas esteiras atrás dos cilindros, uma esteira larga atrás de um dos cilindros e uma esteira estreita atrás do outro, Figura 2.b. A presença destas esteiras fazem com que duas frequências dominantes de desprendimento de vórtices sejam originadas: uma mais alta relacionada à esteira estreita, e outra mais baixa está associada à esteira larga. O

escoamento que passa pela fenda é desviado na direção da esteira mais estreita. Denomina-se fenômeno biestável (*bistable*), de acordo com a literatura técnica, ao padrão de escoamento desviado que sofre uma mudança intermitente, sendo orientado ora na direção de um cilindro, ora na direção do outro. Este fenômeno é considerado uma propriedade intrínseca do escoamento e é independente do número de Reynolds, não sendo relacionado a desalinhamentos entre os cilindros ou qualquer outra influência externa.

- Para grandes espaçamentos, $s/d > 2,2$, o escoamento se dá na direção da corrente principal e o arranjo tem um comportamento de dois corpos rombudos isolados, onde uma interação ou sincronização é identificada na esteira, normalmente na forma de vórtices em oposição de fase (Figura 2.c).

Figura 2 - Modos de escoamento para dois cilindros dispostos lado a lado: (a) cilindros em contato, (b) razão s/d intermediária, (c) alta razão s/d .



Fonte: Silveira, 2011.

3.4 Escoamento em leitos com vegetação

A ocorrência de comunidades de plantas macrófitas na calha fluvial modificam as condições de fluxo na seção transversal. Essas plantas desempenham um papel ecológico importante, ao mesmo tempo em que representam potencial fonte de resistência hidráulica. A ocorrência de plantas aumenta o efeito da rugosidade, com a redução da condutância hidráulica, o que pode gerar consequências negativas,

tais como a inundação de áreas ocupadas. Durante muitos anos, as soluções de engenharia buscavam o aumento da condutância hidráulica dos rios, o que implicava na retirada da vegetação e impermeabilização. Atualmente, a necessidade de proteção do ecossistema tem considerado soluções ambientalmente sustentáveis, com a preservação da fauna e flora aquáticas.

As plantas macrófitas cumprem função ecológica importante, pois atuam como uma espécie de filtro dos sedimentos suspensos na corrente líquida, sumidouro de nutrientes e contaminantes, além de servir de habitat da biota fluvial. (NIKORA *et al.* 2008). De acordo com De Doncker (2009), a vegetação fluvial representa importante fonte de dissipação da energia hidráulica disponível, ao mesmo tempo que protege a calha fluvial dos processos erosivos associados ao fluxo.

Estudos experimentais demonstraram que a resistência hidráulica num canal com plantas macrófitas é causada pelas interações fluxo-vegetação que ocorrem na seção transversal (CAROLLO; FERRO; TERMINI, 2005 e O'HARE *et al.*, 2010). O efeito da resistência produz como resultado o aumento da profundidade, com redução da velocidade média (YEN, 2002). Isso traz como consequência a redução da condutância hidráulica (CHAMPION e TANNER, 2000)

A resistência hidráulica num canal fluvial está associada à ocorrência de diferentes tipos de elementos de rugosidade presentes na seção transversal, capazes de produzir interferências na estrutura da velocidade (VAZ, 2013)

As interações fluxo-vegetação tendem a exercer os maiores efeitos na resistência. Trata-se de fenômenos complexos, uma vez que dependem das morfologia da calha fluvial, comportamento hidráulico, além das características da vegetação (espécie, tamanho, porção submersa, distribuição espacial).

Estudos anteriores realizados em laboratório procuram simular as interações fluxo-vegetação, em condições de vegetação rígida (NEPF 1999, e TANINO; NEPF 2008) e vegetação flexível (NEPF; VIVONI 2000, CAROLLO; FERRO; TERMINI 2005). Na literatura são observados poucos trabalhos realizados em condições de campo, com levantamentos e medições *in situ* (KADLEC 1990 e NIKORA *et al.* 2008).

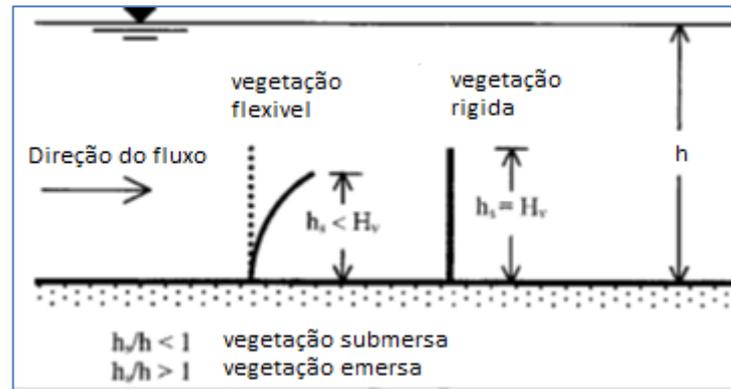
Nepf (1999) analisou o efeito da resistência hidráulica em laboratório utilizando um canal onde foram instaladas hastes cilíndricas. Neste trabalho, a resistência hidráulica foi determinada em função da distribuição espacial das hastes e do número de Reynolds. parâmetros do escoamento. do fluido através da determinação da força de arrastamento gerada devido a um conjunto de hastes de forma circular, e posteriormente relacioná-la com a função de densidade de hastes. Os trabalhos de Nepf e Vivoni (2000), por outro lado, analisaram o comportamento da velocidade e turbulência num conjunto de hastes flexíveis instaladas no canal.

Carollo *et al.*, (2005) desenvolveu um estudo experimental com o objetivo de analisar o efeito da rigidez na resistência hidráulica.

O problema da determinação de um coeficiente de rugosidade para descrever a resistência exercida pela vegetação relaciona-se com o facto de cada tipo de vegetação exercer uma resistência ao escoamento diferente e com o facto de a resistência variar com as alterações da altura do escoamento (STONE; SHEN 2002). Assim, a relação entre o coeficiente de rugosidade e a altura do escoamento, em canais vegetados, é muito variável e não linear (THOMPSON; WILSON 2002).

Num escoamento natural, a vegetação existente pode ser rígida ou flexível, onde comportamento hidráulico de cada uma delas é distinto, para vegetação rígida o comportamento hidráulico na rugosidade é semelhante ao de geometrias das hastes conhecida como, hemisfério, cubos, cascalhos, etc. A rigidez da planta pode ser definida como mostrada na Figura 3, onde h_s é a altura da vegetação dobrada (m) e H_v é a altura da vegetação com ausência do fluxo (m), que determina que uma planta seja mais rígida quando o valor de h_s se se aproxima do valor de H_v (CAROLLO *et al.*, 2005). No estudo feito por Carollo (2005) também é definido o grau de inflexão da vegetação, determinado como a razão de h_s com a altura do nível de água em que para valores menores que 1 é considerada vegetação submersa e para maiores que 1 não submersa.

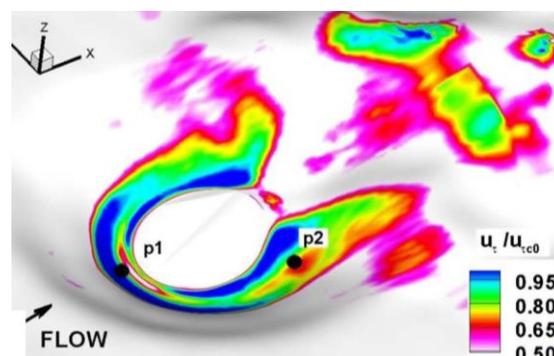
Figura 3 - Diferença da flexibilidade da vegetação e emersão.



Fonte: Carollo; Ferro; Termini, 2005

Liu *et al.* (2008) analisaram em laboratório as variáveis de fluxo (velocidade média e turbulência) em 5 pontos situados a jusante de planta emergente rígida com distribuição esparsa. Foram observadas algumas características do escoamento: a) as maiores intensidades de turbulência ocorreram junto do leito imediatamente a jusante da planta; b) alta variabilidade espacial da velocidade, com os menores valores observados no ponto mais próximo da planta; c) alta variabilidade espacial da turbulência, com redução do valor para jusante. Esses resultados demonstram a alta variabilidade espacial do fluxo através da planta emersa com distribuição esparsa. Esses resultados demonstram o efeito da variabilidade espacial do fluxo na dinâmica morfológica do leito do rio.

Figura 4 - Comportamento espacial da interação fluxo-planta isolada.



Fonte: Neary *et al.*, 2011.

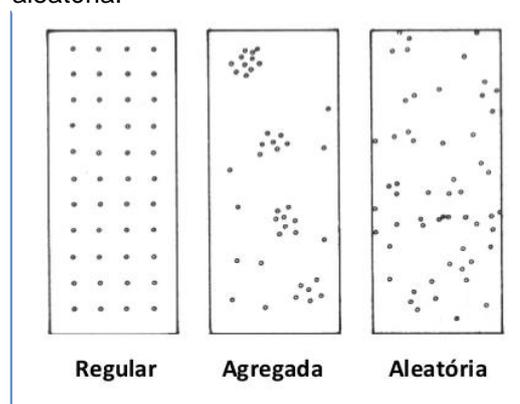
A Figura 4 representa em escala de cores o comportamento espacial do parâmetro adimensional da velocidade de atrito do leito decorrentes da interação fluxo-planta isolada. É possível observar processos erosivos ao longo da base do caule. A zona de maior intensidade está situada na base frontal, diminuindo gradualmente na parte lateral (ponto p1 ao p2).

3.5 Padrões de distribuição espacial da vegetação

O padrão de distribuição espacial de uma espécie é representado pela sua distribuição na área em estudo, em termos de frequência de ocorrência dentro das unidades amostrais coletadas (JANKAUSKIS, 1990). Uma espécie vegetal, embora apresente uma grande ocorrência em uma determinada área, sua distribuição espacial, nas diferentes classes de tamanho, pode ser bastante irregular. O grau de agregação pode apresentar diferentes valores, com as plantas das menores classes de tamanho apresentando tendência ao agrupamento e as plantas das maiores classes de tamanho podendo ocorrer de maneira fortemente agrupadas (CARVALHO, 1983).

Os padrões de distribuição espacial, estes podem ser basicamente divididos em três (aleatório, uniforme e agregado) (ODUM, 1986), os quais podem variar em função de características intrínsecas das espécies, como sua forma de dispersão das sementes, e sofrer influência de interações homeotípicas e heterotípicas e das características do habitat (LAROCCA, 1995 e COSTA; MAGNUSSUN; LUIZÃO 2005).

Figura 5 - Representação dos modelos de distribuição espacial regular, agregada e aleatória.



Fonte: Dajoz, 1973.

Conforme apresentado na Figura 5 os indivíduos de uma população com sua distribuição espacial aleatória é quando distribuídos ao acaso, regular quando em intervalos similares, e agregada no caso da formação de “manchas”.

Na visão de Augspurger (1983), o padrão de distribuição espacial de uma dada espécie de planta é dependente da interação de duas funções: a densidade de sementes dispersadas e sua probabilidade de sobrevivência ao longo do tempo (relativa à distância da planta-mãe). Quando estas duas funções são concordantes, prevê-se uma distribuição agregada; contrariamente, quando elas são discordantes, a tendência é para uma distribuição não-agregada.

3.6 Macrófitas Aquáticas

As macrófitas aquáticas, objeto deste estudo, são originalmente vegetais terrestres que sofreram modificações adaptativas, ao longo do curso evolutivo, sendo capazes de colonizar diversos tipos de ambientes aquáticos como lagos, lagoas zonas húmicas, rios, represas, cachoeiras, etc. (ESTEVES, 1998). Isto se deve ao fato da espécie de macrófitas apresentarem adaptações morfofisiológicas, além de possuírem a capacidade de colonizar ambientes aquáticos com diferentes características físicas e químicas (SCULTHORPE, 1967).

Esse tipo de vegetação desempenha importante função na manutenção e equilíbrio dos ambientes aquáticos, sendo considerada a principal fonte produtora de matéria orgânica. Servem de abrigo e/ou alimentação para diversos tipos de organismos, atuam na despoluição dos ambientes aquáticos, na produção de biomassa, no controle de erosão hídrica, no melhoramento físico e nutricional do solo, e na ciclagem de nutrientes, entre outros. Além disso, promovem a diversificação de habitats, criando locais de abrigo e alimentação para fauna diversificada e também como substrato natural para a formação de perifíton que é definido como “uma comunidade complexa de microbiota constituída por algas, bactérias, fungos, animais e detritos orgânicos e inorgânicos, que estão firmes ou frouxamente aderidos a substratos submersos orgânicos ou inorgânicos, vivos ou mortos” (WETZEL, 1983). Em cursos d’água de pequeno e médio portes, as

macrófitas desempenham importante papel na sedimentação e retenção de nutrientes, nas características físicas e químicas da água. Em alguns casos, afetam significativamente a estrutura da velocidade de fluxo (ESTEVEZ, 1998).

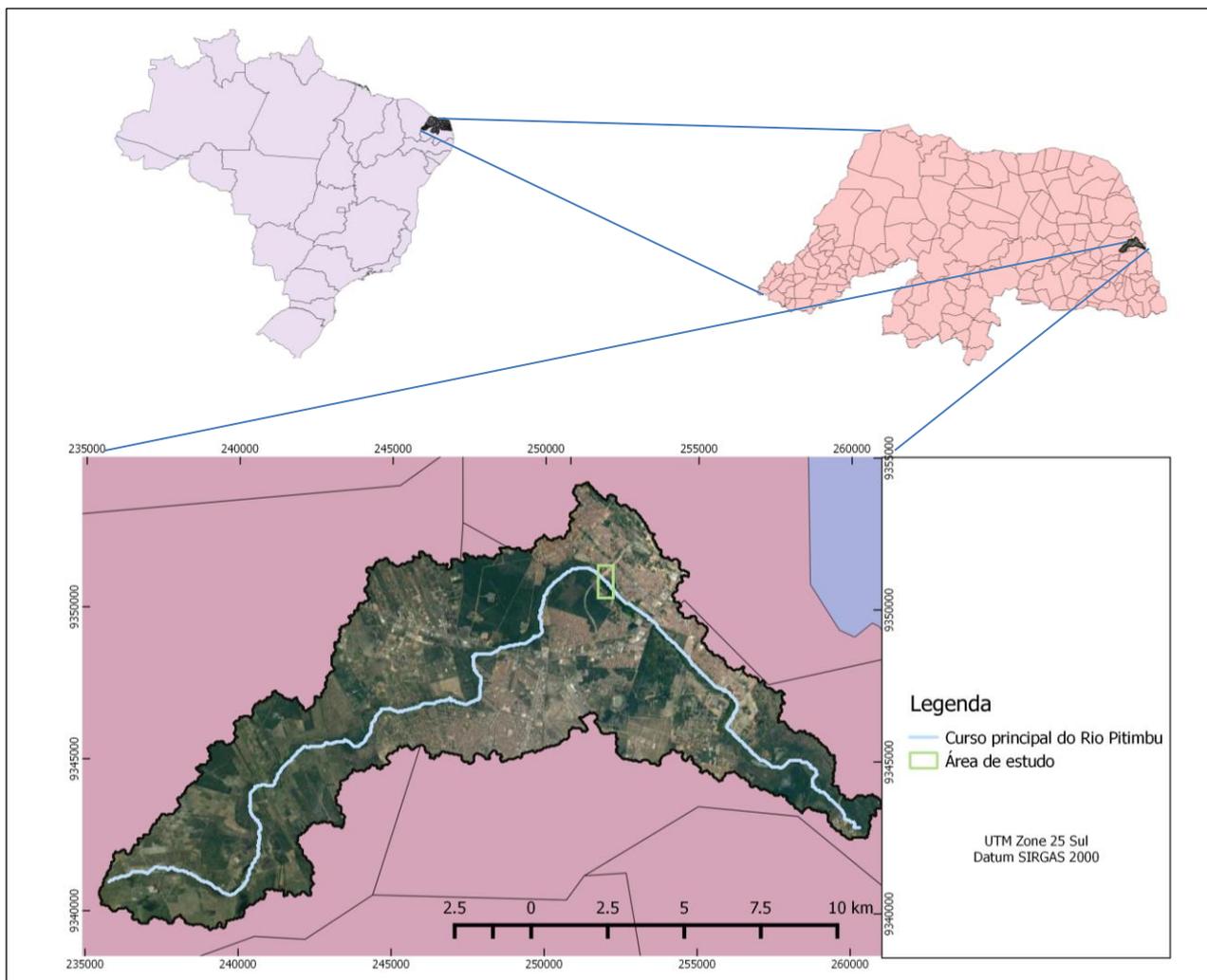
A reprodução das macrófitas aquáticas é controlada por uma série de fatores limitantes, entre os quais destaca-se a temperatura, radiação fotossinteticamente ativa, velocidade da corrente líquida, variação do nível d'água, nutrientes e disponibilidade de carbono inorgânico (CAMARGO; PEZZATO; HENRY-SILVA, 2003). Esses fatores dificilmente atuam isoladamente nos ambientes naturais, mas influenciam as características fotossintéticas das macrófitas, tanto em escalas diárias como sazonais (SAND-JENSEN, 1989). A distribuição espacial das macrófitas também pode ser explicada através de algumas interações específicas, tais como competição, herbivoria, parasitismo, entre outros (THOMAZ *et al.*, 1999).

Por outro lado, as macrófitas não somente são influenciadas por uma diversidade de fatores ambientais, mas também têm a capacidade de alterar as características do meio. Nesse sentido, Petracco (1995) realizou um estudo na represa de Barra Bonita, Estado de São Paulo. Ele observou que os bancos de macrófitas influenciavam diretamente a temperatura e as propriedades físico-químicas da água.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida num trecho do Rio Pitimbu, situado na região metropolitana de Natal. A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu está localizada no Litoral Leste do estado do Rio Grande do Norte, conforme mostrado na Figura 6. A BHRP encontra-se territorialmente inserida nos municípios de Macaíba, Natal e Parnamirim, sendo 43%, 10% e 47% respectivamente as parcelas percentuais de ocupação de área na bacia. Aproximadamente 30% do abastecimento de água da Região denominada Zona sul de Natal é proveniente do rio Pitimbu.

Figura 6 - Delimitação da Bacia do Rio Pitimbu, em destaque a área objeto desse estudo.



Fonte: Autora.

A área objeto de estudo está inserida num trecho da calha fluvial situada no médio curso do rio Pitimbu e delimitada pela coordenada geográfica [251939W; 9350981.5S]. O acesso ao local é feito através da ponte do prolongamento da Avenida Prudente em Natal.

A área de estudo é delimitada por duas seções (S1 e S2). Da S1 a S2 a calha fluvial é formada por um canal principal e uma planície de inundação, onde observa-se a ocorrência de macrófitas e vegetação ciliar (Figura 7). É possível observar sinais da ação antrópica no sistema fluvial, decorrentes do uso e ocupação do solo (processos erosivos e assoreamento da calha), além do lançamento de efluentes e resíduos sólidos de diversos tipos, em pontos situados a montante. O talvegue da calha do rio no trecho de estudo apresenta configuração longitudinal com meandro de curvatura suave. Foram realizadas duas campanhas de medições, em abril e setembro de 2017. O trecho do rio em estudo tem extensão longitudinal 52,18 m. Vale citar que a construção de uma ponte rodoviária em 2010, produziu desmatamento das áreas situadas a montante. Ao mesmo tempo, o movimento de terra durante a obra produziu assoreamento da calha do rio no trecho de estudo. O sedimento depositado no leito alterou a morfologia fluvial. No entanto, tem sido transportado para jusante durante os eventos máximos na bacia, permitindo o ajuste da calha fluvial a nova condição sedimentológica.

Figura 7 - Trecho objeto de estudo.



Fonte: Autora

O escoamento de base do rio Pitimbu ocorre por causa da ressurgência das águas subterrâneas provenientes das formações geológicas Dunas-Barreiras (MEDEIROS, 2001). Esse aquífero subterrâneo apresenta alta conexão com as águas superficiais, uma vez que se comporta como um sistema hidráulico único (MELO, 1995). Quanto a vegetação no trecho de estudo há predominância da Formação Pioneira com influência fluvial arbustiva sem palmeiras, dominada fisionômica e estruturalmente pela espécie arbustiva de arácea denominada Aninga (*Montrichardia linifera*). Essa espécie está presente nas águas rasas dos rios da costa leste tropical da América do Sul (MEDINA, 1959). Ao longo da calha do rio Pitimbu, esse tipo de vegetação é o mais típico e amplamente distribuído em alguns trechos do rio, se estendendo desde as regiões de nascente até a desembocadura no rio Taborda.

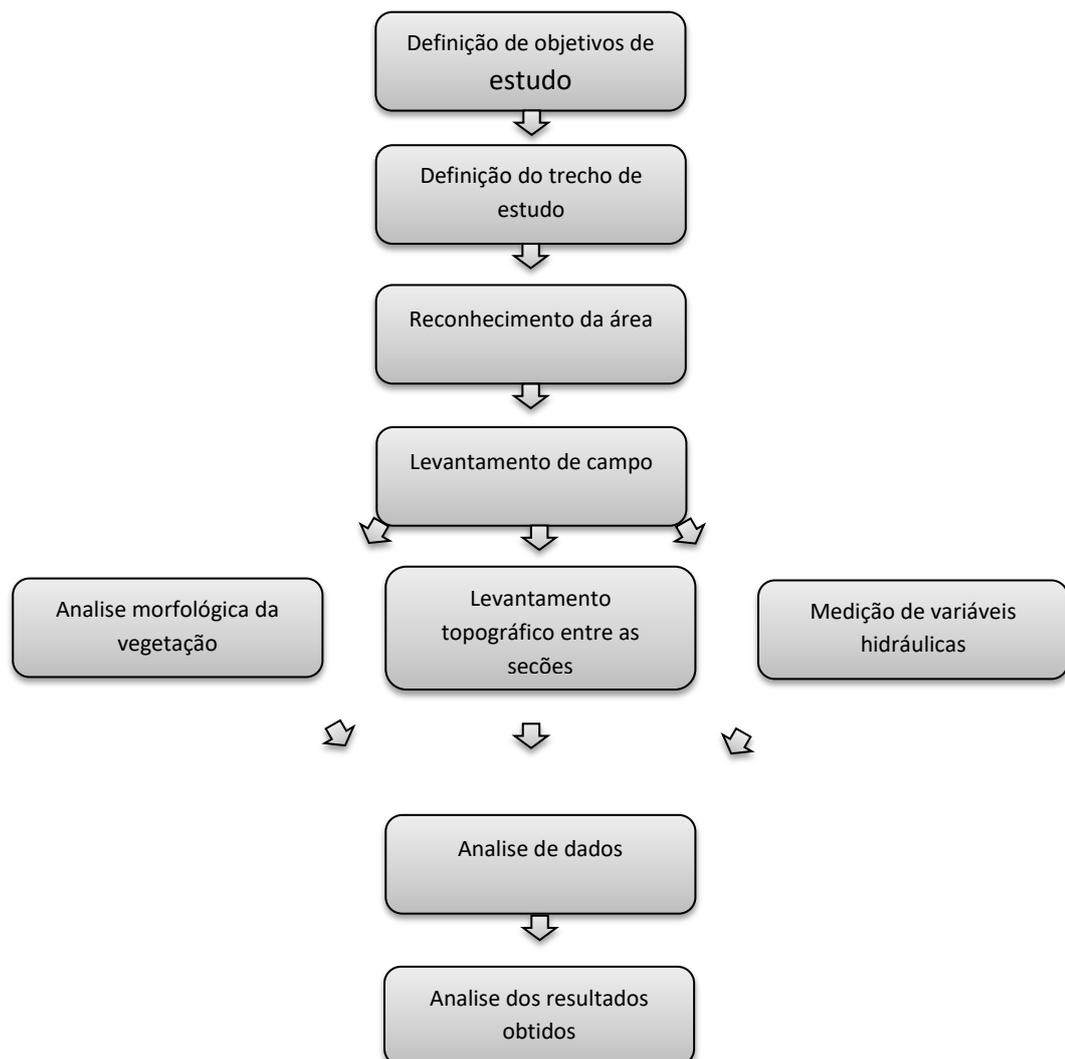
Segundo dados do relatório realizado pelo IDEMA-RN em 2009, é possível identificar na BHRP cinco tipos de vegetação natural aparentemente primária ou em estágio sucessional de regeneração avançada, a saber: Floresta Estacional Semidecidual de Terras baixas (Floresta dos Tabuleiros), Floresta Ombrófila Aluvial (Mata ciliar), Savana Arborizada densa e rala (vegetação de tabuleiro), Formação Pioneira com Influência Fluvial Arbustiva sem palmeiras (aningal) e Formação Pioneira com Influência Fluvial Herbácea sem palmeiras (campo periodicamente inundado).

A *Aninga* é uma macrófita aquática anfíbia que se caracteriza por possuir grande amplitude ecológica, ou seja, pode ser encontrada de emergente a terrestre de solo saturado de água (AMARANTE, *et al.*, 2011). A aninga é uma planta que vive em ambientes aquáticos, e também pode ser encontrada nas várzeas amazônicas e em diversos ecossistemas inundáveis como os igapós, margens de rios, furos e igarapés. A aninga pode ter um papel ecológico importante, pois controla os níveis de contaminantes presentes no solo e na água. Além disso, pode ser capaz de equilibrar o ecossistema, uma vez que pode controlar os níveis de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes no solo e na água, atuando como uma espécie de filtro natural. A espécie aninga normalmente apresenta 4-6 m de altura, limbo foliar de cerca de 45-66 cm de comprimento e 35-63 cm de largura (MACEDO *et al.*, 2005).

5. METODOLOGIA

5.1 Generalidades

A metodologia desse estudo compreendeu as etapas descritas a seguir.



Etapa de definição do melhor trecho para estudo através de mapas geoambientais e análises in loco, assim como analisando visualmente as características físicas no local, principalmente a vegetação presente no trecho. Levantamento de campo da velocidade do fluxo, topografia entre as seções de

estudo e morfologia da vegetação presente no trecho. Após a coleta de dados foi feita a análise dos dados e definição do coeficiente de Manning

5.2 Coleta de dados de campo: Vegetação

O levantamento das características da vegetação em campo foi realizado mediante a seleção de unidades de amostragem estatisticamente representativas situadas dentro da comunidade de macrófitas na área de estudo. Para isso, foi utilizado o método do Ponto-Quadrante, ou simplesmente Quadrantes. Este método que dispensa a instalação de uma área amostral, oferecendo maior rapidez em sua aplicação em campo (DURIGAN, 2003).

Foram selecionados 4 quadrantes, dimensões 2m x 2m, representativos da população de plantas. A sua localização está apresentada na Figura 8. A seleção dos quadrantes foi feita tendo o cuidado de que não houvesse superposição entre eles. Os quadrantes 1 e 2 estão situados numa região com pouca presença de água na superfície. Os quadrantes 3 e 4, situados mais próximos do talvegue do rio, apresentavam maior presença de água na superfície. Uma vez realizada a locação espacial dos quadrantes, foram realizadas as medições das características morfológicas das plantas, foram medidas a altura, diâmetro do caule e a configuração espacial (distância entre plantas).

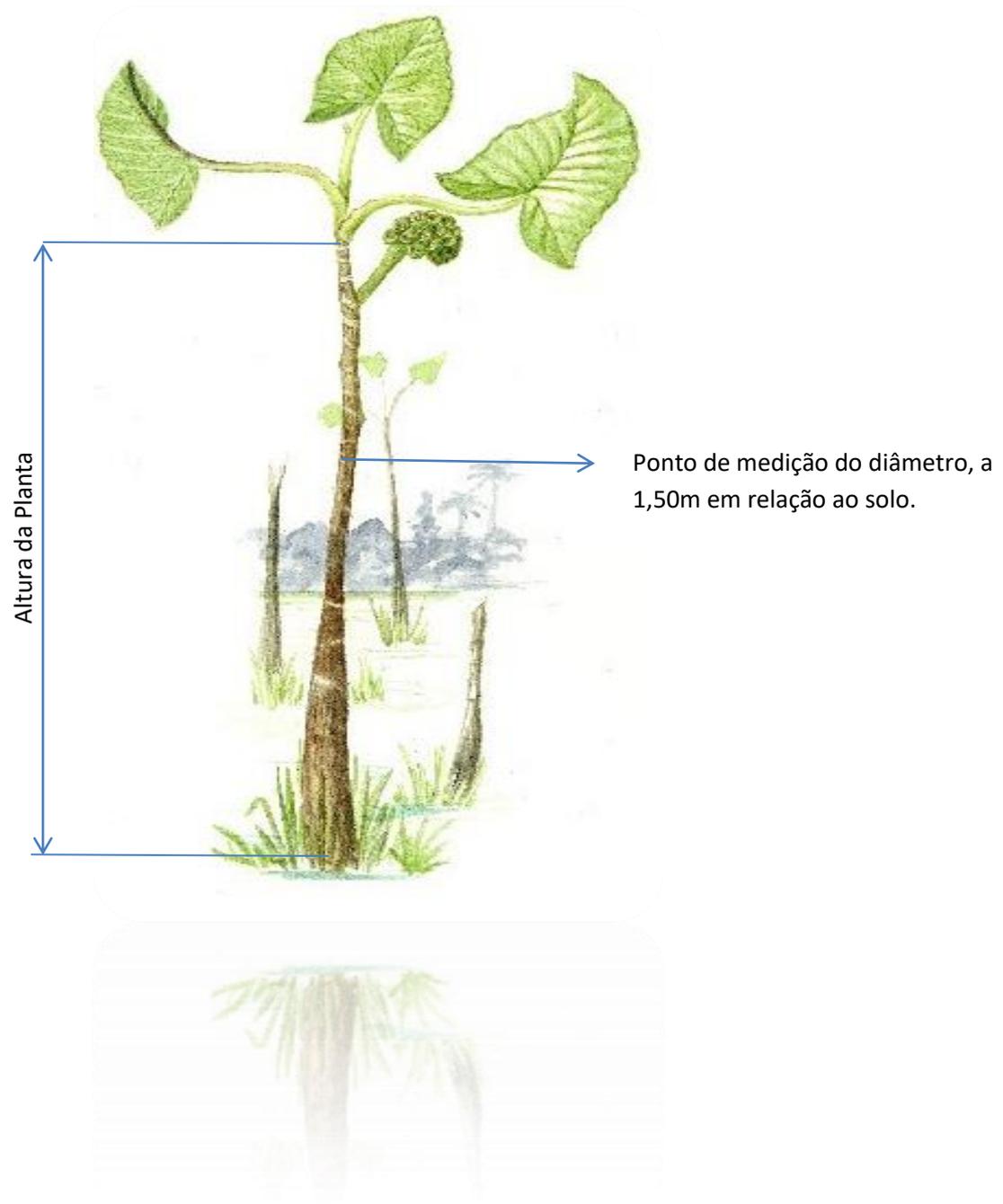
Figura 8 - Localização dos quadrantes 1, 2, 3 e 4 para realização desse estudo.



Imagem retirada do software Google Earth Pro.

A medição dos diâmetros das plantas foi realizada tomando como critério altura do peito do pesquisador, aproximadamente 1,50 m acima do leito do rio. A altura do caule da planta, definida como a distância entre o leito fluvial e o ponto mais alto, foi medida. A macrófita objeto desse estudo foi classificada como vegetação emersa rígida. A Figura 9 ilustra as medições da altura e diâmetro realizadas em cada indivíduo.

Figura 9 - Esquema de medição da planta.



Fonte: <http://olimpiareisresque.blogspot.com.br/2015/08/a-linda-flora-aquatica.html>

5.3 Distribuição espacial da vegetação

Com o objetivo de classificar o padrão espacial das plantas objeto deste estudo, foi utilizado o índice de PAYANDEH (P) usado por Caldato (1998) conforme a Equação 12.

$$P = \frac{s^2}{x} \quad (12)$$

onde P é o índice, s^2 a variância e x a média estimada da distribuição estatística de indivíduos (abundância) de uma população. Os valores de P, menores que 1,0, indicam a inexistência de agrupamento. Valores de P entre 1,0 e 1,5 indicam tendência ao agrupamento, e os valores maiores que 1,5 indicam agrupamento.

A variância (s^2) é calculada conforme Equação 13:

$$s^2 = \frac{\Sigma(xi-x)^2}{N-1} \quad (13)$$

onde: xi: n° de indivíduos em cada unidade amostral, x: média do n° de indivíduos por unidade amostral e N: n° de unidades amostrais

No trecho em estudo a unidade amostral é dada pelo quadrante onde foi contabilizada o número de indivíduos. A análise estatística dos quadrantes, permitiu verificar que distribuição da vegetação estava relacionada com a lamina d'água na superfície do leito. A partir disso optou-se por analisar conjuntamente os quadrantes 1-2 e 3-4.

5.4 Densidade da Vegetação

A densidade da distribuição espacial das plantas ($d = \text{indivíduos/área}$) foi estimada pela razão entre o número de indivíduos em cada quadrante e a sua área.

5.5 Levantamento Hidrométricos

Foi realizados duas campanha de medições das variáveis hidráulicas. A primeira campanha foi realizada em abril de 2017 e a segunda em setembro de 2017.

O levantamento da velocidade na seção transversal foi realizado com a discretização da seção transversal em verticais igualmente espaçadas. Em cada vertical foram realizadas medições pontuais da velocidade média. Para isso foi utilizado um medidor de fluxo modelo *FlowTracker* (Figura 10). Vale citar que este equipamento dispõe de tecnologia Doppler, o que confere precisão na obtenção dos dados.

Figura 10 - Equipamento de vazão ADV *FlowTracker*.



Fonte: <http://www.xylem-analytics.com.au/productsdetail.php?SonTek-FlowTracker-Handheld-ADV-15>

Em cada seção transversal, uma vez estabelecidas as verticais, o equipamento era posicionado na direção do fluxo. O operador se posicionava a jusante do ponto de medição de modo a não interferir no escoamento (Figura 11). A medição da velocidade em cada ponto tinha duração de 40 segundos. Em cada vertical foram realizadas medições a 60% da profundidade, pois os seus valores eram menores que 0,4 m. A análise de dados medidos em planilha eletrônica Excel permitiu calcular a vazão e a velocidade média na seção.

Figura 11 - Esquema de captação de dados pelo equipamento ADV FlowTracker através do efeito Doppler.



Fonte: Autora

5.6 Levantamento da declividade longitudinal entre as seções

O levantamento da declividade longitudinal entre as seções S1 e S2 foi realizado utilizando uma mangueira de nível transparente. O objetivo era medir o desnível entre as superfícies da água nas seções S1 e S2. Esse desnível foi medido por etapas em que o nivelamento foi realizado utilizando a margem esquerda do rio.

Uma vez obtida o desnível topográfico entre as superfícies, foi feito o cálculo da declividade da linha d'água no trecho do rio (Equação 14).

$$I_f = \frac{\Delta h}{L} \quad (14)$$

onde: Δh - diferença de nível entre as seções;

L - comprimento do rio entre as seções.

Figura 12 - Leitura de medição da declividade.



Fonte: Autora

5.7 Determinação do coeficiente de Manning

A determinação em campo do coeficiente de Manning foi feita em planilha eletrônica Excel utilizando os dados medidos em campo. Para cada seção transversal os dados foram os seguintes: área molhada da seção transversal, vazão, velocidade média, raio hidráulico e declividade da linha d'água.

Com vistas ao cálculo do coeficiente de resistência de Manning, baseado em dados experimentais, foi utilizada a Equação 8, mencionada na revisão bibliográfica desse trabalho.

5.8 Análise de Dados

Os dados levantados foram submetidos a análise estatística, utilizando para isso o aplicativo GraphPad Prism 7 e o Microsoft Excel (2010). A análise foi realizada através da geração de gráficos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos com os levantamentos e medições em campo.

6.1 Vegetação Macrófita

O levantamento detalhado da população de plantas presente em cada quadrante permitiu a determinação de alguns parâmetros estatísticos. Observou-se que a densidade de plantas em cada quadrante variou em função da sua localização. As densidades observadas para os quadrantes 1, 2, 3 e 4 foram de 6,5; 4,75; 10,5; 10,75 respectivamente. A densidade media considerando a totalidade dos quadrantes analisados foi de 8,12 plantas/m². Os resultados estatísticos para diâmetro e altura são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Dados descritivos do diâmetro dos caules das plantas.

Dados	Quadrante 1	Quadrante 2	Quadrante 3	Quadrante 4
Número de plantas	26	19	42	43
Minimum	0,022	0,013	0,008	0,016
25% Percentile	0,039	0,028	0,021	0,021
Median	0,05	0,03	0,02	0,03
75% Percentile	0,061	0,064	0,033	0,033
Maximum	0,077	0,083	0,061	0,057
Coeficiente de Variação	32,69%	46,43%	39,96%	36,98%
Média	0,048	0,042	0,028	0,028
Desvio Padrão	0,016	0,019	0,011	0,011

Fonte: Autora.

Tabela 2 - Dados descritivos da altura das plantas.

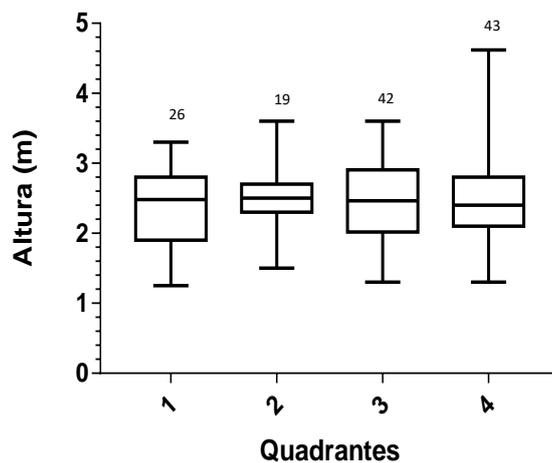
Dados	Quadrante 1	Quadrante 2	Quadrante 3	Quadrante 4
Numero de Plantas	26	19	42	43
Minimum	1,25	1,5	1,3	1,3
25% Percentile	1,9	2,3	2,02	2,1
Median	2,48	2,5	2,465	2,4
75% Percentile	2,8	2,7	2,905	2,8
Maximum	3,3	3,6	3,6	4,62
Coeficiente de Variação	24,58%	18,25%	23,72%	28,32%
Média	2,363	2,511	2,463	2,433
Desvio Padrão	0,5808	0,4581	0,5842	0,6891

Fonte: Autora.

No que se refere à altura das plantas, a análise estatística demonstrou certa uniformidade nas médias observadas nos quadrantes. A altura media das plantas foi de 2,6 m. No entanto, observou-se semelhança no desvio-padrão da amostra entre

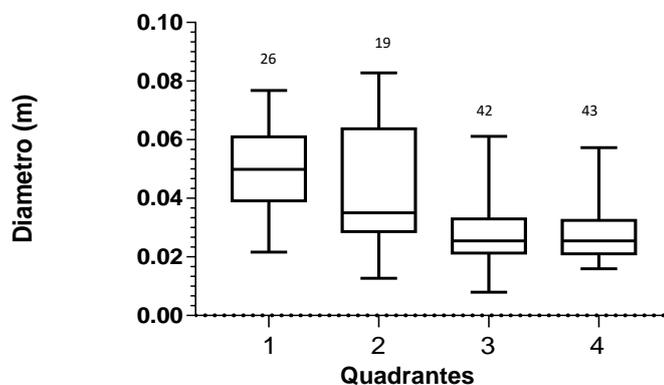
os quadrantes 1 e 3 ($DP = 0,58$) e diferenças para os quadrante 2 ($DP = 0,45$) e o quadrante 4 ($DP = 0,69$), conforme apresentado na Figura 13. No que se refere ao diâmetro dos caules, observou-se nos quadrantes 3 e 4 que a maior densidade de vegetação está associada à ocorrência de diâmetros menores. Os dados observados nos quadrantes demonstram que as características morfológicas das plantas são influenciadas pela localização do quadrante dentro da comunidade de macrófitas. Nesse sentido, nos quadrantes 1 e 2 os diâmetros mais altos estão associados a valores de densidade mais baixos, o que parece indicar a ocorrência de maior disponibilidade de nutrientes (Figura 14).

Figura 13 - Boxplot das alturas das plantas Aninga nos quadrantes



Fonte: Autora.

Figura 14 - Boxplot dos diâmetros dos caules nos quadrantes

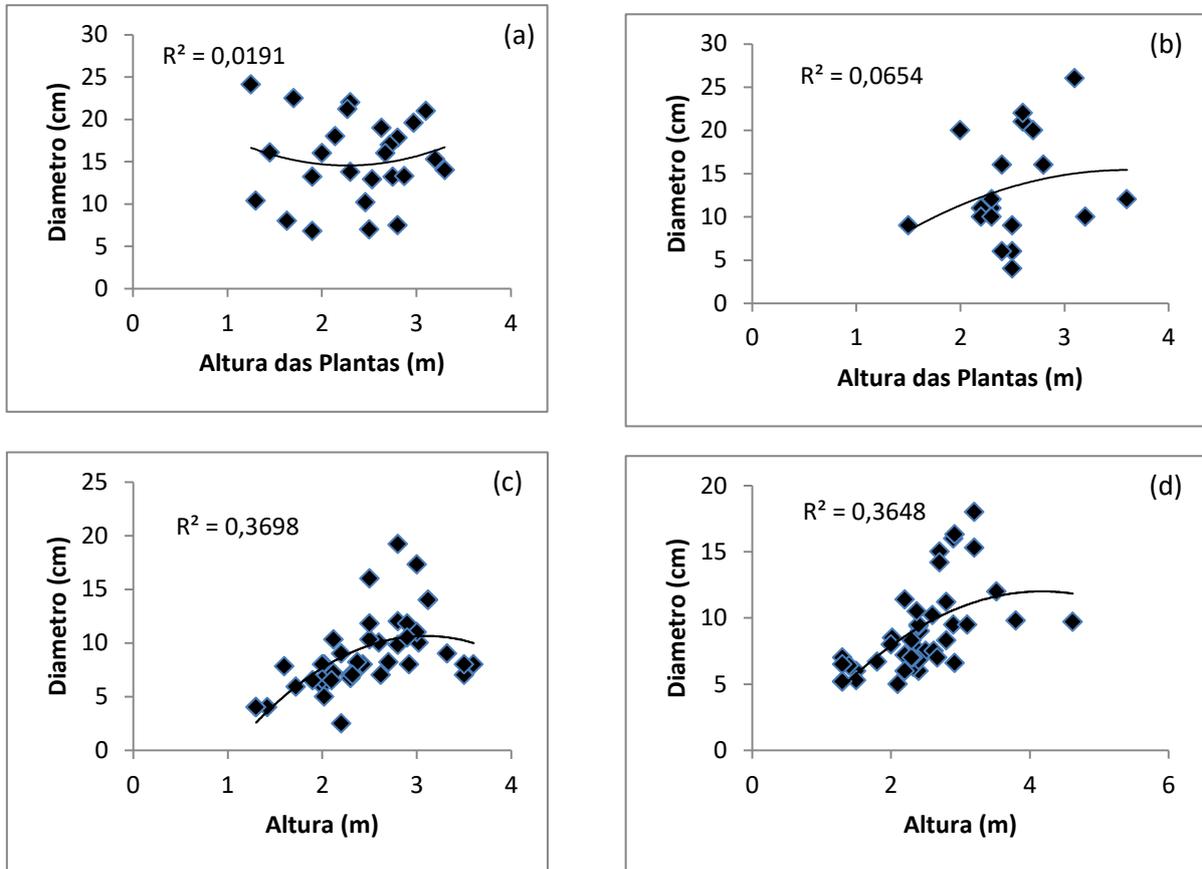


Fonte: Autora.

Além disso, nos quadrantes 3 e 4 a ocorrência de densidades mais altas reflete a localização da planta dentro do sistema fluvial. Esses quadrantes estão situados em áreas mais próximas do talvegue do rio, onde a maior permanência dos fluxos propicia maior disponibilidade de água e nutrientes para as funções biológicas da planta. Os coeficientes de assimetria dos diâmetros nos quadrantes 1, 2, 3 e 4 foram -0,1027; 0,5673; 0,9852 e 1,191 respectivamente.

A relação diâmetro/altura das macrófitas nos quadrantes está apresentado nos gráficos da Figura 15. A alta dispersão dos dados nos quadrantes 1 e 2 indica irregularidade nas características morfológicas das plantas. Por outro lado, nos quadrantes 3 e 4, o melhor ajuste da linha de tendência indica certa uniformidade na morfologia das plantas. A análise dos dados possibilitou o ajuste estatístico de uma linha de tendência. Ela permite obter uma função capaz de correlacionar as variáveis analisadas. Observou-se a existência de uma função tipo polinomial crescente envolvendo o diâmetro e a altura das plantas, conforme apresentado nos gráficos da Figura 15.

Figura 15 - Relação da altura – diâmetro do caule nos quatro quadrantes: (a) Quadrante 1, (b) Quadrante 2 (c) Quadrante 3, (d) Quadrante 4.

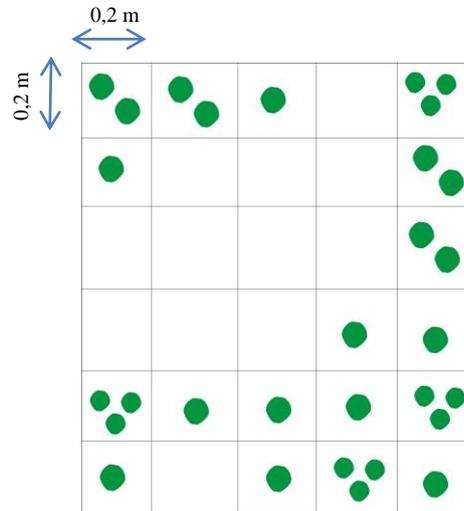


Fonte: Autora

6.2 Distribuição Espacial das Macrófitas

A análise da distribuição espacial das plantas nos quadrantes teve como objetivo determinar de que forma as plantas se predispõem no meio. Os dados revelam que os quadrantes 1-2 e 3-4 apresentaram padrões de distribuição semelhantes entre si. A classificação do padrão espacial de agregação das comunidades de plantas foi feita com base no índice de PAYANDEH (P). Os valores dos índices P obtidos para os quadrantes 1-2 e 3-4 foram 1,1 e 0,1 respectivamente. Esses índices revelam uma alta tendência a agregação nos quadrantes 1-2. Por outro lado, nos quadrantes 3-4 o valor obtido indica a ocorrência de distribuição espacial uniforme, com menor tendência a agregação. A título de exemplo, a Figura 16 apresenta a distribuição espacial das plantas observadas no quadrante 1.

Figura 16 - Esquema de Distribuição espacial plantas para o quadrante 1, onde os círculos verdes representa a vegetação presente a cada subquadrado de 0,2m x 0,2 m.



Fonte: Autora.

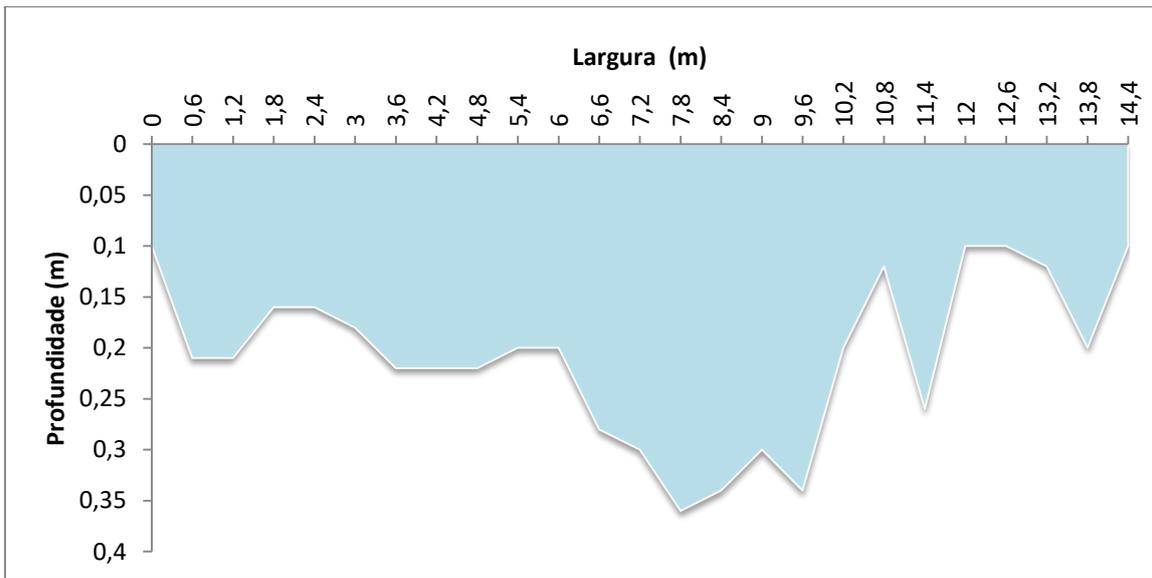
Com base na Figura 16 é possível observar uma tendência a agregação das plantas (mais próximas umas das outras). Essa tendência explica a ocorrência de distâncias grandes entre conjunto de plantas, confirmando a distribuição espacial agregada.

6.3 Levantamento das variáveis Hidráulicas

Os trabalhos de campo destinados ao levantamento e medição das variáveis hidráulicas foram realizados em campanhas nos dias 12 de abril e 15 setembro de 2017.

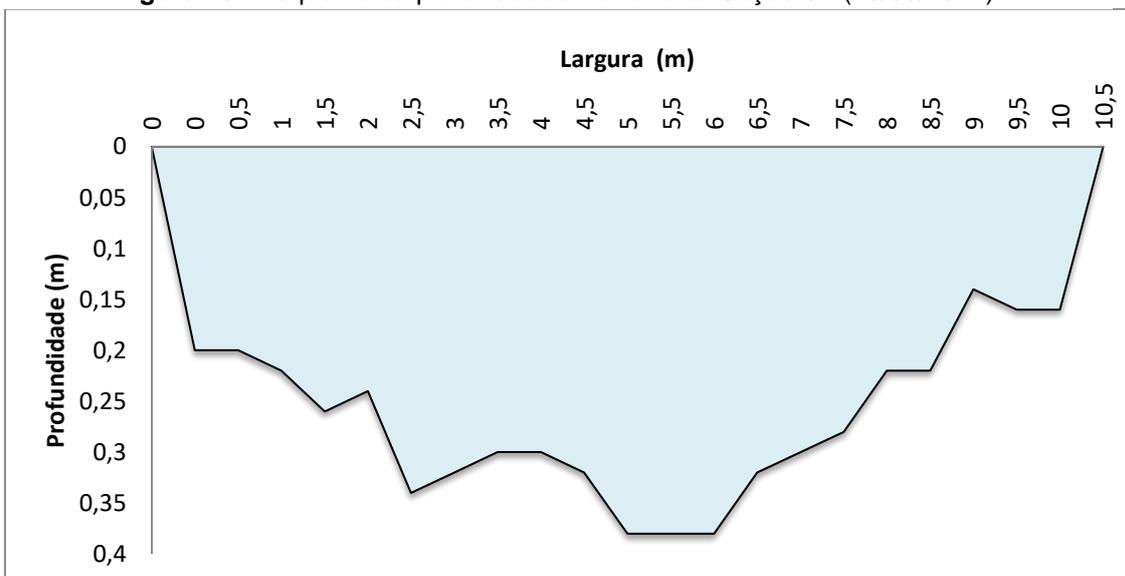
A geometria da seção S1 está representada nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Esquema da profundidade do fluxo Seção S1 (12/04/2017)



Fonte: Autora

Figura 18 - Esquema da profundidade de fluxo da Seção S1 (15/09/2017)



Fonte: Autora.

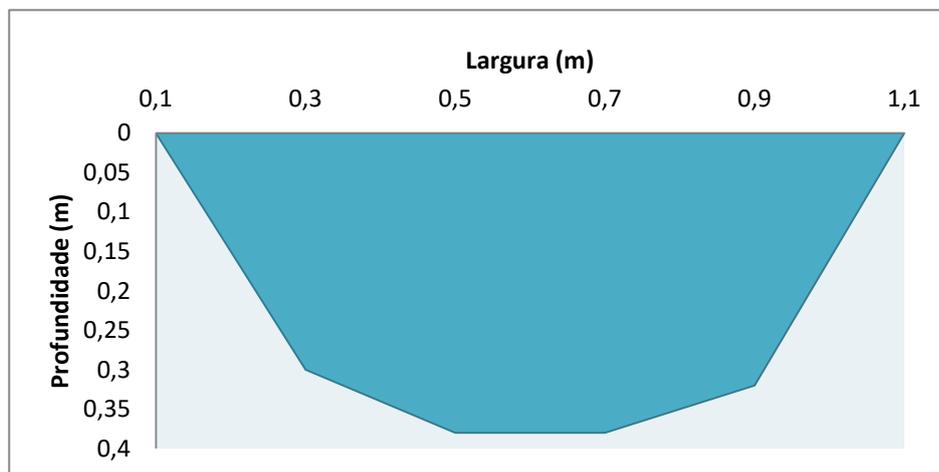
Na medição realizada no mês de abril, a seção S1 tinha uma largura de 14,2 m enquanto que na campanha de setembro a largura passa a um valor de 10,5 m. A

redução da largura da seção provocou um pequeno aumento da profundidade média.

Na primeira campanha a seção S1 foi discretizada em 24 verticais igualmente espaçadas a uma largura de 0,6 m ao longo do perímetro molhado. Na segunda campanha a discretização foi realizada em 21 verticais com um espaçamento de 0,5 m. Uma vez definidas as verticais, foram realizadas as medições das velocidades médias pontuais.

A seção S2 está representada na Figura 19. A campanha de coleta de dados para essa seção foi realizada no dia 15 de setembro de 2017.

Figura 19 – Geometria da seção S2 (15/09/2017).



Fonte: Autora

Na seção S2, observou-se uma largura de 1,1 m e profundidade média de 0,38 m. A seção foi dividida em 6 verticais equidistantes com espaçamento de 0,2 m.

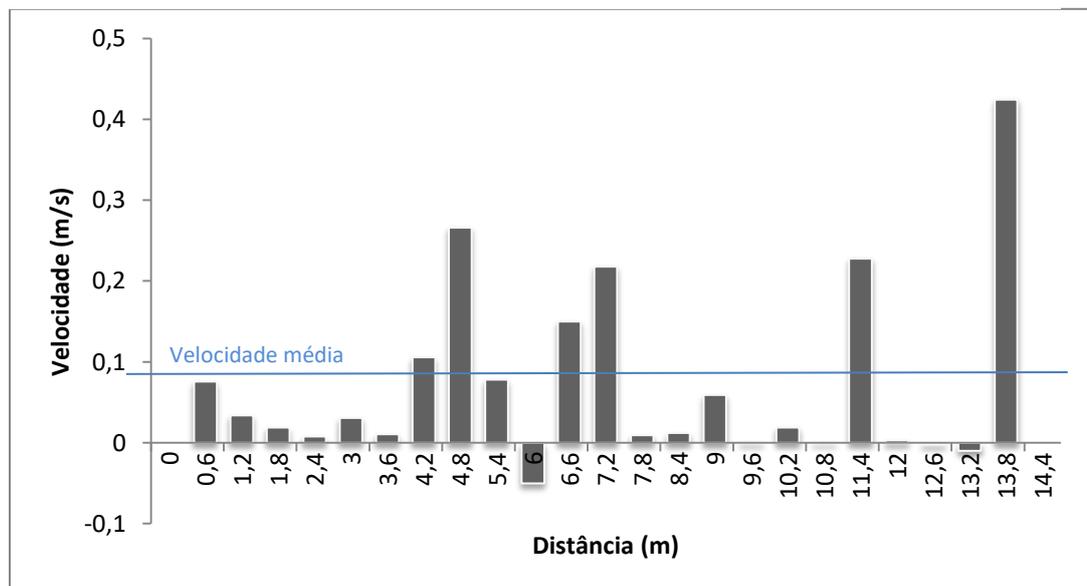
A morfologia das seções reflete o efeito produzido pela presença das plantas. Na seção S1 observou-se uma região central com maior profundidade (talvegue). A seção S2, situada 52,18 m a jusante, apresentou morfologia mais bem definida. Os dados de levantamento e medição em campo, juntamente com o histórico de ocupação da bacia situada a montante do trecho em estudo, indicam que a atual configuração morfológica foi resultado de processos sedimentológicos, com elevação do leito fluvial na planície de inundação e modificação da configuração original. Vale citar que a atual morfologia fluvial é resultado do assoreamento

causado pela construção de ponte rodoviária situada imediatamente a montante do trecho de estudo. A realização da obra implicou no desmatamento de vastas áreas de vegetação nativa e movimento de terra. Isso gerou processos erosivos de alta magnitude, com a transferência de sedimento para a calha fluvial. O resultado desses fenômenos foi o assoreamento da calha fluvial no trecho situado imediatamente a jusante.

Considerando que a profundidade da lamina d'água nas verticais não excedia a 0,38 m, optou-se por realizar medições da velocidade a 60% da profundidade. Ao longo de toda a extensão do trecho em estudo, observou-se alta densidade de vegetação macrófita.

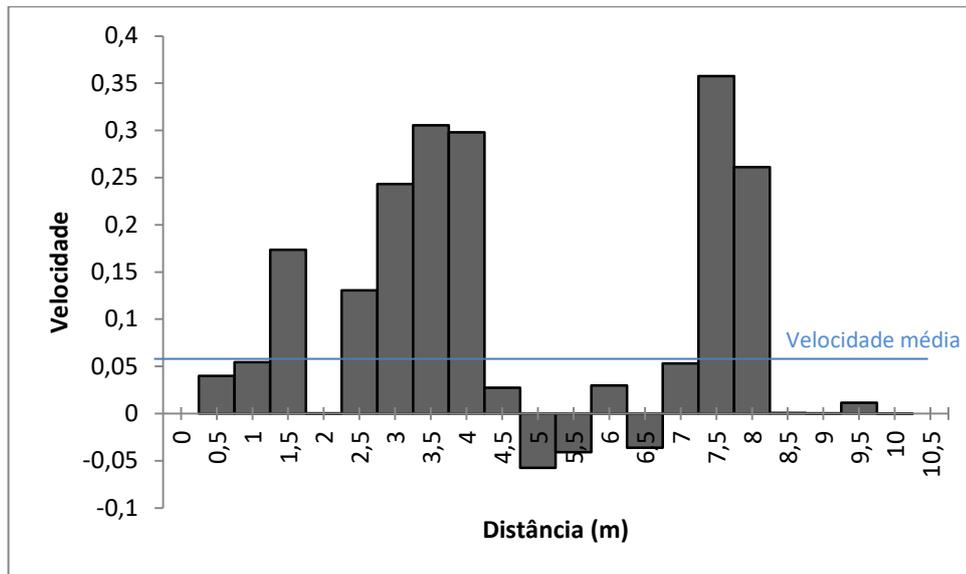
O resultado das medições de velocidades para a seção S1 estão representadas nas Figuras 20 e 21. A velocidade média está indicada nos gráficos.

Figura 20 - Velocidade média na vertical seção S1(12/04/2017).



Fonte: Autora

Figura 21 - Velocidades médias nas verticais da Seção 1. Campanha 15 de setembro de 2017



Fonte: Autora

Como pode ser observada nas Figuras 20 e 21, a estrutura da velocidade na seção transversal tem alta variabilidade. Fora observado valores acima da média em 6 verticais (primeira campanha) e 5 verticais (segunda campanha). Além disso, foram observados valores negativos provocados por escoamentos reversos e vórtices a jusante da planta.

A seção S2 não apresentava vegetação. Desse modo, a distribuição da velocidade nessa seção pode se assemelhar a de um canal sem vegetação com leito de granulometria fina.

Observou-se, de modo geral, que a vegetação modificou a estrutura da velocidade na seção, com desuniformidade na distribuição dos fluxos na seção.

A Figura 22 apresenta uma série de fotografias obtidas durante a segunda campanha. O objetivo era apresentar as condições de fluxo nas regiões próximas ao ponto de medição. Conforme apresentado nas Figuras 21 e 22, o comportamento da velocidade é influenciado pela presença da planta. Entre as verticais 1-4, os fluxos ocorrem livremente. Por outro lado na vertical 5, o fluxo sofre obstrução provocada pela planta. Nas verticais 11, 12 e 14 foi observado a ocorrência de escoamento reverso na região a jusante da planta.

Figura 22 – Fotografias do comportamento do fluxo nas verticais-seção S1 (15/09/2017).



Uma fotografia da seção S2 está apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Registro da Seção S2.



Fonte: Autora

Foi observado que a estrutura da velocidade foi modificada pelo padrão de distribuição espacial da vegetação no perímetro molhado. Nas regiões em que as distâncias entre os caules eram pequenas, observou-se a ocorrência de obstrução do fluxo. Por outro lado, para maiores distancias entre caules, observou-se certa uniformidade na distribuição da velocidade. Vale citar que os efeitos viscosos na dissipação de energia estão relacionados com a profundidade da lâmina de fluxo. Na seção S1, as baixas profundidades (entre 0,07-0,35 m) aumentaram o efeito da rugosidade relativa. As tensões cisalhantes no leito explicam a exposição das raízes numa cota acima do leito fluvial.

Os dados de levantamento e medição das variáveis em campo possibilitaram estimar o coeficiente de rugosidade de Manning. Os dados levantados estão

apresentados na Tabela 3. As declividades da linha d'água para as campanhas 1 e 2 foram 0,00874 m/m e 0,00939 m/m respectivamente. Os coeficientes de Manning obtidos foram de 0,069 $m^{-1/3}s$ e 0,078 $m^{-1/3}s$ respectivamente. Com base no presente estudo realizado, pode-se afirmar que, no trecho do rio Pitimbu desse estudo, um dos principais fatores responsáveis pela resistência ao escoamento está relacionado com fatores associados às características da vegetação macrófita.

Tabela 3 - Dados hidrométricos coletados em campo (12/04/2017).

	Seção 1	Seção 2
Vazão (m ³ /s)	0,2467	0,0041
Área (m ²)	2,979	0,29
Velocidade (m/s)	0,0828	0,851
Profundidade (m)	0,21	0,345
Largura da seção (m)	14,2	1,1
Perímetro molhado (m)	14,63	1,43
Raio Hidráulico (m)	0,204	0,203
Número de Manning ($m^{-1/3}s$)		0,069

Fonte: Autora

Tabela 4 - Dados hidrométricos coletados em campo (15/09/2017).

	Seção 1	Seção 2
Vazão (m ³ /s)	0,2076	0,0041
Área (m ²)	2,216	0,29
Velocidade (m/s)	0,0937	0,716
Profundidade (m)	0,264	0,345
Largura da seção (m)	10,5	1,1
Perímetro molhado (m)	10,63	1,43
Raio Hidráulico (m)	0,208	0,203
Número de Manning ($m^{-1/3}s$)		0,078

Fonte: Autora

Observou-se que a presença de resíduos sólidos de diversos tipos (garrafas tipo 'pet', isopor, plásticos, etc) na calha fluvial, contribuíram para o aumento do número de Manning. Esses elementos ficam retidos entre a vegetação, gerando

obstrução do escoamento, concentração de fluxo e turbulência (Figura 24). Vale citar que esses resíduos sólidos degradam a qualidade do ecossistema fluvial e da água, tendo em vista tratar-se de manancial destinado ao abastecimento humano, sendo enquadrado na Classe 2 no que preceitua a Resolução CONAMA nº 357.

Figura 24 - Presença de Resíduos sólidos no trecho estudado do Rio Pitimbu.



Fonte: Autora

6.4 Escoamento em torno da planta

Neste estudo, admitiu-se que a interação fluxo-planta pode ser assemelhada aquela que ocorre entre corpos cilíndricos. Utilizando a Equação 6, os dados de velocidade e do diâmetro do dossel permitiram determinar o número de Reynolds em torno da planta, que variou entre 44 e 15.625. Trata-se de regime turbulento nas regiões adjacentes ao corpo da planta. Além disso, foi possível identificar visualmente a ocorrência de vórtices na esteira do caule.

O regime dos escoamentos objetos de análise neste estudo refletem regime turbulento rugoso. A Figura 25 registra os detalhes da interação fluxo-planta em uma situação do caule isolado.

Figura 25 - Escoamento do fluxo em situação do caule isolado, caso no Rio Pitimbu/RN.

Legenda
P1: Região da camada limite
P2: ponto de separação
P3: Esteira



Fonte: Autora

Na Figura 25 são identificadas as regiões mencionadas anteriormente neste trabalho. No ponto P1 foi identificada a camada limite, onde observou-se que antes da separação, ela continua se desenvolvendo para jusante, com linhas de fluxo bem definidas visualmente, inicialmente próximo da esteira. No ponto P2 está localizado o ponto de separação da camada limite. Observa-se que após a separação, o fluxo adjacente ao caule é praticamente nulo. No ponto P3 ocorre a formação de esteira, onde nota-se nitidamente a presença de vórtices de alta intensidade.

Foram observados na região de esteira escoamentos reversos, conforme é possível verificar melhor em vídeo onde o link para acesso está contido no APÊNDICE A deste trabalho, explicados pelas duas camadas cisalhantes, que se formam de ambos os lados do dossel, se prolongam na direção do escoamento, confinando a região de esteira. Uma vez que a zona mais interna das camadas cisalhantes, em contato com a esteira, se move mais lentamente do que sua parte

externa, em contato com a corrente livre, assim estas camadas tendem a se enrolar em torno de si mesmas.

Para o comportamento entre dosséis em campo, observa-se que as plantas não tem um padrão de configuração espacial definido, como mostrado na Figura 26. Observou-se na região da seção S1 que as plantas estavam afastadas umas das outras num intervalo que variava entre 0,1 m - 0,70 m.

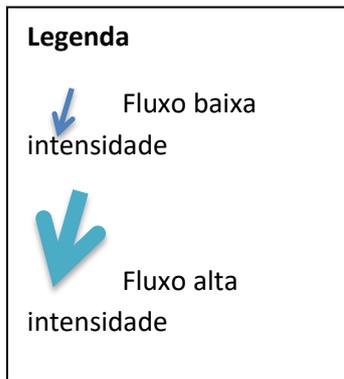
Figura 26 – Fotografia da distribuição espacial das plantas sentido montante-jusante.



Fonte: Autora.

Na Figura 27 é possível observar áreas em que os dosséis tinham um padrão agregado, caracterizando um único corpo. Isso causava um maior fator de bloqueio ao fluxo. Nesse caso, o sentido do escoamento na interação com a planta é desviado na direção das regiões laterais adjacentes, ou seja, na direção de esteiras mais estreitas.

Figura 27 - Desvio do fluxo de uma região de dosséis agregados para uma região de dosséis mais livres.



Fonte: Autora.

A Figura 27 apresenta registro de campo do desvio do fluxo de uma situação de dosséis agregados para uma trajetória mais livre. Esse desvio pode ser justificado pelo fato de que o bloqueio causado pela vegetação agregada não propicia espaço suficiente para criação da esteira, conforme é possível verificar melhor em vídeos onde o link para acesso está contido no APÊNDICE B deste trabalho.

7. CONCLUSÕES

Na presente dissertação procurou-se caracterizar e quantificar a resistência hidráulica imposta por vegetação emersa e rígida através da realização de um trabalho experimental de campo.

- Os dados de campo possibilitaram quantificar a resistência, expressa pelo número de Manning em $0,069 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ e $0,078 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, associado a vazões de $0,2467$ e $0,2076 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente;
- A análise do padrão de distribuição espacial da vegetação indicou a ocorrência de distribuição agregada em algumas regiões da comunidade;
- A análise do comportamento da velocidade nas seções transversais revelou a ocorrência de alta variabilidade espacial, com alguns valores acima do valor médio, demonstrando o efeito da vegetação macrófita na velocidade;
- Foram registradas velocidades negativas em algumas regiões a jusante das plantas, indicando a geração de esteiras e fluxo reverso nestes locais;
- A análise da interação fluxo-vegetação in situ revelou que o efeito dissipativo da vegetação está associado à sua distribuição espacial (densidade $8,12 \text{ plantas/m}^2$), rigidez e rugosidade do caule.

REFERÊNCIAS

- AMARANTE, C. B. et al., Estudo farmacognóstico, fitoquímico e citotóxico do extrato etanólico e frações obtidos do caule de *Montrichardia linifera* (Arruda) Schott (Araceae). **Revista Brasileira de Farmácia**, v. 92, n. 2, p. 60-65, 2011.
- AUGSPURGER, Carol K. Offspring recruitment around tropical trees: changes in cohort distance with time. **Oikos**, p. 189-196, 1983.
- BARBOSA, José Novais. **Mecânica dos fluidos e hidráulica geral**. 1985.
- BLEVINS, Robert D. *Flow-induced vibration*. 1990.
- BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**. Publicado no D.O.U
- BRAY, Dale I. Estimating average velocity in gravel-bed rivers. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 105, n. 9, p. 1103-1122, 1979.
- CALDATO, S. L. **Dinâmica populacional de *Ocotea porosa* (Lauraceae) na Floresta Ombrófila Mista em Caçador, SC. 1998. 89f.** 1998. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- CAMARGO, Antonio Fernando Monteiro; PEZZATO, Maura M.; HENRY-SILVA, Gustavo Gonzaga. Fatores limitantes à produção primária de macrófitas aquáticas. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**. Maringá: Eduem, p. 59-83, 2003.
- CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; TERMINI, D. Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 7, p. 554-564, 2005.
- CARVALHO, JOP de. Abundância, freqüência e grau de agregação do pau-rosa (*Aniba duckei* Kostermans) na floresta nacional do Tapajós. **Boletim de Pesquisa**, v. 53, 1983.
- CHAMPION, Paul D.; TANNER, Chris C. Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream. **Hydrobiologia**, v. 441, n. 1, p. 1-12, 2000.
- CHOW, Ven. **Open channel hydraulics**. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York, 1959.
- COSTA, Flavia RC; MAGNUSSON, William E.; LUIZAO, Regina C. Mesoscale distribution patterns of Amazonian understorey herbs in relation to topography, soil and watersheds. **Journal of Ecology**, v. 93, n. 5, p. 863-878, 2005.

- COON, William F. **Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks**. US Geological Survey, 1997.
- DAJOZ, R. **Ecologia Geral**; tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis, Vozes; São Paulo, Editora da USP, 474 p., ilus., 1973.
- DE DONCKER, Liesbet et al. Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. **Environmental fluid mechanics**, v. 9, n. 5, p. 549-567, 2009.
- DURIGAN, Giselda. Métodos para análise de vegetação arbórea. **Métodos de estudos em biologia da conservação e manejo da vida silvestre**. Curitiba: UFPR, p. 455-479, 2003.
- ESTEVES, Francisco de Assis. Fundamentos de limnologia. In: **Fundamentos de limnologia**. Interciência/Finep, 1988.
- IDEMA/RN. **Delimitação da Área de Preservação Permanente do rio Pitimbu, Rio Grande do Norte**. Relatório relativo ao Contrato de PrVertical de Serviços no 012/09 assinado entre a FUNPEC e o IDEMA. 2009
- JANKAUSKIS, Juris. **Avaliação de técnicas de manejo florestal**. SUDAM, 1990.
- KADLEC, Robert H. Overland flow in wetlands: vegetation resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 5, p. 691-706, 1990.
- LAROCA, S. **Ecologia: princípios e métodos**. Petrópolis: Vozes, 1995. 197p.
- LESIEUR, M. Turbulence in Fluids third revised and enlarged edition. 1997.
- LIU, D. et al. An experimental study of flow through rigid vegetation. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 113, n. F4, 2008.
- MACEDO, Eunice Gonçalves; SANTOS FILHO, Benedito Gomes dos; POTIGUARA, Raimunda Conceição de Vilhena. Anatomia e arquitetura foliar de *Montrichardia linifera* (Arruda) Schott (Araceae) espécie da várzea amazônica. 2005.
- MEDEIROS, Tásia Hortêncio de Lima. **Evolução geomorfológica,(des) caracterização e formas de uso das lagoas da cidade do Natal-RN**. 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MEDINA, Júlio César Medina Cardoza. **Plantas fibrosas da flora mundial**. Campina: Instituto Agrônômico. 1959.
- MELO, José Geraldo de. **Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal-RN**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. MENEGHINI, J. R. Mecânica da geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros. **Anais da ETT**, p. 217-344, 2002.

- NEARY, Vincent S. et al. Effects of vegetation on turbulence, sediment transport, and stream morphology. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 9, p. 765-776, 2011.
- NEPF, H. M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. **Water resources research**, v. 35, n. 2, p. 479-489, 1999.
- NEPF, H. M.; VIVONI, E. R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105, n. C12, p. 28547-28557, 2000.
- NIKORA, Vladimir et al. Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: field study. **Journal of hydraulic engineering**, v. 134, n. 9, p. 1326-1332, 2008.
- ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1986. 434p.
- O'HARE, Matthew T. et al. Variability in roughness measurements for vegetated rivers near base flow, in England and Scotland. **Journal of hydrology**, v. 385, n. 1, p. 361-370, 2010.
- Olimpia Reis Disponível em <<http://olimpiareisresque.blogspot.com.br/2015/08/a-linda-flora-aquatica.html>> Acesso em Outubro de 2016
- PETRACCO, Paula. **Determinação da biomassa e estoque de nitrogênio e fósforo de *polygonum spectabile* mart. E *paspalum repens* berg da Represa de Barra Bonita-SP**. Tese de Doutorado. Universidade de Sao Paulo. Escola de Engenharia de Sao Carlos. 1995.
- PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica. 4. ed. São Carlos: EESC/ USP, 2006.
- SAND-JENSEN, Kaj. Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities. **Aquatic Botany**, v. 34, n. 1-3, p. 5-25, 1989.
- SCULTHORPE, Cyril Duncan. Biology of aquatic vascular plants. Londres: Edward Almod 1967.
- SILVA, RCV da; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. Hidráulica fluvial. **Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 304p**, 2003
- SILVEIRA, Rodrigo Santiago. **Estudo experimental do efeito da razão de bloqueio em canal aerodinâmico sobre o número de Strouhal e o fenômeno da biestabilidade no escoamento em cilindros**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.
- Sontek. Disponível em <<http://www.sontek.com/productsdetail.php?FlowTracker2-Handheld-ADV-1>> Acesso em março de 2017.

- STONE, Brian M.; SHEN, Hung Tao. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. **Journal of hydraulic engineering**, v. 128, n. 5, p. 500-506, 2002.
- SUÁREZ, Romero; VÁLIA, Yannick. **Estudo da resistência ao escoamento em canais de fundo fixo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- SUMNER, D. et al. Fluid behaviour of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow. **Journal of Fluids and Structures**, v. 13, n. 3, p. 309-338, 1999.
- TANINO, Yukie; NEPF, Heidi M. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 1, p. 34-41, 2008.
- THOMAZ, Sidinei Magela et al. Aquatic macrophytes of Itaipu Reservoir, Brazil: survey of species and ecological considerations. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 1, p. 0-0, 1999.
- THOMPSON, Anita; WILSON, Bruce N. The impact of roughness elements on reducing the shear stress acting on soil particles. Final Report MN/RC - 2002-22, Universidade de Minnesota, 2002.
- VAZ, Ana Luísa Sousa. **O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais. 2013**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto.
- WETZEL, Robert G. Recommendations for future research on periphyton. **Periphyton of freshwater ecosystems. The Netherlands: Dr. W. Junk Publishers**, p. 339-346, 1983.
- Xylem-analytics. Disponível em <<http://www.xylem-analytics.com.au/productsdetail.php?SonTek-FlowTracker-Handheld-ADV-15>> Acesso em março de 2017.
- YEN, Ben Chie. Open channel flow resistance. **Journal of hydraulic engineering**, v. 128, n. 1, p. 20-39, 2002.
- YOUNG, DONALD F.; MUNSON, BRUCE RE OKIISHI; OKIISHI, T. H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. **Tradução da 4ª edição norte-americana. Edgard Blucher**, 2004.

APÊNDICE

Vídeos demonstrando o fluxo no trecho do Rio Pitimbu/RN na presença de vegetação macrófita emersa rígida da espécie *Aninga (Montrichardia linifera)*, Disponível em:

APÊNDICE A. Disponível em:

<https://youtu.be/NiBIEfWUKA4>

APÊNDICE B. Disponível em:

<https://youtu.be/KCkZtiO8aYg>

https://youtu.be/ngRntTA9W_w