

TIAGO ZANON DA SILVA

*UTILIZAÇÃO DE VANTS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM
CURSOS D'ÁGUA*

Porto Alegre

Dezembro de 2018

TIAGO ZANON DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE VANTS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO
EM CURSOS D'ÁGUA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO INSTITUTO DE PESQUISAS
HIDRÀULICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO HÍDRICO.

Orientador: Professor Dr. Fernando Mainardi Fan

Co-orientador: Msc. Arthur da Fontoura Tschiedel

Porto Alegre

Dezembro de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Tiago Zanon da
Utilização de VANTS para medição de vazão em cursos
d'água / Tiago Zanon da Silva. -- 2018.
91 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Arthur da Fontoura Tschiedel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. VANTS. 2. Drone. 3. Medição de Vazão. 4.
Hidrometria. I. Fan, Fernando Mainardi, orient. II.
Tschiedel, Arthur da Fontoura, coorient. III. Título.

Folha de Aprovação

Tiago Zanon da Silva

UTILIZAÇÃO DE VANTS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 06/12/2018 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Alfonso Risso – Departamento de Obras Hidráulicas

.....

Prof. Dr. Gean Paulo Michel – Departamento de Obras Hidráulicas

.....

Prof. Dr. Nilza Maria dos Reis Castro – Departamento de Obras Hidráulicas

Conceito:.....

Para meus pais

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente aos meus pais Fabio e Carla, por sempre me apoiarem e me incentivarem incondicionalmente, e por tornarem possível meu sonho de ser um Engenheiro.

Ao meu orientador Fernando e coorientador Arthur, pela paciência, pelos ensinamentos, orientações, oportunidades e principalmente por sempre ouvir e valorizar as minhas opiniões e minhas ideias.

A Katiucia e ao Maurício, pelos empréstimos dos equipamentos e pelo suporte e empenho prestados na realização do campo.

A todos meus colegas de curso, por serem mais que colegas, mas sim grandes amigos, praticamente minha família dentro da faculdade.

A todos os meus demais professores, que foram fundamentais para a minha formação.

A todos os meus demais amigos e familiares, pelo apoio, amizade e suporte.

As minhas grandes amigas que me apoiaram nesta etapa final.

“Nenhum homem pode banhar-se duas vezes no mesmo rio...
pois na segunda vez o rio já não é o mesmo,
nem tão pouco o homem!”

Heráclito de Éfeso

RESUMO

SILVA, T. Z. Utilização de Vants para Medição de Vazão em Cursos D'água. 2018. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este estudo propõe-se a criar e avaliar uma metodologia de medição de vazão em cursos d'água com a utilização de VANTS por meio da interpretação de imagens, com a utilização de traçadores visíveis e a posterior mensuração da velocidade de escoamento superficial, visando a obtenção de dados de vazão. A ideia do trabalho está centrada na avaliação de técnicas alternativas para estimativa da vazão em locais de difícil acesso ou de indisponibilidade de equipamentos de fluviometria e na proposição da utilização de equipamentos menos custosos para o processo. Foi realizado um levantamento de campo junto ao rio Mascarada próximo ao município de Rolante onde foram experimentados 4 diferentes tipos de traçadores que tiveram seus trajetos aerolevantados por um drone posicionado com a câmera perpendicular ao escoamento. Para avaliação dos dados foram propostas 3 técnicas de análises expeditas das imagens, as distâncias percorridas foram calculadas com a utilização de objetos de escala posicionados no campo de visão do levantamento e a área da seção transversal foi levantada com o auxílio de um ADCP, que também forneceu dados de vazão para posterior comparação dos resultados. Os resultados evidenciaram a importância da presença de traçadores ao longo da extensão do rio, de modo a fornecer informações do perfil de velocidade transversal para o cálculo da velocidade média. Além disso, foram propostos a utilização de coeficientes para o ajuste das velocidades médias superficiais em velocidades médias da seção. Em termos gerais, o erro médio entre todas as metodologias avaliadas ficou em torno de 10%, quando comparado com os resultados do ADCP. Conclui-se que apesar de todas as limitações apresentadas os resultados da metodologia apresentaram valores satisfatórios e indicam um campo a ser mais explorado.

Palavras-chave: VANTS; Drone; Medição de Vazão;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CANAL DE SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015) ...	14
FIGURA 2: DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE AO LONGO DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM RIO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	16
FIGURA 3: PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE NA VERTICAL (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	17
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DAS VERTICAIS ONDE SÃO MEDIDAS AS VELOCIDADES AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	18
FIGURA 5: VERTEDOR TRIANGULAR PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	20
FIGURA 6: VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO PARA UM VERTEDOR RETANGULAR DE SOLEIRA DELGADA (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	21
FIGURA 7: VARIÁVEIS PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO PARA UM VERTEDOR TRIANGULAR DE SOLEIRA DELGADA (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	21
FIGURA 8: FORMA DE UMA CALHA PARSHAL PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	22
FIGURA 9: MÉTODO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR DILUIÇÃO DE UMA SOLUÇÃO DE SAL (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)....	23
FIGURA 10: CONCENTRAÇÃO DE SAL AO LONGO DO TEMPO DURANTE UMA MEDIÇÃO DE VAZÃO USANDO O MÉTODO DA DILUIÇÃO COM INJEÇÃO CONSTANTE (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	24
FIGURA 11: MARCAÇÃO DO TRECHO NO RIO PARA MEDIÇÃO DA VAZÃO PELO MÉTODO DOS FLUTUADORES (ADAPTADO PALHARES ET AL., 2007)	26
FIGURA 12: MARCAÇÃO DOS INTERVALOS PARA MEDIÇÃO DAS MÉDIAS DE PROFUNDIDADE (ADAPTADO PALHARES ET AL., 2007)	26
FIGURA 13: MOLINETE PARA MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DA ÁGUA (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	28
FIGURA 14: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM UMA SEÇÃO DE UM RIO, COM A INDICAÇÃO DAS VERTICAIS, DISTÂNCIAS (d) E PROFUNDIDADES (p) – OS PONTOS INDICAM AS POSIÇÕES EM QUE É MEDIDA A VELOCIDADE NO CASO DE UTILIZAR APENAS DOIS PONTOS POR VERTICAL (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	28
FIGURA 15: DETALHE DA ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO PARA QUAL SE CONSIDERA VÁLIDA A VELOCIDADE MÉDIA DA VERTICAL NÚMERO 2 (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	29
FIGURA 16: UTILIZAÇÃO DO PERFILADOR ACÚSTICO POR EFEITO DOPPLER PARA MEDIR VELOCIDADE DA ÁGUA EM VÁRIAS POSIÇÕES (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	31
FIGURA 17: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM UM RIO COM PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER; FONTE: PRÓPRIA DO AUTOR.....	32
FIGURA 18: POSICIONAMENTO DO LANCE DE RÉGUAS LIMNIMÉTRICAS EM UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM RIO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	33
FIGURA 19: DADOS DE MEDIÇÃO E NÍVEL DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA CACHOEIRA DO PAREDÃO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)	34
FIGURA 20: CURVA-CHAVE DO TIPO POTÊNCIA AJUSTADA AOS DADOS DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA CACHOEIRA DO PAREDÃO (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).....	35
FIGURA 21: FLUXOGRAMA PARA EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS POR MEIO DA FOTOGAMETRIA DIGITAL. (ADAPTADO, JENSEN, 2009).	42

FIGURA 22: PARÂMETROS DE ATITUDE DE UM SENSOR FOTOGRAMÉTRICO EMBARCADO EM PLATAFORMA AÉREA. (COELHO E BRITO, 2007)	43
FIGURA 23: CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE (FONTE: WOLF E DEWITT, 2014)	44
FIGURA 24: SISTEMA DE COORDENADAS DA IMAGEM ROTACIONADA PARA QUE SEJA PARALELA AO SISTEMA DE COORDENADAS OBJETO. (FONTE:WOLF E DEWITT, 2014)	44
FIGURA 25: FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE MDT E ORTOIMAGENS COM O USO DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA DIGITAL (ADAPTADO, AGISOFT LLC, 2016).	46
FIGURA 26: DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES NOS RIOS UJI E KATSURA (ADAPTADO, FUJITA E KUNIA, 2011)	48
FIGURA 27: CAMPOS DE VELOCIDADE SUPERFICIAL DO RIO THUR (ADAPTADO, DETERT E WEITBRECHT, 2015)	49
FIGURA 28: MAGNITUDE DAS VELOCIDADES EM UM EVENTO DE CHEIA EM ALYTH BURN, ESCÓCIA (ADAPTADO, PERKS, 2016)	50
FIGURA 29: DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL PERTO DOS ESPORÕES (ADAPTADO, LÜKŐ, 2016)	50
FIGURA 30: FLUXOGRAMA COM OS PROCEDIMENTOS ADOTADOS	52
FIGURA 31: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DAS MEDIÇÕES.....	54
FIGURA 32. BACIA HIDROGRÁFICA DO PONTO DE MEDIÇÃO, NO RIO MASCARADA.	55
FIGURA 33: VISÃO AÉREA DAS MEIAS SEÇÕES QUE DESEMPENHARAM O PAPEL DE ESCALA NAS FOTOGRAFIAS (OBJETOS DESTACADOS EM VERMELHO).	56
FIGURA 34: PONTOS DE CONTROLE ADOTADOS JUNTO A PONTE.....	56
FIGURA 35: LEVANTAMENTO DE VAZÃO COM ADCP JUNTA A SEÇÃO MATERIALIZADA A MONTANTE DA PONTE.	58
FIGURA 36: POSICIONAMENTO DAS MEIAS SEÇÕES DE CANO PVC PARA LANÇAMENTO DOS TRAÇADORES A JUSANTE DA PONTE.	58
FIGURA 37: CARACTERIZAÇÃO DAS REGIÕES DE LEVANTAMENTO DAS VAZÕES.....	59
FIGURA 38: METODOLOGIA ADOTADA PARA O LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO.	61
FIGURA 39: PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS.	63
FIGURA 40: PRINCIPAIS REGIÕES DE ANÁLISE.	64
FIGURA 41: PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE PONTOS COM UTILIZAÇÃO DE SERRAGEM COMO TRAÇADOR. ONDE A: DELIMITAÇÃO DOS PONTOS NA PRIMEIRA IMAGEM; B: DELIMITAÇÃO DOS PONTOS NA SEGUNDA IMAGEM; C: DELIMITAÇÃO DOS PONTOS NA SEXTA IMAGEM E REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DEMARCADOS; E D: MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRES DOIS PONTOS CONSECUTIVOS NA MARGEM ESQUERDA.....	65
FIGURA 42: PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE LINHAS COM UTILIZAÇÃO DE PIPOCAS COMO TRAÇADOR. ONDE A: DELIMITAÇÃO DA LINHA NA PRIMEIRA IMAGEM; B: DELIMITAÇÃO DA LINHA NA SEGUNDA IMAGEM; C: DELIMITAÇÃO DA LINHA NA SEXTA IMAGEM E REPRESENTAÇÃO DAS LINHAS DEMARCADAS; E D: MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRES DUAS LINHAS CONSECUTIVAS JUNTO AO CENTRO.....	66
FIGURA 43: PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE MALHA COM UTILIZAÇÃO DE SERRAGEM COMO TRAÇADOR. ONDE A: ILUSTRAÇÃO DA MALHA SOBREPOSTA AO LONGO DO TRECHO; B: SELEÇÃO DA LINHA DA MALHA DEMARCANDO O TRAÇADOR NA PRIMEIRA IMAGEM, JUNTO A MARGEM ESQUERDA; C: SELEÇÃO DA LINHA DA MALHA DEMARCANDO O TRAÇADOR NA SEGUNDA IMAGEM, JUNTO A MARGEM ESQUERDA; E D: MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRES AS DUAS LINHAS CONSECUTIVOS DA MALHA NA MARGEM ESQUERDA.....	67
FIGURA 44: SEÇÃO TRANSVERSAL LEVANTADA NO RIO MASCARADA	68
FIGURA 45: GRÁFICO EM COLUNAS DOS RESULTADOS DE VAZÃO PARA O COEFICIENTE AJUSTADO DE 0,60.	71

FIGURA 46. RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS UTILIZANDO VINHO VELHO COMO TRAÇADOR. ONDE A: VISTA EM SOLO; E B: VISTA AÉREA.....	72
FIGURA 47. RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS UTILIZANDO PIPOCA.	73
FIGURA 48. RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS UTILIZANDO SERRAGEM.	73
FIGURA 49. RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS UTILIZANDO LARANJAS.....	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALORES n DE MANNING PARA CANAIS E RIOS COM DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTO (ADAPTADO, BAPTISTA & LARA, 2012; BOITEN, 2008)	15
TABELA 2: NÚMERO E POSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES COM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE (ADAPTADO, SANTOS ET AL., 2001).....	18
TABELA 3: DISTÂNCIA RECOMENDADA ENTRE VERTICAIS E NÚMERO DE VERTICAIS PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DA ÁGUA EM UM RIO, DE ACORDO COM A LARGURA DO RIO (ADAPATADO, SANTOS ET AL., 2001).....	19
TABELA 4: COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE	57
TABELA 5: RESUMO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO	62
TABELA 6: RESUMO DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM ADCP	68
TABELA 7: RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DE VAZÃO COM DRONE	69
TABELA 8: RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DE VAZÃO COM DRONE COM COEFICIENTE DE AJUSTE DE 0,80 (TRADICIONALMENTE USADO NO MÉTODO DOS TRAÇADORES).....	70
TABELA 9: RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DE VAZÃO COM DRONE COM COEFICIENTE DE AJUSTE DE 0,60.....	71
TABELA 10: COEFICIENTE DE AJUSTE ÓTIMO PARA CADA TRAÇADOR.....	76
TABELA 11: ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DE VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO LANÇAMENTO UNIFORME OU DESUNIFORME DOS TRAÇADORES	76

Sumário

1	Introdução.....	8
2	Objetivo.....	11
3	Revisão Bibliográfica.....	12
3.1	Medição de Vazão	12
3.1.1	Escoamento permanente e uniforme em canais	13
3.1.2	Distribuição da velocidade da água na seção transversal	16
3.1.3	Medição de vazão usando estruturas de controle.....	19
3.1.4	Medição de vazão utilizando diluição de traçadores	22
3.1.5	Medição de vazão pelo método dos flutuadores	25
3.1.6	Medição de vazão por meio da relação área e velocidade	27
3.1.7	Estimativas da vazão usando curva-chave	32
3.2	Os Veículos Áereos não Triupulados (VANT).....	36
3.2.1	Legislação	37
3.2.2	Fotogrametria	40
3.3	Utilização de VANTS para medição de vazão	47
4	Materiais e Métodos	52
4.1	Recursos empregados	53
4.2	Seleção e Caracterização da Área de Estudo	53
4.3	Elaboração da Escala e dos Pontos de Controle	55
4.4	Escolha dos Traçadores	57
4.5	Medição da Seção Transversal e Execução das Medições de Vazão	57

4.6	Medições de Vazão com VANT	60
4.7	Processamento dos Dados.....	61
5	Resultados	68
6	Discussões	72
7	Conclusões	78
8	Trabalhos Futuros.....	79
9	Referências Bibliográficas	81

1 INTRODUÇÃO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs), ou drones (“zangão” em inglês), ou RPAs (*remotely piloted aircraft systems*) significam aeronaves sem pilotos. Os voos realizados por um VANT podem ser operados de forma remota por um operador humano ou de forma autônoma por computadores de bordo.

Os primeiros VANTs desenvolvidos na história tiveram propósitos de aplicação militares, de modo que há conhecimento de seu emprego já na Primeira Guerra Mundial (WATTS ET AL., 2012). Desde então, por questões de custo e complexidade, até poucos anos atrás essas plataformas eram tradicionalmente desenvolvidas e adquiridas para o emprego militar. No Brasil, os primeiros registros de desenvolvimento de VANTs remetem ao início da década de 80, em projetos ligados a interesses da Aeronáutica, Marinha e Exército brasileiro (SDCI, 2017). Assim como em vários outros países, o principal interesse inicial em veículos aéreos não tripulados se resumia no emprego como alvos aéreos para treinamento de tiro real de suas unidades antiaéreas.

O mercado civil de VANTs surge no Brasil na última década impulsionado por startups e empresas criadas por pesquisadores universitários, que uniram os aeromodelos aos avanços dos sensores óticos digitais, eletrônica de controle e sistemas de comunicação, que permitiram agregar às suas pequenas plataformas capacidades suficientes para o seu emprego comercial (SDCI, 2017).

A partir dos modelos mais recentes de drones de baixo custo disponíveis no mercado, numerosas aplicações evoluíram para os engenheiros no que se diz respeito à aquisição de dados de campo e sua posterior análise. Os VANTs têm contribuído em vários campos da ciência, permitindo a coleta de dados em ambientes de difícil acesso e fornecendo informações em grandes extensões de áreas. Assim como o sensoriamento remoto via satélite transformou as observações científicas em processos físicos de larga escala, o uso generalizado de drones está revolucionando as ciências geofísicas através da medição rápida e refinada de fenômenos de pequena a média escala (TAURO ET AL., 2016).

No âmbito das ciências geofísicas, destaca-se aqui os recursos hídricos e, mais especificamente, a hidrometria, que trata da medição de vazão de corpos hídricos.

Tradicionalmente, as medições de vazão são realizadas de forma invasiva usando molinetes, traçadores, ADCP (do inglês, Acoustic Doppler Current Profiler) e estruturas de controle da passagem de água. Mesmo conhecida a eficácia de tais métodos, seu uso é dificultado para ambientes de fácil acesso. Além disso, a precisão das medições pode ser afetada por eventos de grande pluviosidade e por erros associados ao funcionamento e instalação dos equipamentos.

Estudos envolvendo a utilização de VANTs para medição de vazão vêm surgindo nos últimos anos como uma alternativa de medição remota em ambientes de difícil acesso e em condições de eventos hidro-meteorológicos adversos. As principais aplicações envolvem a medição de velocidades superficiais de rios por meio de técnicas baseadas em imagens, como, por exemplo, velocimetria de imagem de partículas em grande escala (LSPIV), velocimetria de rastreamento de partículas (PTV) e a velocimetria de imagens espaço-temporais (STIV) (LÜKŐ, 2016).

Estes métodos são baseados na análise de gravações de vídeo da superfície da água, para as quais a contribuição dos VANTs tem se mostrado essencial. Desse modo, são observadas aplicações de medições de vazão de rios baseadas em VANTS realizadas nos EUA (TAURO ET AL., 2016), na Suíça (DETERT & WEITBRECHT, 2015), na Hungria (LÜKŐ, 2016) e na Austrália (PERKS ET AL., 2016), entre outros exemplos. Desse modo, a utilização de VANTs para mensuração de vazão não se torna prática para engenheiros que, no futuro, muito possivelmente poderão ter minidrones nos bolsos, mas ao mesmo tempo não dominam programação, nem têm recursos suficientes para compra de sofisticados softwares de medição de vazão a partir dessa tecnologia.

Neste trabalho, portanto, propõe-se uma abordagem de avaliação mais expedita da utilização de VANTs no monitoramento de vazão. Concebe-se que os drones podem ser utilizados em campo como uma alternativa rápida e portátil de estimar vazões em campo. Além disso, o alto custo dos equipamentos de fluviometria associado a crescente popularização dos preços de VANTS no mercado mundial (SDCI, 2017) abrem perspectiva para o desenvolvimento de tecnologias que estabeleçam novas possibilidades e alternativas para realizações de medições expeditas de vazão com esses veículos.

Evitando a necessidade do conhecimento em programação e utilização de programas de Velocimetria por Imagem de Partículas, neste trabalho é apresentado um método de avaliação de imagens sequenciais, em um determinado trecho de rio, sendo inserido ao corpo hídrico

partículas ou traçadores identificáveis nas imagens e, junto a região das fotos, um objeto de escala.

2 OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é criar e avaliar uma metodologia de medição de vazão em cursos d'água com a utilização de um VANTS por meio da interpretação de imagens, com a utilização de traçadores visíveis e a posterior mensuração da velocidade de escoamento superficial, visando a obtenção de dados de vazão. Para tanto, é necessário que sejam atendidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar e validar os resultados da metodologia proposta com os resultados de medição de descarga líquida provenientes dos métodos tradicionais de medição de vazão;
- Fornecer informações como insumo para uma futura automatização do processo de medição de vazão com drones e do processo de análise das imagens.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre as principais matérias de interesse deste trabalho: medição de vazão, principais conceitos de VANTs, fotogrametria e estado da arte na obtenção de dados hidrológicos com a utilização de drones.

As principais atividades do ramo de hidrometria se baseiam nos tradicionais métodos de medição de vazão, destaca-se a utilização de estruturas de controle, como vertedores e calhas Parshal e métodos de diluição de traçadores como alternativas para rios pequenos de baixas vazões. O método de estimativa de vazão pela relação área e velocidade, no entanto, é o mais amplamente utilizado nos processos de hidrometria, seja pela consagrada utilização de molinetes ou pelo avanço do emprego da tecnologia dos sensores acústicos de efeito Doppler, crescente nos últimos anos.

O crescimento nos últimos anos da utilização de VANT com objetivos científicos pela sociedade civil trouxe grandes contribuições na área de fotogrametria e aerolevantamento. Junto com esse avanço também se tornou necessário a criação de legislações que ordenem e controlem o mercado de VANTS.

Entre as inúmeras aplicações emergentes com o avanço da tecnologia dos VANTS destaca-se os trabalhos já realizados sobre o tema de medição de vazão em rios com drones.

3.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO

Define-se vazão como o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio ao longo de uma unidade de tempo. Deste modo, se o tempo é medido em segundos e volume em litros, pode-se expressar a vazão em unidades de litros por segundo (l/s). No caso da vazão em rios, entretanto, é mais usual expressar a vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Medições de vazão são necessárias para a estimativa da disponibilidade de água em um determinado ponto de um rio, considerando os diversos usos da água. Também é necessário obter medições de vazão em situações extremas, como cheias, para permitir o dimensionamento de estruturas ou medidas que permitam reduzir os prejuízos (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

As medições de vazão em rios são relativamente complexas, porque o ambiente em que são realizadas é o ambiente natural, onde as variáveis não estão inteiramente sob controle.

A seguir são revisados alguns conceitos e técnicas que podem ser aplicadas para a estimativa de vazão em rios.

3.1.1 Escoamento permanente e uniforme em canais

Em rios e canais as principais variáveis do escoamento são: velocidade, vazão e nível d'água. O escoamento é denominado de permanente quando essas variáveis não se modificam ao longo do tempo em um determinado trecho do canal. Quando as variáveis vazão, velocidade média e nível não variam no espaço, o escoamento pode ser chamado de uniforme.

A estimativa da velocidade média de escoamentos permanentes uniformes em canais abertos com declividades constantes do fundo e da linha d'água pode ser realizada por meio de equações simples, como as de Chezy e Manning.

A equação de Manning apresentada na Equação 01 relaciona o nível de água e a declividade de um canal com a velocidade média da água nesse canal.

$$u = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{Equação 01}$$

Onde u é a velocidade média da água em m/s; S é a declividade (m/m); R_h é o raio hidráulico da seção transversal e n é o coeficiente de Manning ($m^{-1/3}$).

A Figura 1 apresenta o exemplo de uma seção transversal de um canal retangular. A profundidade do escoamento é dada por y e a largura do canal por B .

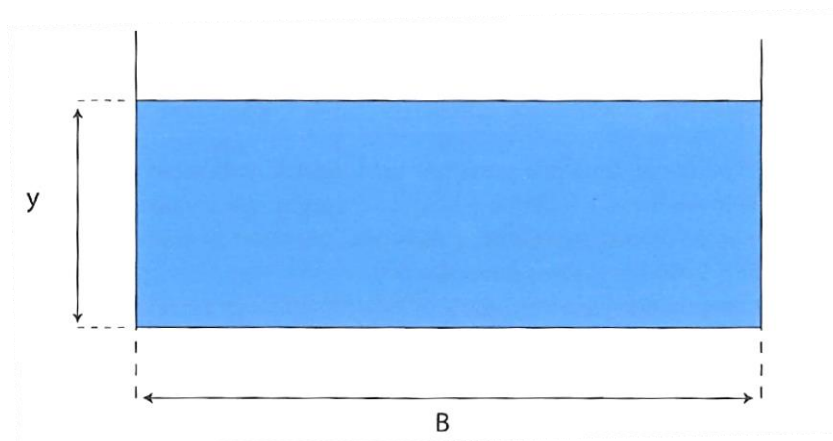


Figura 1: Seção Transversal de um canal de seção transversal retangular (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

O perímetro molhado é definido como a extensão da seção transversal em que há o contato entre a água e a seção. No caso da seção retangular da Figura 1, o perímetro molhado se dará pela soma da seção transversal em que a água tem contato com as paredes, ou seja:

$$P = B + 2y \quad \text{Equação 02}$$

Onde P é o perímetro molhado (m); y é a profundidade ou nível d'água (m) e B é a largura do canal (m).

O raio hidráulico é a relação entre a área de escoamento e o perímetro molhado, conforme a Equação 03:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad \text{Equação 03}$$

Onde A é a área e P é o perímetro molhado.

As análises das equações acima mostradas demonstram que quanto maior o nível da água y , maior a velocidade média da água no canal, para mesmos valores de declividade e de rugosidade do canal.

Em alguns casos é possível admitir a hipótese de escoamento em regime permanente e uniforme em rios, apesar das variáveis apresentarem variações no tempo e no espaço.

O valor do coeficiente n de Manning em rios e canais depende do material que compõe o fundo e as margens, da presença de vegetação e da sinuosidade do trecho. Em geral, canais com paredes muito rugosas, como os canais revertidos por pedras irregulares e rios naturais com leito rochoso tem valores altos de n . Canais de laboratório, revestidos de vidro, ou canais revertidos com concreto podem ter valores relativamente baixos de n . A Tabela 1 apresenta alguns valores de n de Manning para diferentes tipos de canais.

Tabela 1: Valores n de Manning para canais e rios com diferentes tipos de revestimento (Adaptado, BAPTISTA & LARA, 2012; BOITEN, 2008)

Tipo de Rio ou Canal	n de Manning
Canal escavado em terra com boa manutenção	0,016 a 0,020
Canal escavado em terra sem manutenção	0,022 a 0,140
Rio natural retilíneo com seção regular	0,025 a 0,033
Rio natural sinuoso com seção irregular	0,035 a 0,100
Rio em montanha com grandes seixos e pedras	0,030 a 0,070

A vazão em um canal, dado as hipóteses apresentadas, pode ser então calculada pelo produto da velocidade média vezes a área de escoamento, como apresentado na Equação 04

$$Q = A \cdot \frac{R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{Equação 04}$$

A estimativa da vazão pode ser feita de forma relativamente fácil em canais de seção transversal regular a partir da informação da profundidade, utilizando a equação de Manning e um valor adequado para o coeficiente relacionado a rugosidade.

Em rios naturais, entretanto, a estimativa da vazão não é tão simples, pois a seção transversal tende a ser mais irregular, e nem todas as dimensões são perfeitamente conhecidas. Deste modo, a utilização de equações baseadas na hipótese de escoamento uniforme para estimativa da vazão, quando não se conhecem as dimensões físicas da seção, pode acabar resultando em erros grosseiros. Por esse motivo torna-se necessário medir diretamente a vazão em rios naturais.

Existem diversas técnicas para medição de vazão em rios e canais e a escolha entre as técnicas depende principalmente do tipo de curso d'água e dos instrumentos disponíveis para a medição. As técnicas mais usuais são: estruturas de controle de vazão, traçadores e área-velocidade.

3.1.2 Distribuição da velocidade da água na seção transversal

Em uma seção transversal, a velocidade de água não é igual em todos os pontos. Em função da interação do fluido com o fundo e as margens, a velocidade da água costuma ser maior no centro de um rio do que junto às margens. Também, a velocidade é mais baixa junto ao fundo do rio do que junto a superfície (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

Considerando a variação da velocidade nos diferentes pontos de uma seção transversal, a utilização de apenas uma medição de velocidade pode resultar em uma estimativa errada da velocidade média. Conforme mostra a Figura 2, a velocidade média medida junto à margem costuma ser inferior e velocidade média e a velocidade medida junto à superfície, no centro da seção, costuma ser superior à velocidade média.

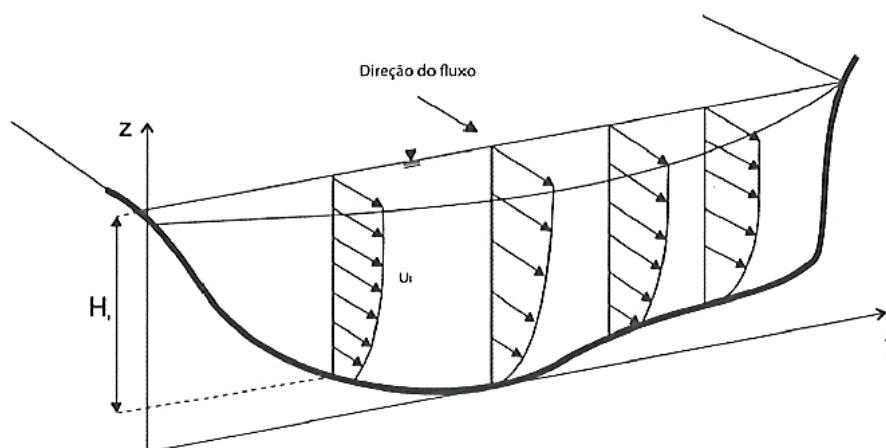


Figura 2: Distribuição de velocidade ao longo de uma seção transversal de um rio (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

É importante, portanto, para obter-se boas estimativas da velocidade média do escoamento de um rio, repetir a medição de velocidade em um considerável número de pontos da seção. Quanto maior for o número de pontos medidos mais baixo é o erro da estimativa da vazão. Por esse motivo, recomenda-se realizar as medições em N “verticais”, que são posições com distâncias diferentes medidas a partir de uma margem, e em cada “vertical” devem ser

realizadas N_p medições de velocidade, em profundidades diferentes. A obtenção destes valores será apresentada posteriormente

A velocidade média em uma vertical pode ser estimada a partir da medição da velocidade em um ou mais pontos de profundidades diferentes, de acordo com o tempo disponível para realizar a medição e a precisão desejada. Quanto maior o número de medições, melhor será a precisão da estimativa da vazão, entretanto, usualmente é realizado de 1 a 6 medições.

Quando realizado apenas uma medição por vertical, ela deve ser feita a uma posição equivalente a 60% da profundidade total, ou a uma distância da superfície igual a $0,6 P$, conforme indicado na Figura 3. Essa posição é recomendada porque, em perfis típicos de velocidades na vertical, é nessa profundidade que a velocidade pontual mais se aproxima da média (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

Realizando dois pontos de medição por vertical em profundidades diferentes, obtém-se a melhor estimativa de velocidade média quando as velocidades são medidas a 20% e 80% da profundidade total. A velocidade média na vertical é obtida pela média aritmética das duas medições.

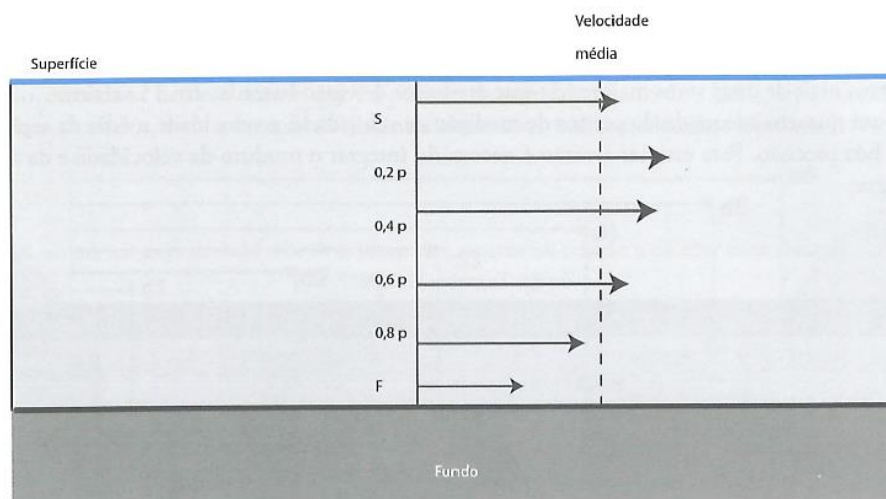


Figura 3: Pontos de medição de velocidade na vertical (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

A Tabela 2 apresenta a relação entre a profundidade do rio e o número de pontos de medição em um vertical. Observa-se que quanto mais profundo é o rio, maior deve ser o número de pontos adotados. De acordo com (BOITEN, 2008), o erro da estimativa da velocidade média

quando se usa apenas um ponto de medição é de 8,2%, reduzindo para 2,7% quando usadas cinco medições.

A Tabela 2 mostra que são recomendadas muitas medições na vertical, entretanto, usualmente pratica-se medições com apenas dois pontos na vertical, mesmo em rio com profundidade maior que 1,20 m, no que é conhecido como “método dos dois pontos”. O erro da estimativa da velocidade média utilizando o método dos dois pontos é da faixa de 4,9% (BOITEN, 2008).

Tabela 2: Número e posição dos pontos de medição de velocidades com relação à profundidade (Adaptado, SANTOS ET AL., 2001)

Profundidade [m]	Número de Pontos	Posição dos Pontos
0,15 a 0,60	1	0,6 p
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 p
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8 p
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 p
>4,00	6	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 p e F

É importante também tomar atenção, para a precisão da estimativa da vazão, no número de verticais para as medições de velocidade. As verticais são as diferentes posições, a partir da margem, em que são realizados os conjuntos de medições de velocidade, conforme mostra a Figura 4.

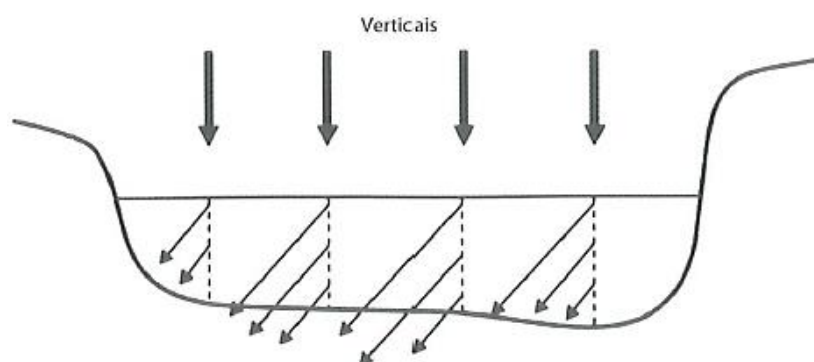


Figura 4: Representação das verticais onde são medidas as velocidades ao longo da seção transversal (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

O número recomendado de verticais para medição de velocidade, de acordo com a largura do rio, é apresentado na Tabela 3. A quantidade de verticais influencia na estimativa da medição de vazão. (BOITEN, 2008) sugere que medições de vazão baseadas em 5 verticais tem erros mais de duas vezes maiores do que medições de vazão baseadas em 15 verticais.

É importante utilizar um número adequado de pontos de medição de velocidade para que se possa estimar a velocidade média da seção transversal com uma boa precisão. Posteriormente, para estimar a vazão é necessário integrar o produto da velocidade e da área.

Tabela 3: Distância recomendada entre verticais e número de verticais para medição de velocidade da água em um rio, de acordo com a largura do rio (Adaptado, SANTOS ET AL., 2001)

Largura do Rio	Distância entre verticais	Número de verticais
< 3	0,3	10
3 a 6	0,5	6 a 12
6 a 15	1,0	6 a 15
15 a 30	2,0	8 a 15
30 a 50	3,0	10 a 17
50 a 80	4,0	13 a 20
80 a 150	6,0	14 a 25
150 a 250	8,0	20 a 30
> 250	12,0	> 20

3.1.3 Medição de vazão usando estruturas de controle

Em pequenos cursos de água e canais é possível condicionar a passar da água através de estruturas construídas, como vertedores e calhas, que apresentam como característica uma relação única e conhecida entre o nível de água e a vazão. Para que isso seja possível é necessário que estas estruturas sejam construídas no leito do canal ou então realizar um desvio da água para que passe através da calha ou do vertedor.

Vertedores de soleira delgada são estruturas hidráulicas que obrigam o escoamento a passar do regime subcrítico (lento) para o regime supercrítico (rápido) em uma pequena queda por sobre uma parede extremamente fina (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015). Na ocorrência dessa situação existe uma relação única entre o nível da água a montante do vertedor e a vazão. Deste modo, pode-se estimar diretamente a vazão por meio do nível da água a montante medido com uma régua ou linígrafo, conforme demonstra a Figura 5.

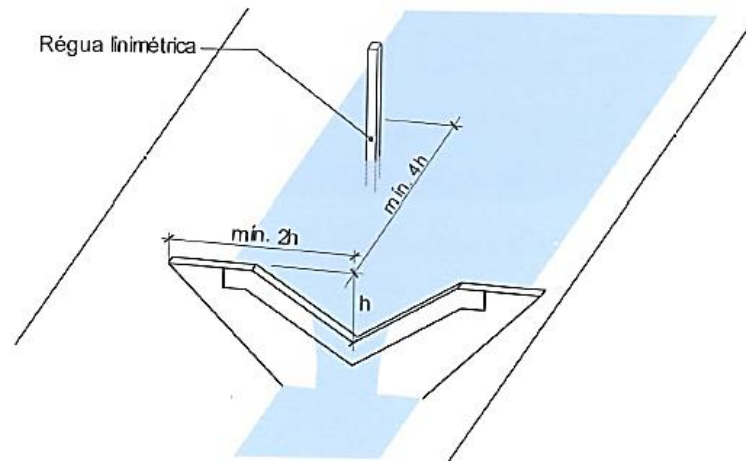


Figura 5: Vertedor triangular para medição de vazão (Collischonn e Dornelles, 2015)

A relação entre o nível de água e a vazão, para vertedores de soleira delgada como o ilustrado na Figura 6 é dado pela Equação 05 (BOITEN, 2008)

$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot b \cdot h^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad \text{Equação 05}$$

Onde Q é a vazão que passa sobre o vertedor (m^3/s); h é a diferença entre as cotas da soleira do vertedouro retangular (m) e a cota do nível de água a montante do vertedouro (m); b é a largura do vertedor (m); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); e C_e é um coeficiente adimensional com valor aproximado de 0,6.

Para vertedores triangulares de soleira delgada a vazão depende do ângulo de abertura do vertedor, conforme indica a Figura 7 e a Equação 06 (BOITEN, 2008).

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h^{2,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad \text{Equação 06}$$

Onde Q é a vazão que passa sobre vertedor (m^3/s); h é a diferença entre as cotas da soleira do vertedouro retangular (m) e a cota do nível de água a montante do vertedouro (m)

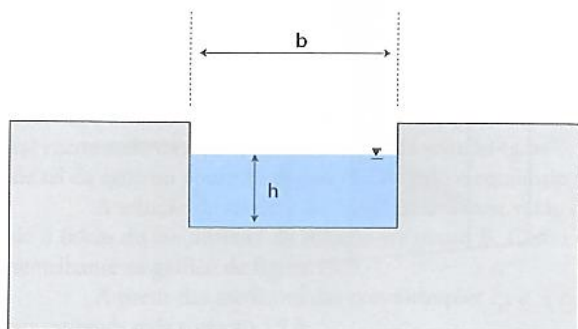


Figura 6: Variáveis para estimativa da vazão para um vertedor retangular de soleira delgada (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

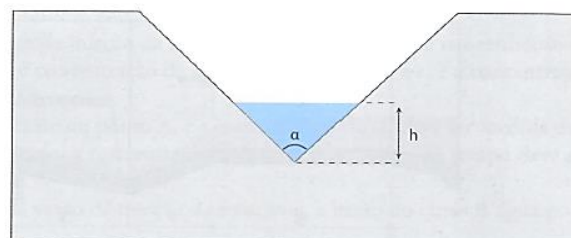


Figura 7: Variáveis para estimativa da vazão para um vertedor triangular de soleira delgada (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Embora a Equação 05 e Equação 06 possam ser usados de forma direta, é recomendado a verificação em laboratórios dos instrumentos, especialmente para a determinação mais precisa do valor do coeficiente.

A Calha Parshal, por sua vez, é uma estrutura que possui o formato de um curto trecho de canal cuja forma das paredes e do fundo produzem um estreitamento da largura do canal e, simultaneamente, um aumento da declividade do fundo, conforme ilustra a Figura 8. Esta estrutura causa uma aceleração no escoamento, que passa do regime subcrítico, junto a entrada da calha, para o regime supercrítico na garganta, ou trecho mais estreito. A jusante, antes da saída da calha, ocorre um ressalto hidráulico e o regime de escoamento volta a ser subcrítico.

As medições de nível de água em uma calha Parshal, feitas a uma certa distância A do início da garganta, conforme é ilustrado na Figura 8, permitem estimar diretamente a vazão, pois pouco a jusante desse ponto há a ocorrência do escoamento crítico.

As calhas Parshal são dimensionadas com diferentes dimensões, de forma a permitir, para cada caso, a medição em diferentes faixas de vazão. A faixa de vazão que pode ser medida com calhas Parshal vai desde alguns litros por segundo até pouco mais de $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para fins comerciais as suas dimensões são padronizadas e a largura da garganta W é utilizada para identificá-la, determinando os valores máximos e mínimos de vazões que podem ser medidos pela calha.

A principal vantagem das calhas e dos vertedouros é a existência de uma relação direta e conhecida, ou facilmente calibrável, entre a cota e a vazão. Em contrapartida, a desvantagem dessas estruturas é o custo relativamente alto de instalação. Além disso, durante eventos extremos, essas estruturas podem ser danificadas ou, até mesmo, inutilizadas.

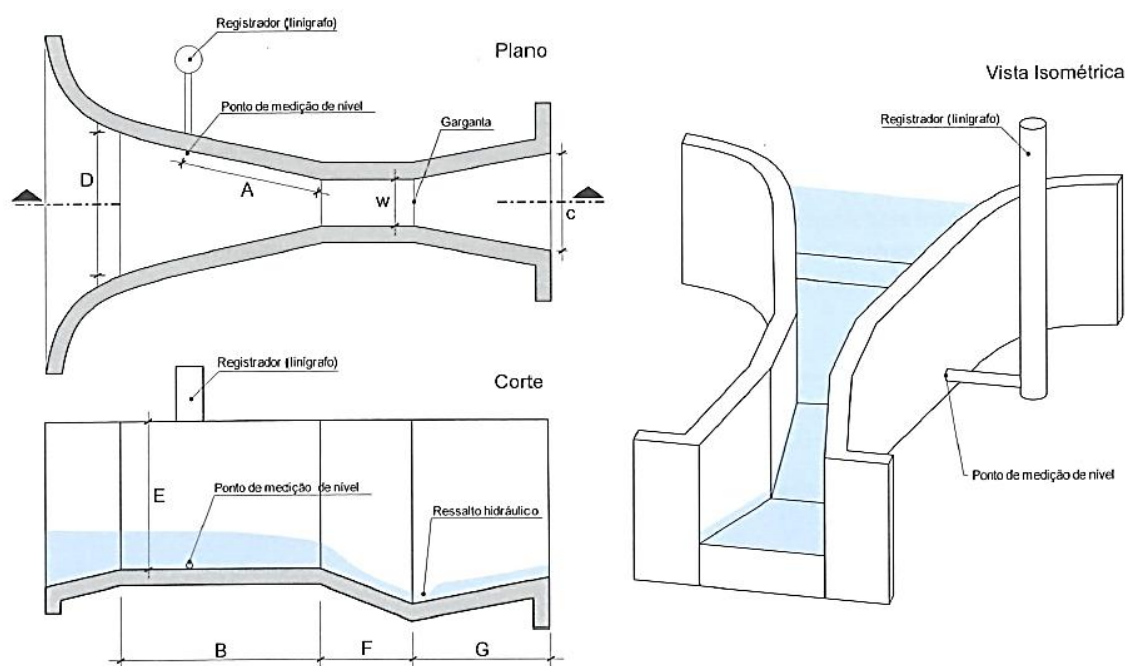


Figura 8: Forma de uma calha Parshal para medição de vazão (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

3.1.4 Medição de vazão utilizando diluição de traçadores

O método de medição de vazão por diluição de um traçador pode ser uma boa alternativa para pequenos cursos de água em que a velocidade da água e a irregularidade do leito são muito grandes, e onde também não é possível instalar estruturas como calhas e vertedouros por questões de custo ou acessibilidade (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

O método mais comum de medição por diluição é o método baseado na injeção de uma vazão constante de uma solução de sal comum (*cloreto de sódio – NaCl*) em um determinado ponto à montante do curso d'água, ocorrendo simultaneamente monitoramento da concentração de sal num ponto posicionado a jusante, conforme ilustra a Figura 9. Iniciando num instante $t=0$, a injeção da solução de sal no ponto A deve continuar durante um período de tempo suficiente para que seja atingido o equilíbrio na concentração medida no ponto B.

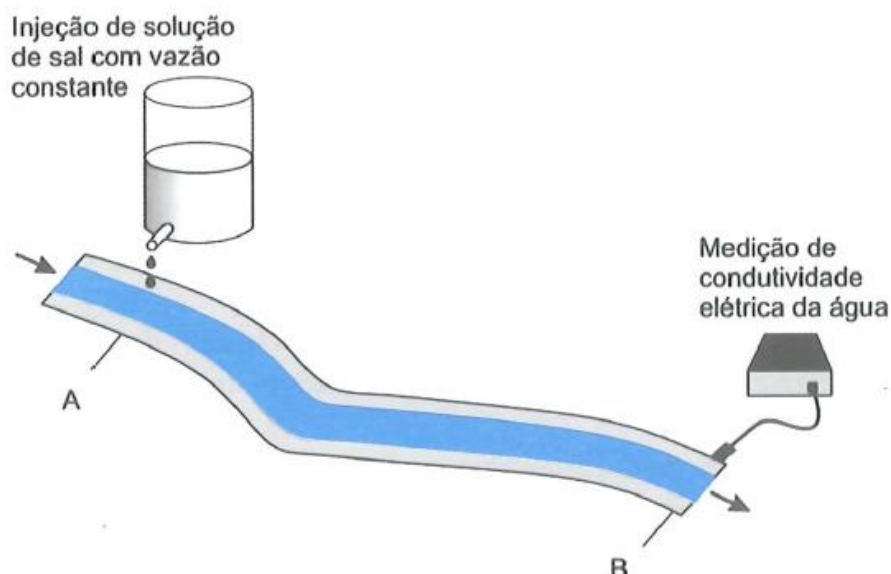


Figura 9: Método de medição de vazão por diluição de uma solução de sal (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

O princípio do método parte da característica do sal ser uma substância conservativa, ou seja, sua massa não se altera por reações químicas ou processos físicos quando é lançada na água (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015). Deste modo, de acordo com o conceito da continuidade a Equação 07 é válida:

$$Q \cdot c_0 + q \cdot c_1 = (Q + q) \cdot c_2 \quad \text{Equação 07}$$

Onde Q é a vazão do curso d'água (m^3/s); q é a vazão constante de injeção da solução de sal (m^3/s); c_0 é a concentração de sal encontrada na água antes da injeção da solução (g/m^3); c_1 é a concentração de sal da solução (g/m^3); e c_2 é a concentração de sal da água no ponto B, depois de atingido o equilíbrio (g/m^3).

É importante para o funcionamento do método que a solução seja lançada com uma vazão constante no ponto A, e que a medição de concentração de sal no ponto B seja realizada desde o início do lançamento. É esperado como resultado de contração ao longo do tempo no ponto B uma resposta semelhante a ilustrada na Figura 10.

A partir das medições das concentrações c_0 , c_1 e c_2 , e da vazão de injeção da solução q , a vazão do curso d'água pode ser estimada pela Equação 08.

$$Q = q \cdot \frac{c_1 - c_2}{c_2 - c_0}$$

Equação 08

Onde Q é a vazão do curso d'água (m^3/s); q é a vazão constante de injeção da solução de sal (m^3/s); c_0 é a concentração de sal encontrada na água antes da injeção da solução (g/m^3); c_1 é a concentração de sal da solução (g/m^3); e c_2 é a concentração de sal da água no ponto B , depois de atingido o equilíbrio (g/m^3).

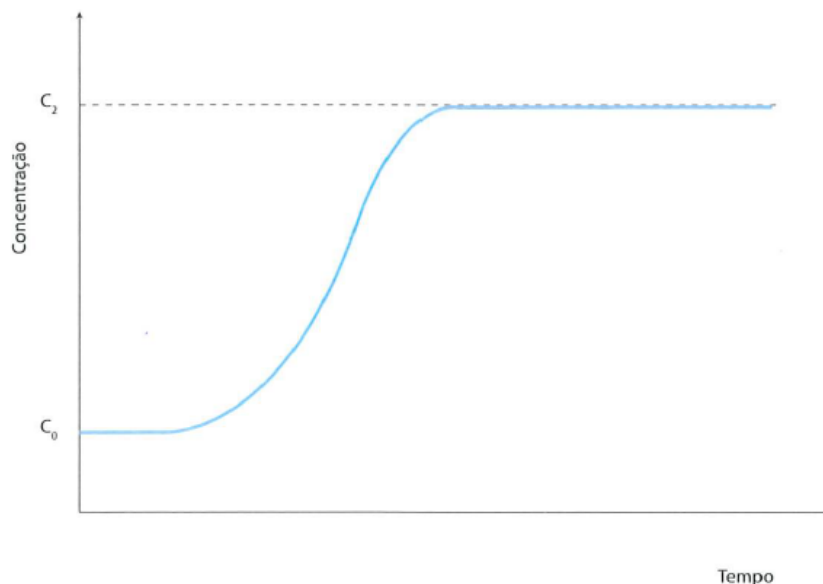


Figura 10: Concentração de sal ao longo do tempo durante uma medição de vazão usando o método da diluição com injeção constante (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Uma maneira relativamente fácil de estimar a concentração de sal é a partir de medição de condutividade elétrica da água.

É importante ao utilizar o método por diluição que a vazão de injeção da solução seja constante. Outro cuidado especial no método deve ser que o afastamento entre os pontos de lançamento da solução e de medição deve ser suficiente para que ocorra mistura completa. Para obter-se um valor estimado da distância necessária para ocorrer a mistura completa em pequenos cursos d'água de montanha, ou muito turbulentos, pode-se usar a Equação 09 (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

$$D_{min} = 25 \cdot B$$

Equação 09

Onde D_{min} é a distância mínima que deve haver entre os pontos de lançamento e de medição; e B é a largura média do curso de água.

Deste modo, em um córrego de 1 metro de largura, por exemplo, o ponto de medição da concentração deverá ocorrer a 25 metros a jusante do ponto de lançamento. É importante também prestar atenção para que não exista ao longo desse trecho a entrada de afluentes, o que invalida a Equação 09.

3.1.5 Medição de vazão pelo método dos flutuadores

O método de medição de vazão por traçadores permite a utilização de várias formas e tipos de flutuadores. Tem por finalidade medir a velocidade de um filete da superfície. Para o cálculo da velocidade é cronometrado o tempo para a esfera percorrer uma distância conhecida (SOUZA et al., 1983).

Este método é indicado por ser um método rápido, mas também precário, devido à necessidade de aplicação de um coeficiente, de determinação incerta, para se obter a velocidade média na seção.

Segundo a NBR 13403 (ABNT, 1995) este é um método de operação simples que pode ser aplicado a todas as vazões, tendo um custo baixo de instalação, e pode apresentar erros de até 20%.

Segundo (ELETROBRÁS, 1985) a medição da vazão pode ser feita escolhendo-se um trecho reto do curso d'água, preferencialmente com mais de 10 metros de comprimento, cujo leito seja uniforme e onde a água flua serenamente, marcando-se o seu início e o seu fim, conforme é ilustrado na Figura 11. Sugere-se o uso de cordas para a marcação do trecho escolhido (PALHARES et al., 2007) .

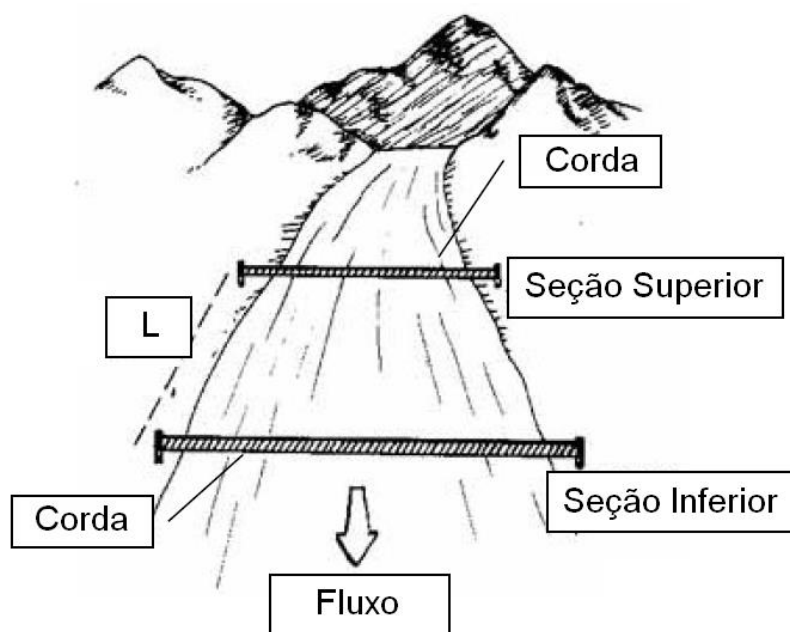


Figura 11: Marcação do trecho no rio para medição da vazão pelo método dos flutuadores (Adaptado PALHARES et al., 2007)

Em seguida coloca-se no meio do leito, a alguns metros a montante do início do trecho escolhido, um flutuador e determina-se o tempo que o flutuador gasta para percorrer o trecho escolhido (ELETROBRÁS, 1985).

Quanto maior o número de repetições mais precisos serão os resultados, recomenda-se realizar a medição no mínimo três vezes. O resultado do tempo será a soma dos tempos medidos dividido pelo número de repetições. (PALHARES et al., 2007).

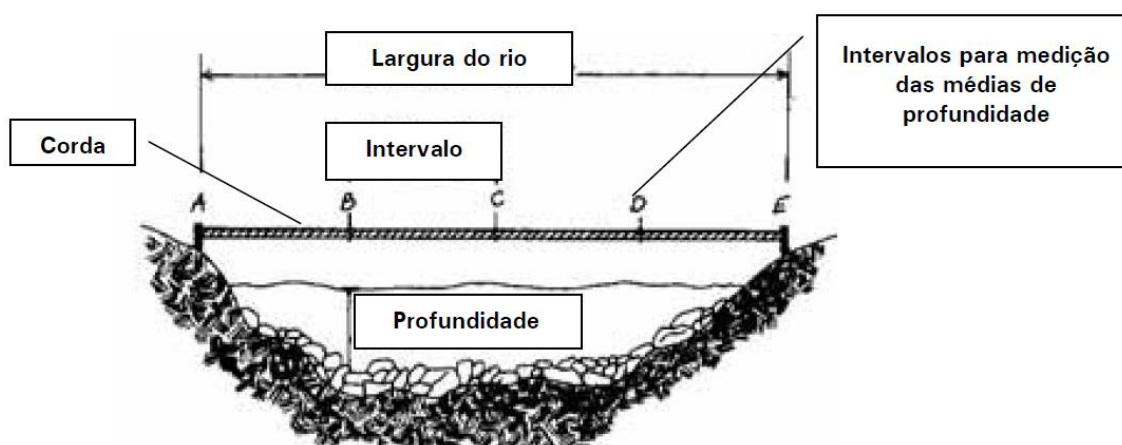


Figura 12: Marcação dos intervalos para medição das médias de profundidade (Adaptado PALHARES et al., 2007)

A vazão Q , em m^3/s , pode ser calculada pela Equação 10 (ELETROBRÁS, 1985) e (PALHARES et al., 2007):

$$Q = \frac{C \cdot L \cdot \bar{A}}{t} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: L é o comprimento do trecho medido (m); \bar{A} é a média das áreas das seções transversais, levantadas ao longo do trecho (m²); t é o tempo de percurso do flutuador (s); e C é o coeficiente de correção de velocidade superficial para velocidade média na seção de medição (0,8 para rios com fundo pedregoso ou 0,9 para rios com fundo barrento (PALHARES et al., 2007)).

3.1.6 Medição de vazão por meio da relação área e velocidade

Diferentemente dos pequenos cursos de água, em rios maiores não é viável a utilização dos métodos de medição de vazão baseados em estruturas, como vertedores ou calhas, à exceção de locais específicos onde existem barragens. Em situações normais, o método mais utilizado para medição de vazão em rios é baseado na medição de velocidades e de área, e na integração do produto velocidade vezes área.

Entende-se, por tanto, que a medição de vazão em cursos d'água é normalmente realizada de forma indireta, a partir da medição de velocidade e da área da seção transversal.

3.1.6.1 Medição de vazão por meio da relação área e velocidade

A velocidade da água pode ser medida por instrumentos mecânicos, como os molinetes, ou por instrumentos eletroacústicos. Em algumas situações emergenciais em que não se dispõe dos instrumentos adequados, podem ser utilizados flutuadores, porém, com resultados muito menos precisos (BOITEN, 2008).

Os molinetes são pequenas hélices de eixo paralelo ou perpendicular ao fluxo, que giram impulsionadas pela passagem da água, como ilustra a Figura 13. Esses instrumentos são projetados para girar em diferentes velocidades de acordo com a variação da velocidade da água. A relação entre velocidade de rotação do molinete e a velocidade da água é a equação do molinete. Esta equação é originalmente fornecida pelo fabricante do molinete, mas deve ser

periodicamente verificada, pois pode ser alterada à medida que ocorre o desgaste das peças do instrumento.

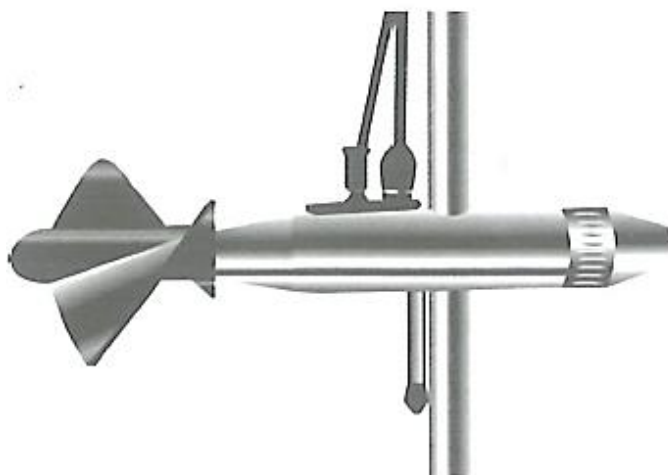


Figura 13: Molinete para medição da velocidade da água (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

3.1.6.2 Determinação da vazão total na seção transversal

A medição de vazão está baseada na medição de velocidade em um grande número de pontos. Os pontos estão dispostos segundo linhas verticais com distância conhecida da margem (d_1, d_2, d_3 , etc) como mostra a Figura 14.

A vazão se dá pelo pela integração do produto da velocidade pela área. Essa integração pode ser realizada por diversos métodos (SANTOS et al., 2001).

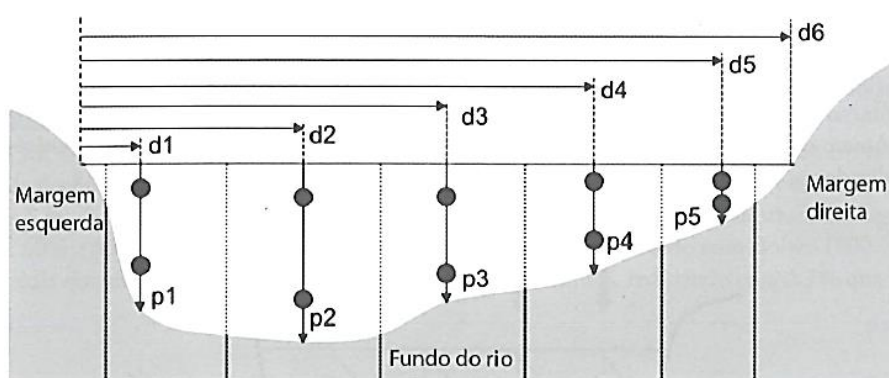


Figura 14: Exemplo de medição de vazão em uma seção de um rio, com a indicação das verticais, distâncias (d) e profundidades (p) – os pontos indicam as posições em que é medida a velocidade no caso de utilizar apenas dois pontos por vertical (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Dentre os métodos mais utilizados, destaca-se o da meia seção (SANTOS et al., 2001), onde considera-se que a velocidade média calculada numa vertical é válida na área próxima a

essa vertical. Essa área, denominada subseção, estende-se desde o centro, que é a posição da vertical, para os dois lados, até metade da distância entre a vertical considerada e a anterior, e até a metade da distância entre a vertical considerada e a próxima. A Figura 15 ilustra a situação:

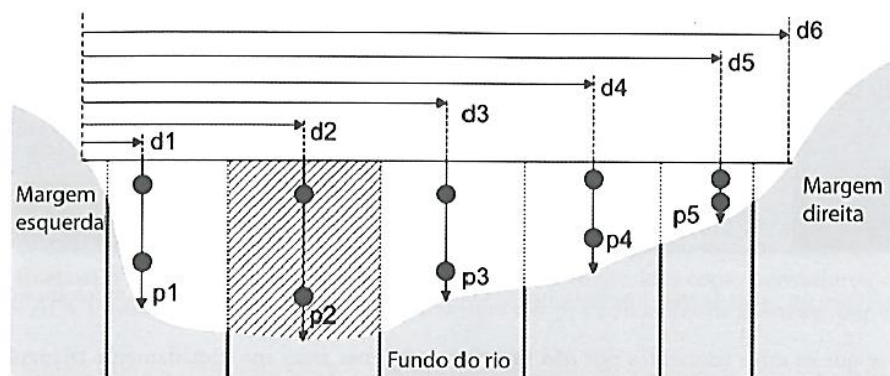


Figura 15: Detalhe da área da seção transversal do rio para qual se considera válida a velocidade média da vertical número 2 (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Considerando que para cada vertical é medida a sua distância da margem (d_i) e a profundidade no local (p_i), então a área de uma subseção, como a apresentada na Figura 15, pode ser calculada pela Equação 11 abaixo:

$$A_i = p_i \cdot \left(\frac{(d_{i+1} - d_{i-1})}{2} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde A_i é a área de subseção (m^2); i indica o índice da vertical que está sendo considerada; p é a profundidade do rio na posição da vertical (m); e d é a distância da vertical até a margem (m).

Quanto as pequenas áreas aproximadamente triangulares próximas às margens, elas são desconsideradas nas subseções da primeira e última vertical, não entrando para o cálculo de vazão. Considera-se que os erros produzidos pela não inclusão dessas áreas são relativamente pequenos, desde que a primeira e a última verticais estejam localizadas próximas da margem.

Assim, a vazão total do rio é dada pela Equação 12:

$$Q = \sum_{i=1}^N v_i \cdot A_i$$

Equação 12

Onde Q é a estimativa de vazão do rio (m^3/s); v_i é a velocidade média da vertical i (m/s); N é o número de verticais; e A_i é a área da subseção da vertical i (m^2).

3.1.6.3 Método da área-velocidade com perfilador acústico Doppler

O método de medição de velocidade por efeito Doppler sobre ondas de ultrassom emitidas na água tem sido utilizado em equipamentos, conduzidos por barcos, capazes de medir a velocidade em um grande número de pontos na seção transversal, enquanto o barco atravessa o rio em uma seção (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015). Esses equipamentos são conhecidos como perfiladores, ou, em alguns casos, pela sigla em inglês ADCP, que são os Perfiladores de Corrente por efeito Doppler sobre ondas Acústicas.

Equipados com emissores e receptores de ultrassom utiliza-se o equipamento preso a um barco, de forma a posicionar o receptor e o emissor mergulhados na água e orientados para baixo. De forma análoga aos medidos de velocidade acústicos, os perfiladores também funcionam emitindo pulsos acústicos (ultrassom) em uma frequência conhecida, e recebendo de volta o eco do ultrassom, refletido nas partículas imersas na água. Com base no efeito Doppler, calcula-se a velocidade relativa entre as partículas imersas na água e o barco por meio da diferença entre as frequências dos sons emitidos e refletidos.

O motivo pelo qual os instrumentos são chamados de perfiladores é porque permitem medir o perfil de velocidades, desde a superfície até fundo, de forma relativamente rápida. As medições são realizadas com uma resolução espacial que depende da frequência do sinal emitido.

O processo de medição da velocidade da água se dá em vários volumes de controle. Estima-se a profundidade do volume de controle pelo tempo de viagem do pulso de ondas acústicas, usando a relação da velocidade de propagação do som na água. Conforme o local medido torna-se distante do instrumento, o volume de controle torna-se também maior, como

mostra a Figura 16. Esse processo ocorre devido a orientação na diagonal dos receptores, que permite a estimativa da velocidade em três direções: vertical, horizontal paralelo ao plano da seção transversal e horizontal perpendicular à seção transversal, que é a componente que, de fato, contribui para a vazão do rio.

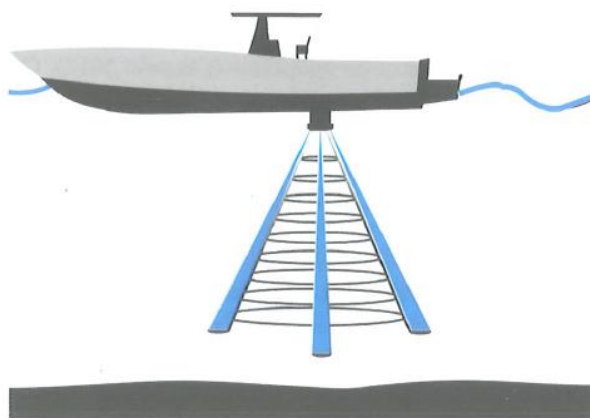


Figura 16: Utilização do perfilador acústico por efeito Doppler para medir velocidade da água em várias posições (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Os perfiladores podem ser utilizados acoplados a uma embarcação, tripulada ou não, que percorre a seção do rio de uma margem até outra, lentamente, enquanto são realizadas medições em intervalos regulares. A velocidade da embarcação é medida pelo próprio perfilador, com base na resposta recebida do fundo do rio, cuja intensidade é maior que o eco das partículas imersas na água e, portanto, fácil de distinguir pelo aparelho (BOITEN, 2008).

Além disso, esses instrumentos comunicam-se diretamente a microcomputadores, transferem os dados de velocidade e calculam a vazão automaticamente, reduzindo substancialmente o tempo necessário para preencher planilhas no campo e para digitar esses dados, posteriormente, no escritório (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

Na Figura 17 é apresentado o resultado de uma medição de vazão realizada com um perfilador acústico no rio Mascarada, local de estudo deste trabalho. Verifica-se que junto as regiões de fundo e superfície existe um espaço onde a velocidade não é medida, a espessura dessa região depende principalmente da frequência com que trabalha o equipamento e das características do leito do rio.

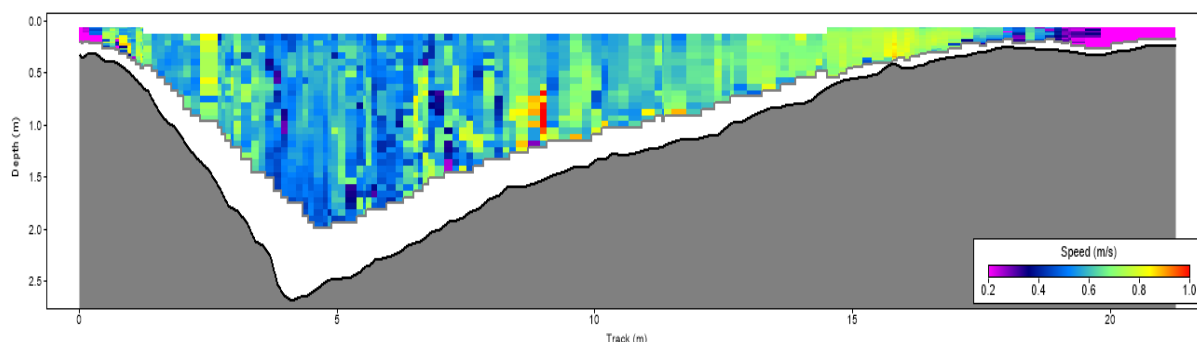


Figura 17: Exemplo de medição de vazão em um rio com perfilador acústico Doppler; Fonte: Própria do Autor

A ocorrência de faixas sem medição próximo à superfície deve-se ao fato que o aparelho precisa de um tempo mínimo para distinguir as respostas, o que exige uma pequena distância até o primeiro volume de controle. Já a ocorrência da faixa sem medição junto ao fundo ocorre porque nessa região começa a haver um efeito forte do eco junto ao fundo do rio. As medições acústicas são complementadas nessas faixas por estimativas baseadas em perfis teóricos de velocidade (GAMARO, 2012). O impacto dessas estimativas teóricas na exatidão das vazões medidas é relativamente pequeno se o equipamento utilizado tiver uma frequência compatível com a profundidade do rio (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

3.1.7 Estimativas da vazão usando curva-chave

Os processos que regem o ciclo hidrológico, como a infiltração e a precipitação, por exemplo, apresentam características fortemente dinâmicas e aleatórias. Deste modo, caracterizar o comportamento hidrológico de um curso d'água ou de uma bacia requer não apenas a disposição de uma única medição de vazão, mas sim de uma série de medições. Para uma boa caracterização é necessário que essa série se estenda por, pelo menos, alguns anos, e é necessário que o intervalo de tempo entre medições seja apropriado para possibilitar a medição de vazão em períodos de cheias e estiagens. Em rios volumosos, de comportamento lento, isso pode significar uma medição por semana, já em rios com uma área de drenagem pequena, em uma região montanhosas de rápidas respostas em eventos chuvosos, pode ser necessária uma medição a cada minuto.

A medida em que o processo de medição de vazão em rios é um processo caro e trabalhoso, realizar medições de forma muito frequente torna-se uma alternativa inviável. Normalmente a medição de vazão em rios exige uma equipe de técnicos qualificados e equipamentos como molinetes, ou medidores acústicos, guincho para posicionar o molinete nas

diferentes profundidades, barcos, e veículos adequados para transportar a equipe de técnicos e os equipamentos até os locais de medição.

Conhecidas as dificuldades inerentes do processo de medição de vazão, procura-se realizar as medições de forma sistemática, sempre nos mesmos locais, denominados postos fluviométricos. Busca-se, nesses locais, determinar a relação entre o nível de água do rio em uma seção e sua vazão. Esta relação entre o nível (ou cota) e a vazão é denominada a curva-chave, ou curva de descarga, de uma seção.

A partir da curva-chave é possível converter medições de cota, que são relativamente mais simples e baratas, em medições de vazão. As medições de cota, por serem mais acessíveis, podem ser executadas com maiores frequências, bastando para isso a presença de um observador que leia manualmente o nível da água do rio em uma régua instalada no local do posto fluviométrico, ou então a instalação de um equipamento automático de medição de nível.

3.1.7.1 Medições do nível da água

Realizar a medição de vazão de forma indireta a partir da curva-chave exige uma sistemática medição do nível d'água no rio. Pode-se realizar essa medição por meio da instalação de réguas limniétricas de leitura manual ou até mesmo por meio de equipamentos automáticos denominados linígrafos.

As réguas limnimétricas são, em geral, feitas de metal, e apresentam uma escala marcada a cada 2 cm (SANTOS et al., 2001). Cada uma das réguas, denominadas “lance”, tem 1 a 2 metros. Por esse motivo, para permitir a medição do nível da água nas situações de estiagem e de cheia é necessário prover a seção de medição de nível do posto fluviométrico com vários lances de régua. A Figura 18 ilustra esse processo.

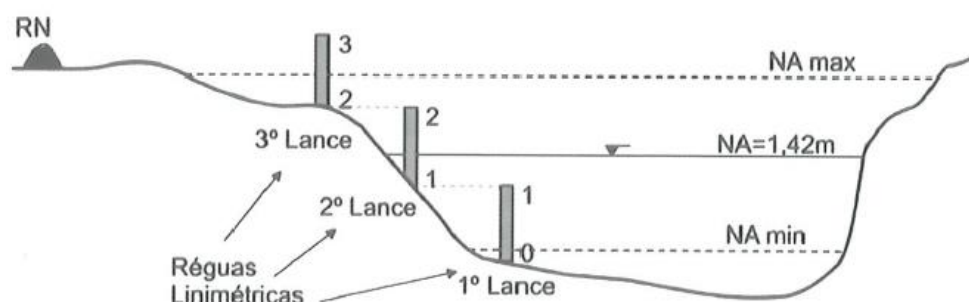


Figura 18: Posicionamento do lance de réguas limnimétricas em uma seção transversal de um rio (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

Nos postos fluviométricos em que se adota leituras manuais do nível d'água, um observador realiza a leitura duas vezes ao dia, uma no início da manhã e outra ao final da tarde. A medição do nível da água de forma automática, por sua vez, pode ser realizada por diversas formas, destaca-se entre os equipamentos mais comuns os linígrafos de boia, os linígrafos de bolha, os linígrafos de pressão e os sensores de distância ultrassônicos (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015).

3.1.7.2 Traçado da curva-chave

O processo de transformação de nível d'água em estimativas de vazão se dá pela utilização de uma relação entre duas variáveis válidas para o local de medição denominada curva-chave.

Para a geração de uma curva-chave é preciso realizar a medição de vazão um grande número de vezes, no mesmo local, que é posto fluviométrico, em situações de vazões baixas, médias e altas. Ao mesmo tempo é necessário também realizar a leitura do nível d'água para vincular as variáveis. Para ilustrar, a Figura 19 apresenta de forma gráfica o resultado de 62 medições de vazão no rio Sono, realizadas entre 1992 e 2002, no posto fluviométrico de Cachoeira do Paredão, no estado de Minas Gerais.

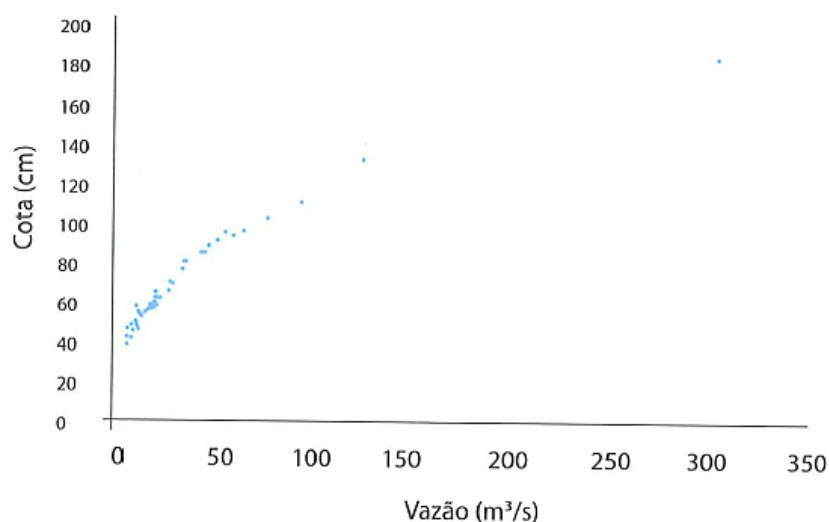


Figura 19: Dados de medição e nível da estação fluviométrica Cachoeira do Paredão (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

A curva-chave é uma equação ajustada aos dados de medição de vazão. Essa curva pode ser ajustada manualmente, de forma gráfica, ou podem ser utilizadas equações de ajuste através de regressão.

Normalmente utiliza-se equações do tipo potência, como a Equação 13 abaixo:

$$Q = a \cdot (h - h_0)^b \quad \text{Equação 13}$$

Onde Q é a vazão; h é a cota; h_0 é a cota quando a vazão é zero; e a e b são parâmetros ajustáveis.

Prefere-se esse tipo de equação pois se assemelha as relações entre nível de água e vazão encontrados nas equações de escoamento de regime permanente e uniforme, como as equações de Manning e Chezy. A Figura 20 apresenta a equação do tipo potência ajustada aos dados do rio Sono.

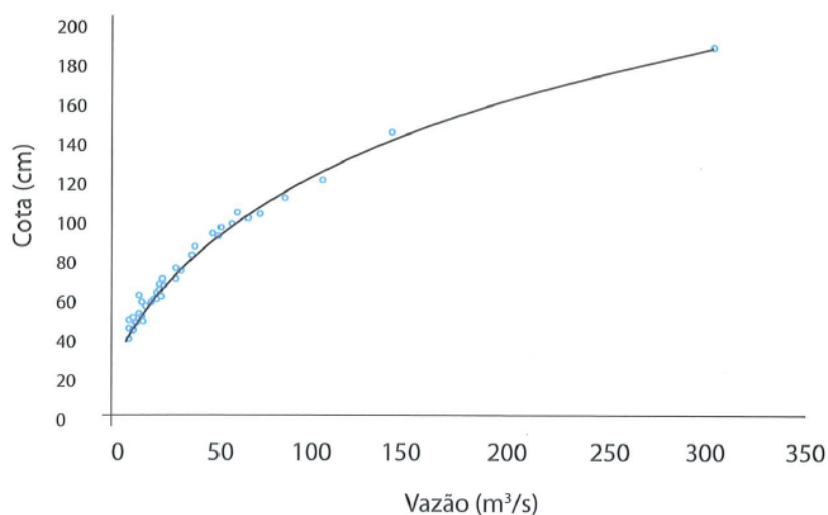


Figura 20: Curva-chave do tipo potência ajustada aos dados da estação fluviométrica Cachoeira do Paredão (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015)

A curva-chave de uma seção de rio pode se alterar com o tempo devido a diversos processos como erosão e assoreamento em rios de leitos arenosos e modificações artificiais como aterros e pontes. Sendo assim, é preciso manter de forma regular as medições de vazão em uma estação fluviométrica. Caso seja percebido mudanças no comportamento geral das medições em relação as anteriores, há indicativos que uma nova curva-chave deve ser ajustada.

3.2 OS VEÍCULOS ÁEREOS NÃO TRIUPULADOS (VANT)

O início do interesse por VANTS pela comunidade científica tem surgimento após o período da Guerra Fria. O início do desenvolvimento de VANT com objetivos científicos para comunidade civil se deu com os programas elaborados nos Estados Unidos da América pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), entre as décadas de 70 a 90 (RUIZ, 2015). Como inicialmente essa tecnologia era desenvolvida preferencialmente para uso militar, os VANT apresentavam grande porte e alto custo. Desta maneira os projetos de pesquisa preocuparam-se com a miniaturização dos sensores e das plataformas (WATTS ET AL., 2012; COLOMINA; MOLINA, 2014)

No Brasil, a origem da utilização dos VANT foi introduzida pelo Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), no ano de 1984, por meio do projeto intitulado Acauã, com objetivos de aplicações militares e civis. Dentre as aplicações civis, estava o interesse de estudos ambientais e a fiscalização de dutos de gás e óleo (LONGHITANO, 2010)

Os VANTs representam um desenvolvimento tecnológico nas áreas da automação e da robótica. Essa tecnologia possui sistema de telemetria, Sistema Global de Navegação por Satélite (Global Navigation Satellite System - GNSS) e Unidade de Medida Inercial (IMU - Inertial Measurement Unit) (RUIZ, 2015). A telemetria é utilizada para realizar a comunicação entre a aeronave e a estação em solo, já o IMU é composto por medidores de força da gravidade, orientação e velocidade da embarcação (HAN ET AL., 2011). Combinando esses dispositivos eletrônicos, essas aeronaves realizam voos autônomos, controlado remotamente e sem piloto a bordo.

Atualmente, há uma oferta de inúmeros VANT no mercado, com diversos tamanhos e autonomia de voo, e sensores que compreendem diferentes faixas do espectro eletromagnético (YASTIKLI, 2013). Dentre os sensores mais empregados nesse tipo de plataforma destacam-se as câmaras fotográficas de baixo custo (HAUBECK. AND PRINZ, 2013). Devido ao seu baixo valor, as lentes muitas vezes não possuem parâmetros de calibração, que podem ser utilizados na etapa de alinhamento das imagens. Uma forma de obtê-los, entretanto, é a partir de técnicas de referência de imagens capturadas sobre locais com medidas conhecidas (FRASER, 1992).

3.2.1 Legislação

As principais organizações que atualmente atuam na criação da legislação que regulamenta o uso e as operações de aeronaves no Brasil são: a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), responsável por regular e fiscalizar as atividades relacionadas a aviação civil, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), responsável por realizar o controle do espaço aéreo brasileiro, e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) (Glinski et al., 2017).

Sendo o drone um tipo de aeronave, ela está sujeita às regulamentações do Órgão Regional do DECEA, uma vez que é de responsabilidade do DECEA o gerenciamento e controle do espaço aéreo, como consta na Portaria nº 913/GC3, de 21 de setembro de 2009 (Glinski et al., 2017). À ANAC compete a emissão do Certificado de Aeronavegabilidade (C.A.), Certificado de Matrícula (C.M.) e efetuar o registro de aeronaves, como definido pelo artigo 8º, da Lei nº 11.182, de 27 de setembro de 2005. No Código Brasileiro de Aeronáutica, seção II, artigo 114:

“Nenhuma aeronave poderá ser autorizada para o voo sem a prévia expedição do correspondente certificado de aeronavegabilidade que só será válido durante o prazo estipulado e enquanto observadas as condições obrigatórias nele mencionadas” - (artigos 20 e 68, § 2º).

Um dos pontos em que se deve prestar mais atenção é quanto a nomenclatura dos veículos aéreos não tripulados (GLINSKI ET AL., 2017). Cada uma das legislações, tanto da ANAC, do DECEA e da ANATEL, seguem o padrão internacional estabelecido pela OACI onde é adotada uma nomenclatura padrão para se referir a drones:

- RPA: Um RPA (*Remotely Piloted Aircraft*, Aeronave Remotamente Pilotada) é uma aeronave que não realiza voo de forma totalmente autônoma, uma vez que há a interferência. Dentre estes veículos podem estar helicópteros quadricópteros, octocópteros, asa fixa, etc;
- RPS: (*Remotely Piloted Station(s)*, Estação(es) de Pilotagem Remota) Posto de trabalho do piloto remoto, componentes que podem estar embarcados no veículo, tais como sensores, equipamentos utilizados para o lançamento e/ou

recuperação da aeronave e demais componentes utilizados na realização da operação;

- RPAS: (Remotely Piloted Aircraft Systems), Sistema(s) de Aeronave Remotamente Pilotada) Refere-se ao conjunto da aeronave (RPA) e da estação de pilotagem remota (RPS).

A seguir são apresentadas um resumo das legislações vigentes de cada órgão:

3.2.1.1 Legislação DECEA

A ICA 100/40, documento que trata sobre a utilização e acesso das aeronaves remotamente utilizadas em espaço aéreo brasileiro, do DECEA entrou em vigor em 15 de novembro de 2015. A legislação do DECEA apresenta a seguinte finalidade:

“A presente Instrução tem por finalidade regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS).”

Ao DECEA compete também a emissão do certificado de acesso ao espaço aéreo brasileiro, documento necessário para realizar operações de voo com um veículo aéreo não tripulado.

Na ICA 100/40 são tratadas as questões relacionadas à definição dos termos relacionados a operações de voo com aeronaves não tripuladas e de abreviaturas que são utilizadas, tais como RPA, RPS e RPAS, tudo com o objetivo de se criar uma nomenclatura padrão com conformidade internacional. São tratadas questões como segurança operacional, situações de emergência, infrações, questões legais e responsabilidades do operador de RPAS (GLINSKI ET AL., 2017). No que se trata ao registro da aeronave, certificação de aeronavegabilidade e outras questões legais relacionadas, a ICA 100/40 é clara ao estabelecer as competências destas as agências reguladoras da ANAC e ANATEL.

Dois pontos são importantes ressaltar quanto ao DECEA e sua legislação, (i) O sistema SARPAS e; (ii) Web site:

- (i) O SARPAS (Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS) é sistema desenvolvido pelo DECEA no qual são realizadas solicitações para o

acesso ao espaço aéreo brasileiro com RPAS. O sistema é acessível através da internet;

- (ii) O DECEA também desenvolveu um website no qual reúne informações necessários sobre a regulamentação brasileira para veículos aéreos não tripulados. O objetivo desse portal é permitir que as pessoas tenham um acesso mais fácil e transparente quanto as questões da regulamentação dos RPAS.

3.2.1.2 Legislação ANAC

Em 3 de maio de 2017 entrou em vigor a RBAC-E nº 94, Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil, da ANAC. A RBAC-E nº 94 é a principal legislação no Brasil quanto a realização de operações de voo com RPAS. Em seu preâmbulo:

“Este Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E aborda os requisitos gerais de competência da ANAC para aeronaves não tripuladas. Por natureza, um RBAC-E possui a finalidade de regular matéria exclusivamente técnica que possa afetar a segurança da aviação civil, com vigência limitada no tempo e restrita a um número razoável de requisitos e pessoas, até que os requisitos contidos nos mesmos sejam incorporados em RBAC apropriado ou definitivamente revogados. Este Regulamento Especial estabelece as condições para a operação de aeronaves não tripuladas no Brasil considerando o atual estágio do desenvolvimento desta tecnologia”

Um ponto importante da legislação da ANAC é quanto a classificação do RPAS e do RPA (GLINSKI ET AL., 2017). Essa classificação é realizada de acordo com o peso máximo de decolagem (PMD) da aeronave. As aeronaves são classificadas em 3 classes, sendo elas:

- Classe 1: RPA de PMD maior que 150 kg;
- Classe 2: RPA de PMS maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg;
- Classe 3: RPA com peso máximo de decolagem menor ou igual a 25 kg.

Sendo definido na legislação, nenhuma aeronave não pilotada poderá realizar operações de voo sem um certificado válido de aeronavegabilidade e o registro, como apresentado no

Artigo 20 do Código Brasileiro de Aeronáutica. A ANAC define os seguintes tipos de certificados de aeronavegabilidade para um RPA:

1. Certificado de Autorização de Voo Experimental – CAVE;
2. Autorização Especial de Voo – AEV;
3. Certificado de Aeronavegabilidade Especial para RPA – CAER;
4. Certificado de Aeronavegabilidade categoria restrita;
5. Certificado de Aeronavegabilidade padrão.

A única exceção quanto ao certificado é para RPAs Classe 3 que se destinam unicamente a operações VLOS (Linha de Visada Visual) até 123 metros e para os aeromodelos, que não necessitam possuir qualquer certificado de aeronavegabilidade (GLINSKI ET AL., 2017).

3.2.1.3 Legislação ANATEL

É necessário realizar a homologação dos equipamentos utilizados em um RPAS com a ANATEL devido a utilização de componentes, tais como transmissores de radiofrequência. A necessidade dessa homologação estende-se não somente aos RPAS, mas também aos aeromodelos. É possível fazer o requerimento para esta homologação através do Sistema de Gestão de Certificação e Homologação da ANATEL. Durante o processo de homologação é verificado a transmissão dos equipamentos como, por exemplo, o enlace de controle entre o RPA e o RPS. É importante salientar também a necessidade do pagamento de uma taxa para a homologação.

É indispensável para que se realize uma operação de voo regular que o veículo possua a homologação da ANATEL junto ao Certificado de aeronavegabilidade para RPA da ANAC (GLINSKI ET AL., 2017).

3.2.2 Fotogrametria

Segundo a Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS) conceitua-se fotogrametria como sendo a arte e tecnologia de obter informações confiáveis da superfície da terra, e demais objetos físicos, através de medições, análises e representações utilizando

fotografias. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) define fotogrametria como a “ciência que trata da obtenção de medições fidedignas de imagens fotográficas”.

Esta pode ser utilizada para obtenção de dados qualitativos (fotointerpretação) e de dados quantitativos (fotogrametria).

Segundo Souza (2015), com o avanço da tecnologia de captura direta de imagens digitais e a capacidade dos computadores para aplicações gráficas, a fotogrametria digital ultrapassou as técnicas analógicas.

Utilizando-se múltiplas fotografias aéreas sequenciais podem ser extraídas informações quantitativas e qualitativas, tais como a localização precisa das feições, projeção horizontal de edificações, vias, hidrografia e linhas costeiras em uma projeção cartográfica padrão, além da altura precisa de objetos, modelos digitais de elevação (MDE), ortofotos, entre outras. As etapas para a geração de modelos digitais de elevação, ortofotos, imagens ortorretificadas e a extração de atributos temáticos de interesse a partir de fotogrametria digital é representado na Figura 21.

As fotografias aéreas devem ter regiões sobrepostas para a obtenção da estereoscopia. Segundo Jensen (2009) para se obter a sobreposição estereoscópica deve-se calcular o intervalo entre as tomadas das fotografias aéreas de tal forma que a sobreposição entre as mesmas seja de aproximadamente 60%. Para Jensen (2009), essa sobreposição é muito importante porque fornece pelo menos duas e, em alguns casos três, visadas fotográficas de cada objeto do mundo real ao longo de uma linha de voo. Ainda, a maior parte dos levantamentos por fotografia aérea requer múltiplas linhas de voo para recobrir a área de interesse. Quando isso ocorre, as linhas de voo devem ser sobrepostas com uma taxa que varia de 20 a 30% (JENSEN 2009).

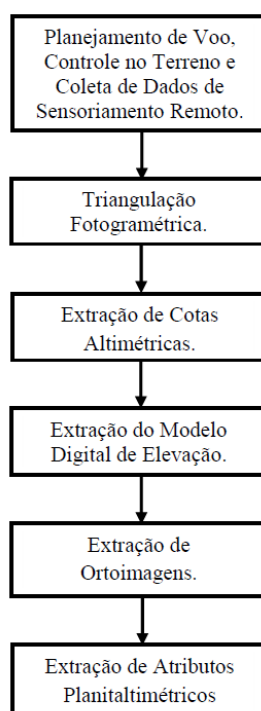


Figura 21: Fluxograma para extração de atributos por meio da fotogrametria digital. (Adaptado, JENSEN, 2009)

3.2.2.1 Aerolevantamento

Segundo Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), “aerolevantamento é o conjunto de operações para obtenção de informações de parte terrestre, aérea ou marítima do território nacional, por meio de sensor instalado em plataforma aérea”. Para gerar produtos cartográficos precisos através das informações obtidas pelo sensor, são necessárias as etapas de planejamento, execução e processamento. Neste tipo de trabalho consideram-se duas etapas de campo, uma para voo e outra para coleta dos pontos foto identificáveis após o processamento das fotografias.

3.2.2.2 Orientação Interior e Orientação Exterior

A orientação interior é o procedimento pelo qual as características geométricas de uma fotografia aérea são relacionadas matematicamente com as características geométricas (incluindo deformidades) do sistema da câmera que adquiriu a fotografia. Isto significa estabelecer a relação entre o sistema de coordenadas internas da câmera e o sistema de coordenadas do pixel da imagem (JENSEN, 2009).

A extração de medidas úteis das fotografias aéreas requer a correção de certas distorções inerentes ao seu processo de aquisição. Além das distorções internas, é preciso conhecer a inclinação da aeronave no instante da tomada da foto. Há seis elementos de orientação exterior

que expressam a localização espacial e a orientação angular de uma fotografia aérea inclinada no momento da exposição ($x, y, z, \omega, \phi, \kappa$). As coordenadas tridimensionais da aeronave no momento da exposição são x, y, z , onde z expressa a altitude da câmera. No instante da exposição, a câmera apresentará arfagem, rolagem e deriva, expressas, respectivamente, por ω, ϕ, κ (Figura 22).

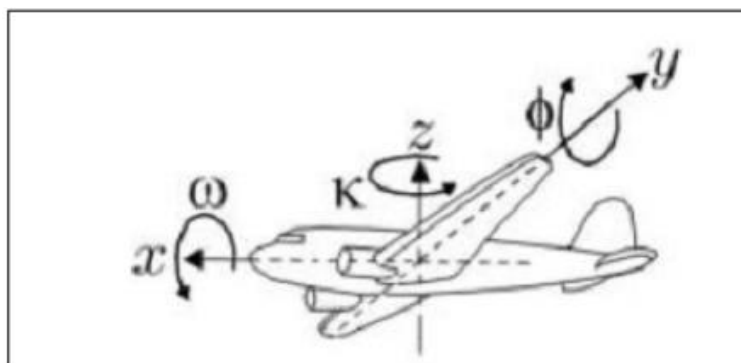


Figura 22: Parâmetros de atitude de um sensor fotogramétrico embarcado em plataforma aérea. (COELHO E BRITO, 2007)

A aerotriangulação utiliza um ajuste geral por mínimos quadrados com restrição de pesos para orientar adequadamente todas as imagens em um bloco de fotografias aéreas (Jensen, 2009). Este ajuste é baseado no uso de equações de colinearidade. A colinearidade é a condição na qual a posição de exposição da câmera (L), um objeto no solo (A) e sua correspondente imagem na foto (a) situam-se todos em uma linha reta no espaço tridimensional (WOLF E DEWITT, 2014 apud JENSEN, 2009). Jensen complementa os referidos autores mencionando que a condição de colinearidade para qualquer ponto em uma fotografia aérea pode ser expressa por duas equações, uma para a coordenada x da foto e outra para a coordenada y da foto (Figura 23 e Figura 24).

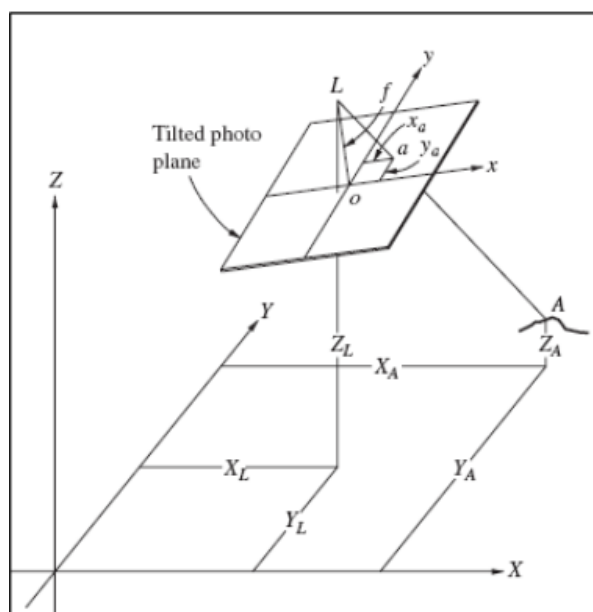


Figura 23: Condição de colinearidade (Fonte: WOLF E DEWITT, 2014)

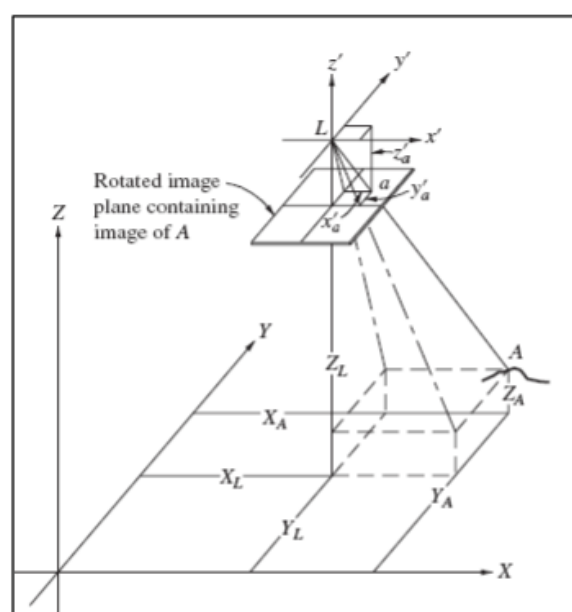


Figura 24: Sistema de coordenadas da imagem rotacionada para que seja paralela ao sistema de coordenadas objeto. (Fonte: WOLF E DEWITT, 2014)

Além disto, cada fotografia aérea sofre deformações em sua geometria, causadas, entre outros fatores, pelas distorções das lentes. O processo de correção é denominado orientação interior ou calibração da câmera. Dentre vários métodos de calibração de câmeras, destaca-se aquele realizado no mesmo processo de ajustamento que a aerotriangulação, oferecendo, assim, soluções mais completas. Também permitem que haja uma grande superabundância de observações o que torna possível um controle estatístico mais rigoroso. Este processo é denominado por (ANDRADE, 1998) como calibração de campo.

3.2.2.3 Pontos de Controle e Posicionamento

Segundo (JENSEN, 2009) todos os métodos desenvolvidos para determinar os seis parâmetros referidos anteriormente requerem pelo menos três pontos de controle no terreno, constituídos por qualquer objeto na imagem cujas coordenadas X , Y , Z no terreno no mundo real sejam conhecidas.

Os pontos de controle devem ser bem distribuídos na imagem de modo a formar um triângulo e não uma linha reta. Quanto mais pontos de controle verticais/horizontais puderem ser localizados melhor se dá o processo da aerotriangulação. A orientação exterior mais precisa ocorrerá nas áreas circundadas pelos pontos de controle artificiais (JENSEN, 2009). Lugnani

(1987) afirma que a fototriangulação tem por objetivo gerar coordenadas precisas de pontos do espaço objeto, a partir de coordenadas medidas nas fotografias.

A obtenção de pontos de controle tem sido facilitada pelo uso de sistemas globais de posicionamento por satélites (Global Positioning Systems – GPS). Segundo Jensen (2009), a disponibilidade da tecnologia de levantamento por GPS possibilita a coleta de pontos com precisão, em que o erro médio quadrático (root mean squared error-RMSE) das coordenadas X, Y, Z poderá ser inferior a 3 cm quando os dados são submetidos a correção diferencial.

3.2.2.4 Planejamento de Voo

Conforme apresenta Jensen, (2011), para obter fotografias aéreas de forma precisa é necessário saber qual a escala que as fotografias devem ter e a escala do mapa base no qual as informações das fotografias serão plotadas. Além disso deve-se conhecer e as coordenadas dos limites da área de estudo, o tamanho da área a ser fotografada (em km²), o recobrimento médio frontal de cada fotografia, o recobrimento lateral de cada fotografia e a distância focal do objetivo. Uma vez definidas essas informações torna-se possível calcular:

1. Altitude de voo;
2. Número de linhas de voo necessárias;
3. Distância entre as linhas de voo;
4. Distância no terreno entre exposições;
5. Número total de exposições requeridas.

Antes de executar o voo é de suma importância o planejamento de execução do voo. Para isso devem ser consideradas variáveis como a hora do dia (ângulo solar) e o tempo. Segundo Jensen (2011) “a hora ideal do dia para obter fotografias aéreas ocorre quando o sol está entre 30° e 52° acima do horizonte, isto é, duas horas antes e depois do meio-dia”. Um ângulo solar menor que 30° pode resultar numa subexposição da foto, devido à falta de iluminação, e assim prejudicar a interpretação. Ainda deve-se considerar para ângulos solares muito baixos há excesso de sombras nas imagens, que podem encobrir alguns elementos importantes da área mapeada. Já para ângulos acima de 52° o risco é de ocorrerem clarões na imagem, que também podem dificultar a interpretação. As informações de ângulo solar para uma determinada altitude podem ser adquiridas em tabelas de efemérides solares.

Um dos fatores mais consideráveis e importantes no planejamento de uso do VANT é a velocidade do vento. Ventos fortes podem causar vários problemas indesejados, sendo um deles desviar o veículo da rota. Neste caso pode haver perda da estereoscopia devido aos defeitos no recobrimento das linhas de voo.

A partir da segunda metade dos anos 2010, por outro lado, observou-se o advento de diversos aplicativos de celular que se conectam diretamente com o VANT a ser utilizado no mapeamento. Como exemplo, cita-se o *DroneDeploy*. Nesse app, basta que o usuário insira a área de estudo a ser mapeada e a resolução desejada do pixel para que o plano de voo e a configuração da câmera sejam automaticamente estabelecidos.

3.2.2.5 Execução do Voo e Processamento das Fotografias

No Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial, de título Requisitos Gerais para Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeromodelos, define-se em Requisitos de Autonomia, que “somente é permitido iniciar uma operação de VANT ou aeromodelo se, considerando vento e demais condições meteorológicas conhecidas, houver autonomia suficiente para cumprir a missão e pousar em segurança no local previsto” (ANAC, 2017).

De modo geral os processamentos realizados com as fotografias correspondem aos apresentados no fluxograma da Figura 25:

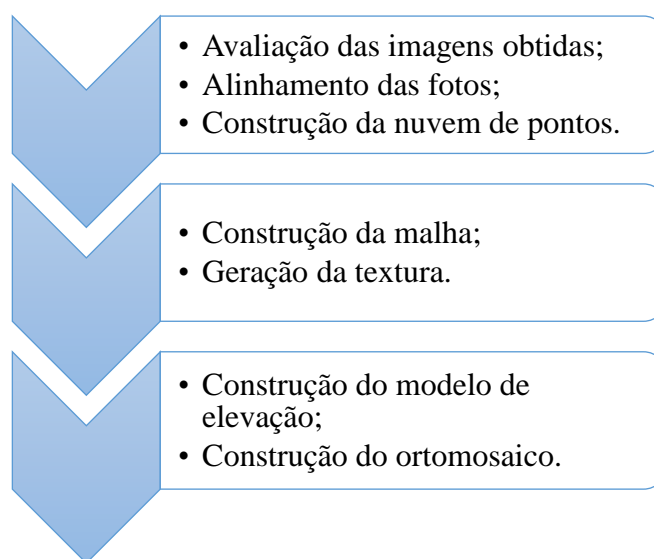


Figura 25: Fluxograma de extração de MDT e ortoimagens com o uso de técnicas de Fotogrametria Digital (Adaptado, AGISOFT LLC, 2016).

Na primeira etapa há o registro das cenas das imagens e cálculo das coordenadas dos pontos de controle no terreno usando orientação interior e exterior.

3.2.2.6 Geração de Modelos e Ortofoto

Esta etapa consiste na geração de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e um Modelo Digital de Superfície (MDS) a partir de uma nuvem de pontos.

De acordo com Andrade, 1998, modelar um terreno significa reproduzir a sua forma. Quando essa reprodução é realizada por meios digitais, diz-se que se elaborou um modelo digital do terreno.

Segundo (WOLF ET AL., 2014) a representação digital de elevações em uma região é chamada de modelo digital de elevação (DEM). Quando as elevações são relativas ao terreno, é adequado referir-se como modelo digital do terreno. Quando se considera a elevação contida em superfícies acima do terreno (por exemplo, construções, árvores e etc.) denomina-se modelo digital de superfície.

A precisão dos modelos obtidos é função da escala e da resolução dos dados do sensor remoto, da altura de voo, da geometria das imagens estereoscópicas, da precisão do controle no terreno e também da qualidade do software utilizado no processo, conforme cita (Jensen, 2009). O zelo na escolha dos pontos e a quantidade de dados amostrados estão relacionados diretamente com a qualidade do produto final. Atualmente, os softwares mais reconhecidos que fazem esse tipo de processamento são o Agisoft Photoscan e o Pix4D.

Atualmente os softwares realizam automaticamente a fototriangulação a partir de algoritmos como o SIFT – Scale Invariant Feature Transform. Esses algoritmos conseguem identificar mesmas feições para diferentes ângulos de visada. Este algoritmo, foi proposto por Lowe (2004), e tem sido empregado com sucesso na área da robótica (TSCHIEDEL, 2017).

3.3 UTILIZAÇÃO DE VANTS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Os estudos relacionados a utilização de VANTS para estimativa da vazão em rios vem crescendo de forma incipiente ao longo da segunda metade dos anos 2010. Considerada uma aplicação desafiadora, as metodologias correntemente utilizadas envolvem a medição de velocidades superficiais por técnicas baseadas em imagem, tais como a Velocimetria de

Imagem de Partículas (PIV) e a Velocimetria de Rastreamento de Partículas (PTV). Ambos os métodos podem ser considerados de última geração e podem adquirir campos instantâneos de velocidade. No entanto, o processo de medição de campo em grande escala apresenta maiores dificuldades, já que o processo de identificação das partículas traçadores torna-se de difícil distinção junto a superfície da água. Outro desafio também é obter de forma adequada e precisa as imagens da área de interesse.

Os primeiros estudos de velocimetria de imagens de superfície baseam-se em imagens retiradas de helicópteros e foi aplicada com sucesso por Fujita e Kunia, (2011). O foco principal deste trabalho foi estimar a descarga de água durante as inundações, com base apenas em alguns quadros de vídeo com pontos de referência do solo digitalizados de forma manual. A Figura 26 ilustra os resultados obtidos.

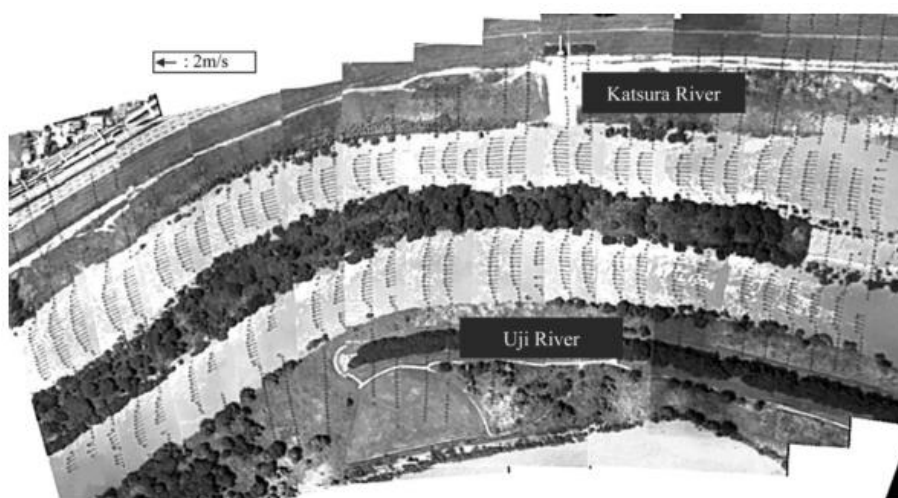


Figura 26: Distribuição de velocidades nos rios Uji e Katsura (Adaptado, FUJITA E KUNIA, 2011)

Em consonância com a pesquisa de Fujita e Kunia (2011), Detert e Weitbrecht (2015) demonstraram que medições espaciais contínuas de vazão de alta resolução por meio de VANTS são possíveis se uma ortorretificação automática das imagens for aplicada (Figura 27).

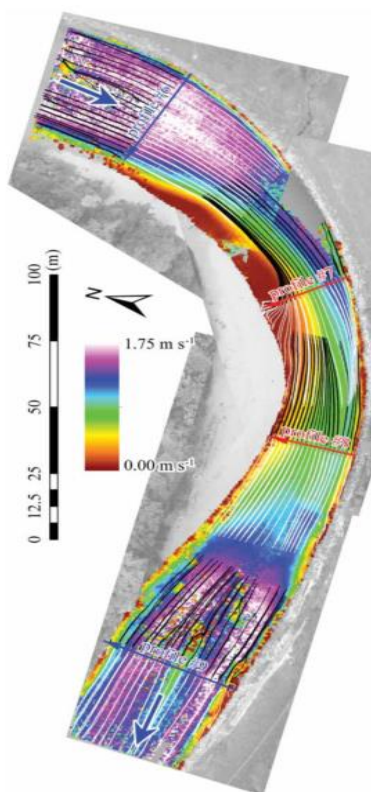


Figura 27: Campos de velocidade superficial do rio Thur (Adaptado, DETERT E WEITBRECHT, 2015)

Recentemente, Tauro (2016) demonstrou que um drone recreacional pode ser usado para produzir mapas de fluxo de superfície precisos de corpos de água. Especificamente, as vibrações do drone não impedem as observações do fluxo de superfície, e as medições da velocidade estão de acordo com as técnicas tradicionais.

Perks, (2016), através da aquisição de imagens de eventos de inundação repentina por meio de drones, utilizou o algoritmo Kande-Lucas-Tomasi (KLT) para rastrear características presentes na superfície da água que estão relacionadas à velocidade da superfície livre, obtendo informações valiosas sobre as condições hidráulicas presentes durante as inundações dinâmicas de alta energia do escoamento (Figura 28).

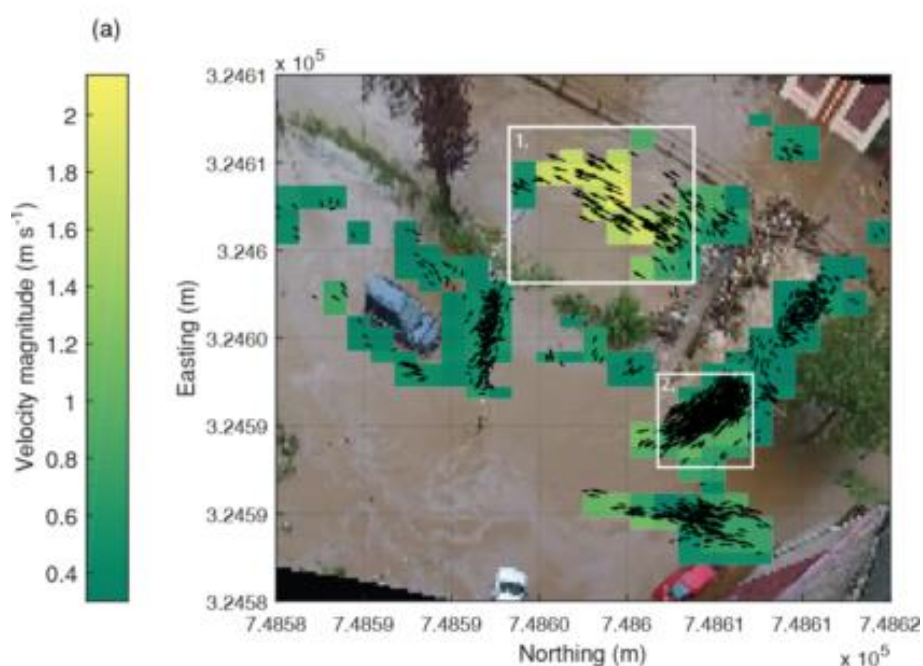


Figura 28: Magnitude das velocidades em um evento de cheia em Alyth Burn, Escócia (Adaptado, PERKS, 2016)

Lükó (2016) utilizou gravações obtidas de VANTS de baixo custo detectar a geometria e preparar o modelo digital de diferentes objetos no rio Danúbio e na planície aluvial conectada. Posteriormente foi realizado o mapeamento do fluxo de velocidades na região próxima aos objetos (Figura 29). Todo o processamento de dados foi realizado com softwares de código aberto, disponíveis gratuitamente, buscando alcançar uma metodologia econômica.

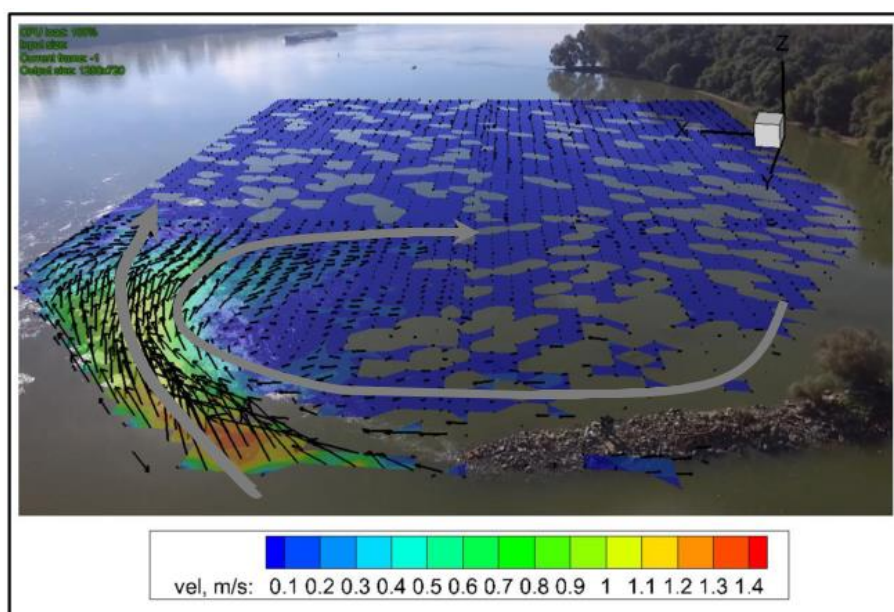


Figura 29: Distribuição da velocidade superficial perto dos esporões (Adaptado, LÜKŐ, 2016)

A análise do estado da arte das metodologias de medição de vazão em rios com VANT demonstrou que não ainda foram levantados métodos práticos e acessíveis para o processo. Vinculadas a utilização de softwares de Velocimetria de Imagem de Partículas, o acesso a esta metodologia fica restrito ao conhecimento de programação e ao acesso de programas, ainda incipientes, que automatizem o processo. Deste modo, em contrapartida a popularização do uso de VANT na sociedade civil, o acesso as ferramentas e utilidades destes instrumentos acabam tonando-se restritos.

Dentre as diversas possibilidades decorrentes da popularização de utilização desses instrumentos, tem-se observado um ganho de espaço junto ao campo, na medida em que se torna possível acessar regiões de difícil ou perigoso acesso de forma remota, ou, ainda, capturar grandes volumes de informações em pouco tempo diminuindo a necessidade de mão de obra e o risco dos técnicos envolvidos; todas essas, características relevantes no campo da hidrometria.

Nesse sentido, a observação de um espaço pouco explorado quanto aos processos de medição de vazão com VANTS estimulou o levantamento de indagações quanto a viabilidade de sua aplicação, ideia central deste trabalho. Com base nos métodos de medição de vazão com flutuadores, é possível adaptar está metodologia com a utilização de VANTS, capturando-se imagens junto ao escoamento e analisando-se o movimento dos traçadores? Se possível, quais seriam os coeficientes de correção que seriam necessários para o método? E ainda, quais seriam as limitações de aplicação e as principais diretrizes a se seguir para obter-se uma boa medição?

Neste contexto, propõe-se no âmbito desta pesquisa a criação de uma metodologia prática para avaliação pontual da vazão em um trecho de rio por meio da obtenção de imagens aéreas de drones e sua posterior avaliação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para execução deste trabalho compreendeu duas principais etapas. A primeira etapa consistiu no processo de medição em campo das variáveis de interesse, ocorrido no mês de agosto de 2018, e a segunda etapa consistiu no processamento dos dados e validação das medições. A Figura 30 apresenta o fluxograma dos procedimentos para a aquisição dos dados em campo e o processamento dessas informações em escritório.

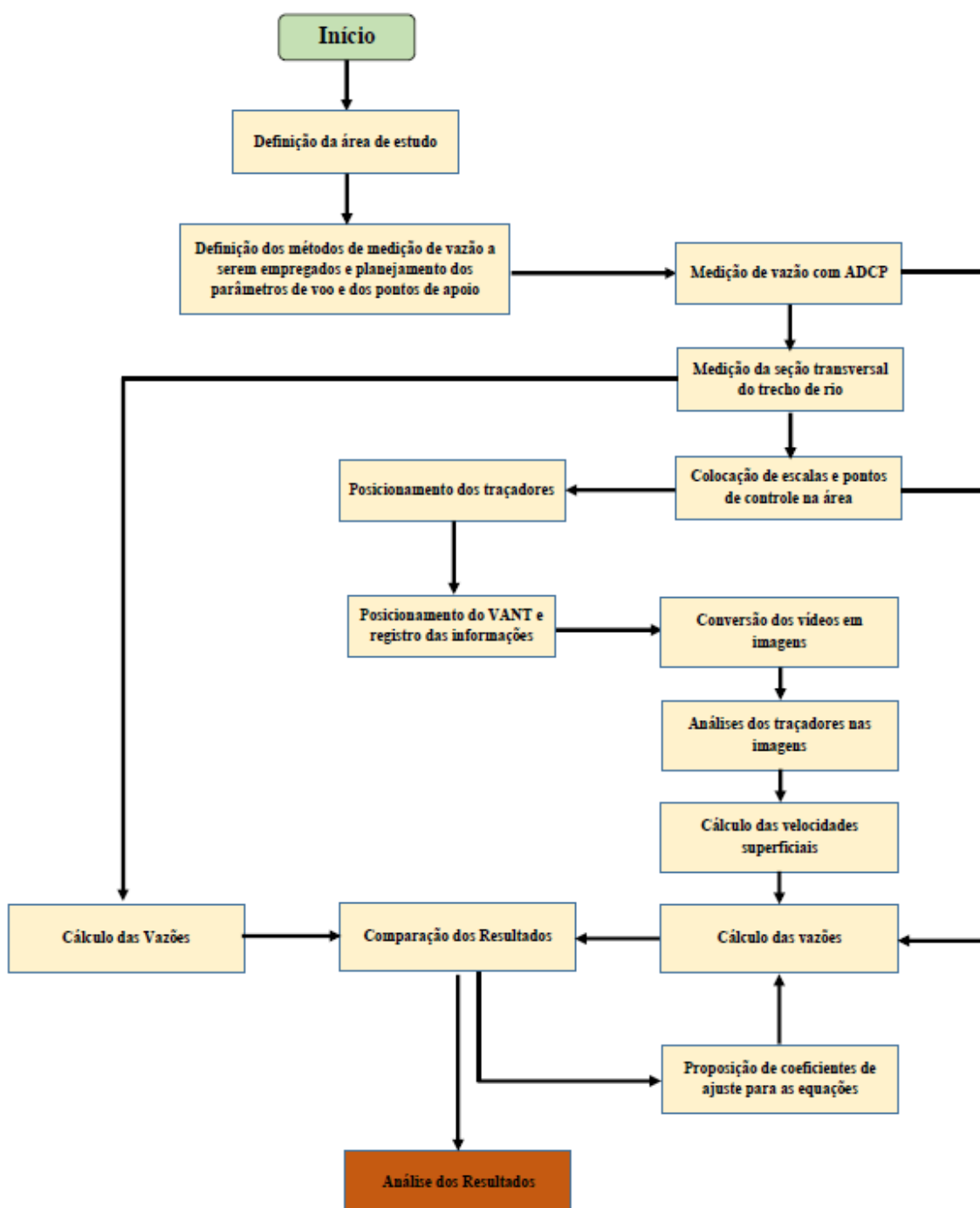


Figura 30: Fluxograma com os procedimentos adotados

O método de medição proposto no presente pesquisa consiste em uma adaptação e aprimoramento do método do flutuador proposto por PALHARES et al. (2007). A diferença básica do método tradicional se dá pela troca da avaliação temporal/espacial de um flutuador para a avaliação em imagens de traçadores, em maior quantidade e em menores intervalos de tempo e espaço. A concepção de aplicação de coeficientes de ajuste manteve-se nessa proposta, com a proposição de novos valores adaptados à metodologia. A escolha dos traçadores teve inspiração em materiais tradicionalmente utilizados em trabalhos de hidrologia/hidráulica, além da preocupação da utilização de produtos biodegradáveis para não geração de poluição ao corpo hídrico receptor.

4.1 RECURSOS EMPREGADOS

Para execução deste trabalho foram utilizados os seguintes recursos e equipamentos:

- ✓ ADCP *SONTEK RIVERSURVEYOR M9*;
- ✓ Dispositivo móvel com GPS;
- ✓ Máquina Fotográfica;
- ✓ Molinete;
- ✓ Seção semicircular de cano PVC;
- ✓ Software *Arcgis 10.4*;
- ✓ Software *Video To JPG Converter*;
- ✓ Traçadores: Laranja, Pipoca, Serragem e Vinho;
- ✓ Trena de 15 metros;
- ✓ VANT DJI Mavic PRO.

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A primeira etapa da execução do trabalho referiu-se à escolha da área de estudo. Os critérios de seleção foram a proximidade a universidade, de modo a facilitar a logística, e a presença de informações pertinentes à seção do rio, tais como medições da seção transversal, curva-chave ajustada ao local e presença de estação linimétrica.

Assim, selecionou-se um trecho do rio Mascarada próximo ao municio de Rolante, no estado do Rio Grande do Sul que atendia a esses requisitos. As coordenadas aproximadas do local são: 29°36'44.22"S e 50°29'8.32"O. A Figura 31 apresenta o mapa de localização da área.

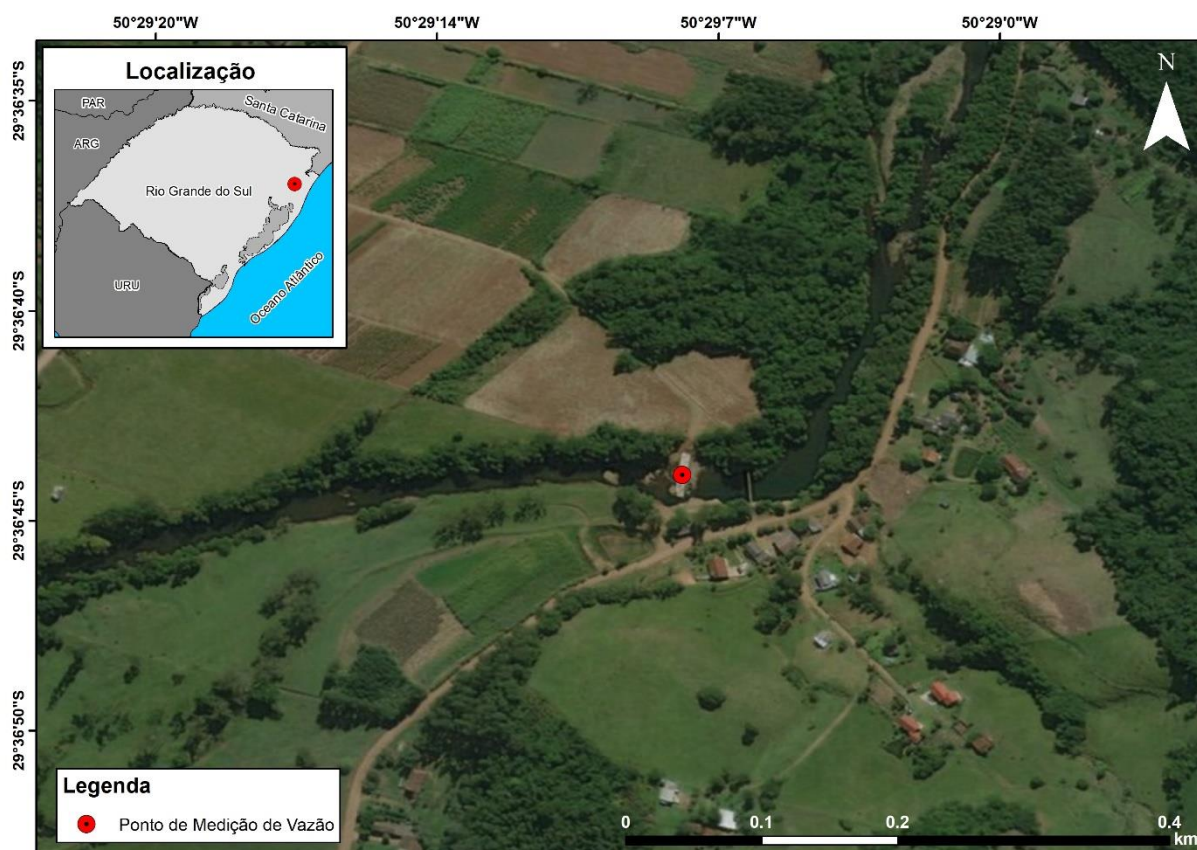


Figura 31: Mapa de localização da área das medições.

A bacia hidrográfica do local de medição possui área de drenagem de 311,1 km², e declividade média de 29% (Figura 32).

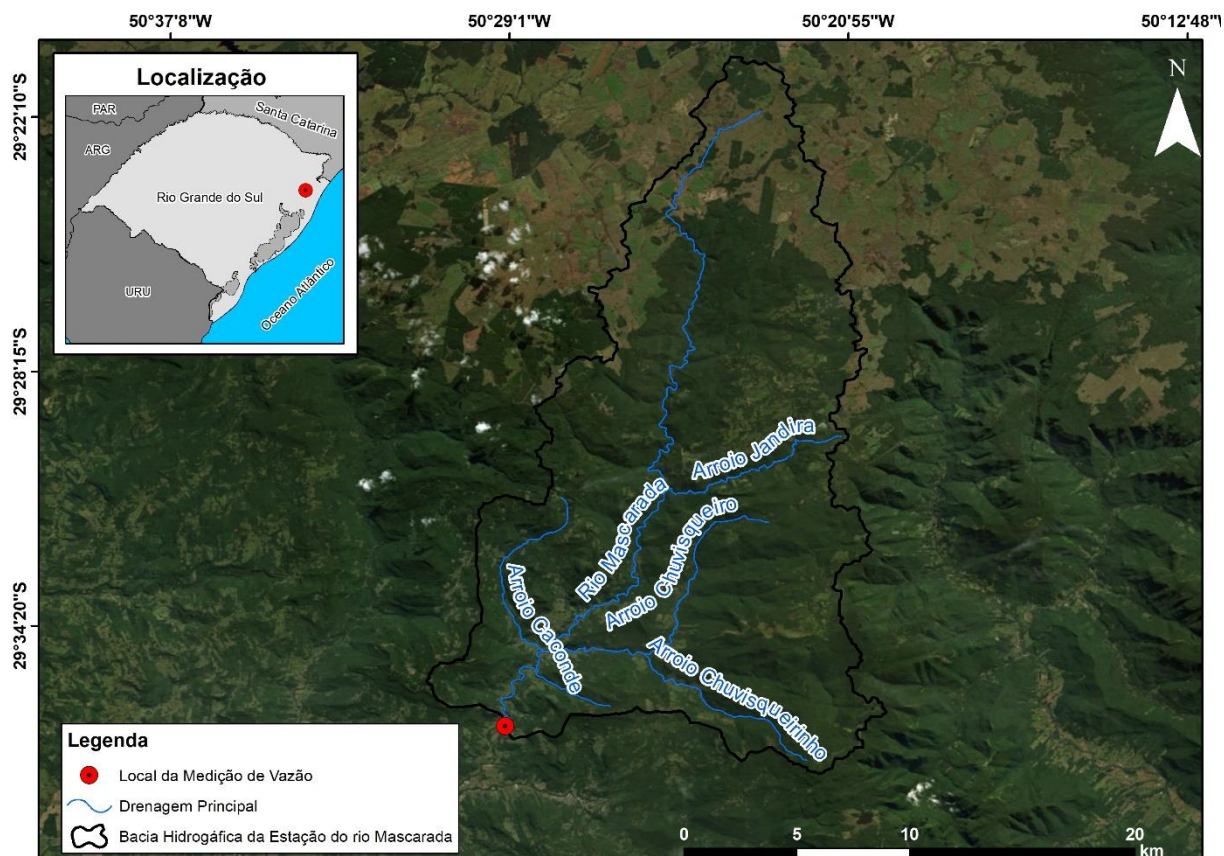


Figura 32. Bacia hidrográfica do ponto de medição, no rio Mascarada.

4.3 ELABORAÇÃO DA ESCALA E DOS PONTOS DE CONTROLE

A utilização de um objeto como escala serviu para a posterior análise das imagens, de modo a fornecer uma referência de dimensão. Para este trabalho, utilizaram-se as meias seções de canos de PVC que ficaram dispostas sobre a área de medição, em cima da ponte, as quais possuíam comprimento conhecido de 3,00 m, conforme ilustra a Figura 33.



Figura 33: Visão aérea das meias seções que desempenharam o papel de escala nas fotografias (objetos destacados em vermelho).

Os pontos de controle, por sua vez, são regiões com coordenadas (x, y, z) conhecidas do terreno e foram utilizados para realizar a relação entre o sistema imagem (fotográfico) e o sistema objeto (terreno). Para este trabalho utilizaram-se as coordenadas junto as quinas das extremidades e do centro da ponte, capturadas com um GPS, conforme ilustra a Figura 34.

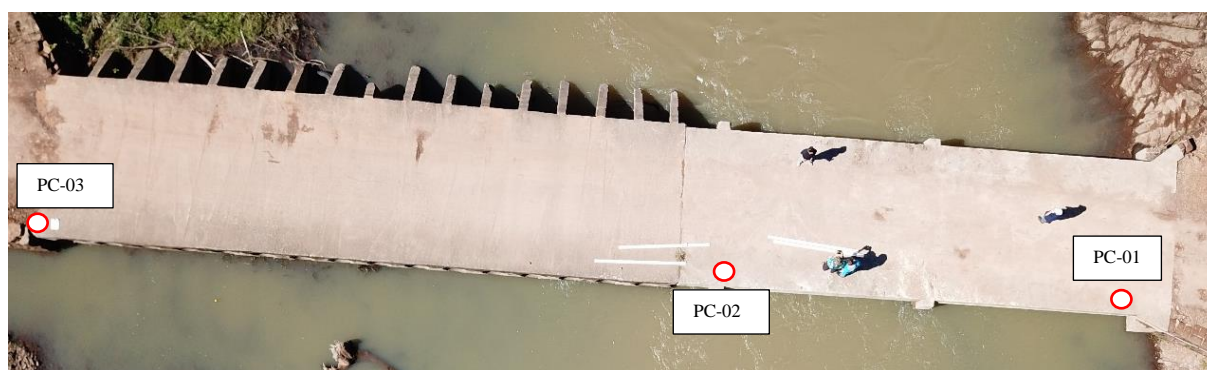


Figura 34: Pontos de controle adotados junto a ponte.

As coordenadas geográficas dos pontos de controle estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4: Coordenadas dos pontos de controle

Ponto de Controle	Latitude [S]	Longitude [O]	Localização
PC-01	29°36'44.53"S	50°29'8.21"O	Margem esquerda
PC-02	29°36'44.12"S	50°29'8.14"O	Centro da ponte
PC-03	29°36'43.38"S	50°29'7.98"O	Margem direita

4.4 ESCOLHA DOS TRAÇADORES

Os traçadores desempenharam a essencial função de acompanhar, marcando visualmente, a velocidade superficial da água no rio nas fotos. Para avaliar os diferentes resultados da interação dos objetos com o fluído e da posterior visualização nas imagens capturadas, utilizou-se 4 tipos de traçadores.

O processo de escolha dos materiais para utilização como traçadores teve inspiração em materiais tradicionalmente utilizados em trabalhos de hidrologia/hidráulica, além da preocupação da utilização de produtos biodegradáveis para não geração de poluição ao corpo hídrico receptor. Baseada na metodologia do flutuador (PALHARES et al., 2007), foram escolhidas as laranjas; com base em trabalhos de avaliação de traçadores em estudos hidráulicos (PAULO, 2015), selecionou-se a serragem; inspirados em estudos de simulação de derramamento de óleos em corpos hídricos (IPIECA, 2014), selecionou-se as pipocas; e por fim, escolheu-se o vinho para avaliar um traçador de diluição na água, como é realizado com corantes em estudos hidráulicos.

Deste modo, os seguintes materiais foram utilizados:

- ✓ Laranja;
- ✓ Pipoca;
- ✓ Serragem;
- ✓ Vinho.

4.5 MEDIÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL E EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES DE VAZÃO

O processo de medição da seção transversal do rio foi realizado junto a seção transversal do posto fluviométrico com o auxílio do ADCP. As medições de vazão no rio foram realizadas por meio de duas principais metodologias e ocorreram em regiões distintas:

- i) Primeiramente, a vazão foi medida com o auxílio do ADCP junto a seção materializada a montante da ponte (Figura 35).
- ii) Posteriormente, foram realizados os levantamentos aerofotogramétricos com o drone na região a jusante da ponte, estrutura que foi utilizada como auxílio para o lançamento dos traçadores (Figura 36).

Não foi possível no dia realizar o levantamento da vazão com o uso do molinete devido a condição de nível elevado que apresentava o rio Mascarada.

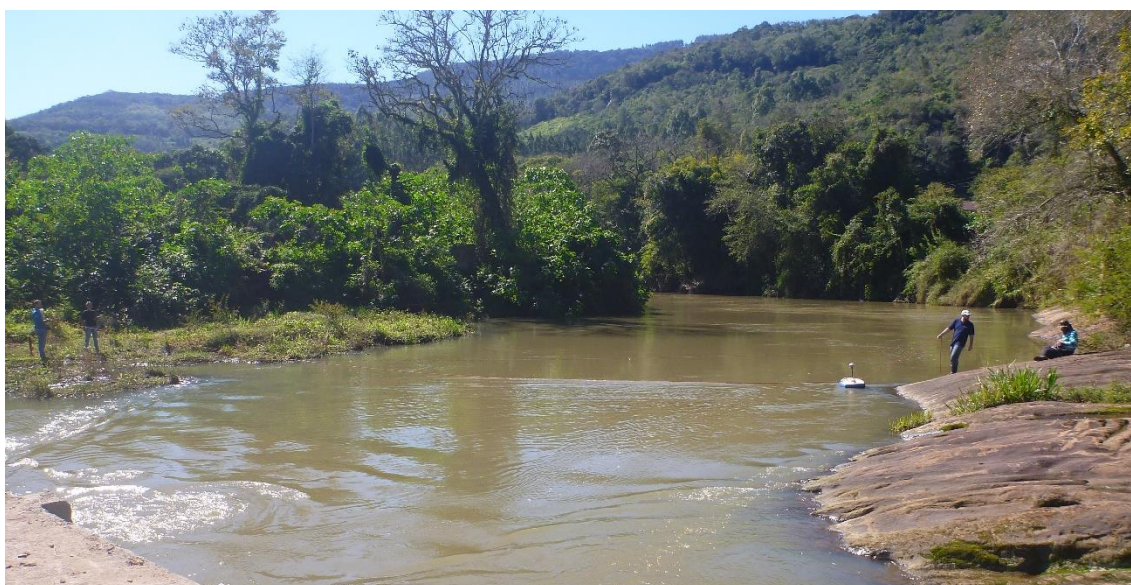


Figura 35: Levantamento de vazão com ADCP junto a seção materializada a montante da ponte.



Figura 36: Posicionamento das meias seções de cano PVC para lançamento dos traçadores a jusante da ponte.

Para ilustrar e caracterizar as regiões onde ocorreram os levantamentos é apresentado a Figura 37. A área “A1” ilustra a região onde foi levantada a seção transversal e foram realizadas as medições de vazão com o ADCP, as áreas “A2” e “A3” representam as regiões onde o escoamento apresentava baixa profundidade e grande turbulência e não foi possível avaliar a velocidade superficial e a área “A4” representa a região onde foram lançados os traçadores e posteriormente foram realizadas as avaliações de velocidade.



Figura 37: Caracterização das regiões de levantamento das vazões.

4.6 MEDIÇÕES DE VAZÃO COM VANT

Os passos adotados para o processo do levantamento aerofotogramétrico com o VANT são descritos a seguir:

- i) Primeiro, foi feita a disposição do objeto de escala e dos pontos de controle dentro do campo de visão do local de medição do VANT (Figura 38A);
- ii) Após, foi posicionado o VANT sobre do rio, com a câmera disposta em um ângulo perpendicular ao fluxo do escoamento. A altura de voo foi escolhida de forma que a imagem a ser capturada englobasse as duas margens do curso d'água;
- iii) Os processos de liberação dos traçadores foram feitos de maneiras distintas. As pipocas foram lançadas com auxílio do cano de PVC orientado paralelamente a seção do rio, contendo dentro de si o material uniformemente espalhado, ocorrendo a liberação simultânea do material no rio (Figura 38B). A serragem, devido a disponibilidade de um maior volume, foi lançada de forma pontual, sendo realizado o caminhamento no processo de lançamento com o objetivo de espalhar o material ao longo da seção. Por fim, as laranjas foram lançadas ao rio de forma simultânea e o vinho foi lançado junto a região central da ponte.
- iv) Junto ao processo de liberação dos traçadores, a câmera embarcada no VANT iniciou o processo de gravação de vídeo, de modo a registrar o avanço das partículas ao longo da superfície no rio (Figura 38D);
- v) O processo então é repetido substituindo as variáveis, neste caso, os materiais traçadores;
- vi) Posteriormente a vazão foi estimada por meio da análise das velocidades das partículas em um processo de integração com a área da seção transversal do trecho do rio avaliado.

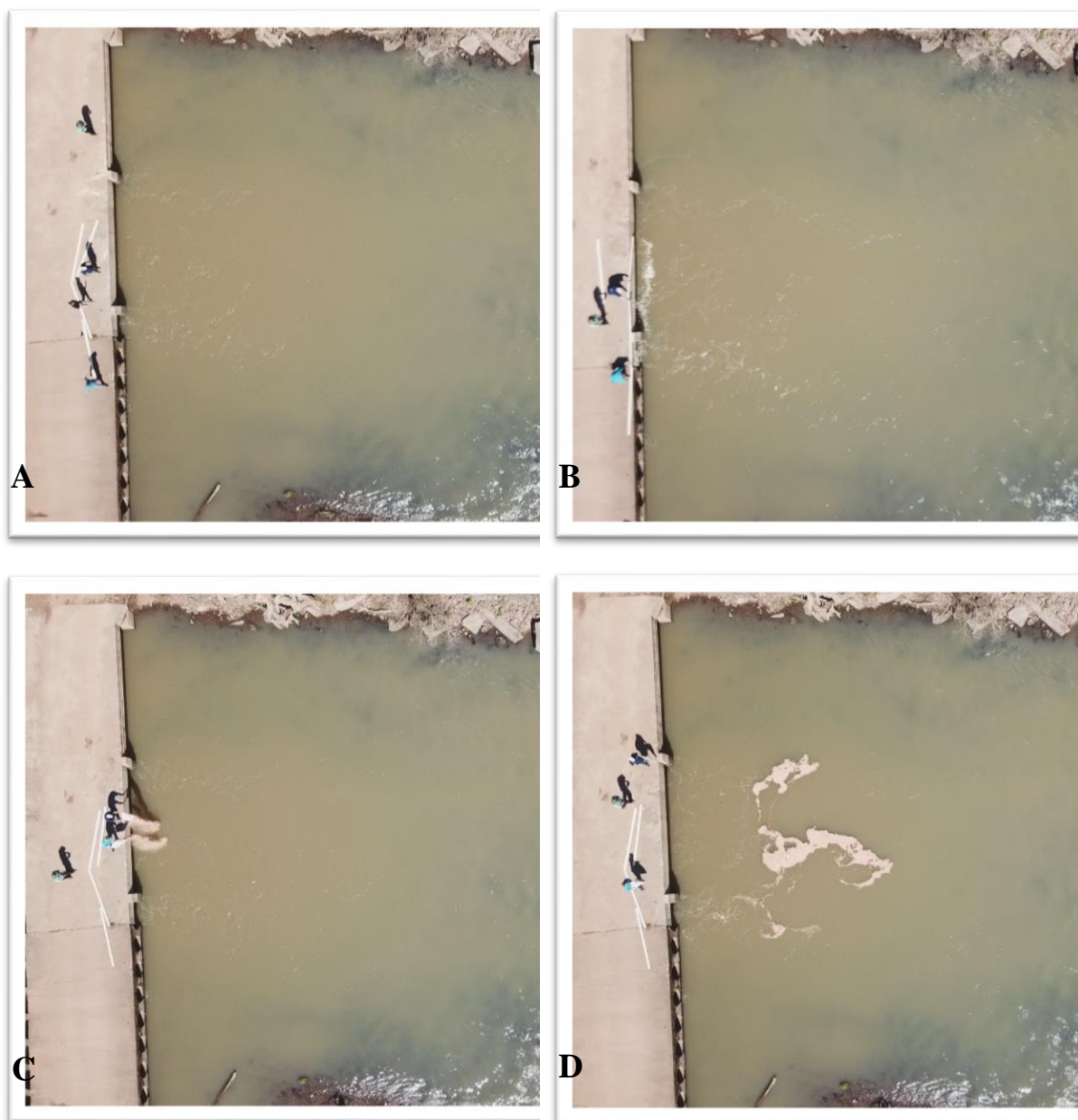


Figura 38: Metodologia adotada para o levantamento aerofotogramétrico.

4.7 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados obtidos se deu primeiramente com o cálculo da descarga líquida e estimativa da seção transversal do rio por meio da utilização do ADCP M9 com a utilização do software *RiverSurveyor Live*. Posteriormente, foram feitas as análises dos resultados fotogramétricos levantados pelo VANT. Os resultados de vazão foram adquiridos por meio de diferentes combinações entre as velocidades superficiais médias de cada traçador no rio com a seção transversal obtida pelo ADCP. A Tabela 5 apresenta o resumo das interações produzidas no processo de determinação das vazões.

Tabela 5: Resumo dos processos de medição de vazão

Medição [Nº]	Traçador
1	Pipoca
2	Serragem I
3	Serragem II
4	Laranja
5	Vinho

Aqui faz-se uma ressalva quanto a diferença entre as medições número 2 e 3. A Serragem I compreende o lançamento de dois sacos de serragem concomitantemente, enquanto percorria-se a seção transversal. A Serragem II foi uma medição realizada posteriormente, com o restante da serragem de um dos sacos, o local de lançamento foi mais próximo da região central do escoamento.

Para avaliação da velocidade superficial das partículas, primeiramente foi feita a conversão dos vídeos em imagens sequencias por meio da utilização do software livre *Video To JPG Converter* (<https://www.dvdvideosoftware.com/pt/products/dvd/Free-Video-to-JPG-Converter.htm>) e após, foi feita a seleção das fotos de modo a se obter fotos com intervalos de 1 segundo.

Para a avaliação das imagens optou-se por utilizar o software Arcgis. Foram propostas 3 metodologias de análise:

- i) Análise por pontos;
- ii) Análise por Linhas; e
- iii) Análise por Malhas.

Todas essas metodologias consistiram em acompanhar, junto das regiões mais relevantes: centro, margem esquerda e margem direita, o movimento das frentes de aglomerados dos traçadores. Posteriormente, junto da referência de escala e o conhecimento do tempo decorrido foi possível determinar a velocidade superficial instantânea média entre duas imagens por meio da Equação 14. A vazão da seção, por fim, é determinada com a multiplicação da velocidade média da seção com a área da seção transversal e, quando necessário, com um coeficiente de ajuste (Equação 15).

$$v = \frac{d \left(\frac{L_r}{L_f} \right)}{\Delta t} \quad \text{Equação 14}$$

Onde: v é velocidade do traçador (m/s); d é distância percorrida pelo traçador, entre duas imagens, na escala da imagem (m); L_r é o comprimento real do objeto de escala (m); L_f é o comprimento do objeto na escala da imagem (m); e Δt é o tempo transcorrido entre as duas imagens analisadas.

$$Q = C \cdot v \cdot A \quad \text{Equação 15}$$

Onde: C é o coeficiente de ajuste da velocidade média superficial em velocidade média da seção do rio; v é a velocidade do traçador (m/s); e A é a área da seção transversal analisada (m^2).

A Figura 39 ilustra o procedimento. As metodologias adotadas para cada tipo de análise serão descritas a seguir.

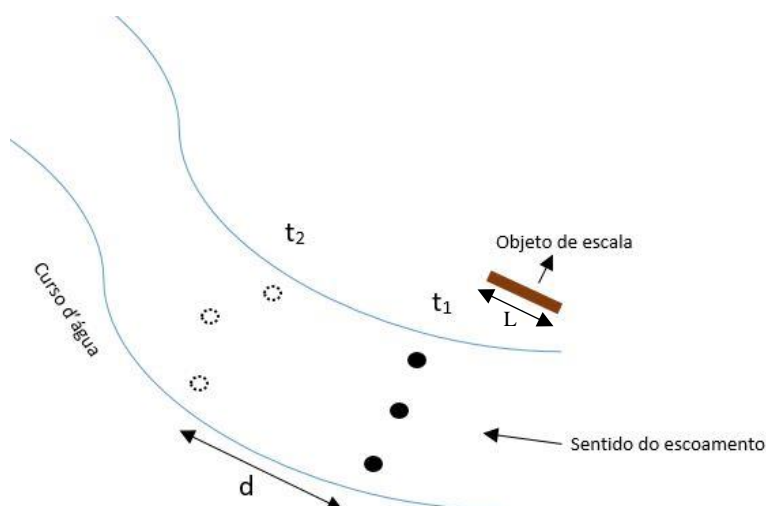


Figura 39: Procedimento de análise dos dados.

4.7.1.1 Análise da velocidade superficial por meio de pontos

Esta metodologia consistiu em marcar as frentes dos traçadores com pontos, junto as principais regiões de escoamento que a pluma de traçadores delimitava: centro, margem esquerda e margem direita (Figura 40).



Figura 40: Principais regiões de análise.

Deste modo, posteriormente, foi possível encontrar a velocidade superficial do escoamento medindo a distância percorrida do traçador no sentido do escoamento. Para isso, a cada duas imagens consecutivas foram avaliadas as distâncias, ao total foram realizadas análises em 6 fotos, totalizando 5 medições em cada região e 15 medições em cada tipo de traçador. A Figura 41 ilustra o procedimento adotado.



Figura 41: Procedimento de análise dos dados por meio de pontos com utilização de serragem como traçador. Onde A: delimitação dos pontos na primeira imagem; B: delimitação dos pontos na segunda imagem; C: delimitação dos pontos na sexta imagem e representação dos pontos demarcados; e D: medição da distância entre dois pontos consecutivos na margem esquerda.

4.7.1.2 Análise da velocidade superficial por meio de linhas

A metodologia de linhas consistiu em demarcar a frente das plumas de traçadores com linhas, buscando aproximar-se de um traçado de perfil de velocidade superficial. Posteriormente foram avaliadas as distâncias entre linhas consecutivas, no sentido do escoamento, junto as principais regiões: margem esquerda, centro e margem direita. A Figura 42 ilustra os procedimentos adotados.



Figura 42: Procedimento de análise dos dados por meio de linhas com utilização de pipocas como traçador. Onde A: delimitação da linha na primeira imagem; B: delimitação da linha na segunda imagem; C: delimitação da linha na sexta imagem e representação das linhas demarcadas; e D: medição da distância entre duas linhas consecutivas junto ao centro.

4.7.1.3 Análise da velocidade superficial por meio de malha

A metodologia de análise por malhas consistiu em produzir um grid de linhas em frente as imagens analisadas, no sentido do escoamento. Para definição do espaçamento adotou-se como padrão o valor de $1/5$ da distância entre dois pontos, essa avaliação era realizada de forma expedita entre duas imagens. As distâncias eram posteriormente avaliadas (junto das regiões centro, margem esquerda e margem direita) por meio do número de linhas que a pluma de traçadores percorria. O processo de avaliação era realizado de maneira individual, com auxílio da malha, para cada região. A Figura 43 ilustra o processo.



Figura 43: Procedimento de análise dos dados por meio de malha com utilização de serragem como traçador. Onde A: ilustração da malha sobreposta ao longo do trecho; B: Seleção da linha da malha demarcando o traçador na primeira imagem, junto a margem esquerda; C: Seleção da linha da malha demarcando o traçador na segunda imagem, junto a margem esquerda; e D: medição da distância entre as duas linhas consecutivas da malha na margem esquerda.

5 RESULTADOS

Os resultados deste trabalho compreendem a avaliação dos dados obtidos com os levantamentos de vazão por meio da metodologia proposta da utilização de drone em comparação com os resultados de vazão levantados com o ADCP.

A Tabela 6 apresenta o resumo das medições realizadas com o ADCP. Ao total foram realizadas 3 medições, cada uma compreendendo 2 passadas: uma de ida e outra de volta. A vazão média das medições apresentou um valor de 11,50 m³/s.

Tabela 6: Resumo dos resultados da medição de vazão com ADCP

Medição [N°]	Descarga Líquida [m ³ /s]	Área [m ²]
01	11,79	22.00
02	11,50	20.67
03	11,24	21.22

O perfil médio da seção transversal levantada está representado pela Figura 44. O valor médio da área da seção foi de 21,30 m².

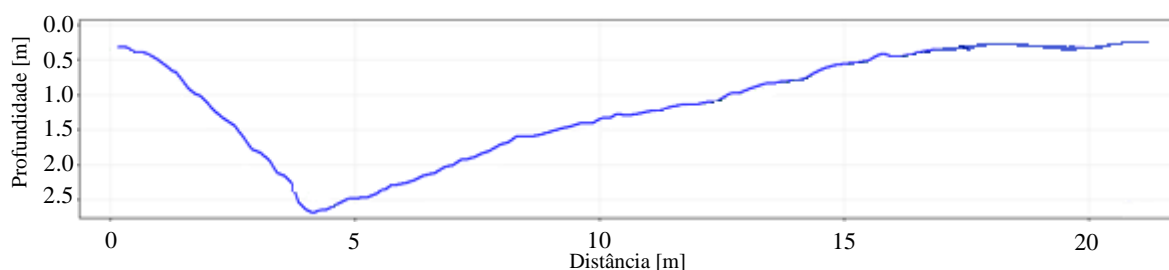


Figura 44: Seção transversal levantada no rio Mascarada

Os resultados de vazão levantados com as velocidades superficiais oriundas das informações retiradas das imagens levantadas com o drone são apresentadas na Tabela 7. Para avaliação dos valores utilizou-se o denominado erro médio, representado a diferença de valor, em porcentagem, em relação aos resultados obtidos de vazão pelo ADCP. Destaca-se que estas vazões foram calculadas sem o coeficiente de correção normalmente empregado no método tradicional do traçador.

Tabela 7: Resultados dos levantamentos de vazão com drone

Traçador	Metodologia	Velocidade Média (m/s)	Distância Percorrida Analisada (m)	Vazão [m³/s]	Erro Médio
Pipoca	Ponto	0,97	4,84	20.62	+ 79%
	Linha	0,96	4,78	20.35	+ 77%
	Malha	0,96	4,82	20.51	+ 78%
Serragem I	Ponto	0,90	4,48	19.11	+ 66%
	Linha	1,09	5,44	23.19	+ 102%
	Malha	0,88	4,41	18.79	+ 63%
Serragem II	Ponto	0,96	4,80	20.46	+ 78%
	Linha	1,02	5,11	21.76	+ 89%
	Malha	0,95	4,74	20.19	+ 76%
Laranja	Ponto	0,76	3,81	16.23	+ 41%
	Linha	0,92	4,62	19.67	+ 71%
	Malha	0,75	3,73	15.90	+ 38%

De modo geral, os resultados apresentaram valores elevados quando comparados com o resultado do ADCP. As justificativas para estes resultados fundamentam-se principalmente na simplificação da adoção da velocidade média superficial como velocidade média da seção. Deste modo, assim como as principais metodologias associadas as observações de velocidade superficial com traçadores (ELETROBRÁS, 1985; PALHARES et al., 2007), propõe-se aqui a utilização de um coeficiente de ajuste, de modo a considerar as variações existentes no perfil longitudinal de velocidades junto a calha fluvial.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos cálculos de vazão com aplicação de um coeficiente de ajuste de 0,80, valor comumente usado para transformação das velocidades médias superficiais em velocidades médias da vertical de rios em leitos pedregosos (PALHARES et al., 2007).

Tabela 8: Resultados dos levantamentos de vazão com drone com coeficiente de ajuste de 0,80 (tradicionalmente usado no método dos traçadores)

Traçador	Metodologia	Vazão [m³/s]	Erro Médio
Pipoca	Ponto	16.49	+ 43%
	Linha	16.28	+ 42%
	Malha	16.41	+ 43%
Serragem I	Ponto	15.28	+ 33%
	Linha	18.56	+ 61%
	Malha	15.04	+ 31%
Serragem II	Ponto	16.37	+ 42%
	Linha	17.40	+ 51%
	Malha	16.15	+ 40%
Laranja	Ponto	12.99	+ 13%
	Linha	15.73	+ 37%
	Malha	12.72	+ 11%

Os resultados com aplicação dos coeficientes de ajuste de 0,80 apresentaram uma significativa melhora, entretanto, ainda apresentam magnitudes elevadas quando comparados com os resultados do ADCP. Possivelmente fatores como a não avaliação das menores velocidades junto as regiões mais próximas da margem e também as mudanças no escoamento causada pela obstrução do escoamento pela ponte, gerando aumento das velocidades, ainda exercem influências nos resultados.

Assim sendo, foi proposta a realização de um ajuste de modo a definir um valor para o coeficiente que melhor represente as medições com todos os traçadores. Em termos gerais para utilização de laranjas como traçador, o valor médio indicado para o coeficiente de ajuste é de 0,70; e para utilização de serragem e pipocas o valor médio indicado para o coeficiente de ajuste é de 0,56.

O valor final do coeficiente médio de ajuste otimizado para todos os traçadores foi de 0,60. Os resultados são apresentados na Tabela 9, o erro médio de todas as 12 metodologias testadas foi de 10%.

Tabela 9: Resultados dos levantamentos de vazão com drone com coeficiente de ajuste de 0,60

Traçador	Metodologia	Vazão [m ³ /s]	Erro Médio
Pipoca	Ponto	12.37	+ 8%
	Linha	12.21	+ 6%
	Malha	12.31	+ 7%
Serragem I	Ponto	11.46	- 0.3%
	Linha	13.92	+ 21%
	Malha	11.28	- 2%
Serragem II	Ponto	12.27	+ 7%
	Linha	13.05	+ 14%
	Malha	12.12	+ 5%
Laranja	Ponto	9.74	- 15%
	Linha	11.80	+ 3%
	Malha	9.54	- 17%

A Figura 45 ilustra os resultados encontrados. As metodologias de ponto e malha apresentaram os melhores resultados, enquanto que a metodologia de linhas tendeu a causar superestimativa nas vazões. Ainda, observou-se uma mudança de tendência entre os traçadores mais densos (laranjas) em relação aos traçadores menos densos (serragem e pipoca), de modo que a aplicação de um coeficiente único comprometeu os resultados das laranjas como traçadores.

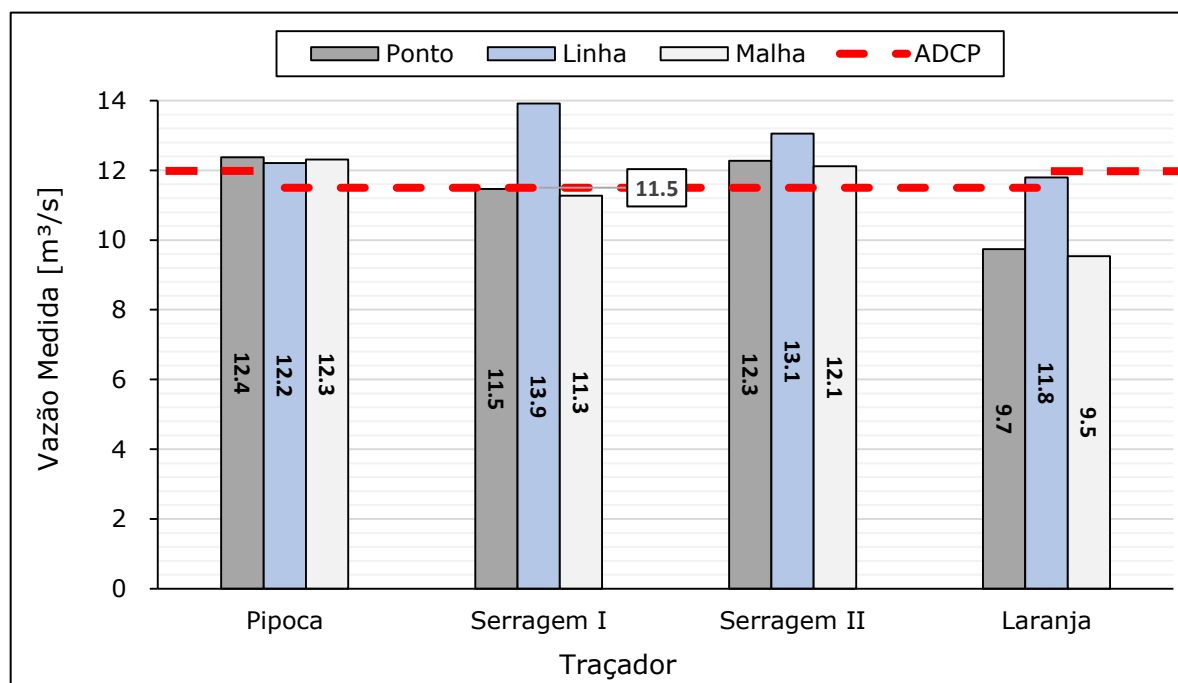


Figura 45: Gráfico em colunas dos resultados de vazão para o coeficiente ajustado de 0,60.

6 DISCUSSÕES

A seguir são apresentadas as discussões referentes aos resultados encontrados com a metodologia proposta de medição de vazão com drones.

Primeiramente justifica-se que não foi viável a medição de vazão com a utilização do vinho. Conforme ilustra a Figura 46, a elevada vazão que apresentava o rio Mascarada no dia da medição, ocasionando uma diluição quase instantânea, aliada a coloração da água não permitiram que se identificasse os traçadores juntos as imagens levantadas.



Figura 46. Resultados dos levantamentos utilizando vinho velho como traçador. Onde A: vista em solo; e B: vista aérea.

Quanto aos diferentes tipos de traçadores, observou-se diferentes implicações quanto as interações junto ao fluido e quanto aos resultados visuais junto ao levantamento aerofotogramétrico. As pipocas, devido a limitação na quantidade lançada, não foram capazes de formar aglomerados. Deste modo, não apresentaram boa identificação nas imagens do levantamento, muitas vezes confundindo-se com as colorações dos efeitos turbulentos do escoamento (Figura 47). Dentre alternativas possíveis levantadas para viabilizar a utilização das pipocas, destaca-se a possibilidade de coloração do traçador.

A serragem se apresentou como o melhor traçador dentre as opções levantadas. Sendo um dos traçadores com maior viabilidade para aquisição, sua maior quantidade permitiu a formação de aglomerados junto ao escoamento, possibilitando sua identificação juntos das imagens levantadas (Figura 48).



Figura 47. Resultados dos levantamentos utilizando pipoca.



Figura 48. Resultados dos levantamentos utilizando serragem.

As laranjas, diferentes dos outros traçadores que apresentavam formações de aglomerados, apresentaram resultados mais pontuais. Para a metodologia adotada, o traçador foi capaz de gerar um número maior de informações das velocidades superficiais, uma vez que foram feitas análises para todas as laranjas lançadas e não apenas nas regiões de centro, margem esquerda e margem direita (Figura 49). Além disso, o processo de identificação pontual das laranjas nas imagens tornou o processo menos subjetivo.



Figura 49. Resultados dos levantamentos utilizando laranjas.

Em relação as metodologias adotadas para análise dos traçadores, as análises de distâncias com linhas apresentaram os maiores erros, sendo o método mais subjetivo dos três utilizados. Um dos principais motivos é devido à incerteza do traçado do perfil em relação ao movimento da pluma de traçadores.

As análises com pontos e malha apresentaram resultados similares. Entretanto, a análise com pontos ainda apresentou considerável subjetividade, principalmente quanto as escolhas das frentes e definição das regiões de centro, margem esquerda e margem direita para as análises de velocidade. Quanto as análises com definição da malha, foram observados os melhores resultados na avaliação de todos os traçadores. Sua principal vantagem é a diminuição significativa na subjetividade no momento de medição da distância percorrida.

Quanto aos aspectos relacionados as limitações gerais da metodologia para utilização de VANTS para medição de vazão em cursos d'água destaca-se que na data do campo a alta vazão apresentada pelo rio Mascarada impediu a passagem a vau pelo rio, de modo que só foi possível lançar os traçadores junto a ponte, implicando também em um grande comprimento da seção transversal a ser percorrido, impossibilitando o lançamento dos traçadores ao longo de todo o perfil. Com a utilização da região central da ponte para lançamento dos traçadores, as análises da velocidade média foram superestimadas.

O levantamento da área da seção transversal também apresentou limitações, uma vez que foi levantado em um trecho a montante do local de medição, encontrando-se no meio do

caminho uma ponte. Assim sendo, estão associados aos erros de medição as incertezas das modificações nos escoamentos causadas pela singularidade e utilização deslocada da seção transversal: Segundo BAPTISTA E LARA (2012), pontes geram alterações das profundidades de escoamento face às variações da energia específica, em função do estreitamento e posterior alargamento das seções. Como o regime nos cursos d'água naturais é geralmente fluvial, o nível de água é geralmente rebaixado imediatamente sob as pontes.

Em relação aos traçadores utilizados, os que foram lançados em maior quantidade, de modo que gerassem massas de agregados, permitiram uma melhor identificação posteriormente junto as imagens do levantamento. Além disso, materiais desagregados e em menor quantidade, utilizados como traçadores, estão mais sujeitos a ação dos efeitos de turbulência do escoamento, de forma a dificultar a definição da frente do traçador e causar mais rapidamente o afundamento das partículas.

Com respeito as implicações das diferenças de velocidade que um escoamento fluvial possui, são feitas algumas ressalvas. Segundo COLLISCHONN E DORNELLES (2015), em uma seção transversal, a velocidade de água não é igual em todos os pontos. Em função da interação do fluido com o fundo e as margens, a velocidade da água costuma ser maior no centro de um rio do que junto às margens. Também, a velocidade é mais baixa junto ao fundo do rio do que junto a superfície, deste modo, considerando a variação da velocidade nos diferentes pontos de uma seção transversal, a utilização de apenas uma medição de velocidade pode resultar em uma estimativa errada da velocidade média. De modo geral, a velocidade média medida junto à margem costuma ser inferior à velocidade média e a velocidade medida junto à superfície, no centro da seção, costuma ser superior à velocidade média.

Com base nessas considerações foram feitas proposições de coeficientes que reparassem essas variáveis indissociáveis ao meio. Os resultados apresentados apontaram para um coeficiente de ajuste médio de 0,60 para as condições naturais existentes no dia da realização do campo. Foram também observadas indicações da influência da forma e densidade do material utilizado, de modo que cada traçador atuou de forma diferente, influenciado por diferentes arrastes em função do peso e da superfície para fora d'água. Como produto dessa premissa obteve-se coeficientes de ajuste ótimo diferentes para cada traçador quando analisados individualmente, esses valores são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Coeficiente de ajuste ótimo para cada traçador

Traçador	Coeficiente de Ajuste Ótimo
Pipoca	0,56
Serragem II	0,57
Serragem I	0,55
Laranja	0,72

Observa-se que as laranjas apresentaram coeficiente de ajuste com os maiores valores, indicando tendência de materiais mais pesados e com maior volume submerso apresentarem resultados de velocidade de escoamento mais próximos do valor médio. Diferentemente, a pipocas e a serragem, apresentaram coeficientes com valores baixos, indicando uma tendência de acompanhar a velocidade superficial com valores mais elevados.

Ademais, o processo de lançamento diferencial dos traçadores também gerou influências nos resultados. Para realizar o lançamento foram utilizados dois métodos: as pipocas foram lançadas de forma simultânea com auxílio das meias seções de cano e as serragens foram lançadas de maneira pontual com o despejo do material do saco. A avaliação da influência da disposição não linear dos traçadores foi feita por meio da análise da diferença entre as velocidades da região central (CE), margem esquerda (ME) e margem direita (MD) para cada traçador, com exceção da laranja que teve mais pontos avaliados. A Tabela 11 exibe os resultados obtidos.

Tabela 11: Análise das diferenças de velocidade em função do lançamento uniforme ou desuniforme dos traçadores

Traçador	Tipo Análise	Variação ME - CE	Variação CE - MD	Variação ME - MD	Média
Pipoca	Ponto	12.7%	10.6%	14.8%	12.7%
	Linha	5.4%	14.4%	19.6%	13.1%
	Malha	12.1%	14.6%	20.4%	15.7%
Serragem I	Ponto	21.2%	3.6%	21.2%	15.3%
	Linha	14.0%	27.2%	17.1%	19.4%
	Malha	16.9%	5.0%	18.9%	13.6%
Serragem II	Ponto	19%	9%	12%	13.5%
	Linha	11%	5%	8%	7.9%
	Malha	19%	8%	11%	12.8%

Em termos gerais, quanto maior as médias apresentadas maior a diferença entre as velocidades medidas ao longo da seção com relação à média. Os resultados demonstram que, embora tenham decorrido valores médios totais próximos, o método de lançamento não simultâneo apresentou os maiores desvios em relação aos outros resultados, demonstrando a influência do processo de lançamento.

Por fim, discorre-se das limitações e aplicabilidades do método proposto quanto as características do rio. As medições foram realizadas em um ponto cuja bacia hidrográfica possui área de drenagem de 311,1 km². Devido a problemas técnicos na estação fluviométrica, falhas nos registros e curva-chave incompleta não foi possível levantar qual seria a vazão obtida pela curva-chave. A Figura 32 apresenta a ilustração da bacia hidrográfica da estação, local onde também foram realizadas as medições de vazão.

Conjectura-se, com os resultados adquiridos nesse trabalho, que cursos de rios com características próximas da região de estudo apresentem aplicabilidade da metodologia, outras sugestões e condições de aplicabilidade são discutidas na seção de Trabalhos Futuros a seguir. Ressalva-se que ainda são necessários um maior número de medições de vazão com drone para que se possa avaliar todas as incertezas e limitações da metodologia. Uma das principais avaliações a serem feitas é se há alternância nos coeficientes de ajuste para diferentes eventos de vazão e diferentes rios.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo propor e avaliar uma metodologia de medição de vazão em cursos d'água com a utilização de VANTS por meio da interpretação de imagens, com a utilização de traçadores visíveis e a posterior mensuração da velocidade de escoamento superficial, visando a obtenção de dados de vazão. A proposição da metodologia foi desenvolvida junto a realização de um campo no rio Mascarada, onde foram propostos diferentes tipos de materiais e diferentes formas de lançamento dos traçadores. A comparação e complementação dos resultados foram feitas junto aos produtos de vazão e seção transversal levantados por um ADCP M9.

A avaliação dos resultados obtidos demonstrou a viabilidade na aplicação do método desenvolvido, desde com a ressalva da utilização de coeficientes de correção, que neste trabalho foram nomeados de “coeficientes de ajuste”. Estes ajustes tornaram-se necessários para realização da correção dos problemas intrínsecos a variabilidade da velocidade ao longo das seções transversais e longitudinais do rio, e de erros associados ao peso, densidade e métodos de lançamento dos traçadores. Neste trabalho os resultados indicaram a utilização de um coeficiente de ajuste de 0,60 para qualquer traçador, apresentando um erro médio entre as medições de 10%.

A principal dificuldade encontrada na aplicação da metodologia remeteu-se as condições de alta vazão no rio Mascarada no dia do campo. Esse fenômeno implicou na inacessibilidade do rio, de forma que a seção transversal foi levantada a jusante do local de lançamento, neste caso, uma ponte que cruzava o rio. Todas estas variações adotadas, derivadas da metodologia original proposta, carregam intrinsecamente erros associados junto aos resultados de vazão. Conclui-se, entretanto, que apesar de todas as limitações apresentadas os resultados da metodologia de medição de vazão em cursos d'água com a utilização de um VANTS apresentaram valores satisfatórios e indicam um campo a ser mais explorado.

Por fim, na direção da exploração de novas tecnologias para medição de vazão com VANTS, os produtos gerados pelo trabalho ficam disponíveis como insumo para um processo de automatização das análises das imagens levantadas. As principais vantagens associadas a estas metodologias implicam na eliminação dos erros de subjetividade intrínsecos ao método manual proposto neste trabalho.

8 TRABALHOS FUTUROS

Quanto as considerações para futuros trabalhos relacionados ao tema, são feitas as seguintes recomendações:

- i) A realização das análises dos traçadores deve ser feita junto aos primeiros segundos após o lançamento, de modo que a medida em que traçador se desloca sob o rio há a ocorrência de processos de desagregação e afundamento que devem ser evitados.
- ii) É imprescindível que se busque lançar os traçadores ao longo maior distância possível da seção transversal do rio, de modo a obter não apenas as maiores velocidades junto ao centro, mas também as menores velocidades junto as margens.
- iii) É importante, quando possível, evitar realizar medições junto a singularidades no curso d'água como pontes, pilares, curvas, entre outros.
- iv) Incentiva-se a busca da utilização de novos métodos de lançamento e de diferentes traçados para complementação da avaliação da metodologia.
- v) Buscar a utilização de um processo de automação na análise das imagens para diminuição dos erros associados as subjetividades do analista. Dentre os métodos possíveis levantados, destaca-se aqui a alternativa de avaliação dos centroides da mancha de traçadores lançadas na água;
- vi) Em alinhamento com um dos objetivos da utilização de drones como alternativa para medições em locais de difícil acesso, inviabiliza-se o levantamento da seção transversal nessas situações. Como tema de estudo futuro indica-se analisar a alternativa da proposição de uma metodologia que estime a profundidade média e perfil da seção transversal do rio. Dado que o drone fornece as informações de velocidade superficial e largura, e por meio do desenvolvimento deste trabalho obteve-se índices de correção, restaria apenas a obtenção da profundidade média do rio para estimar a vazão com total ausência de contato entre observador e água. Nesse contexto, ficaram abertas questões como: Como seria possível obter essa profundidade média? A consideração de uma calha retangular por relações hidromorfológicas seria viável? Uma vez que tenhamos uma calha retangular

estimada e a largura fixada, seria possível obter-se a profundidade média? E como isso seria comparado com resultados reais de vazão?

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGISOFT LLC. **Agisoft PhotoScan User Manual**, v. 1.2, 2016

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial**. 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00/@@displayfile/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf> Acesso em: 17 jun. 2018.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. v. 1 ed. Curitiba, 1998

BAPTISTA, Marcio; LARA, Marcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

BOITEN, Wubbo. **Hydrometry - A comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels**. London: CRC Press, 2008.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro. 2007

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2ª ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, [s. l.], v. 92, p. 79–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>>

DEPERT, Martin; WEITBRECHT, Volker. **A low-cost airborne velocimetry system: Proof of concept**. Journal of Hydraulic Research, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 532–539, 2015.

ELETROBRÁS. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985.

FRASER, C. S. **Photogrammetric Measurement to One Part in a Million**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, [s. l.], v. 58, p. 305–310, 1992.

FUJITA, Ichiro; KUNITA, Yohei. **Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera**. Journal of Hydro-Environment Research, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 323–331, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2011.05.003>>

GAMARO, Paulo Everardo. **Medidores acústicos Doppler de vazão**. Foz do Iguaçu, 2012

GLINSKI, Paulo Henrique Tokarski. **Aeronaves Remotamente Pilotadas e a Atual Regulamentação no Brasil**. [s. l.], 2017.

HAN, J. H. et al. **Position and Attitude Determination for UAV-Based GPS, IMU and AT without GCPs**. International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), 2011, [s. l.], p. 1–5, 2011.

HAUBECK, K. AND PRINZ, T. A. **Uav-Based Low-Cost Stereo Camera System for Archaeological Surveys - Experiences from Doliche (Turkey)**. Rostock. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, [s. l.], n. Enschede, p. 195–200, 2013.

IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association). **Simulados de derramamento de óleo**, Londres, IPIECA, 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. ed. São José dos Campos, 2009

JENSEN, John R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

LONGHITANO, George Alfredo. **Vants para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. [s. l.], p. 148, 2010.

LUGNANI, J. B. **Introdução a Fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987.

LÜKŐ, Gabriella. **Analysis of UAV-based topography and river flow measurements**. [s. l.], 2016.

PALHARES, Julio C. P. et al. **Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador**. Comunicado Técnico - EMBRAPA, [s. l.], v. 455, p. 2–5, 2007.

PAULO, Felipe Azevedo; BORGES, Ana Luiza de Oliveira. **Visualização do Escoamento e Perfis de Velocidade em Curva de Sistema de Conduto de Drenagem Pluvial**

Urbana, Porto Alegre, IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2015.

PERKS, Matthew T.; RUSSELL, Andrew J.; LARGE, Andrew R. G. Technical Note: **Advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs)**. Hydrology and Earth System Sciences, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 4005–4015, 2016. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/4005/2016/>>

RUIZ, Luis Fernando Chimelo. **Uma Abordagem De Classificação Da Cobertura Da Terra Em Imagens Obtidas Por Veículo Aéreo Não Tripulado**. 2015. [s. l.], 2015.

SANTOS, Irani et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: LACTEC, 2001.

SDCI (Secretaria de Desenvolvimento e Competitividade Industrial). **Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados**. [s. l.], p. 92, 2017.

SOUZA, ZULCY; FUCHS, RUBENS D.; SANTOS, Afonso H. M. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

SOUZA, Gabriel De. **Análise da Viabilidade do Uso de VANT para Mapeamento Topográfico e de Cobertura e Uso da Terra**. [s. l.], p. 94, 2015.

TAURO, Flavia; PORFIRI, Maurizio; GRIMALDI, Salvatore. **Surface flow measurements from drones**. Journal of Hydrology, [s. l.], v. 540, p. 240–245, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012>>

TÉCNICAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – Escoamento livre**, Rio de Janeiro, 1995.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens**. 2017. [s. l.], 2017.

WATTS, Adam C.; AMBROSIA, Vincent G.; HINKLEY, Everett A. **Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use**. Remote Sensing, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 1671–1692, 2012.

WOLF, P.R.; DEWITT, B.A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in Gis**. 4. ed. ed. New York, 2014

YASTIKLI, N.; BAGCI, I. AND BESER, C. **The processing of image data collected by light UAV systems for GIS Data Capture and Updating.** In: SERVING SOCIETY WITH GEOINFORMATICS. Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, [s. l.], [s.d.], 2017