

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Yuri Batista Ishizawa

**Aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas em
Larga Escala (LSPIV) para Medição de vazão em canal
aberto utilizando plataforma '*open-source*'**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

Yuri Batista Ishizawa

**Aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas em
Larga Escala (LSPIV) para Medição de vazão em canal
aberto utilizando plataforma *'open-source'***

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento.

Área de concentração: Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

I79a Ishizawa, Yuri Batista
 Aplicação de Velocimetria por imagem de
Pártículas em Larga Escala (LSPIV) para medição de
vazão em canal aberto utilizando plataforma 'open-
source' / Yuri Batista Ishizawa; orientador Edson Cezar
Wendland. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2022.

1. Hidráulica. 2. Hidrometria. 3.
Instrumentação. 4. LSPIV. 5. Raspberry. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **YURI BATISTA ISHIZAWA**.

Título da dissertação: “Aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas em Larga Escala (LSPIV) para Medição de vazão em canal aberto utilizando plataforma ‘*open-source*”.

Data da defesa: 05/10/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

__Aprovado__

Prof. Dr. **Johannes Gerson Janzen**
(Universidade Federal do Mato Grosso do Sul/UFMS)

__Aprovado__

Prof. Dr. **Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral**
(Universidade Federal de Pernambuco/UFPE)

__Aprovado__

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico este trabalho às mais de 600 mil vítimas de COVID-19 no Brasil, em especial ao meu melhor amigo, meu pai, Yoshio Ishizawa (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir passar por tudo que passei até aqui com perseverança.

Aos meus pais por sempre confiarem em mim e em meus esforços e por fazerem de tudo para nunca faltasse algo para mim. Agradeço especialmente ao meu melhor amigo, o meu pai, que foi quem me ensinou a ter valores, dignidade e respeito ao próximo. Infelizmente, meu pai não pode estar comigo agora para celebrar esta conquista, mas tenho certeza que, onde ele estiver, está muito orgulhoso do filho que ele criou com muito amor, carinho e amizade.

Agradeço à minha amada Letícia, que esteve sempre ao meu lado durante esses anos de mestrado, me apoiando e incentivando a não desistir nunca. Seu carinho e companheirismo foram essenciais para superar todos os obstáculos.

Aos meus amigos de Aracaju: Alan, Alex, Armando, Daniel, Dayane, Dudu, Elvis, Gabriel, Glauber, Joaquim, Leandro, Luã, Ludmilson, Matheus, Menandro, Murilo, Rodrigo, Sandro e Sávio. Obrigado por me acompanharem até aqui.

Aos amigos do LHC, Alessandra, Alice, Aline, André, Camila, Hélio, Jamil, Jacqueline, Jean, Jullian, Lazarini, Lívia. Um agradecimento especial aos amigos da equipe de monitoramento da Bacia do Ribeirão da Onça, Alan, Bertotto, Kalyl, Érick e Rubens, além dos amigos que estiveram comigo durante o período de isolamento da pandemia, Alex e Dimaghi. Levarei comigo cada memória dos dias que passamos juntos no laboratório.

Aos amigos de outros laboratórios, em especial ao Felipe, Gabriela, Marcus, Tassiana e Thalita, do WadiLab/NIBH e a Lizeth e Pedro, do LabSin.

Aos técnicos do SHS, Roberto Bérghamo e Luis Muzzeti, por toda a ajuda oferecida no desenvolvimento deste trabalho e de outros trabalhos do grupo. O apoio de vocês é fundamental.

Ao professor Dr. Edson Wendland pela oportunidade dada de poder trabalhar no LHC, além do auxílio profissional e pessoal durante todo o mestrado. Obrigado pela paciência, pelos ensinamentos e pelo incentivo, professor.

Às secretárias do PPGSHS, Priscilla, Rose e Sá, pela ajuda, paciência, disposição e empatia para resolver todas as questões burocráticas do programa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao PPGSHS, EESC e USP pela estrutura oferecida para a realização deste projeto.

RESUMO

Ishizawa, Y. B. **Aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas em Larga Escala (LSPIV) para Medição de vazão em canal aberto utilizando plataforma ‘open-source’**. 2022. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O gerenciamento dos recursos hídricos é importante para garantir o desenvolvimento sustentável. Os estudos hidrológicos, que dão base à gestão dos recursos hídricos, levam em conta observações passadas de variáveis hidrometeorológicas em bacias hidrográficas. Contudo, manter redes de monitoramento hidrológico com alta qualidade espacial e temporal torna-se um desafio a ser superado, principalmente por países emergentes como o Brasil, onde os custos de aquisição e manutenção de equipamentos de medição acabam inviabilizando a continuidade de monitoramento. Tendo isso em vista, o objetivo deste trabalho foi utilizar tecnologias ‘open source’ de baixo custo para medição de velocidade superficial e vazão e validar seu uso em laboratório. Foi obtida, como produto desta pesquisa, a possibilidade de diminuição dos custos que envolvem a implantação de redes de monitoramento. Foi construído um sistema de medição com o microcomputador Raspberry e um módulo de captura de imagens para aplicação da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula em Grande Escala (LSPIV, do inglês *Large-Scale Particle Image Velocimetry*). O sistema foi avaliado em um canal aberto de seção transversal de 40 x 50 cm, com um intervalo de vazões entre 9,7 L/s e 34,4 L/s. Os seus resultados foram comparados aos obtidos por um Perfilador Acústico de Correntes Doppler (ADCP, do inglês, *Acoustic Doppler Current Profiler*) através de métricas estatísticas, como a raiz do erro médio quadrático (RMSE), a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o percentual de viés (PBIAS) e análise gráfica dos erros. Os resultados obtidos de vazão foram próximos aos aferidos pelo método ADCP em condições específicas de escoamento que facilitam ao algoritmo reconhecer os padrões de movimentação da água em imagem. No caso de escoamentos com número de Froude maior que 0,15, foram obtidos RMSE igual a 3,87, NSE igual a 0,81 e PBIAS -9,38%. Em contrapartida, para valores de número de Froude menor que 0,15, ou seja, quando a velocidade superficial de escoamento é baixa e os padrões de movimentação da água não são visíveis, os resultados são insatisfatórios, com RMSE igual a 11,76, NSE igual -1,13 e PBIAS -41,63%, o que pode indicar a necessidade de utilização de traçadores artificiais em aplicações com essas condições. Levando em consideração o quanto se tem avançado em termos de poder computacional e como as tecnologias ‘open source’, como o Arduino e o Raspberry, tem se tornado cada vez mais acessíveis, a técnica se mostrou promissora, o que corrobora o avanço de mais pesquisas sobre o assunto.

Palavras-chave: Hidráulica; Hidrometria; Instrumentação; LSPIV; Raspberry.

ABSTRACT

Ishizawa, Y. B. **Applying Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) for flow measurement in open channel with open-source platform.** 2022. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

The water resources management is important to ensure sustainable development. Hydrological studies, which support the water resources management, consider past observations of hydrometeorological variables in watersheds. However, hydrological monitoring networks with high spatial and temporal quality are a challenge to be overcome, especially for emerging countries such as Brazil, where the acquisition and maintenance costs of measurement equipment compromise the monitoring continuity. So, the goal of this work was to use low cost open-source technologies for surface velocity and flow measurement and validate its use in laboratory. It was expected to obtain, as a product of this research, the possibility of reducing the costs involved in the implementation of monitoring networks. A measurement system was built with a Raspberry microcomputer and an image capture module for the application of Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) technique. The system was evaluated in an open channel with a cross section of 40 x 50 cm, with a flow range between 9.7 L/s and 34.4 L/s. These results were compared to those obtained through Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) using statistical metrics such as Root Mean Squared Error (RMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percentage of Bias (PBIAS) and graphical analysis. The flow results obtained were close to those measured by the ADCP method in specific conditions of flow that facilitate the algorithm to recognize the patterns of water movement in image. In the case of flows with Froude number greater than 0.15, RMSE equal to 3.87, NSE equal to 0.81 and PBIAS -9.38% were obtained. On the other hand, for values of Froude number less than 0.15, when the surface runoff velocity is low and the water movement patterns are not visible, the results are unsatisfactory, with RMSE equal to 11.76, NSE equal to -1.13 and PBIAS -41.63%, which may indicate the need for use of artificial tracers in applications on these conditions. Considering how much has been advanced in terms of computational power and as open-source technologies, such as Arduino and Raspberry, have become increasingly accessible, the LSPIV technique has shown promise, which corroborates the advancement of more researches on this subject.

Keywords: Hydraulics; Hydrometry; Instrumentation; LSPIV; Raspberry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração simplificada do ciclo hidrológico.	26
Figura 2 – Ilustração simplificada da parte superficial do ciclo hidrológico.	26
Figura 3 – Calha Parshall.	29
Figura 4 – Transmissão e recepção de um pulso acústico pelo ADCP.	31
Figura 5 – Quantidade de publicações indexadas à plataforma Scopus relacionadas ao termo de busca “LSPIV”, entre os anos 1998 e 2022.	32
Figura 6 – Procedimento para transformação de coordenadas TRC para coordenadas físicas.	35
Figura 7 – Algoritmo geral para processamento de imagem pelo PIV.	36
Figura 8 – (a) Microcontrolador Arduino e (b) Microcomputador Raspberry . . .	38
Figura 9 – Canal de concreto do Laboratório de Hidráulica: à esquerda, seção de 40,0 x 50,0 cm	39
Figura 10 – Vertedor triangular de soleira fina.	40
Figura 11 – Piezômetro utilizado na medição de vazão sobre o vertedor triangular que alimenta o canal.	40
Figura 12 – Comportas manuais para controle de regime de escoamento no canal. A: comporta à montante; B: comporta à justante.	41
Figura 13 – Sontek-IQ Plus: (a) Imagem do catálogo de divulgação do Sontek-IQ Plus e (b) Sontek-IQ Plus instalado no canal.	41
Figura 14 – Sistema de aquisição de imagens: (a) Raspberry Pi Zero W; (b) Raspberry Picam v2	42
Figura 15 – Etapas do trabalho	43
Figura 16 – Conjunto Raspberry Pi Zero W e Raspberry Picam v2 desmontado. . .	44
Figura 17 – Conjunto montado acima do canal.	45
Figura 18 – Conversão de RGB para escala de cinza: (a) ‘frame’ original; (b) ‘frame’ convertido.	46
Figura 19 – Linhas verticais traçadas nas paredes laterais do canal para facilitar a localização dos PCT.	47
Figura 20 – Captura de tela de rotina que grava coordenadas em TRC de pontos clicados em imagens.	47
Figura 21 – Transformação de vetores de velocidade em área de interesse em vetor de velocidade média.	49
Figura 22 – Ortoretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 11 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0,212.	52

Figura 23 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18518 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d’água 18 cm e Froude 0.19 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	53
Figura 24 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18544 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d’água 44 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	53
Figura 25 – Métricas estatísticas calculadas para cada valor de Froude mínimo para separação dos grupos de amostras.	55
Figura 26 – Comparação entre os valores de vazão de referência e a vazão estimada.	56
Figura 27 – Resíduos de cada ponto de vazão de referência, separado por grupo de número de Froude.	56
Figura 28 – Métricas de avaliação: (a) Vazão média em L/s; (b) RMSE; (c) NSE e (d) PBIAS.	57
Figura 29 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 11 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.212.	69
Figura 30 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 27 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.055.	69
Figura 31 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 30 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.047.	70
Figura 32 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 15 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.159.	70
Figura 33 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 30,5 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.055.	71
Figura 34 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 38 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.040.	71
Figura 35 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 16 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.171.	72
Figura 36 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 29,5 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.068.	72
Figura 37 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 39 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.045.	73
Figura 38 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 18 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.193.	73
Figura 39 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 34 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.074.	74
Figura 40 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 44 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.051.	74
Figura 41 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 32 cm de altura de lâmina d’água e Froude 0.120.	75

Figura 42 – Ortoretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 33 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.115.	75
Figura 43 – Ortoretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 42 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.080.	76
Figura 44 – Ortoretificação do primeiro frame captado para a vazão de 34,4 L/s, 32 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.152.	76
Figura 45 – Ortoretificação do primeiro frame captado para a vazão de 34,4 L/s, 38,5 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.115.	77
Figura 46 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09711 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 11 cm e Froude 0.21 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	79
Figura 47 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09727 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 27 cm e Froude 0.06 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	80
Figura 48 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09730 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 30 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	80
Figura 49 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11615 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 15 cm e Froude 0.16 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	81
Figura 50 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11630 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 30,5 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	82
Figura 51 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11638 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 38 cm e Froude 0.04 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	82
Figura 52 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13716 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 16 cm e Froude 0.17 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	83
Figura 53 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13729 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 29,5 cm e Froude 0.07 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	83
Figura 54 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13739 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 39 cm e Froude 0.04 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	84
Figura 55 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18518 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 18 cm e Froude 0.19 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	84

Figura 56 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18534 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d’água 34 cm e Froude 0.07 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	85
Figura 57 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18544 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d’água 44 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	85
Figura 58 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27332 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d’água 32 cm e Froude 0.12 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	86
Figura 59 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27333 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d’água 33 cm e Froude 0.11 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	86
Figura 60 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27342 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d’água 42 cm e Froude 0.08 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	87
Figura 61 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q34432 com Vazão de 34,4 L/s, altura de lâmina d’água 32 cm e Froude 0.15 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	87
Figura 62 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q34438 com Vazão de 34,4 L/s, altura de lâmina d’água 38,5 cm e Froude 0.11 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AI	Área de Interrogação
CSI	<i>Camera Serial Interface</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
LHC	Laboratório de Hidráulica Computacional
LSPIV	<i>Large-Scale Particle Image Velocimetry</i>
PCT	Ponto de Controle Topográfico
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídrico
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
STIV	Space-Time Image Velocimetry
TRC	Tubos de Caios Catódicos
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivo Geral	23
2.2	Objetivos Específicos	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	Ciclo hidrológico	25
3.2	Gestão dos recursos hídricos	27
3.3	Quantificação do escoamento superficial	28
3.3.1	Flutuador	28
3.3.2	Calha Parshall	28
3.3.3	Molinete hidrométrico	29
3.3.4	Método acústico	30
3.3.5	Velocimetria por Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV)	31
3.3.5.1	Ortorretificação	34
3.3.5.2	Cálculo do deslocamento e geração de campos de vetores	35
3.3.5.3	Determinação da vazão	36
3.4	Plataformas <i>'open-source'</i> e Raspberry	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Materiais	39
4.1.1	Laboratório	39
4.1.2	Configuração do sistema de aquisição de imagens	41
4.2	Métodos	42
4.2.1	Intervalo de vazões	43
4.2.2	Aquisição de imagens	44
4.2.3	Pré-processamento das imagens	45
4.2.3.1	Extração de sequência de frames e conversão para escala de cinza	45
4.2.4	Processamento LSPIV	46
4.2.4.1	Ortorretificação dos frames	46
4.2.4.2	Obtenção dos vetores de velocidade	47
4.2.4.3	Quantificação da vazão	48
4.2.5	Análise estatística	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Vazões de referência e alturas de lâmina d'água	51

5.2	Ortorretificação e obtenção dos vetores de velocidade	51
5.3	Quantificação da vazão	54
5.4	Métricas estatísticas	57
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	67
	APÊNDICE A – RESULTADOS DA ORTORREFICAÇÃO DOS PRIMEIROS FRAMES DE CADA VÍDEO CAPTADO	69
	APÊNDICE B – CAMPOS DE VELOCIDADES E SEÇÕES TRANSVERSAS CONSIDERADAS NO CÁLCULO DA VAZÃO DAS AMOSTRAS	79

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a humanidade em diversas atividades, desde suas necessidades fisiológicas básicas até o uso direto em processos industriais. Porém, apenas uma pequena parcela da água existente no planeta encontra-se na forma de água doce disponível na superfície, em rios, lagos e reservatórios (OKI; KANAE, 2006). Em diversas partes do mundo, muitas pessoas sofrem com o problema da escassez hídrica e a previsão é que a situação piore, se for mantida a tendência de aumento populacional e de consumo (MOSTERT, 2003). A situação pode ficar ainda mais crítica, levando em conta que há projeções que indicam que a demanda de água da Terra irá aumentar em cerca de 55%, considerando o período de 2000 a 2050 (ISLAM; KARIM, 2019).

Isso salienta a importância do gerenciamento ideal dos recursos hídricos, que deve ser baseado em estudos hidrológicos que consideram observações efetuadas no passado (SILVA *et al.*, 2006). Portanto, destaca-se a importância da criação e manutenção de redes de monitoramento que possam fornecer dados confiáveis, com qualidade espaço-temporal satisfatória.

Uma das variáveis hidrológicas a ser medida nas redes de monitoramento é o escoamento superficial. Hoje, há diversos métodos para quantificá-lo. Cada método tem suas características de aplicação, vantagens, desvantagens e limitações. Em geral, os métodos mais acurados – com tecnologias mais avançadas – possuem custo de implantação e manutenção relativamente altos.

Consequentemente, operadores de monitoramento hidrológico de países emergentes, como o Brasil, em geral, têm mais dificuldades para adquirir e manter redes de monitoramento de alta qualidade. Isso faz com que os dados hidrológicos sejam imprecisos e baseados em monitoramentos isolados (FELL; PEAD; WINTER, 2019). Nesta “era do Arduino” (CRESSEY, 2017), com a ascensão do uso de sistemas ‘*open-source*’ em diversas aplicações, surge a oportunidade de adotar tecnologias inovadoras e de baixo custo no monitoramento de variáveis ambientais (TAURO *et al.*, 2018; BLÖSCHL *et al.*, 2019).

Dito isso, é justificada a relevância deste trabalho, que busca facilitar e diminuir os custos de implantação de futuras estações de monitoramento fluviométrico, implementando um sistema de medição de vazão de baixo custo e utilizando ‘*hardwares*’ e ‘*softwares*’ ‘*open-source*’.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a utilização da técnica de visão computacional *Large Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) para a quantificação da vazão em canais abertos, utilizando tecnologias ‘*open-source*’ de baixo custo.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i. Confeccionar sistema de baixo custo para medição de vazão em canais abertos, utilizando o sistema *opensource* Raspberry e módulo de captação de imagem;
- ii. Quantificar, em laboratório, velocidades superficiais e vazões com o sistema e validar seu uso, utilizando a linguagem de programação Python;
- iii. Comparar os resultados obtidos frente a outras formas de medição de vazão mais consolidadas na literatura e no mercado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclo hidrológico

Para Tucci (2015, p. 25), Hidrologia é “a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente”. A Hidrologia está direcionada a problemas envolvendo os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Para o melhor entendimento desses problemas, é necessário conhecer o funcionamento do ciclo hidrológico.

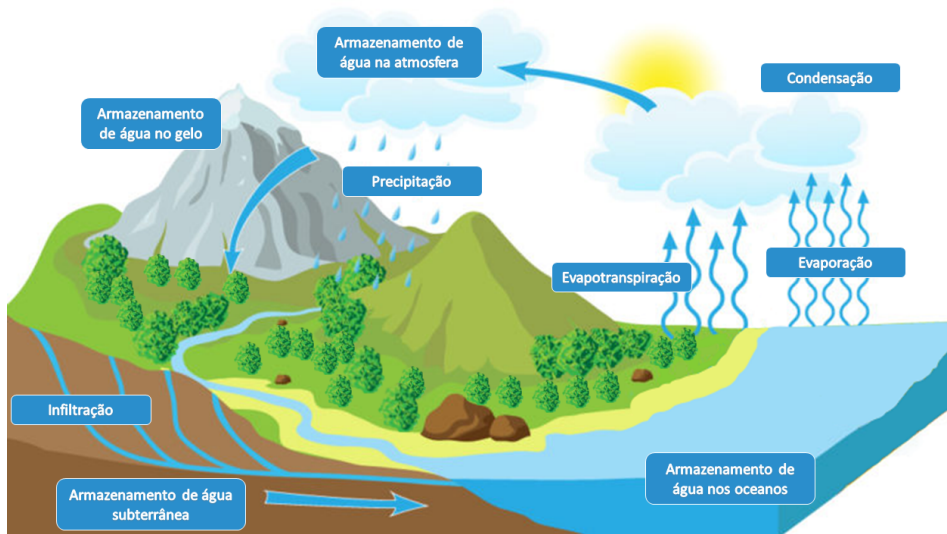
“O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (TUCCI, 2015, p. 35). Em suas três fases – sólida, líquida e gasosa, a quantidade de água no planeta tem se mantido constante, desde o aparecimento do Homem. Em suas formas líquidas e sólidas, cobre mais de 2/3 da superfície da Terra (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

Geralmente, o ciclo hidrológico funciona de modo que a energia solar aquece o ar, o solo e a água superficial. Essa energia resulta na evaporação da água no estado líquido e na evapotranspiração da água presente no solo, através das plantas. Em seguida, o vapor de água é transportado pelo ar, podendo condensar e formar nuvens. Então, em circunstâncias nas quais haja alta presença de umidade e núcleos de condensação, é possível que ocorra o agrupamento de microgotículas de água. Assim, após a formação de grandes quantidades de gotas com peso suficiente para que a força da gravidade supere a ação de movimentos ascendentes atmosféricos, ocorre o retorno da água à superfície terrestre, denominado precipitação. Essa precipitação pode ocorrer em forma de chuva, neve ou granizo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015; TUCCI, 2015). Na Figura 1 está ilustrada uma simplificação do ciclo hidrológico.

A superfície terrestre é composta por continentes e oceanos. A circulação de água no interior e superfície dos solos e rochas, os oceanos e os seres vivos são importantes constituintes do ciclo hidrológico. Segundo Miranda, Oliveira e Silva (2010), o ciclo hidrológico é constituído por um processo natural, em que a água parte de um estágio inicial até alcançar um estágio final, igual à sua posição primitiva.

Ao nível global, o ciclo hidrológico é considerado fechado. Em escala de bacia hidrográfica, é comum, em estudos hidrológicos, considerar a simplificação que o ciclo funciona como um processo fechado, apesar de, ao nível local, o ciclo ser aberto. A água que evapora em um determinado local, não necessariamente precipitará nesse mesmo local, da mesma forma que apenas parte da água que precipita em um continente evapora ali mesmo. A outra parte é escoada aos oceanos (TUCCI, 2015). Levando-se em conta somente

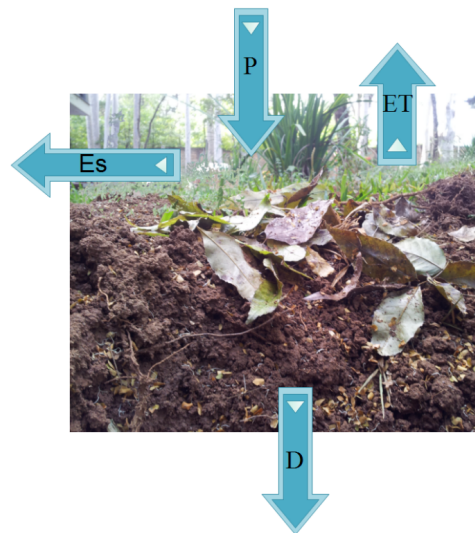
Figura 1 – Ilustração simplificada do ciclo hidrológico.



Fonte: Adaptado de Universia Brasil (2019).

a parte superficial da bacia (Figura 2), a Equação 3.1 representa o processo fechado de um ciclo hidrológico em uma bacia, através de um balanço (hídrico) de massa.

Figura 2 – Ilustração simplificada da parte superficial do ciclo hidrológico.



Fonte: Melo (2013).

$$P = E_s + ET + \Delta S + D \quad (3.1)$$

sendo P a precipitação total sobre a bacia, E_s o escoamento superficial direto total que passa pelo exutório, ET a evapotranspiração total, ΔS a variação no armazenamento de água total, e D é a percolação da água na bacia.

Considerando as zonas saturada e não-saturada do solo em uma bacia, simplificada, o balanço hídrico pode ser representado pela Equação 3.2

$$P + Q_e = E_s + ET + \Delta S \quad (3.2)$$

em que Q_e é o escoamento superficial e subterrâneo que entra na bacia e E_s é o escoamento superficial e subterrâneo que sai da bacia.

3.2 Gestão dos recursos hídricos

A partir do início da década de 1990, o embasamento do recorte territorial das bacias hidrográficas na gestão de recursos hídricos ganhou força após o acordo dos Princípios de Dublin, em preparação à reunião Rio-92. Hoje, pode-se considerar que:

Há certamente dificuldades em se lidar com esse recorte geográfico, visto que os recursos hídricos exigem a gestão compartilhada com a administração pública, órgãos de saneamento, instituições ligadas à atividade agrícola, gestão ambiental, entre outros e a cada um desses setores corresponde uma divisão administrativa certamente distinta da bacia hidrográfica (PORTO; PORTO, 2008, p. 45).

Surge então a Política Nacional de Recursos Hídrico (PNRH) – Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997), que define critérios e diretrizes para a gestão dos recursos hídricos. “A partir da aprovação dessa lei, o país passa a dispor de um instrumento legal que visa garantir às gerações futuras a disponibilidade do recurso hídrico” (PORTO; PORTO, 2008, p. 48).

A PNRH estabelece como fundamentos: a água como um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo das águas; a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH); e a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997).

O SNGRH tem como instrumentos para viabilização de sua implantação os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, a outorga de direito de uso e a cobrança pelo uso da água. Qualquer utilização de recursos hídricos está submetida à obtenção da outorga de uso da água, sendo uma forma de autorização condicionada de uso, que pode ser emitida pela União ou pelos Estados. Essa autorização é concedida “[...] mediante o conhecimento das disponibilidades hídricas (redes de monitoramento

hidrológico) e do cadastramento das demandas (usos e usuários outorgados) [...]” (PORTO; PORTO, 2008).

No Brasil, em geral, para a gestão de recursos hídricos, as disponibilidades hídricas superficiais de um manancial são estimadas por vazões mínimas de referência, que podem ser: Q_{90} e Q_{95} (vazões de permanência em uma percentagem de tempo) e $Q_{7,10}$ (vazão mínima durante 7 dias consecutivos em um período de retorno de 10 anos). Esses indicadores são obtidos através da análise de dados observados de vazão (SILVA *et al.*, 2006). Salienta-se então a importância do monitoramento hidrológico e da quantificação do escoamento superficial de bacias.

3.3 Quantificação do escoamento superficial

Atualmente, há na literatura diversas formas disponíveis para a quantificação de escoamento superficial. Alguns métodos consideram grandezas geométricas da seção de escoamento, como área, perímetro molhado, raio hidráulico, largura, distância entre duas verticais e área entre duas verticais, enquanto outros consideram grandezas referentes ao escoamento, como velocidade média na seção, velocidade pontual numa vertical, velocidade superficial, velocidade de fundo (SANTOS *et al.*, 2001). Alguns desses métodos, inclusive, são padronizados tanto nacionalmente (ABNT, 2008; ABNT, 2011) quanto internacionalmente (ISO, 2007).

3.3.1 Flutuador

O método flutuador é um método simples de medição de vazão, o qual necessita apenas do uso de trenas, réguas, cronômetro e um objeto que sirva como flutuador na água – que pode ser uma laranja, uma bola de ping-pong, etc. (DOHNER *et al.*, 1997). Esse método considera a solução da Equação 3.3.

$$Q = \frac{A \cdot L \cdot C}{t} \quad (3.3)$$

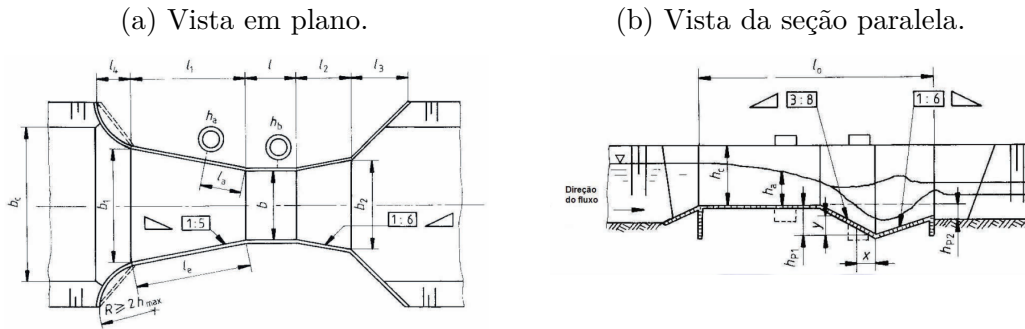
sendo Q a vazão do canal onde se deseja medir em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, A a área da seção transversal do canal (largura multiplicada pela altura média da lâmina de água) em m^2 , L o comprimento percorrido pelo objeto flutuador em m, C um coeficiente que relaciona a velocidade média com a velocidade superficial do escoamento e t o tempo, em s, para o flutuador percorrer o comprimento L .

3.3.2 Calha Parshall

A Calha Parshall é uma estrutura de medição de vazão construída sobre um canal – sem modificar, drasticamente, suas condições naturais (SANTOS *et al.*, 2001). A NBRISO9826 (ABNT, 2008, p.1) define a calha Parshall (Figura 3) como uma “calha de

medição que possui uma seção de entrada convergente com o fundo em nível, uma curta seção estrangulada (garganta) com o fundo com declividade de 3:8 e uma seção de saída divergente com o fundo com aclividade de 1:6”.

Figura 3 – Calha Parshall.



Fonte: ABNT (2008).

A medição de vazão em uma calha Parshall operando em escoamento livre é feita utilizando a Equação 3.4.

$$Q = C_D \cdot b \cdot H_a^n \quad (3.4)$$

sendo Q a vazão em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, C_D o coeficiente de descarga, b a largura da garganta em m, H_a a lâmina de água na seção de entrada em m e n um expoente dependente de b (ABNT, 2008).

Para condições de submergência, ou seja, quando a altura da lâmina de água à montante é maior que 60% da altura à justante da garganta, deve ser realizada uma correção da vazão. Para mais detalhes desse procedimento, deve-se consultar ábacos encontrados na literatura (SKOGERBOE *et al.*, 1966; SANTOS *et al.*, 2001; ABNT, 2008; ROSA, 2018).

3.3.3 Molinete hidrométrico

O método de medição de vazão com molinete consiste na obtenção de velocidades pontuais ao longo de uma seção transversal do corpo hídrico. O aparato utilizado consiste em uma hélice e um conta-giros acoplado a um cronômetro de contagem regressiva (MALDONADO, 2009).

Posiciona-se a hélice na água e então, após o acionamento do cronômetro, o conta-giros inicia a contagem no número de rotações da hélice. Quando o cronômetro atinge o zero, registra-se a quantidade de voltas que a hélice efetuou nesse intervalo de tempo. Utiliza-se a Equação 3.5 para calcular a velocidade no ponto da seção onde a hélice se encontrava.

$$v = e \cdot N + f \quad (3.5)$$

onde v é a velocidade pontual na seção de escoamento em m/s, e e f são constantes de calibração características do molinete que relacionam a velocidade pontual ao número de rotações da hélice (SANTOS *et al.*, 2001).

Para estimar a vazão, é preciso calcular a área da seção transversal do canal em que é efetuada a medição e a velocidade média do escoamento da água que a atravessa. Portanto, faz-se necessário determinar as larguras e as profundidades – também conhecidas como verticais – de suas subseções. Todavia, há critérios práticos estabelecidos para a determinação da quantidade de verticais necessárias para a estimativa da velocidade média (SILVA *et al.*, 2006; ISO, 2007; MALDONADO, 2009). A vazão, então, pode ser estimada pela Equação 3.6.

$$Q = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot v_i) \quad (3.6)$$

sendo Q a vazão estimada em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, A_i a área da subseção transversal i em m^2 , v_i a velocidade média da subseção transversal i em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ e n a quantidade de subseções transversais (adimensional).

3.3.4 Método acústico

O método acústico trata-se de um método de medição de vazão a partir da transmissão e recepção de pulsações acústicas, originalmente desenvolvido para medição de velocidades de correntes marítimas e hoje aplicado vastamente na medição de velocidades em rios e oceanos (ADLER; NICODEMUS, 2001; SCHOTT *et al.*, 2005; NIHEI; KIMIZU, 2008; Le Coz; PIERREFEU; PAQUIER, 2008; MALDONADO, 2009; JOHNSON; COWEN, 2016; SENTCHEV; YAREMCHUK, 2016; ROSA, 2018). O método é baseado no efeito Doppler, descoberto por Christian Johann Doppler, em 1842. O efeito Doppler é um fenômeno físico que pode ser percebido na alteração da frequência de captação de ondas, conforme a velocidade de deslocamento dos corpos emissores ou receptores de tais ondas. A mudança de frequência de recepção de uma onda sonora causado pelo efeito Doppler pode ser calculada a partir da Equação 3.7.

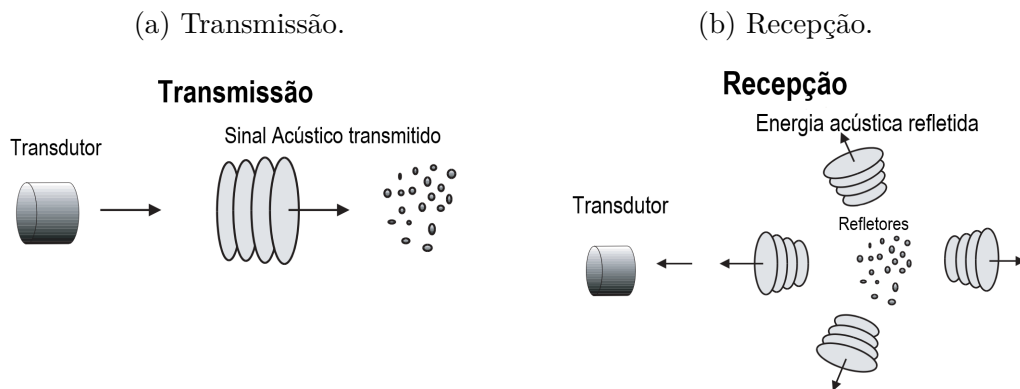
$$F_D = F_S \left(\frac{V}{C} \right) \quad (3.7)$$

sendo F_D a frequência de recepção alterada pelo efeito Doppler em Hz, F_S a frequência de transmissão da onda sonora em Hz, V a velocidade relativa entre o corpo transmissor e o corpo receptor da onda em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ e C a velocidade do som no meio onde a onda se propaga em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Para o cálculo da velocidade do escoamento e da geometria da seção transversal, é utilizado um equipamento denominado Perfilador Acústico de Correntes Doppler (ADCP,

do inglês, *Acoustic Doppler Current Profiler*) (SIMPSON, 2001). Atualmente, o ADCP é um dos equipamentos mais precisos e rápidos disponíveis para medição de vazão (MALDONADO, 2009). Entretanto, é também um dos equipamentos com custo mais elevado, tanto para aquisição quanto para manutenção. O ADCP possui transdutores de emissão que transmitem pulsos acústicos que refletem em corpos refletivos, que podem ser partículas ou bolhas presentes na água, e retornam aos transdutores de recepção (RIBEIRO, 1999; SIMPSON, 2001), porém, em geral, com menor energia, pois parte é absorvida pelas partículas ou refletidas em outras direções, como ilustrado na Figura 4

Figura 4 – Transmissão e recepção de um pulso acústico pelo ADCP.



Fonte: Adaptado de Simpson (2001).

O ADCP tanto transmite quanto recebe o pulso acústico refletido. Portanto, a onda sonora sofre o efeito por duas vezes – na ida até os corpos refletivos e na volta do sinal até o transdutor. Logo, a Equação 3.7 se torna a Equação 3.8.

$$F_D = 2 \cdot F_S \left(\frac{V}{C} \right) \quad (3.8)$$

Considerando que uma onda sonora é emitida em uma direção que forma um ângulo θ com a direção de movimento de uma partícula refletora – que aqui está pressuposta igual à direção do escoamento da água –, logo, a frequência de recepção modificada pelo efeito Doppler é calculada pela Equação 3.9.

$$F_D = 2 \cdot F_S \left(\frac{V}{C} \right) \cos(\theta) \quad (3.9)$$

Para medição de componentes de velocidade tridimensionais, é necessário utilizar um ADCP com, pelo menos, três transdutores (SIMPSON, 2001; ROSA, 2018).

3.3.5 Velocimetria por Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV)

A técnica denominada Velocimetria por Imagem de Partícula em Grande Escala (LSPIV, do inglês, *Large-Scale Particle Image Velocimetry*) é um método não-intrusivo de

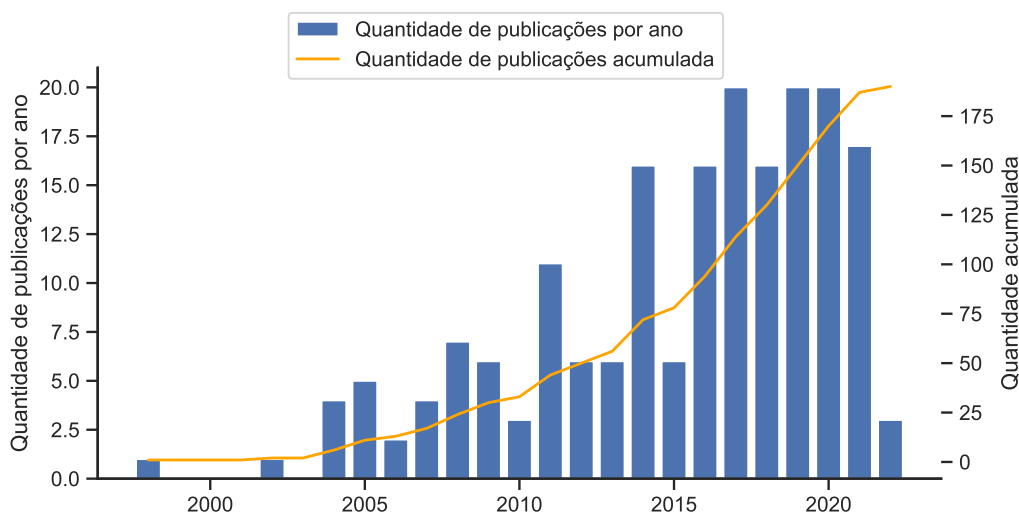
medição de velocidade superficial de água em escoamento livre. A LSPIV é uma extensão da velocimetria por imagem de partícula (PIV, do inglês, ‘*Particle Image Velocimetry*’), que proporciona a geração de campos de velocidade a partir de imagens efetuadas tanto em laboratório quanto em campo (CREUTIN *et al.*, 2003).

Um típico sistema de LSPIV utiliza câmeras de vídeo para a aquisição de imagens da superfície da água. Então, métodos estatísticos (correlação cruzada) são executados repetidamente para estimar o deslocamento de traçadores naturais (padrões de turbulência, ondulações, folhas, entre outros) entre duas sucessivas imagens e obter a distribuição da velocidade da superfície da água (RAN *et al.*, 2016).

A aplicação da LSPIV começou a ser implementada no final do século XX com Fujita, Muste e Kruger (1998). Thielicke e Stamhuis (2014) propuseram a criação de uma interface gráfica de usuário (GUI, do inglês, ‘*Graphical User Interface*’) desenvolvida em ambiente MATLAB (MATLAB, 2010) para realização de análises de PIV, denominada PIVLab. Em seguida, Patalano, García e Rodríguez (2017) desenvolveram, também em ambiente MATLAB, o *software* RIVeR, especificamente para análise de velocidade superficial de escoamento de água em canais abertos.

É possível observar na Figura 5 a quantidade de publicações indexadas à plataforma Scopus relacionadas aos termos de busca “LSPIV” e “*Large-Scale Particle Image Velocimetry*”, entre os anos de 1998 e 2022. Não foram encontradas, indexadas à base Scopus, publicações em periódicos brasileiros envolvendo os termos de busca.

Figura 5 – Quantidade de publicações indexadas à plataforma Scopus relacionadas ao termo de busca “LSPIV”, entre os anos 1998 e 2022.



Fonte: Autor.

As características mais atrativas desse método para a comunidade da engenharia hidráulica são sua alta adaptabilidade a diferentes condições e seu custo razoavelmente

baixo (FLEIT; BARANYA, 2019). Além disso, a utilização da LSPIV pode facilitar a quantificação de vazão em eventos de cheia, nos quais é dispendioso e perigoso realizar a medição com métodos mais tradicionais (Le Coz *et al.*, 2010). Na literatura, há diversos exemplos de aplicação da LSPIV, como:

- Lee *et al.* (2010) aplicaram o LSPIV com uma câmera digital comum para análise da velocidade de escoamento e altura da lâmina de água em canais de irrigação e, assim, obtenção da vazão. Os autores compararam os valores de vazão aos obtidos por calhas Parshall sendo observada uma diferença de cerca de 5% nos resultados. Entretanto, foi ressaltado que, apesar da técnica poder ser utilizada com equipamentos de baixo custo e de fácil instalação, a qualidade das imagens tem muita influência sobre a qualidade dos resultados obtidos;
- Dramais *et al.* (2011) implementaram um sistema de LSPIV móvel num canal natural da França para medição de vazão e aprimoramento de curvas-chave. Os autores perceberam que o erro multiplicativo conduzido pelo coeficiente de velocidade mostrou-se uma fonte de erros maior que erros causados por incerteza na medição de nível de água, deformações na superfície livre, número de pares de imagens utilizadas, ausência ou presença de traçadores artificiais e perfis de batimetria de seção transversal. Todos esses erros são estimados em cerca de 1% a 5% da vazão, enquanto a variabilidade do coeficiente de velocidade encontra-se entre 10% e 15%, a depender das características do escoamento;
- Tsubaki, Fujita e Tsutsumi (2011) utilizaram LSPIV e Velocimetria de Imagem Espaço-Tempo (STIV, do inglês, *Space-Time Image Velocimetry*) com um circuito televisivo fechado para medir vazão em um canal urbano e compararam com medições realizadas pelo método flutuador convencional. Os resultados obtidos mostraram que ambas as técnicas – a LSPIV e a STIV subestimaram a vazão em cerca de 26% e 9%, respectivamente – são promissoras, porém é recomendado que as próximas pesquisas busquem utilizar outros métodos de medição de vazão para comparação, como o ADCP.

Outras aplicações mais recentes do LSPIV envolvem medição de escoamento de águas rasas (NOVAK *et al.*, 2017), análise de escoamento superficial durante tufões (HUANG; YOUNG; LIU, 2018), medição de turbulência em superfícies de rios e estimativa de altura de lâmina de água (JIN; LIAO, 2019), estimativa de velocidade superficial da água em bacias de detenção (ZHU; GISLAIN, 2019), medição de vazão de rios em locais montanhosos (LI; LIAO; RAN, 2019) e uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) na aquisição das imagens para obtenção de velocidade superficial (KOUTALAKIS; TZORAKI; ZAIMES, 2019).

3.3.5.1 Ortorretificação

Em geral, câmeras utilizadas na LSPIV captam imagens com ângulos oblíquos à superfície de escoamento. Isso torna fundamental outro passo a ser realizado no processamento da imagem, a orrorretificação (MUSTE; HO; KIM, 2011). Esse processo é baseado na transformação linear direta proposta por Abdel-Aziz e Karara (2015)¹.

Essencialmente, um ponto em uma imagem pode ser representado por dois sistemas de coordenadas distintos, as coordenadas (x , y e z) em tubo de raios catódicos (TRC) e coordenadas físicas (XYZ). Ambos estão relacionados através de uma matriz de transformação (FUJITA; MUSTE; KRUGER, 1998; FLEIT; BARANYA, 2019). Considerando coordenadas físicas dos pontos escolhidas de tal modo que o eixo Z é vertical – logo, o plano XY é horizontal –, simplificadamente, a transformação de coordenadas pode ser representada pelas Equações 3.10 e 3.11.

$$X = \frac{b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3}{b_4 \cdot x + b_5 \cdot y + 1} \quad (3.10)$$

$$Y = \frac{b_6 \cdot x + b_7 \cdot y + b_8}{b_4 \cdot x + b_5 \cdot y + 1} \quad (3.11)$$

onde b_i ($i = 1, 2, 3...8$) são coeficientes de transformação determinados pelo métodos de mínimos quadrados, utilizando N pares de pontos de coordenadas conhecidas $[(x_1, y_1), (X_1, Y_1)], \dots, [(x_N, y_N), (X_N, Y_N)]$. Os coeficientes de transformação podem ser obtidos resolvendo-se a Equação 3.12 (FUJITA; MUSTE; KRUGER, 1998).

$$TB = Z \quad (3.12)$$

onde

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & -x_1 X_1 & -y_1 X_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 & -x_N X_N & -y_N X_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 Y_1 & -y_1 Y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -x_N Y_N & -y_N Y_N & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

¹ Este trabalho é uma reprodução exata do trabalho original publicado anteriormente pelos autores Abdel-Aziz e Karara²(1971), com pequenas correções textuais e de formatação.

² ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H.M. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. In: SYMPOSIUM ON CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY, 1971, Urbana. **Anais...** Urbana: PE&RS, 1971, p. 1–18.

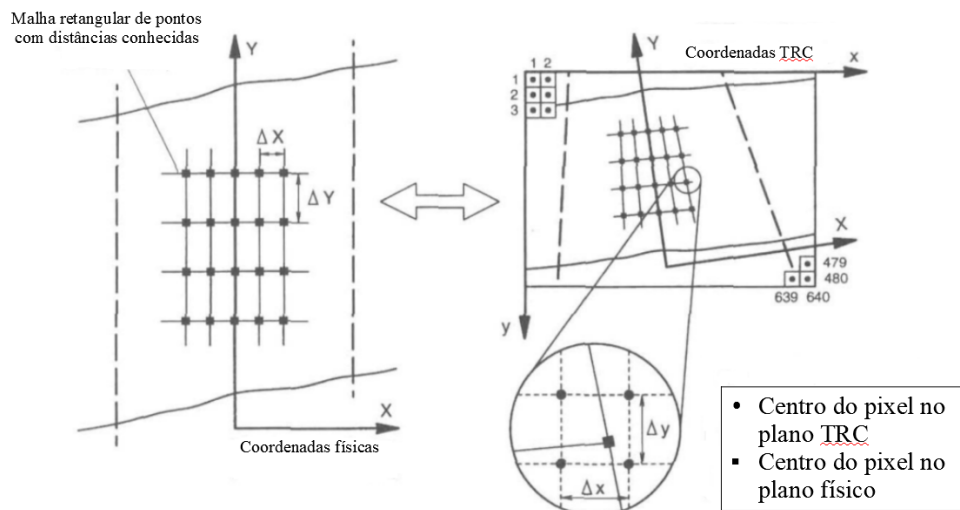
$$B = [b_1, b_2, \dots, b_8]^T \quad (3.14)$$

e

$$Z = [X_1, X_2, \dots, X_N \quad Y_1, Y_2, \dots, Y_N]^T \quad (3.15)$$

Nota-se que é preciso que haja, pelo menos, quatro Pontos de Controle Topográficos (PCT) com coordenadas conhecidas em ambos os sistemas para solucionar a Equação 3.12. A relação entre as coordenadas físicas e TRC está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Procedimento para transformação de coordenadas TRC para coordenadas físicas.



Fonte: Adaptado de Fujita, Muste e Kruger (1998).

3.3.5.2 Cálculo do deslocamento e geração de campos de vetores

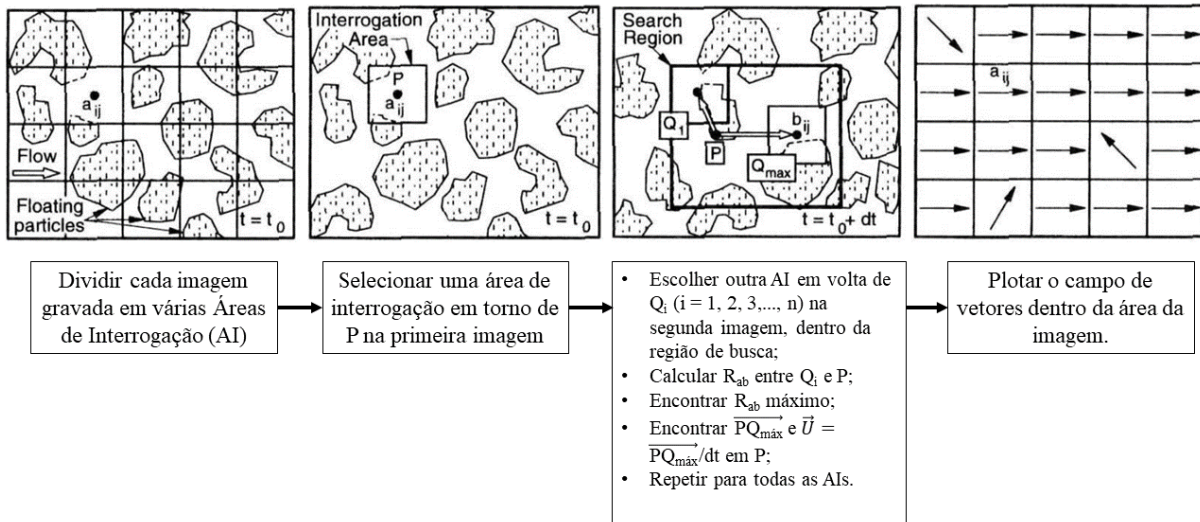
As imagens ortorretificadas são divididas em várias Áreas de Interrogação (AI). A correlação cruzada é computada entre uma AI em uma primeira imagem e AIs dentro de uma região de busca na segunda imagem. O par de partículas (AIs) que apresentarem o maior coeficiente de correlação é selecionado e, a partir delas, é gerado um vetor de velocidades. (FUJITA; MUSTE; KRUGER, 1998). O coeficiente de correlação cruzada, R_{ab} , é definido pela Equação 3.16.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} \{ (a_{ij} - \bar{a}_{ij}) \cdot (b_{ij} - \bar{b}_{ij}) \}}{\left\{ \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \cdot \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right\}^{1/2}} \quad (3.16)$$

onde MX e MY são os tamanhos das AI e a_{ij} e b_{ij} são as distribuições das intensidades no nível de cinza em duas áreas de interrogação separadas por um intervalo de tempo dt .

A barra superior indica o valor médio da intensidade dentro da AI (FUJITA; MUSTE; KRUGER, 1998). Na Figura 7 está ilustrado o esquema de abordagem do método de correlação cruzada de imagem.

Figura 7 – Algoritmo geral para processamento de imagem pelo PIV.



Fonte: Adaptado de Fujita, Muste e Kruger (1998).

Devido ao método probabilístico utilizado na determinação do deslocamento, imperfeições na aquisição das imagens ou outros problemas que podem comprometer a qualidade das imagens, alguns vetores podem ser retornados com erros de direção ou sentido. Portanto, é necessário realizar um pós-processamento dos dados (FUJITA; MUSTE; KRUGER, 1998). Zhen *et al.* (2017) desenvolveram um filtro digital não-linear para correção do campo de vetores de velocidade gerados, aumentando a taxa de acerto da LSPIV de 83% para 92%.

3.3.5.3 Determinação da vazão

O cálculo do volume de água por tempo (vazão) que passa através de uma seção transversal em um rio pode ser efetuado através do método velocidade-área, semelhante ao procedimento realizado na medição de vazão com o molinete hidrométrico. Logo, aquela pode ser estimada pela Equação 3.17.

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i \quad (3.17)$$

onde Q é a vazão total através de uma seção transversal designada, a_i é a área da subseção i e v_i é a velocidade média em cada subseção. A velocidade média pode ser estimada

através da Equação 3.18.

$$v_i = k \cdot v_s \quad (3.18)$$

sendo k a relação entre a velocidade superficial v_s e a velocidade média v_i em uma subseção de escoamento. O coeficiente k depende de características específicas do canal e das condições de escoamento. Na literatura, são encontrados vários que variam entre 0,76 a 0,90 (RAN *et al.*, 2016).

De acordo com Muste, Ho e Kim (2011), a estimativa do coeficiente de velocidade pode ser uma fonte de erros sistemáticos multiplicativos com alta influência nos resultados. Há o consenso, em diversos estudos (CREUTIN *et al.*, 2003; Le Coz *et al.*, 2010; GUNAWAN *et al.*, 2012; RAN *et al.*, 2016; JIN; LIAO, 2019; KOUTALAKIS; TZORAKI; ZAIMES, 2019), assumindo que o perfil de velocidades em uma subseção transversal é logarítmico, o valor padrão de 0,85 é aceitável, com ressalva para a importância da análise caso-a-caso de sua variação.

3.4 Plataformas ‘open-source’ e Raspberry

O alto custo de aquisição de alguns dos equipamentos citados na seção 3.3, torna-se uma barreira para os hidrólogos, em especial os oriundos de países emergentes – como o Brasil. Por outro lado, isso incita o desenvolvimento de tecnologias próprias de baixo custo, a partir de ideias inovadoras e multidisciplinares (TAURO *et al.*, 2018). Nesse contexto, junto à ascensão do movimento ‘open-source’, surge a motivação para utilização dos microcontroladores e microcomputadores de baixo custo, como o Arduino[®] e o Raspberry[®], respectivamente.

O surgimento do conceito de redes de sensores ambientais de baixo custo na literatura se dá por volta de 2004, coincidentemente, no mesmo ano em que começam a ser fabricadas as primeiras placas do microcontrolador Arduino e apresentou um aumento significativo a partir do ano de 2012, com o advento do microcomputador Raspberry (MAO *et al.*, 2019). O Arduino (Figura 8a) e o Raspberry (Figura 8b) têm se mostrado tecnologias oportunas para melhoria da resolução espacial e temporal do sensoriamento ambiental (TURNER *et al.*, 2019). Ambos têm sido utilizados em diversas aplicações ambientais, como: estações meteorológicas de baixo custo (FISHER; GOULD, 2012; PALLUGNA *et al.*, 2013; HUND; JOHNSON; KEDDIE, 2016) e sistemas de alerta de tempestades e inundações (XU *et al.*, 2016; SATRIA *et al.*, 2018). A vantagem do Raspberry sobre o Arduino é o fato da possibilidade de utilizá-lo embarcadamente com sistemas operacionais baseados no *kernel Linux*.

Figura 8 – (a) Microcontrolador Arduino e (b) Microcomputador Raspberry



(a)

Fonte: Arduino (2019)



(b)

Fonte: Raspberry (2022a).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

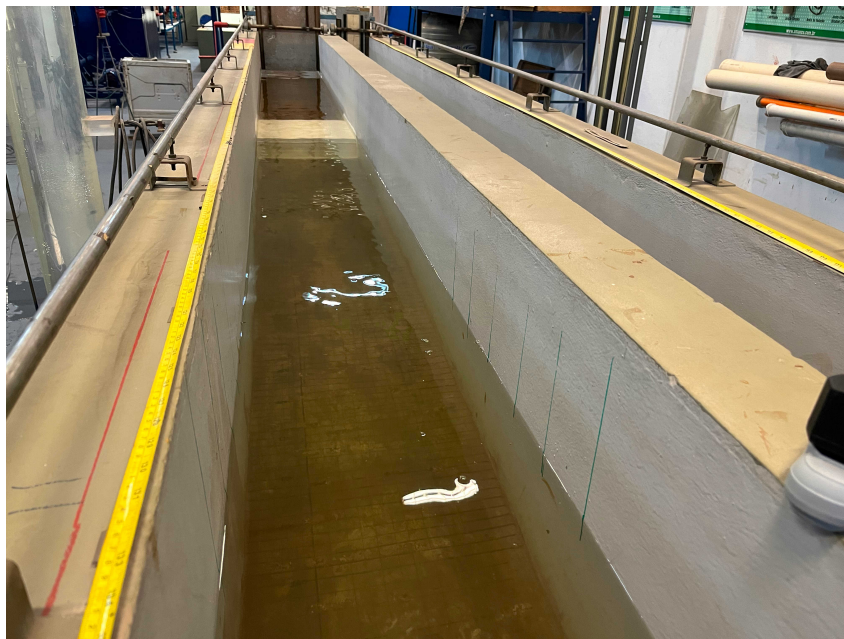
4.1 Materiais

4.1.1 Laboratório

A concepção e montagem do sistema de medição, desde o *hardware* ao *software*, foi realizada no Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) e sua validação e calibração foram feitas no Laboratório de Hidráulica. Ambos pertencem ao Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

O Laboratório de Hidráulica conta com dois canais retangulares de concreto. O canal utilizado nesta pesquisa (à esquerda na Figura 9) possui seção transversal retangular com 40,0 cm de largura por 50,0 cm de altura. Ele é alimentado por um reservatório elevado com recirculação de água. É possível regular a vazão que passa sobre o canal através de um registro de gaveta.

Figura 9 – Canal de concreto do Laboratório de Hidráulica



Fonte: Autor.

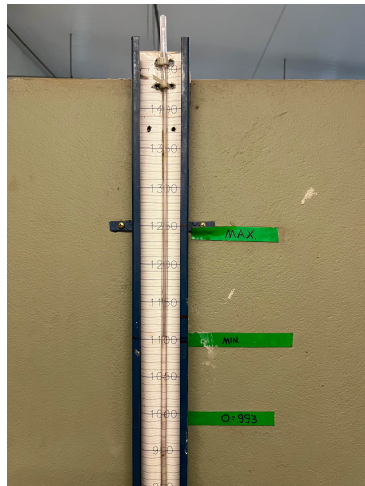
Antes de chegar ao canal, a água passa por um vertedor triangular de soleira fina (Figura 10), onde também é possível realizar medições de vazão, sabendo a altura da lâmina d'água através de um piezômetro instalado próximo ao vertedor (Figura 11). O piezômetro foi utilizado apenas para auxiliar nas manobras de abertura e fechamento do registro de gaveta, a fim de controlar a vazão que estava sendo medida.

Figura 10 – Vertedor triangular de soleira fina.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Piezômetro utilizado na medição de vazão sobre o vertedor triangular que alimenta o canal.



Fonte: Autor.

O canal conta ainda com uma comporta manual à montante e outra à jusante, como ilustrado na Figura 12 para dar mais possibilidades de regimes de escoamento para uma mesma vazão.

Para a medição de vazão referencial, que foi comparada à vazão obtida por LSPIV, foi utilizado o medidor de vazão do tipo ADCP Sontek-IQ Plus. Esse medidor utiliza o método acústico de medição, detalhado no item 3.3.4. Segundo Clean (2022), o Sontek-IQ Plus (Figura 13a) perfila a velocidade da água em 3 dimensões, além de possuir um sensor de pressão e um feixe acústico vertical utilizados na medição do nível d'água. É possível utilizá-lo em escoamentos com altura de lâmina d'água entre 8 cm e 5 m e velocidades de escoamento de até 5 m/s. Sua resolução de captação de velocidades é de 0.0001 m/s. Na Figura 13b está apresentada a forma como o medidor foi instalado no canal.

O custo de aquisição do Sontek-IQ Plus, considerando orçamento solicitado em

Figura 12 – Comportas manuais para controle de regime de escoamento no canal. A: comporta à montante; B: comporta à justante.



Fonte: Autor.

Figura 13 – Sontek-IQ Plus: (a) Imagem do catálogo de divulgação do Sontek-IQ Plus e (b) Sontek-IQ Plus instalado no canal.



(a)

Fonte: Clean (2022).



(b)

Fonte: Autor.

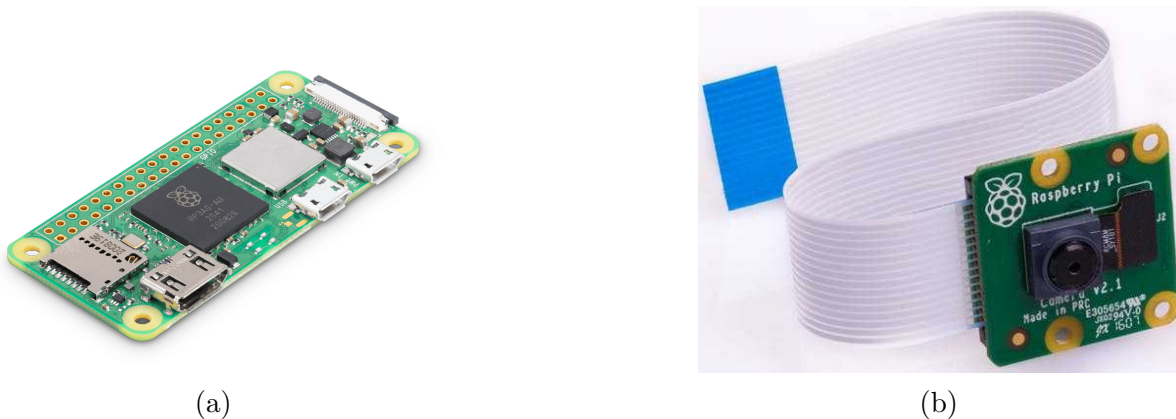
2019 a uma empresa representante nacional da Sontek[®], encontrava-se em torno de US\$ 20000,00.

4.1.2 Configuração do sistema de aquisição de imagens

Para a composição sistema de aquisição de imagens foi utilizado o Raspberry Pi Zero W (Figura 14a), junto a uma câmera Raspberry Picam v2 (Figura 14b) de 8 *Megapixels*.

O Raspberry Pi Zero W foi lançado em 2017 e é o mais simples microcomputador da sua marca. Ele possui apenas um processador 32-bit com apenas 1 core e memória

Figura 14 – Sistema de aquisição de imagens: (a) Raspberry Pi Zero W; (b) Raspberry Picam v2



Fonte: Raspberry (2022a).

RAM de 512 MB. Apesar de serem valores baixos, se comparados aos computadores mais modernos, é o suficiente para a maioria das aplicações de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) (GAMESS; HERNANDEZ, 2022).

A câmera Raspberry Picam v2 é um módulo que contém um sensor Sony IMX219. Essa configuração permite diversas aplicações com processamento de imagens, incluindo aplicações médicas e biológicas, sensoriamento remoto, astronomia e monitoramento de segurança (PAGNUTTI *et al.*, 2017; BADASHAH *et al.*, 2022). Ela possui tamanho reduzido e, apesar de ser de baixo custo, conta com baixo consumo de energia e uma qualidade de produção de imagens satisfatória. O sensor Sony IMX219 produz imagens de até 8 *megapixels* com resolução de 3280 x 2464 *pixels*. Para usuários iniciantes, é fácil utilizar a câmera Raspberry Pi v2 em simples execuções e, se o objetivo é empregá-la em tarefas mais complexas, é possível contar com diversos exemplos de aplicações na internet (RANI; LAVANYA; POOJITHA, 2018).

O custo de aquisição do Raspberry Pi Zero W e da Raspberry Picam v2 foi cerca de US\$ 30,00 e US\$ 70,00, respectivamente, considerando que ambos foram adquiridos no início de 2020. Esses equipamentos podem ser encontrados em lojas nacionais, com alta disponibilidade de estoque. É possível perceber a enorme diferença – 99,5 % a menos – entre o custo do sistema proposto e o Sontek-IQ Plus.

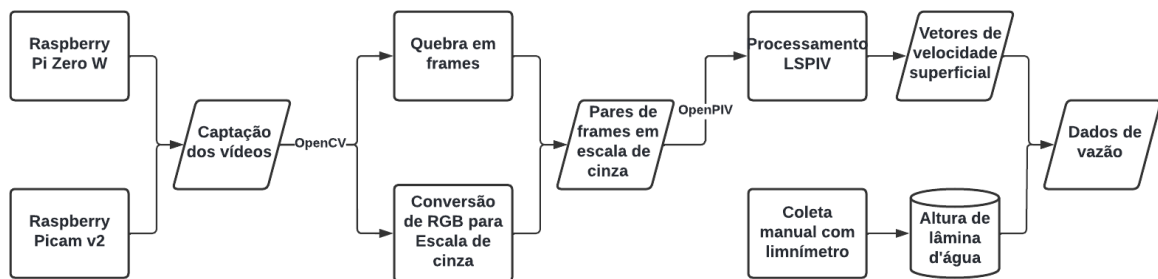
4.2 Métodos

As etapas deste trabalho estão apresentadas na Figura 15. A primeira etapa consiste na extração das imagens em vídeo. Foram capturadas sequências de filmagens para cada amostra coletada com o conjunto construído com o Raspberry Pi Zero W e a Raspberry Picam v2. Em seguida, cada arquivo de vídeo é dividido em vários arquivos de imagem,

sendo que cada arquivo constitui um *'frame'* de vídeo.

Então, é feito um pré-processamento das imagens, a fim de melhorar a performance de armazenamento e de desempenho do algoritmo. Por fim, é feito o processamento dos pares consecutivos de *'frames'*, em que é realizada a ortorretificação das imagens e o cálculo dos vetores de velocidade superficial e, com a adição da informação de altura de lâmina d'água obtida por limnómetro, é feito o cálculo da vazão. Ambos (pré-processamento e pós-processamento) foram executados utilizando pacotes *'open-source'* desenvolvidos na linguagem Python (ROSSUM; JR, 1995). Todos os códigos desenvolvidos nesta pesquisa estão armazenados em um repositório online¹.

Figura 15 – Etapas do trabalho



Fonte: Autor.

De forma paralela, foi feita a coleta das amostras de vazão através do Sontek-IQ Plus, para fazer a comparação com o resultado obtido pelo processo mencionado acima.

4.2.1 Intervalo de vazões

O intervalo de vazões possíveis para o canal vai de aproximadamente 5 L/s a 47 L/s. Considerando que o Sontek-IQ Plus tem uma limitação de uso viável para alturas de lâmina d'água maiores que 8 cm, foi observado que o limite inferior possível para o canal, na prática, passou a ser de 9,7 L/s. Valores inferiores a esse, dadas as características do canal, independente das posições das comportas à montante e a jusante, proporcionavam alturas menores que 8 cm. Além disso, para evitar o transbordamento do canal, evitou-se ultrapassar uma borda livre de 5 cm. Com isso, o limite superior de vazão observado foi de 34,4 L/s.

Foi realizado o controle da vazão sobre o canal através da abertura ou fechamento do registro de gaveta que encontra-se à montante do vertedor triangular que alimenta o canal. Além disso, através da abertura ou fechamento das comportas à montante e à jusante, foi feito o controle do regime de escoamento. Por isso, para uma mesma vazão, era

¹ <https://github.com/yuriishizawa/lhcpiv>

possível alterar a altura da lâmina d'água, gerando também velocidades de escoamento diferentes.

Foi utilizado o número de Froude para a comparação do regime de escoamento das amostras de vazão coletadas. Esse pode ser calculado pela Equação 4.1.

$$F_r = \frac{Q}{(g \cdot H)^{1/2}} \quad (4.1)$$

sendo F_r o número de Froude (adimensional), Q a vazão que escoava sobre o canal em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, g a aceleração da gravidade, considerada $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ e H a altura de lâmina d'água característica do canal em m.

4.2.2 Aquisição de imagens

A montagem do sistema de aquisição de imagens foi realizada com a câmera Raspberry Pi v2 para estimar a velocidade superficial na água sobre o canal do método LSPIV. A câmera estará conectada na entrada de Interface Serial de Câmera (CSI, do inglês, '*Camera Serial Interface*') do Raspberry Pi Zero W. É possível observar na Figura 16 o equipamento desmontado. Foi utilizada uma capa de proteção de plástico, disponibilizada para venda pela própria Raspberry Foundation.

Figura 16 – Conjunto Raspberry Pi Zero W e Raspberry Picam v2 desmontado.



Fonte: Autor.

O conjunto foi colocado sobre uma plataforma metálica acima do canal, como ilustrado na Figura 17. Assim, foi possível realizar a captação dos vídeos da forma mais nítida possível. Além disso, nesta mesma plataforma, encontrava-se um limnómetro, que foi utilizado na medição do nível d'água. Essa é uma informação necessária para o cálculo da vazão e que não é extraída pelo tratamento dos vídeos.

O código utilizado na obtenção das imagens foi escrito em linguagem Bash, que é uma linguagem voltada ao desenvolvimento de aplicações no sistema operacional Linux. Foi utilizado o pacote Raspivid (RASPBERRY, 2022b), feito pelo próprio time responsável

Figura 17 – Conjunto montado acima do canal.



Fonte: Autor.

pelo desenvolvimento do Raspberry. O Raspivid permite que a captação das imagens seja feita com diversas opções de configuração, como escalas de cores, resolução das imagens, taxa de captura (*'frames'* por segundo) e formato de gravação do arquivo. As imagens brutas utilizadas nesta pesquisa possuem as seguintes configurações:

- **Duração de gravação:** 5 segundos;
- **Resolução:** 1080 x 720p;
- **Taxa de captura:** 30 frames por segundo;
- **Formato de gravação:** h264.

4.2.3 Pré-processamento das imagens

Para a etapa de pré-processamento, foi utilizado o pacote OpenCV (OPENCV, 2022). Esse pacote foi escolhido devido a sua popularidade entre os usuários de Python no que concerne ao tratamento de imagens para aplicações de visão computacional em diversas áreas (RAO *et al.*, 2018; ALIYU; BOMOI; MAISHANU, 2022; LE; MOHD, 2022; BHAT; JHA; KEDIA, 2022).

4.2.3.1 Extração de sequência de frames e conversão para escala de cinza

Foram extraídos, para cada vídeo, 120 *'frames'*, o que equivale a 4s de vídeo. A extração dos *'frames'* foi realizada ao mesmo tempo em que foi realizada a conversão da

escala de cores de RGB para escala de cinza. Essa conversão é realizada em algoritmos de visão computacional, em geral, para reduzir o espaço em disco necessário para gravar as imagens, além de melhorar significativamente a *'performance'* dos algoritmos (BOUILLON; INGOLD; LIWICKI, 2019), pois cada pixel da imagem, em vez de carregar sua informação de 3 canais (vermelho, verde e azul), passa a carregar apenas 1 canal (cinza). Um exemplo de conversão pode ser encontrado na Figura 18. Nesse caso, foi proporcionada uma redução de 62% de espaço em disco ocupado pela imagem, que passou de 878 KB para 327 KB.

Figura 18 – Conversão de RGB para escala de cinza: (a) *'frame'* original; (b) *'frame'* convertido.



Fonte: Autor.

4.2.4 Processamento LSPIV

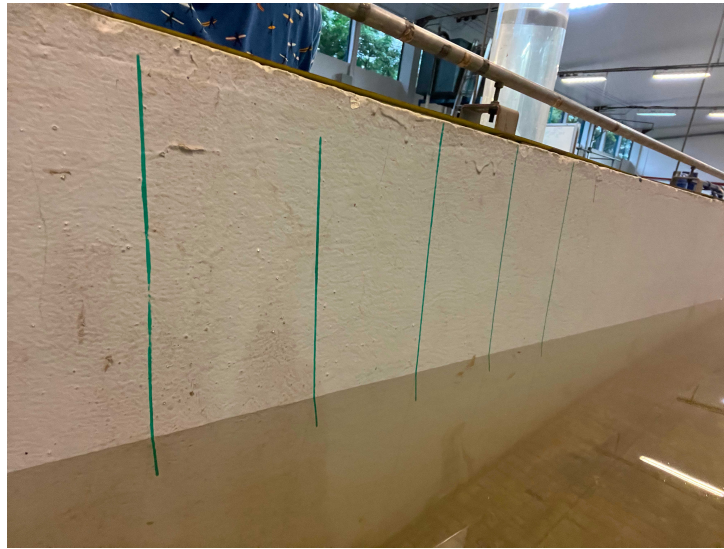
4.2.4.1 Ortorretificação dos frames

Para facilitar a identificação dos PCT, foram traçadas linhas verticais igualmente espaçadas nas paredes laterais do canal, como ilustrado na Figura 19.

Sabendo a largura do canal (40,0 cm) e o espaçamento entre as linhas (12,7 cm), é possível conhecer com mais facilidade as coordenadas reais dos PCT. Foi desenvolvida uma rotina que permite gravar em um arquivo de texto as coordenadas em TRC clicadas em uma imagem, além de exibi-las em tela (Figura 20). Para cada vazão e altura, foram colhidas as coordenadas de TRC de 4 PCT que se localizavam no encontro entre as linhas verticais traçadas e a lâmina d'água.

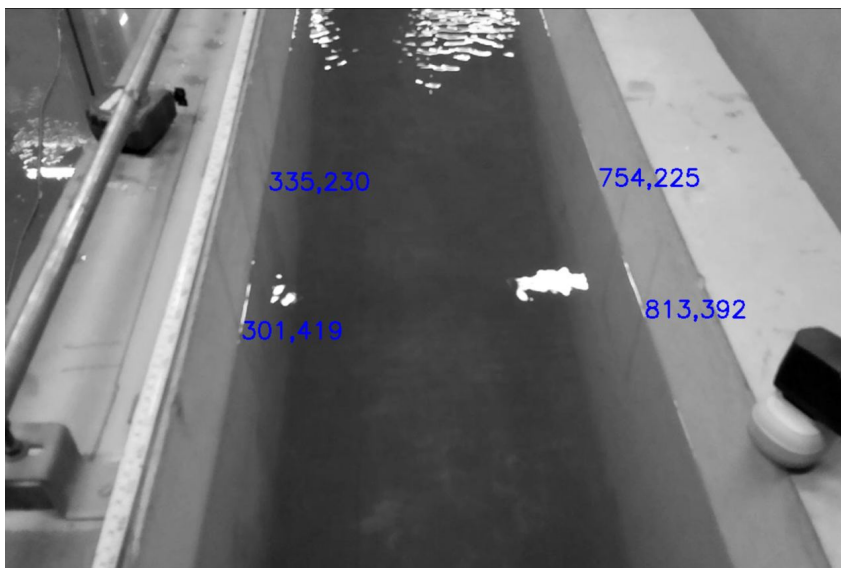
O pacote OpenCV possui implementado o algoritmo de ortorretificação detalhado na Seção 3.3.5.1. Com ele, é possível fazer a reconstrução de uma imagem, transformando suas coordenadas de TRC para coordenadas reais. Para isso, basta passar como parâmetros de entrada do algoritmo, as coordenadas (reais e TRC) dos 4 PCT identificados no passo anterior.

Figura 19 – Linhas verticais traçadas nas paredes laterais do canal para facilitar a localização dos PCT.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Captura de tela de rotina que grava coordenadas em TRC de pontos clicados em imagens.



Fonte: Autor.

4.2.4.2 Obtenção dos vetores de velocidade

Com as seqüências de frames ortorretificados, foi aplicado o cálculo de deslocamento das partículas, procedimento descrito na Seção 3.3.5.2. Para isso, foi utilizado o Pacote OpenPIV, que nasceu de uma iniciativa de desenvolvimento grátis e ‘open-source’ de ‘software’ para Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) (LIBERZON *et al.*, 2021). Atualmente, esse pacote encontra-se disponível para diversas linguagens de programação,

dentre elas MATLAB, C e Python. Nesta pesquisa foi utilizado o pacote disponibilizado para Python². O OpenPIV permite a utilização de uma gama de ferramentas de pré-processamento e pós-processamento, como a aplicação de filtros e correção de vetores anômalos.

A configuração de parâmetros de entrada utilizados nesta pesquisa foi a mencionada na Tabela 1. O tamanho da área de interrogação e da região de busca do algoritmo são parâmetros que acarretam em alto impacto na qualidade do resultado e no custo computacional (tempo de processamento) do algoritmo. Neste trabalho foram adotados valores padrão, sugeridos em literatura (KOUTALAKIS; TZORAKI; ZAIMES, 2019; ZHU; GISLAIN, 2019; SASSO *et al.*, 2021). O método da média local substitui vetores com direção, sentido e intensidades diferentes dos demais vetores na sua área de busca do algoritmo. Para isso, é feita uma média ponderada dos vetores próximos ao que deve ser substituído.

Tabela 1 – Configuração dos parâmetros de entrada do OpenPIV

Parâmetro	Configuração
Tamanho da área de interrogação	32 <i>'pixels'</i>
Tamanho da região de busca	64 <i>'pixels'</i>
Método de correção de anomalias	Média Local

O processo de obtenção de vetores é repetido para todos os pares de *'frames'* dos vídeos. Portanto, para cada vídeo, são obtidos 120 campos de vetores de velocidade. O resultado utilizado na quantificação da velocidade e na vazão é a mediana desses 120 campos. Foi escolhido utilizar a mediana, pois a média, em geral, sofre mais influência de valores anômalos (LEYS *et al.*, 2013).

4.2.4.3 Quantificação da vazão

Foi seguido o procedimento descrito na Seção 3.3.5.3, utilizando o método velocidade-área. É definida uma região de interesse na imagem ortorretificada, na qual é calculada a sua velocidade média na direção do escoamento. Considerando que o canal possui uma seção transversal retangular com 40 cm de largura a Equação 3.17 se torna a Equação 4.2.

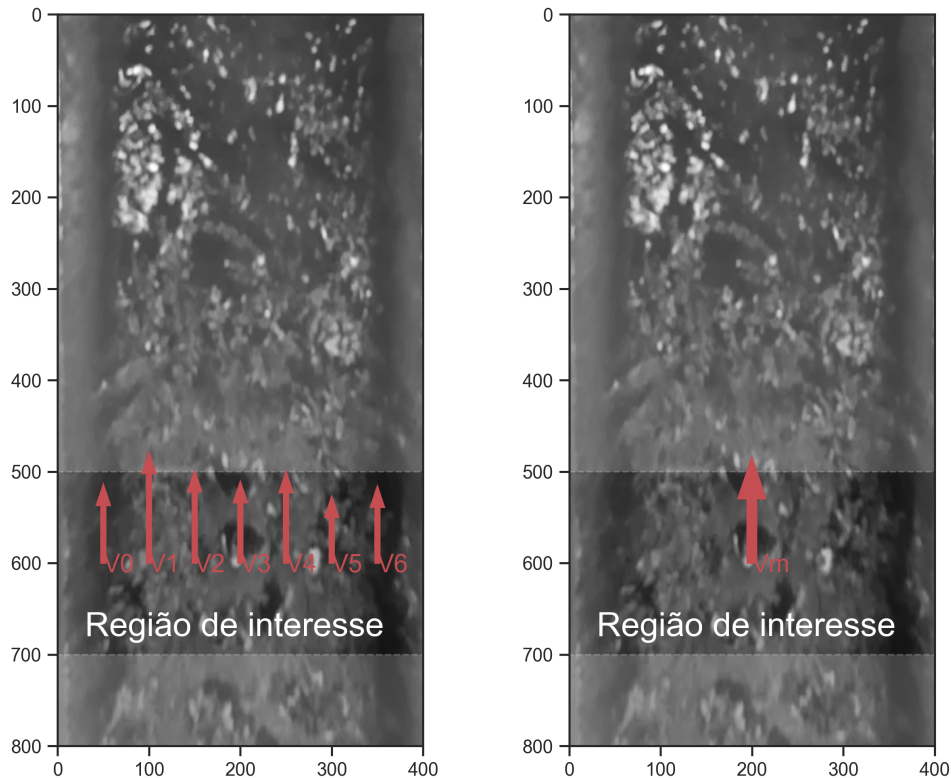
$$Q = 0,40 \cdot k \cdot H \cdot V_m \quad (4.2)$$

sendo H a altura de lâmina d'água em metros e V_m a velocidade média na direção do escoamento na área de interesse. Nesta pesquisa, seguindo o consenso da literatura, foi utilizado o parâmetro $k = 0,85$.

² A versão do OpenPIV específica para Python, assim como instruções de instalação e exemplos de uso, pode ser encontrada no site <https://github.com/OpenPIV/openpiv-python>.

Na Figura 21 está apresentada uma demonstração de transformação de vetores de velocidade dentro de uma região de interesse em vetores de velocidade média.

Figura 21 – Transformação de vetores de velocidade em área de interesse em vetor de velocidade média.



Fonte: Autor.

4.2.5 Análise estatística

Ambos os sistemas serão avaliados a partir de métricas estatísticas indicadas para comparação entre dados experimentais, sendo essas: a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o percentual de viés (PBIAS) e análise gráfica dos resíduos. As Equações 4.3, 4.4 e 4.5 descrevem a obtenção matemática do RMSE, da NSE e do PBIAS, respectivamente (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1996; NAGHETTINI; PINTO, 2007; GUPTA *et al.*, 2009).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q})^2} \quad (4.4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}} \quad (4.5)$$

sendo $Q_{s,i}$ a i -ésima vazão medida por um dos sistemas confeccionados, \bar{Q} a média das vazões observadas com os medidores de vazão referencial, $Q_{o,i}$ a i -ésima vazão observada por um dos medidores de vazão referencial e n o número de vazões observadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Vazões de referência e alturas de lâmina d'água

Na Tabela 2 é possível verificar as vazões de referência medidas através do Sontek-IQ Plus e suas respectivas alturas de lâmina d'água medidas com limnómetro. É possível observar que o número de Froude das amostras observadas estava entre 0,04 e 0,20, considerados valores baixos. Nenhuma das amostras observadas encontrava-se no regime supercrítico ($F_r > 1$). Portanto, vale salientar que os resultados obtidos neste trabalho abrangem apenas escoamentos no regime subcrítico. Foram obtidos um total de 5880 'frames' de imagens.

Tabela 2 – Vazões de referência, altura de lâmina d'água e número de Froude.

Código de Amostra	Vazão de Referência (L/s)	Altura de lâmina d'água	Froude	Quantidade de vídeos	Quantidade de frames
Q09711	9,7	11,0	0,212	3	360
Q09727		27,0	0,055	3	360
Q09730		30,0	0,047	3	360
Q11615	11,6	15,0	0,159	3	360
Q11630		30,5	0,055	3	360
Q11638		38,0	0,040	3	360
Q13716	13,7	16,0	0,171	3	360
Q13729		29,5	0,068	3	360
Q13739		39,0	0,045	3	360
Q18518	18,5	18,0	0,193	1	120
Q18534		34,0	0,074	3	360
Q18544		44,0	0,051	3	360
Q27332	27,3	32,0	0,120	3	360
Q27333		33,0	0,115	3	360
Q27342		42,0	0,080	3	360
Q34432	34,4	32,0	0,152	3	360
Q34438		38,5	0,115	3	360

Fonte: Autor.

5.2 Ortorretificação e obtenção dos vetores de velocidade

Todos os 5880 'frames' passaram pelo processo de ortorretificação em um computador comum de suporte. Na Figura 22 encontra-se um exemplo de imagem ortorretificada. O exemplo em questão pertence à amostra Q09711. A ortorretificação inicial foi feita para que as coordenadas reais estejam apresentadas em milímetros (mm). No Apêndice A encontra-se um exemplo de 'frame' ortorretificado para cada amostra de vazão. As coordenadas dos PCT localizados nas imagens ortorretificadas correspondem às suas coordenadas reais. Os PCT localizados na mesma parede lateral estão a duas linhas verticais

de distância um do outro, ou seja, 25,4 cm. Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes da matriz B de ortorretificação da Equação 3.12 para cada amostra.

Figura 22 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 11 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0,212.

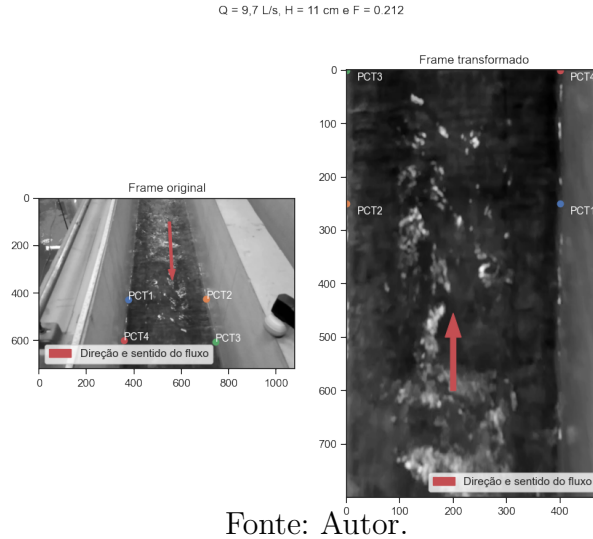


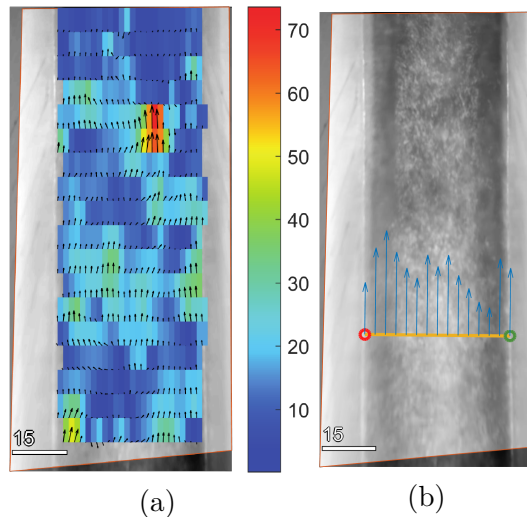
Tabela 3 – Matriz B da ortorretificação.

Amostra	B
Q09711	$\begin{bmatrix} -2.30 & 0.50 & 1410.13 & 0.04 & -2.76 & 1638.37 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q09727	$\begin{bmatrix} -1.54 & 0.42 & 974.49 & -0.03 & -1.89 & 999.42 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q09730	$\begin{bmatrix} -1.52 & 0.45 & 974.16 & -0.07 & -1.97 & 1008.46 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q11615	$\begin{bmatrix} -1.92 & 0.45 & 1182.89 & -0.08 & -2.15 & 1326.35 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q11630	$\begin{bmatrix} -1.49 & 0.43 & 968.91 & -0.05 & -1.97 & 991.29 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q11638	$\begin{bmatrix} -1.32 & 0.43 & 877.70 & -0.09 & -1.83 & 851.74 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q13716	$\begin{bmatrix} -2.08 & 0.50 & 1283.77 & 0.09 & -2.34 & 1341.81 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q13729	$\begin{bmatrix} -1.69 & 0.44 & 1099.29 & -0.04 & -2.27 & 1171.96 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q13739	$\begin{bmatrix} -1.54 & 0.50 & 1017.51 & -0.07 & -2.30 & 1045.97 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q18518	$\begin{bmatrix} -1.93 & 0.47 & 1201.48 & -0.06 & -2.45 & 1423.80 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q18534	$\begin{bmatrix} -1.61 & 0.54 & 1012.52 & -0.00 & -2.23 & 1067.22 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q18544	$\begin{bmatrix} -1.21 & 0.43 & 815.62 & -0.11 & -1.76 & 770.32 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q27332	$\begin{bmatrix} -1.55 & 0.49 & 981.94 & -0.08 & -2.05 & 1047.22 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q27333	$\begin{bmatrix} -1.52 & 0.47 & 977.69 & -0.08 & -2.01 & 1010.15 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q27342	$\begin{bmatrix} -1.24 & 0.43 & 830.16 & -0.08 & -1.75 & 775.47 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q34432	$\begin{bmatrix} -1.38 & 0.38 & 902.81 & -0.04 & -1.84 & 921.63 & -0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$
Q34438	$\begin{bmatrix} -1.49 & 0.45 & 988.82 & -0.13 & -2.35 & 1120.72 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$

Fonte: Autor.

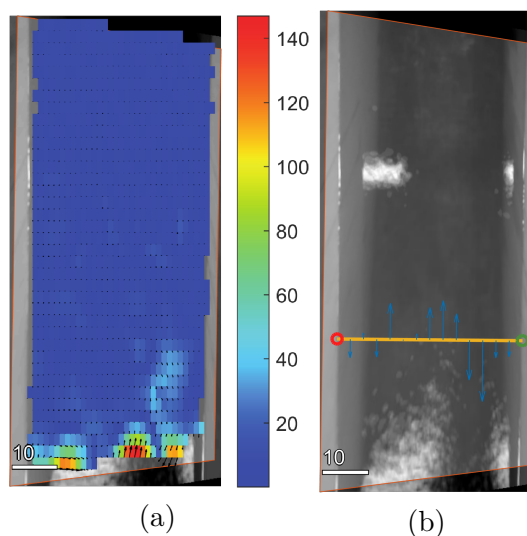
Nas Figuras 23 e 24 estão apresentados os campos de vetores gerados a partir do algoritmo desenvolvido, assim como os vetores de velocidade considerados no cálculo da vazão para as amostras Q18518 e Q18544. Os resultados das outras amostras podem ser encontrados no Apêndice B.

Figura 23 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18518 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 18 cm e Froude 0.19 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



Fonte: Autor.

Figura 24 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18544 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 44 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



Fonte: Autor.

É possível notar que, para as amostras com número de Froude alto, como o caso da Q18518, os campos de velocidade são uniformes, ou seja, os vetores têm direção, sentido e

intensidade semelhantes uns dos outros. Em contrapartida, no caso da amostra Q18544, por exemplo, não pode ser relatada essa uniformidade em seu campo de velocidades. Inclusive, muitos vetores têm intensidade nula e alguns até encontram-se no sentido contrário ao do escoamento. Isso se deve ao baixo poder de identificação de padrões de movimentação da água na imagem nessas situações de baixíssimo número de Froude. Isso reforça que, nessa situação, o ideal seria partir para o uso de traçadores artificiais, como foi realizado por Sutarto (2015).

Durante os testes de utilização do algoritmo, notou-se que os resultados dos vetores de velocidade são sensíveis aos parâmetros de entrada do OpenPIV (tamanho da AI e tamanho da região de busca). A variação de tais parâmetros gerava mudanças de direção, sentido e intensidade dos vetores, o que indica a necessidade de futuros aprofundamentos acerca da escolha deles, além de análise de sensibilidade da velocidade superficial e da vazão.

5.3 Quantificação da vazão

Na Tabelas 4 encontram-se as vazões calculadas através do LSPIV. Para cada amostra, foram tomadas 3 medições com vídeos, exceto para a amostra Q18518, que teve 2 de seus arquivos de medições sobrescritos durante os ensaios. O valor utilizado para comparação com a vazão de referência foi a média das 3 medições. Para as amostras com os maiores números de Froude, foi observado que o desvio-padrão das medições era menor do que o observado em condições de escoamento menos turbulentas. Além disso, é possível perceber que, ainda nessas situações de baixíssimo número de Froude, em alguns casos a vazão média chegou a ser negativa, o que não tem sentido físico.

As amostras foram separadas em dois grupos, levando em consideração um valor mínimo de número de Froude a partir do qual os resultados são considerados satisfatórios. Para encontrar esse valor de separação dos grupos, foram calculadas as métricas mencionadas na seção 4.2.5 e então foi obtido o valor de Froude que gerou menor RMSE e maior NSE, como ilustrado na Figura 25.

As vazões estimadas que melhor se ajustaram às vazões de referência foram aquelas as quais o número de Froude era maior que 0,15 (Figura 26). A curva azul, ajustada para esses pontos observados, é a que mais se aproxima da curva 1:1. É possível notar também, graficamente, que os resíduos desse grupo de amostras mais turbulentas apresenta uma distribuição dos resíduos mais aleatória do que o grupo com baixíssimos números de Froude (Figura 27).

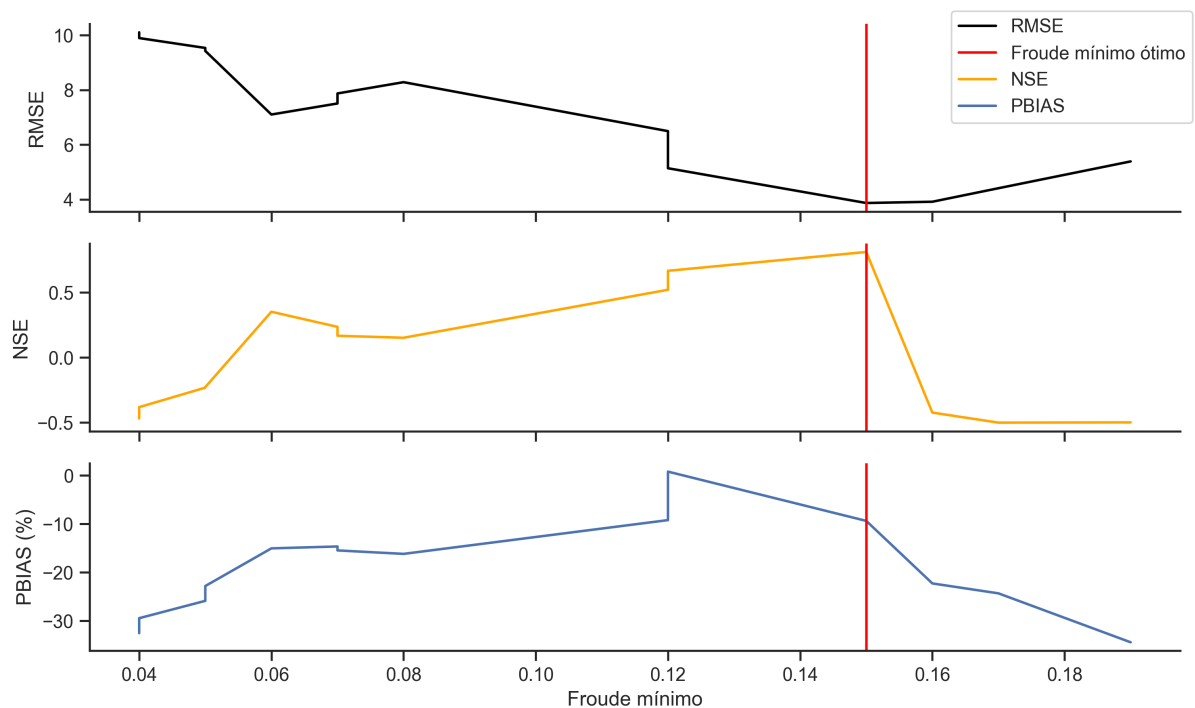
Tabela 4 – Vazões em L/s obtidas a partir da aplicação da técnica LSPIV

Amostra	Vazão 1	Vazão 2	Vazão 3	Média	Desvio-padrão
Q09711	5,72	9,25	6,59	7,19	1,51
Q09727	13,61	11,08	9,34	11,34	1,75
Q09730	-8,35	-0,03	4,66	-1,24	5,38
Q11615	9,23	10,82	9,57	9,87	0,69
Q11630	6,30	3,09	8,11	5,83	2,08
Q11638	-9,53	1,45	3,87	-1,40	5,83
Q13716	14,81	12,89	11,94	13,21	1,19
Q13729	12,85	17,14	10,52	13,50	2,74
Q13739	1,90	-5,19	1,63	-0,55	3,28
Q18518	11,31	*	*	11,31	*
Q18534	16,71	17,39	17,19	17,10	0,29
Q18544	-10,16	-7,57	0,48	-5,75	4,53
Q27332	45,47	33,49	30,37	36,44	6,51
Q27333	21,50	18,07	28,29	22,62	4,25
Q27342	10,22	10,51	10,96	10,56	0,30
Q34432	41,10	36,94	36,18	38,07	2,16
Q34438	19,95	22,27	23,39	21,87	1,43

*Os arquivos de vídeo da amostra foram sobrescritos durante o momento do ensaio

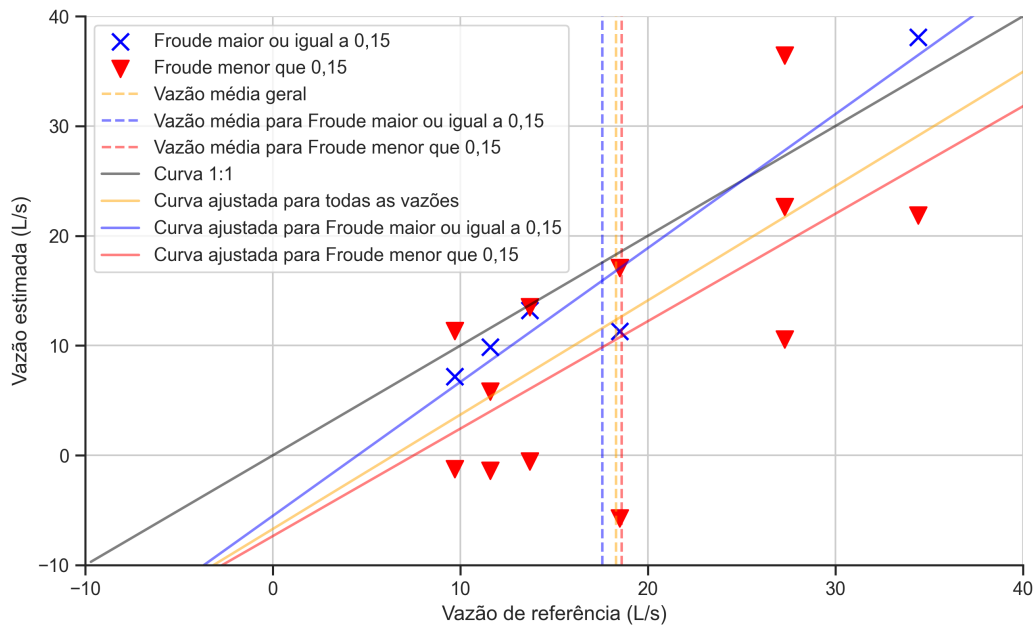
Fonte: Autor

Figura 25 – Métricas estatísticas calculadas para cada valor de Froude mínimo para separação dos grupos de amostras.



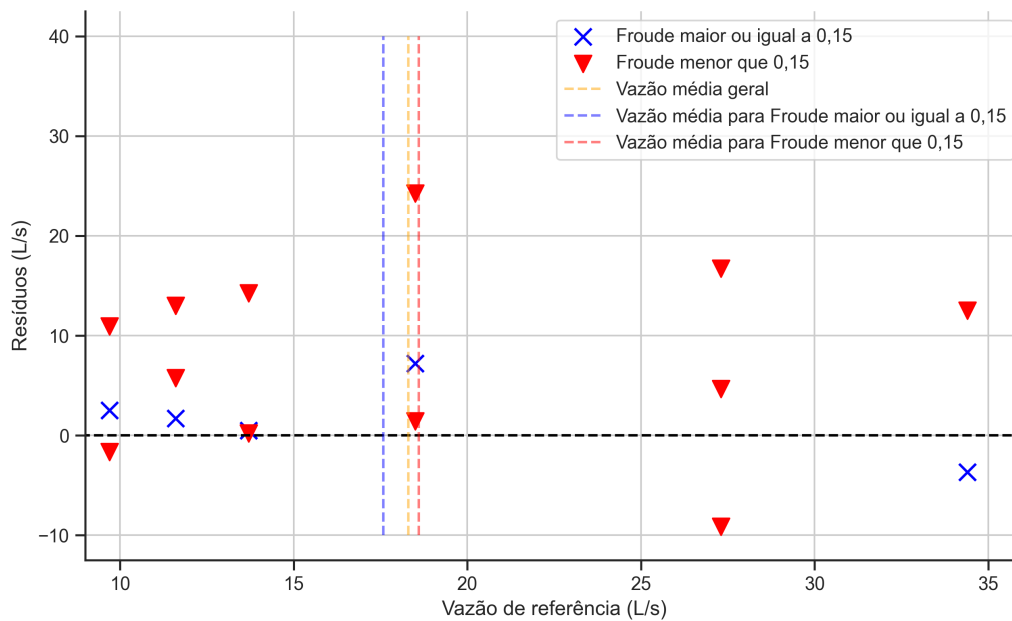
Fonte: Autor.

Figura 26 – Comparação entre os valores de vazão de referência e a vazão estimada.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Resíduos de cada ponto de vazão de referência, separado por grupo de número de Froude.

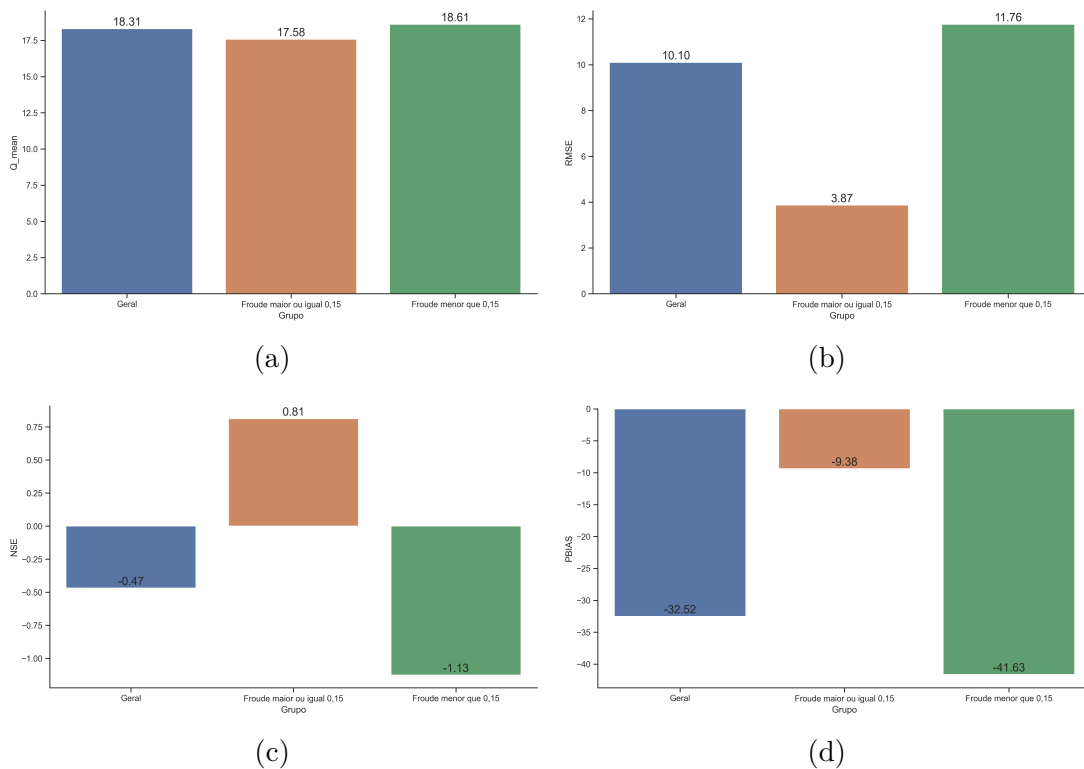


Fonte: Autor.

5.4 Métricas estatísticas

Na Figura 28 estão apresentadas as métricas estatísticas de avaliação do método proposto separadas em 3 grupos: um grupo geral, com todos os dados coletados; um grupo com os dados com Froude maior ou igual a 0,15; e um último grupo com os dados com Froude menor que 0,15. Cada grupo tem 17, 5 e 12 elementos, respectivamente.

Figura 28 – Métricas de avaliação: (a) Vazão média em L/s; (b) RMSE; (c) NSE e (d) PBIAS.



Fonte: Autor.

De modo geral, o grupo com Froude maior ou igual a 0,15 obteve métricas estatísticas melhores. O RMSE foi 67% menor que o erro encontrado no grupo com baixo número de Froude. Além disso, o seu NSE foi o único, dentre os três grupos, que apresentou um valor positivo. Apesar de não ser igual a 1 – o que significaria que a variância das vazões estimadas seria perfeitamente igual à variância das vazões de referência, o valor está acima de 0. Quanto ao PBIAS, é possível perceber que todos os grupos tendem a subestimar a vazão de referência, porém, essa subestimação é menos acentuada para o grupo com maiores números de Froude.

Apesar da baixa quantidade total de amostras e das limitações do regime de escoamento, esses resultados são promissores e possibilitam a exploração do assunto em trabalhos futuros, principalmente se for levado em consideração o seu baixo custo. Seria interessante, por exemplo, aplicar o sistema desenvolvido em condições de escoamentos

supercríticos e em campo, para torná-lo mais consolidado e verificar quais são suas as possibilidades de aplicação.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar em laboratório um sistema de medição de vazão, através da técnica LSPIV, utilizando *'hardware'* e *'software'* *'open-source'*, a fim de melhorar a qualidade espacial e temporal das redes de monitoramento ao tornar mais acessível o acompanhamento contínuo dessa variável hidrológica.

O *'hardware'* do sistema elaborado é constituído pela versão mais simples do microcomputador Raspberry, o Pi Zero W, junto à Picam v2, ambos desenvolvidos pela Raspberry Foudation, assim como o software utilizado na aquisição das imagens. Apesar da obtenção dos vídeos ter ocorrido de forma manual para todas as amostras de vazão coletadas, o código desenvolvido poderia, facilmente, ser utilizado de forma que o sistema coletasse automaticamente amostras de vídeos periodicamente, bastando utilizar um agendador de tarefas no sistema operacional. Isso poderia ser utilizado em coletas de dados de vazão em campo, onde os técnicos operadores não têm condições de acompanhar as estações de monitoramento na maior parte do dia, para realizar a coleta de dados.

Para o processamento das imagens, foram desenvolvidos *'scripts'* em linguagem Python, utilizando pacotes aplicados a visão computacional. Alguns desses processos, assim como na aquisição das imagens, podem funcionar de forma automática em campo, como o particionamento dos vídeos em *'frames'* e a conversão de RGB para escala de cinza. A ortorretificação, no formato que foi apresentado neste trabalho, não poderia ser automatizada. Para isso, seria necessário: o desenvolvimento de um algoritmo que identifique a localização dos 4 pontos de controle topográfico das imagens; ou a utilização de mais de 4 pontos de controle topográfico em 3 dimensões, ou seja, acrescentando a coordenada real Z dos pontos.

Durante os testes de utilização do sistema, foi observado que os resultados do algoritmo são sensíveis aos parâmetros de entrada, como tamanho de área de interrogação, tamanho de janela de busca ou coeficiente de velocidade k. Existem valores indicados na literatura, que foram adotados neste trabalho. Porém, sugere-se que sejam realizadas futuras análises de sensibilidade e calibração de tais parâmetros. Assim, podem ser utilizados os valores mais adequados caso-a-caso.

Para avaliar o sistema proposto, foram coletadas amostras de dados de vazão em um canal aberto de seção transversal 40 x 50 cm, com vazões entre 9,7 L/s e 34,4 L/s. Como método referencial, foi utilizado um medidor de vazão tradicional, o Sontek-IQ Plus, que é do tipo ADCP. Um fator limitante para as conclusões tiradas com este trabalho é que todas as amostras coletadas de vazão encontravam-se em regime subcrítico. Logo, recomenda-se que mais estudos sejam desenvolvidos considerando o cenário de escoamentos

em regime supercrítico.

Embora o sistema tenha um custo de aquisição cerca de 99,5% menor que o medidor de vazão referencial, foram obtidos através dele resultados promissores para escoamentos com número de Froude mais elevado, dentro de um intervalo do regime subcrítico. Esse é um ponto que reforça ainda mais a necessidade de avaliação do sistema em trabalhos futuros para escoamentos supercríticos e é aqui que, talvez, esteja o maior impacto positivo do sistema. Quando a velocidade superficial da água é muito baixa, o algoritmo não consegue identificar os padrões de movimentação das partículas, por isso não consegue calcular corretamente a direção, sentido e intensidade dos vetores de velocidade. Para esses casos de escoamento com baixa velocidade superficial, recomenda-se a avaliação do uso de traçadores artificiais. Eles podem ajudar na identificação dos padrões de movimentação em imagens.

Ressalta-se que, pelo fato deste trabalho ter sido elaborado em um ambiente controlado em laboratório, encoraja-se o desenvolvimento de novas pesquisas em situação de campo, para que a utilização do sistema aqui desenvolvido possa ser validado e que, assim, contribua com o aprimoramento das redes de monitoramento dos recursos hídricos no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 2, p. 103–107, fev 2015. ISSN 00991112.
- ADLER, M.; NICODEMUS, U. A new computer model for the evaluation of data from acoustic doppler current profilers (ADCP). **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science**, v. 26, n. 10-12, p. 711–715, 2001. ISSN 14641917.
- ALIYU, I.; BOMOI, M. A.; MAISHANU, M. A comparative study of eigenface and fisherface algorithms based on opencv and sci-kit libraries implementations. **International Journal of Information Engineering & Electronic Business**, v. 14, n. 3, 2022.
- ARDUINO. **Arduino - Home**. 2019. 1 p. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 19 jul. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRISO 9826**: Medição de vazão de líquido em canais abertos – calhas parshall e saniiri. Rio de Janeiro, 2008. 29 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRISO 3846**: Hidrometria – Medição de vazão em canal aberto utilizando vertedores retangulares de soleira espessa. Rio de Janeiro, 2011. 36 p.
- BADASHAH, S. J. *et al.* Telepresence robot using raspberry pi. **JOURNAL OF ALGEBRAIC STATISTICS**, v. 13, n. 2, p. 2165–2172, 2022.
- BHAT, A.; JHA, R. K.; KEDIA, V. Robust face detection and recognition using image processing and opencv. *In: IEEE. 2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1273–1278.
- BLÖSCHL, G. *et al.* Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)–a community perspective. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 10, p. 1141–1158, 2019. ISSN 21503435.
- BOUILLON, M.; INGOLD, R.; LIWICKI, M. Grayification: A meaningful grayscale conversion to improve handwritten historical documents analysis. **Pattern Recognition Letters**, Elsevier, v. 121, p. 46–51, 2019.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 22 dez. 2019.
- CLEAN. **Medidor de Vazão SonTek-IQ | Clean**. 2022. <https://www.clean.com.br/Produto/Detalhe/50>. (Accessed on 07/23/2022).

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Editora ABRH, 2015. ISBN 9788588686342.

CRESSEY, D. Age of the Arduino. **Nature**, v. 544, p. 125–126, 2017.

CREUTIN, J. *et al.* River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. **Journal of Hydrology**, v. 277, n. 3-4, p. 182–194, jun 2003. ISSN 00221694.

DOHNER, E. *et al.* Flow Stream. *In*: **Volunteer Stream Monitoring : A Methods Manual**. 1. ed. Washington: Environmental Protection Agency, 1997. cap. 5, p. 134–139. ISBN EPA 841-B-97-003.

DRAMAIS, G. *et al.* Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 5, n. 4, p. 301–312, 2011. ISSN 15706443.

FELL, J.; PEAD, J.; WINTER, K. Low-cost flow sensors: Making smart water monitoring technology affordable. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, IEEE, v. 8, n. 1, p. 72–77, 2019. ISSN 21622256.

FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. **Modern Instrumentation**, v. 01, n. 02, p. 8–20, 2012. ISSN 2165-9257.

FLEIT, G.; BARANYA, S. An improved particle image velocimetry method for efficient flow analyses. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier Ltd, v. 69, n. June, p. 101619, oct 2019. ISSN 09555986.

FUJITA, I.; MUSTE, M.; KRUGER, A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. **Journal of Hydraulic Research**, v. 36, n. 3, p. 397–414, may 1998.

GAMESS, E.; HERNANDEZ, S. Performance evaluation of different raspberry pi models for a broad spectrum of interests. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Science and Information (SAI) Organization Limited, v. 13, n. 2, 2022.

GUNAWAN, B. *et al.* The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier Ltd, v. 24, p. 1–12, apr 2012. ISSN 09555986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095559861200012X>.

GUPTA, H. V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, Elsevier B.V., v. 377, n. 1-2, p. 80–91, 2009. ISSN 00221694. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

HUANG, W.-C.; YOUNG, C.-C.; LIU, W.-C. Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan. **Water**, v. 10, n. 3, p. 280, mar 2018. ISSN 2073-4441. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/280>.

HUND, S. V.; JOHNSON, M. S.; KEDDIE, T. Developing a Hydrologic Monitoring Network in Data-Scarce Regions Using Open-Source Arduino Dataloggers. **Ael**, v. 1, n. 1, p. 0, 2016. ISSN 2471-9625.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 748**: Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats. Londres, 2007. 58 p.

ISLAM, S. M. F.; KARIM, Z. World's demand for food and water: The consequences of climate change. **Desalination-challenges and opportunities**, IntechOpen London, UK, p. 57–84, 2019.

JIN, T.; LIAO, Q. Application of large scale PIV in river surface turbulence measurements and water depth estimation. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier Ltd, v. 67, n. April, p. 142–152, jun 2019. ISSN 09555986. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.001><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095559861830133X>.

JOHNSON, E. D.; COWEN, E. A. Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics. **Water Resources Research**, v. 52, n. 3, p. 2178–2193, 2016. ISSN 19447973.

KOUTALAKIS, P.; TZORAKI, O.; ZAIMES, G. UAVs for Hydrologic Scopes: Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods. **Drones**, v. 3, n. 1, p. 14, jan 2019. ISSN 2504-446X. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/14>.

LE, C.; MOHD, T. K. Facial detection in low light environments using opencv. *In*: **IEEE. 2022 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 624–628.

Le Coz, J. *et al.* Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. **Journal of Hydrology**, Elsevier B.V., v. 394, n. 1-2, p. 42–52, 2010. ISSN 00221694.

Le Coz, J.; PIERREFEU, G.; PAQUIER, A. Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler. **Water Resources Research**, v. 46, n. 4, p. 1–13, 2008. ISSN 00431397.

LEE, M. C. *et al.* The measurement of discharge using a commercial digital video camera in irrigation canals. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier Ltd, v. 21, n. 2, p. 150–154, 2010. ISSN 09555986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.02.002>.

LEYS, C. *et al.* Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. **Journal of experimental social psychology**, Elsevier, v. 49, n. 4, p. 764–766, 2013.

LI, W.; LIAO, Q.; RAN, Q. Stereo-imaging LSPIV (SI-LSPIV) for 3D water surface reconstruction and discharge measurement in mountain river flows. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 578, n. June, p. 124099, nov 2019. ISSN 00221694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124099><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169419308340>.

- LIBERZON, A. *et al.* **OpenPIV/openpiv-python: OpenPIV-Python v0.23.6**. Zenodo, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5009150>.
- MALDONADO, L. H. **Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça**. 2009. 181 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- MAO, F. *et al.* Low-Cost Environmental Sensor Networks: Recent Advances and Future Directions. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, n. September, p. 1–7, 2019.
- MATLAB. **version R2015a**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.
- MELO, D. C. M. **Estimativa de impacto de mudanças climáticas nos níveis do aquífero Guarani**. 2013. 190 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- MIRANDA, R. A. C. de; OLIVEIRA, M. V. S. de; SILVA, D. F. da. CICLO HIDROLÓGICO PLANETÁRIO: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109–119, 2010.
- MOSTERT, E. Conflict and co-operation in international freshwater management: A global review. **International Journal of River Basin Management**, v. 1, n. 3, p. 267–278, 2003. ISSN 18142060.
- MUSTE, M.; HO, H. C.; KIM, D. Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 5, n. 4, p. 289–300, 2011. ISSN 15706443.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. d. A. **Hidrologia Estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. ISBN 978-85-7499-023-1.
- NIHEI, Y.; KIMIZU, A. A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. **Water Resources Research**, v. 46, n. 4, p. 1–15, 2008. ISSN 00431397.
- NOVAK, G. *et al.* Non-intrusive measurements of shallow water discharge. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 56, n. May, p. 14–17, aug 2017. ISSN 09555986. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955598616300917>.
- OKI, T.; KANAE, S. Global hydrological cycles and world water resources. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 313, n. 5790, p. 1068–1072, 2006.
- OPENCV. **OpenCV - Home**. 2022. 1 p. Disponível em: <https://opencv.org/>. Acesso em: 19 jul. 2022.
- PAGNUTTI, M. *et al.* Laying the foundation to use Raspberry Pi 3 V2 camera module imagery for scientific and engineering purposes. **Journal of Electronic Imaging**, v. 26, n. 1, p. 013014, feb 2017. ISSN 1017-9909.
- PALLUGNA, R. C. *et al.* Low-cost Remote Rain and Stream Data Acquisition System for Mapping of Potential Micro-Hydro Sites. **Energy and Power Engineering**, v. 05, n. 04, p. 56–62, 2013. ISSN 1949-243X.

PATALANO, A.; GARCÍA, C. M.; RODRÍGUEZ, A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). **Computers and Geosciences**, Elsevier Ltd, v. 109, p. 323–330, dec 2017. ISSN 00983004.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. ISSN 0103-4014.

RAN, Q.-h. *et al.* Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 17, p. 3014–3029, aug 2016.

RANI, R.; LAVANYA, S.; POOJITHA, B. IoT Based Home Security System Using Raspberry Pi with Email and Voice Alert. **International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, v. 8, n. 4, p. 119–123, 2018.

RAO, G. A. *et al.* Deep convolutional neural networks for sign language recognition. *In*: IEEE. **2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES)**. [*S.l.: s.n.*], 2018. p. 194–197.

RASPBERRY. **Raspberry Pi – Home**. 2022. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/>. Acesso em: 19 jul. 2022.

RASPBERRY. **Raspivid - Home**. 2022. 1 p. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html#raspivid/>. Acesso em: 19 jul. 2022.

RIBEIRO, M. A. **Instrumentação**. 8. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria LTDA, 1999. 478 p.

ROSA, D. M. S. **Interação rio aquífero: um estudo de caso na Bacia do Ribeirão da Onça**. jun 2018. 146 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, jun 2018.

ROSSUM, G. V.; JR, F. L. D. **Python tutorial**. [*S.l.: s.n.*]: Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands, 1995.

SANTOS, I. dos *et al.* **Hidrometria Aplicada**. 1. ed. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372 p. ISBN 8588519011.

SASSO, S. F. D. *et al.* Increasing lspiv performances by exploiting the seeding distribution index at different spatial scales. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 598, p. 126438, 2021.

SATRIA, D. *et al.* Design of Information Monitoring System Flood Based Internet of Things (IoT). *In*: MICOMS, 2017. **Proceedings...** [*S.l.: s.n.*], 2018. p. 337–342. ISBN 9781787567931.

SCHOTT, F. A. *et al.* The shallow and deep western boundary circulation of the South Atlantic at 5°–11°S. **Journal of Physical Oceanography**, v. 35, n. 11, p. 2031–2053, 2005. ISSN 00223670.

SENTCHEV, A.; YAREMCHUK, M. Monitoring tidal currents with a towed ADCP system. **Ocean Dynamics**, v. 66, n. 1, p. 119–132, 2016. ISSN 16167228.

SILVA, A. M. da *et al.* Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 374–380, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci{_}arttext{\&}pid=S1415-43662006000.

SIMPSON, M. R. **Discharge Measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler**. [*S.l.*], 2001. 134 p.

SKOGERBOE, G. V. *et al.* **Measuring Water with Parshall Flumes**. Utah: Utah State University, 1966. 55 p. Disponível em: https://digitalcommons.usu.edu/water{_}.

SUTARTO, T. E. Application of large scale particle image velocimetry (Ispiv) to identify flow pattern in a channel. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 125, p. 213–219, 2015.

TAURO, F. *et al.* Measurements and observations in the XXI century (MOXXI): Innovation and multi-disciplinarity to sense the hydrological cycle. **Hydrological Sciences Journal**, Taylor & Francis, v. 63, n. 2, p. 169–196, 2018. ISSN 21503435. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1420191>.

THIELICKE, W.; STAMHUIS, E. J. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. **Journal of Open Research Software**, v. 2, oct 2014.

TSUBAKI, R.; FUJITA, I.; TSUTSUMI, S. Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system. **Journal of Hydro-Environment Research**, Elsevier B.V, v. 5, n. 4, p. 313–321, 2011. ISSN 15706443. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.004>.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015.

TURNER, B. *et al.* Low-cost, high-resolution stemflow sensing. **Journal of Hydrology**, v. 570, n. January, p. 62–68, 2019. ISSN 00221694.

Universia Brasil. **Hidrosfera: águas oceânicas e continentais**. 2019. 1 p. Disponível em: <http://www.universiaenem.com.br/sistema/faces/pagina/publica/conteudo/texto-html.xhtml?redirect=14750178230676134105588640551>. Acesso em: 02 dez. 2019.

XU, Z. *et al.* Raspberry Pi Based Intelligent Wireless Sensor Node for Localized Torrential Rain Monitoring. **Journal of Sensors**, v. 2016, n. November, 2016. ISSN 16877268.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 181, n. 1-4, p. 23–48, 1996. ISSN 00221694.

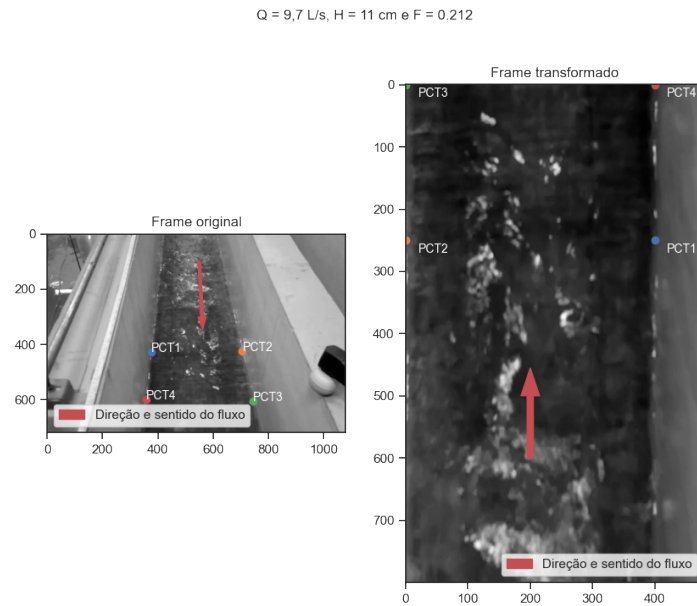
ZHEN, Z. *et al.* IP camera-based LSPIV system for on-line monitoring of river flow. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT & INSTRUMENTS (ICEMI)*, 13., 2017. **Proceedings... IEEE**, 2017. p. 357–363. ISBN 978-1-5090-5035-2. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8265818/>.

ZHU, X.; GISLAIN, L. An Analysis of LSPIV-Based Surface Velocity Measurement Techniques for Stormwater Detention Basin Management. **Water Resources Research**, v. 55, n. 2, p. 888–903, feb 2019. ISSN 0043-1397. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018WR023813>.

APÊNDICES

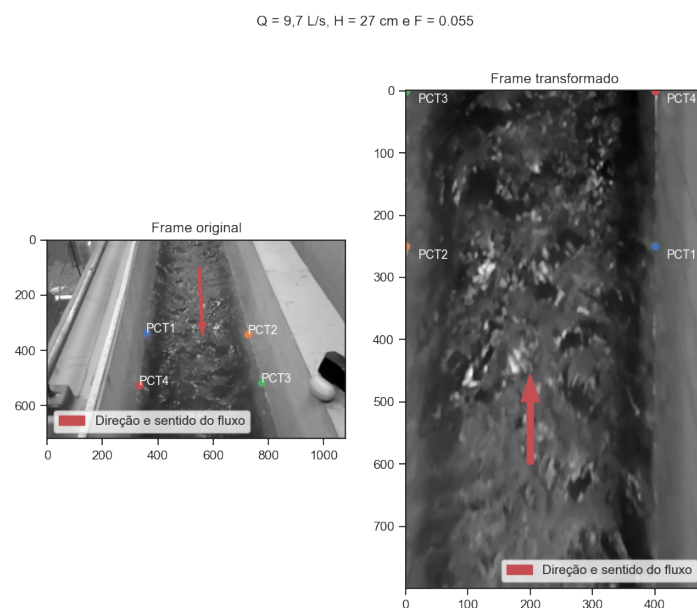
APÊNDICE A – RESULTADOS DA ORTORREIFICAÇÃO DOS PRIMEIROS FRAMES DE CADA VÍDEO CAPTADO

Figura 29 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 11 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.212.



Fonte: Autor.

Figura 30 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 27 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.055.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 9,7 L/s, 30 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.047.

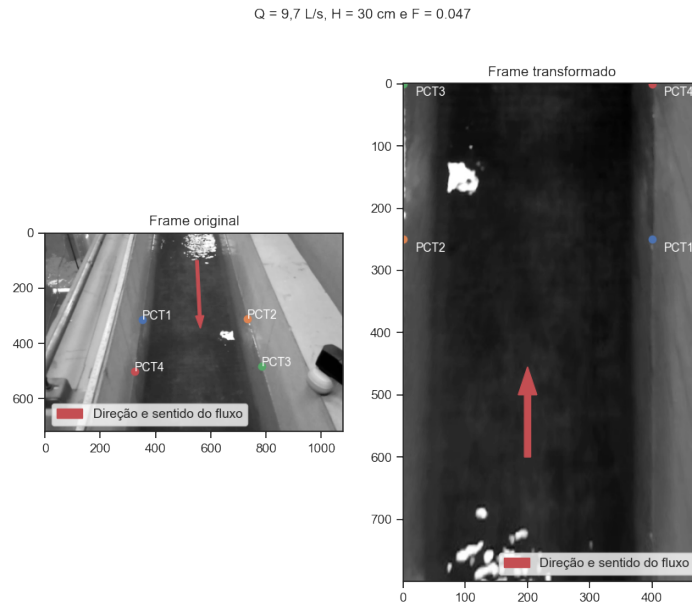


Figura 32 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 15 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.159.

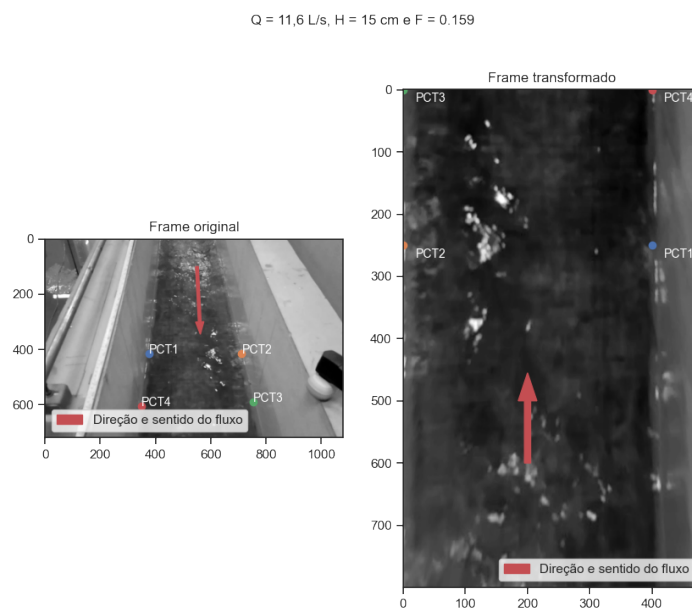
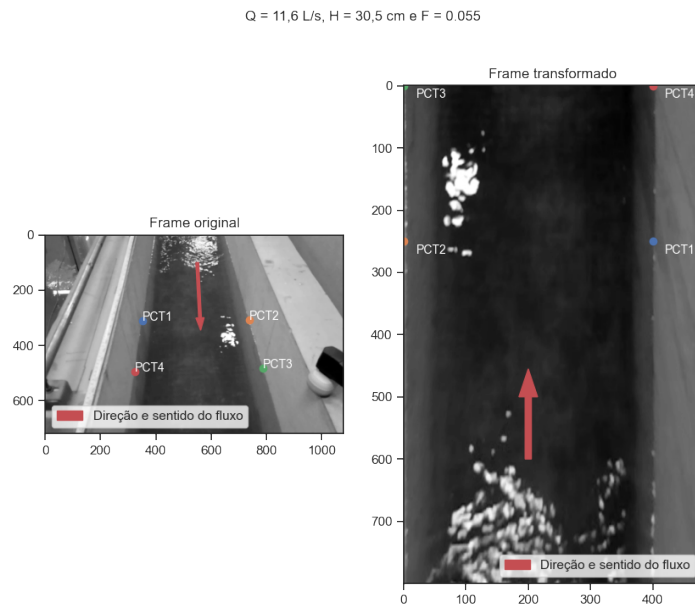
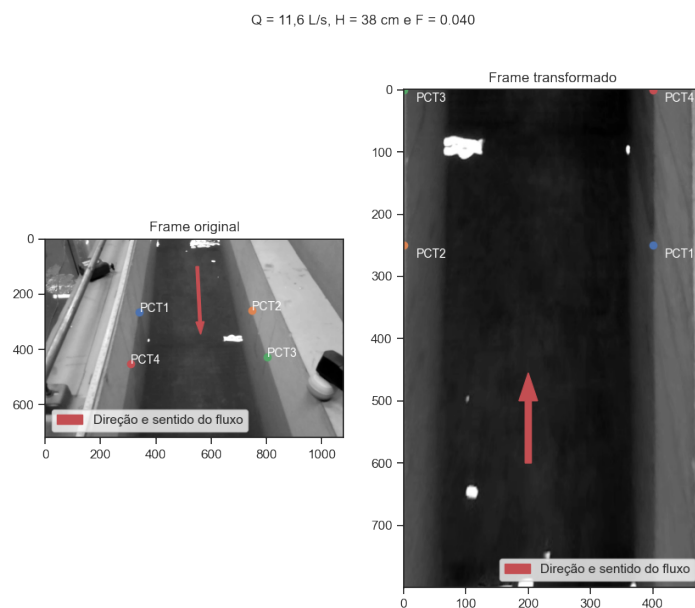


Figura 33 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 30,5 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.055.



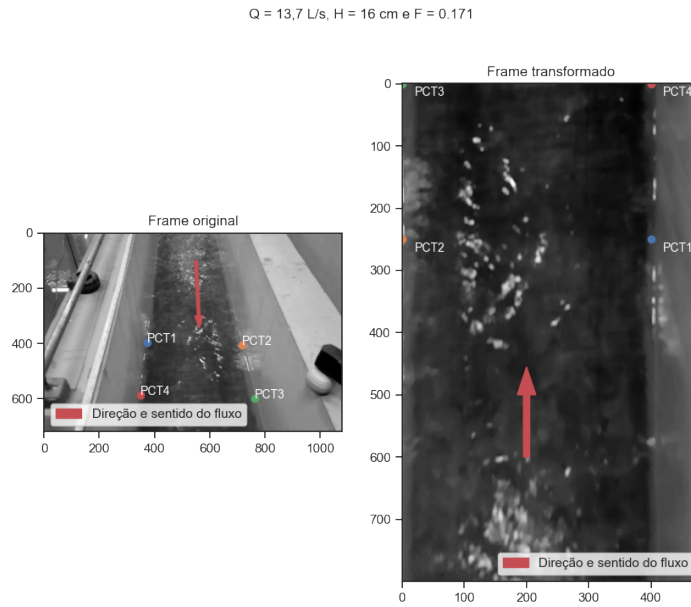
Fonte: Autor.

Figura 34 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 11,6 L/s, 38 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.040.



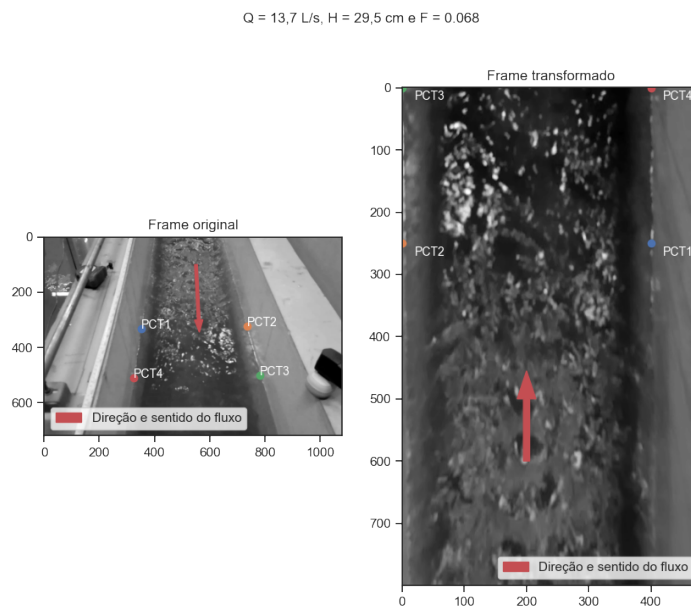
Fonte: Autor.

Figura 35 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 16 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.171.



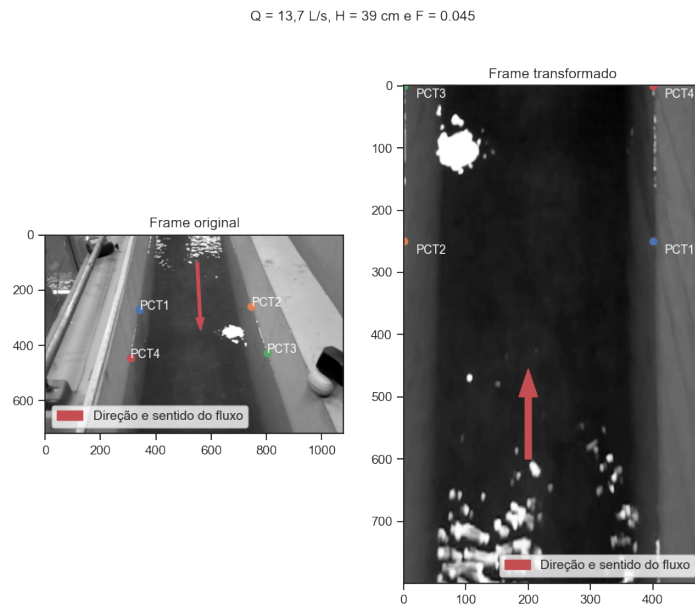
Fonte: Autor.

Figura 36 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 29,5 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.068.



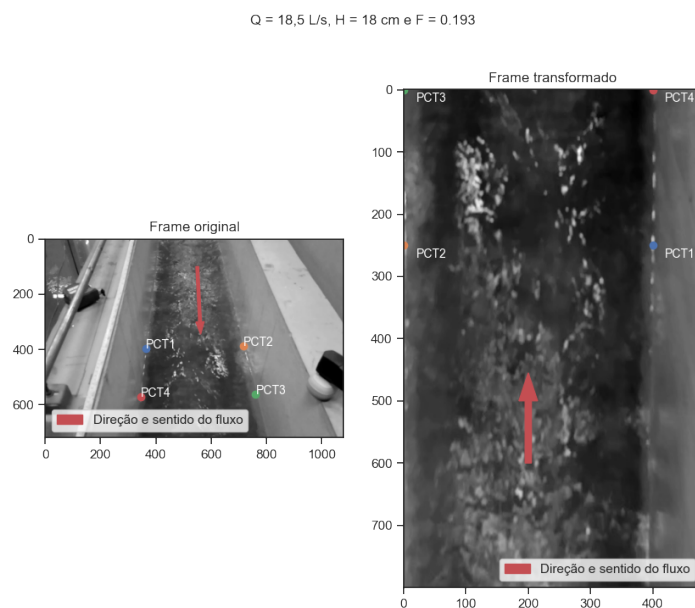
Fonte: Autor.

Figura 37 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 13,7 L/s, 39 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.045.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 18 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.193.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 34 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.074.

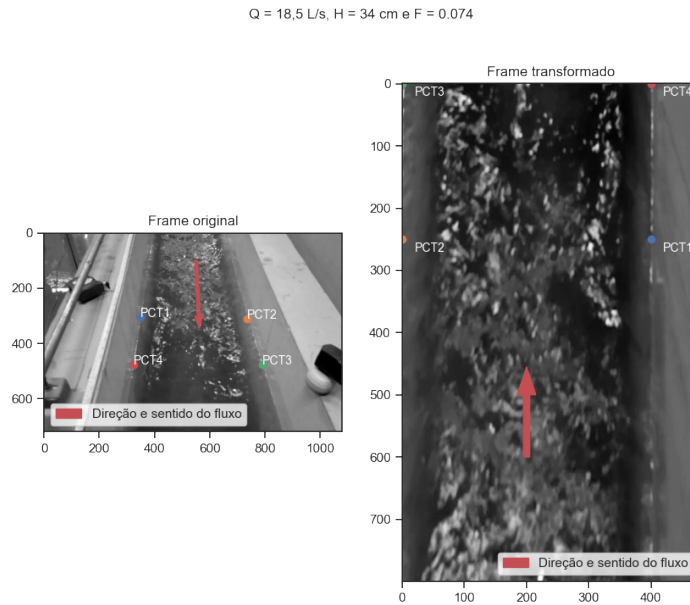


Figura 40 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 18,5 L/s, 44 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.051.

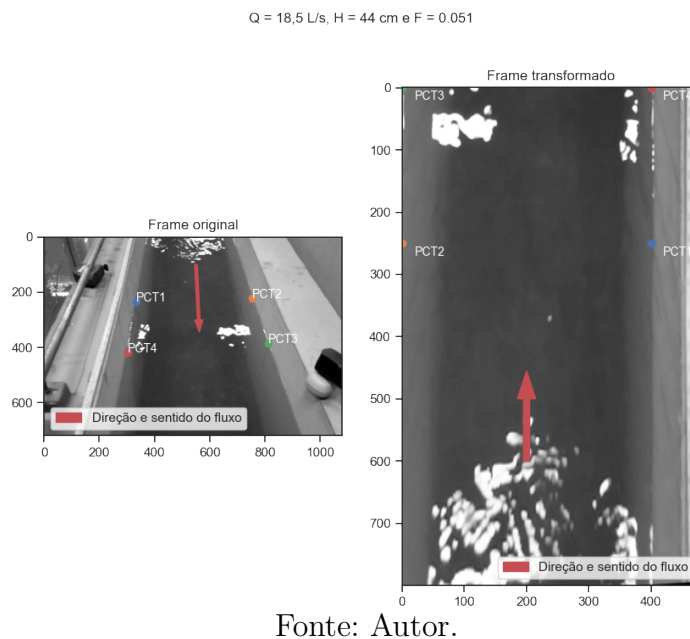


Figura 41 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 32 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.120.

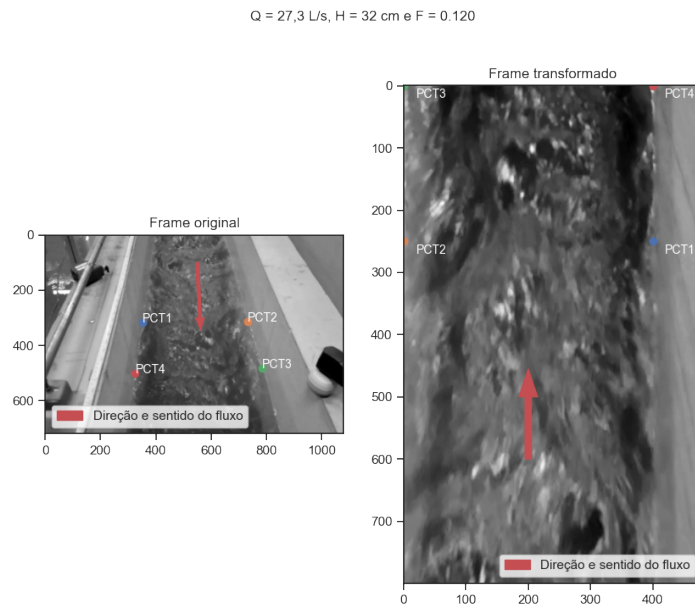


Figura 42 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 33 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.115.

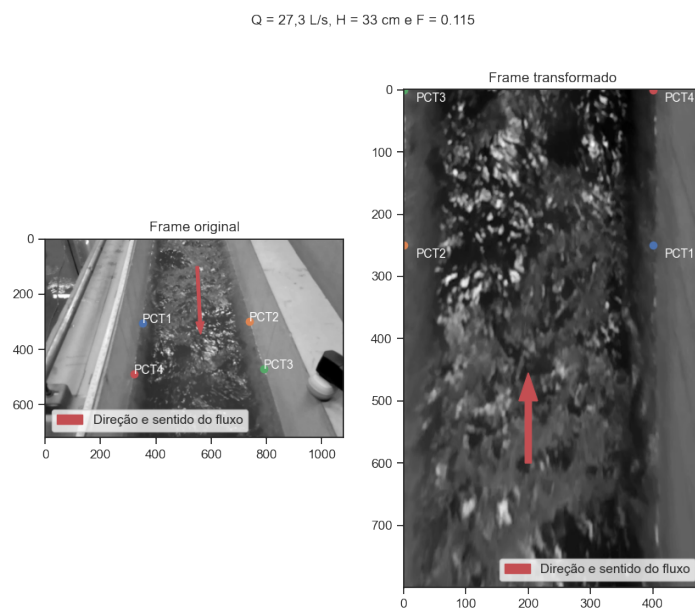
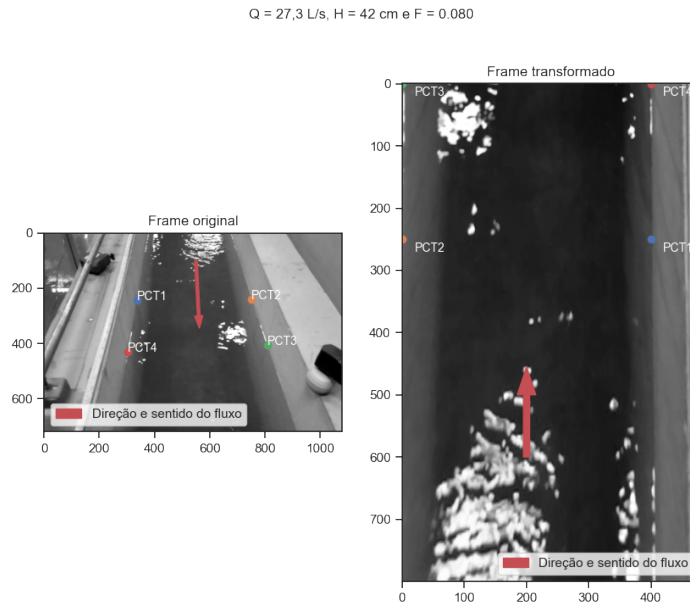
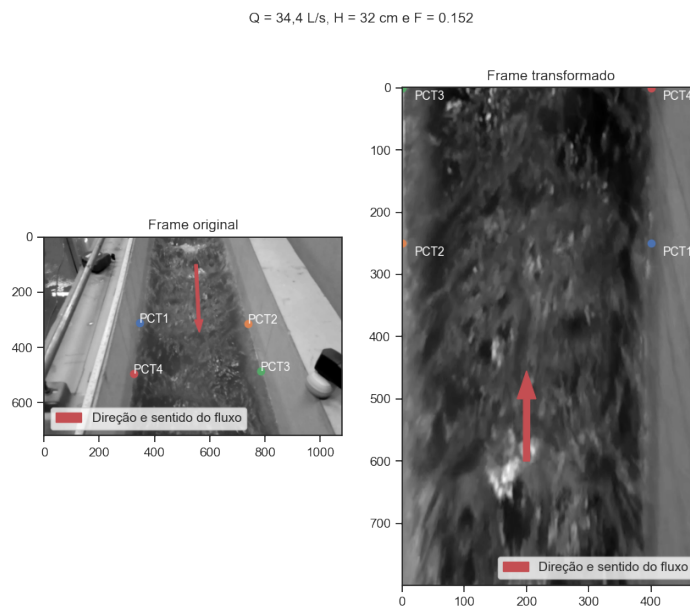


Figura 43 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 27,3 L/s, 42 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.080.



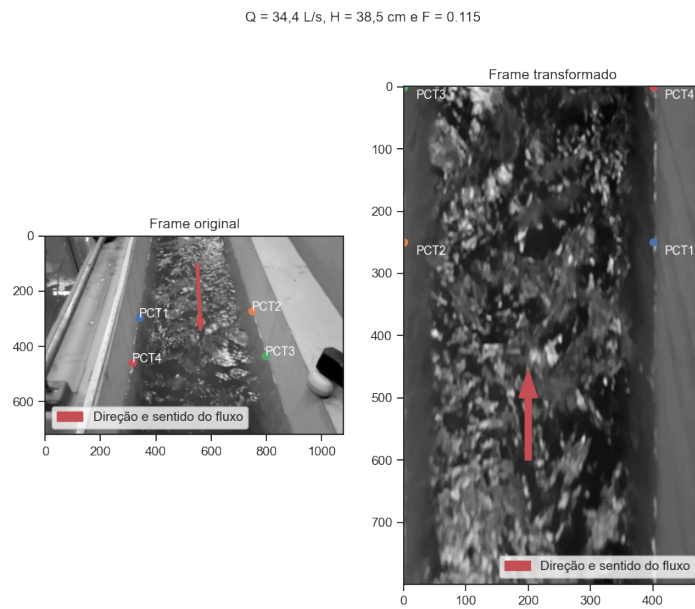
Fonte: Autor.

Figura 44 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 34,4 L/s, 32 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.152.



Fonte: Autor.

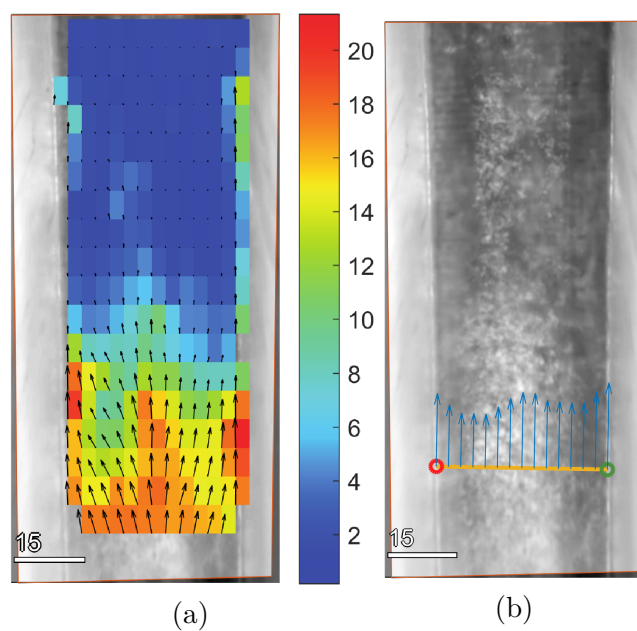
Figura 45 – Ortorretificação do primeiro frame captado para a vazão de 34,4 L/s, 38,5 cm de altura de lâmina d'água e Froude 0.115.



Fonte: Autor.

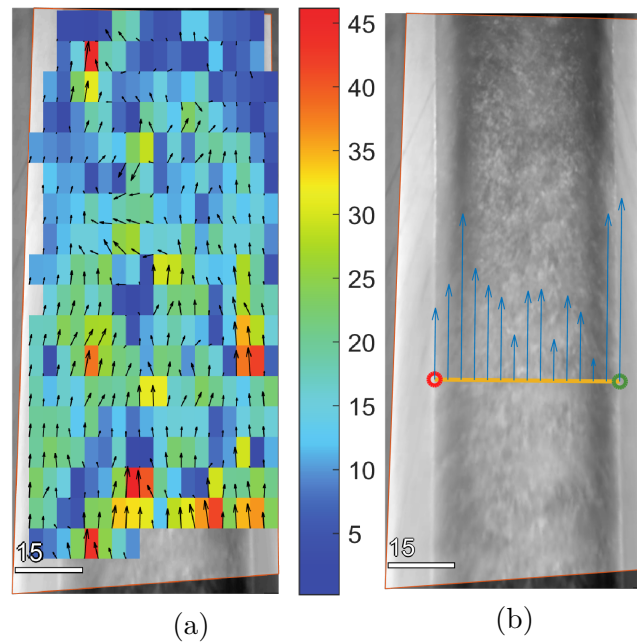
APÊNDICE B – CAMPOS DE VELOCIDADES E SEÇÕES TRANSVERSAIS CONSIDERADAS NO CÁLCULO DA VAZÃO DAS AMOSTRAS

Figura 46 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09711 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 11 cm e Froude 0.21 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



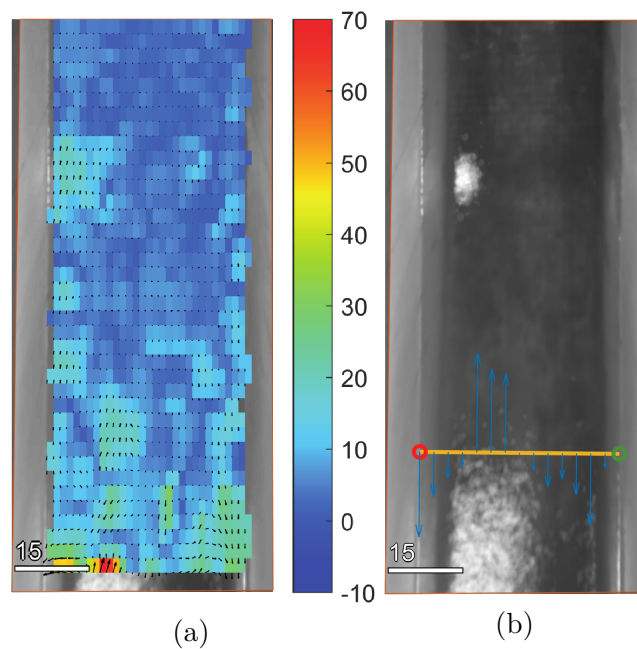
Fonte: Autor.

Figura 47 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09727 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 27 cm e Froude 0.06 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



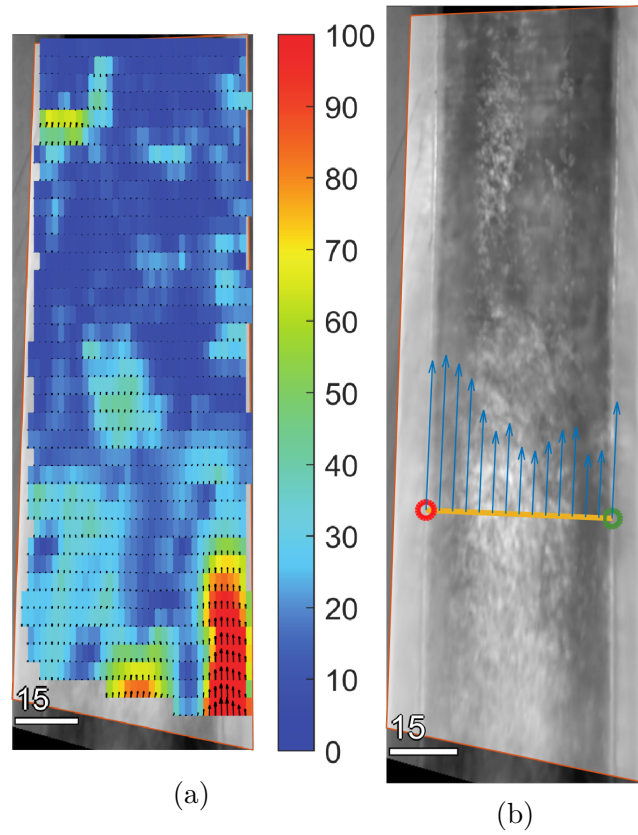
Fonte: Autor.

Figura 48 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q09730 com Vazão de 9,7 L/s, altura de lâmina d'água 30 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



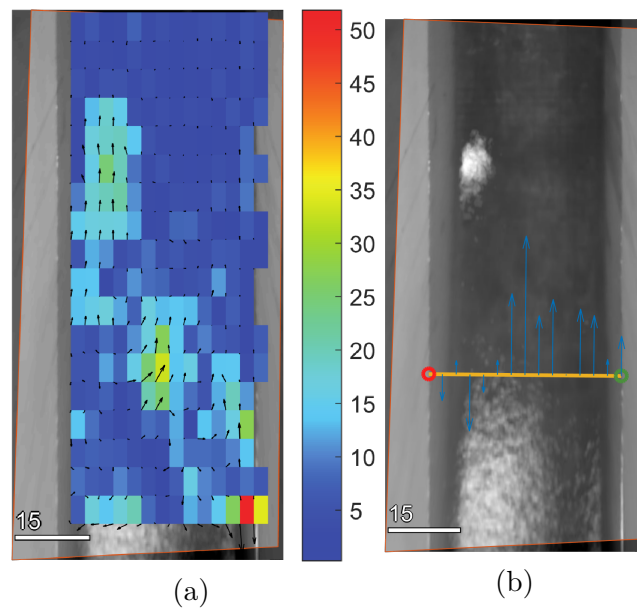
Fonte: Autor.

Figura 49 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11615 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 15 cm e Froude 0.16 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



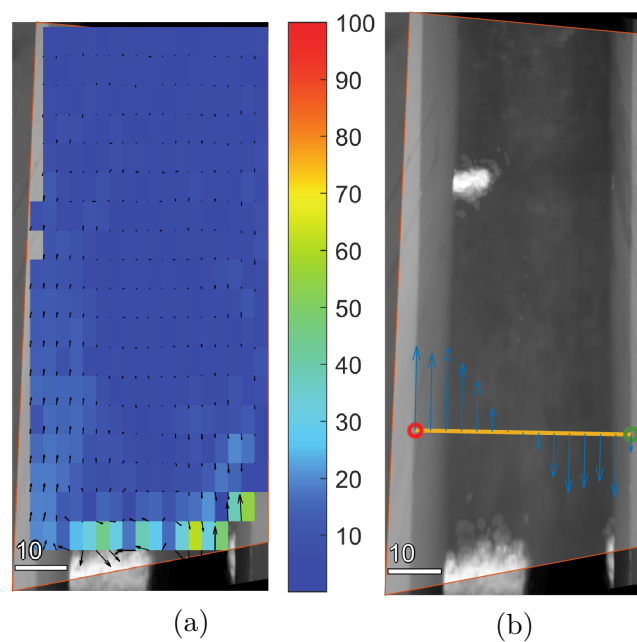
Fonte: Autor.

Figura 50 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11630 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 30,5 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



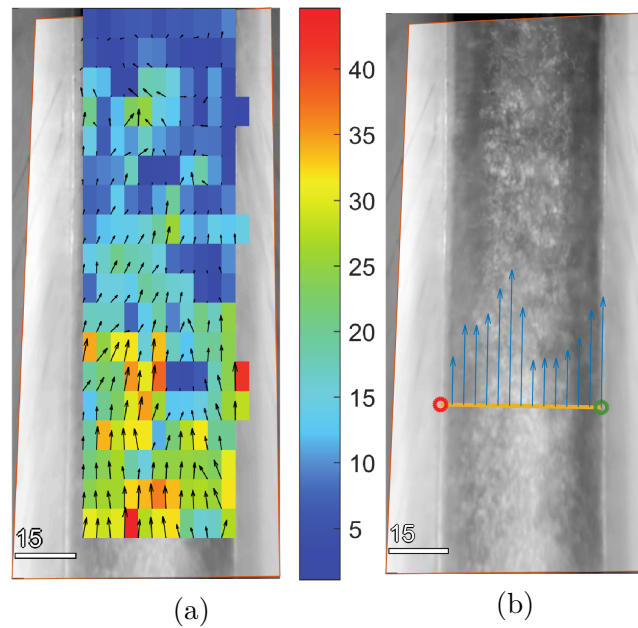
Fonte: Autor.

Figura 51 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q11638 com Vazão de 11,6 L/s, altura de lâmina d'água 38 cm e Froude 0.04 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



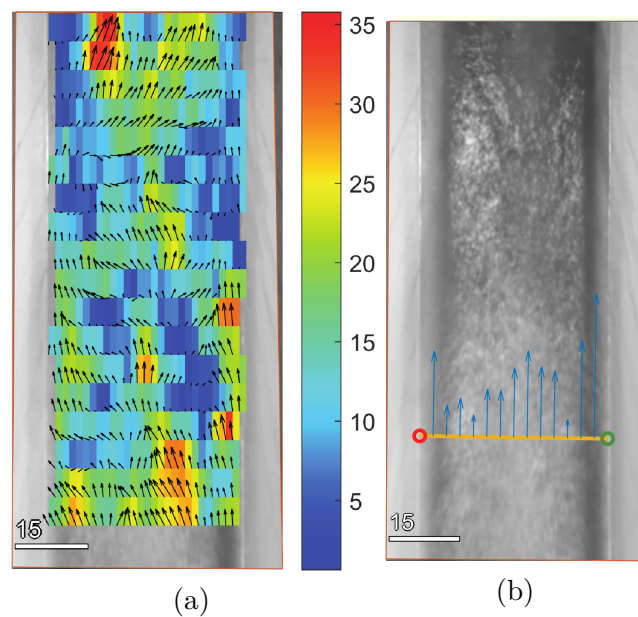
Fonte: Autor.

Figura 52 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13716 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 16 cm e Froude 0.17 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



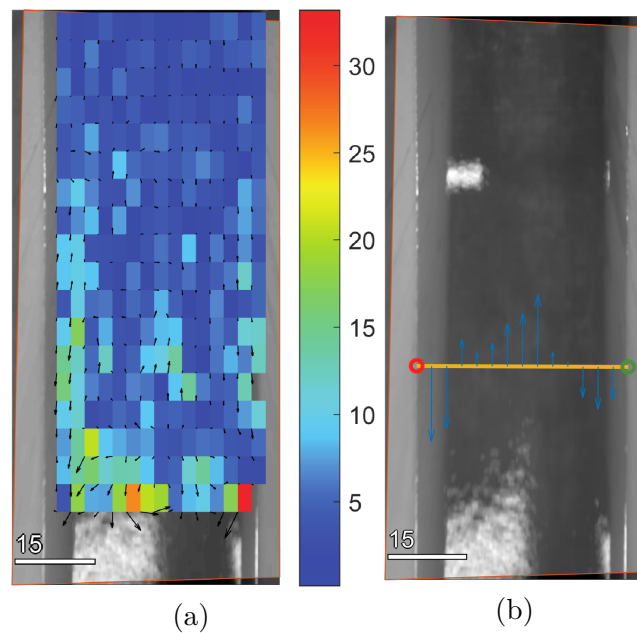
Fonte: Autor.

Figura 53 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13729 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 29,5 cm e Froude 0.07 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



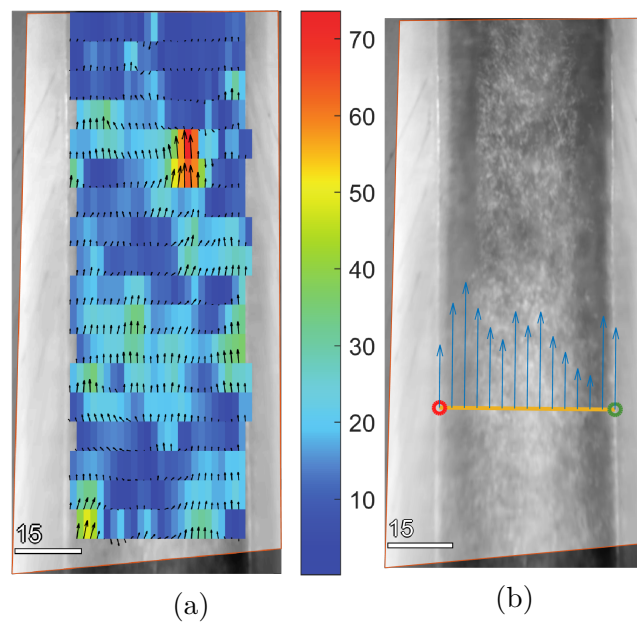
Fonte: Autor.

Figura 54 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q13739 com Vazão de 13,7 L/s, altura de lâmina d'água 39 cm e Froude 0.04 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



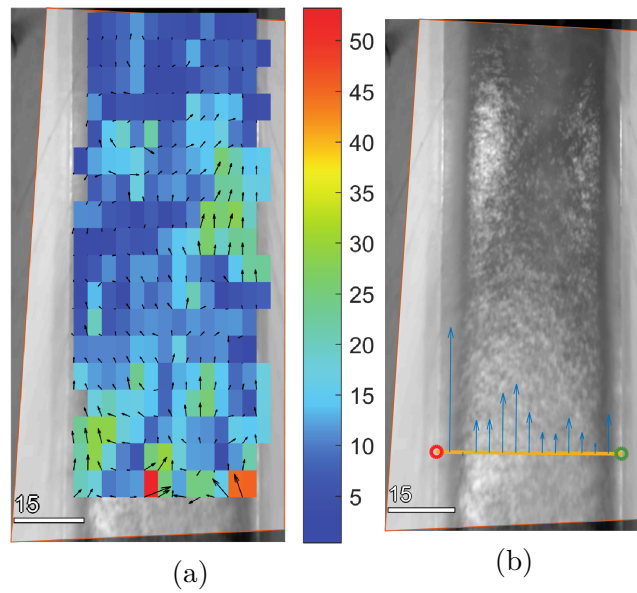
Fonte: Autor.

Figura 55 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18518 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 18 cm e Froude 0.19 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



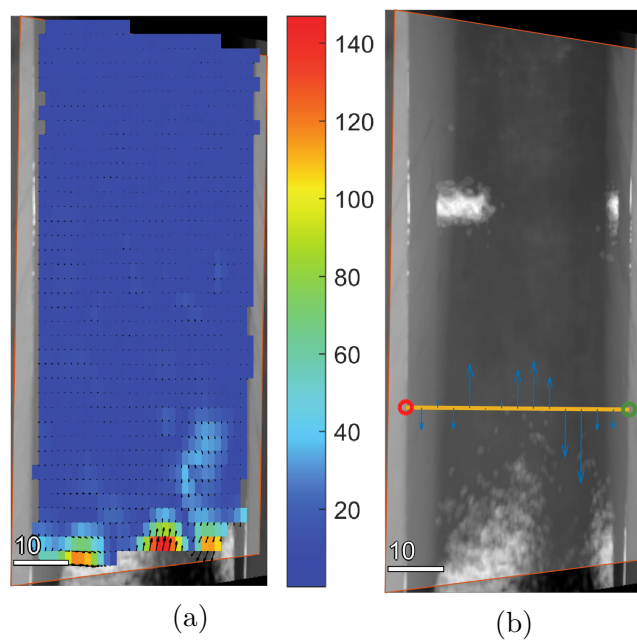
Fonte: Autor.

Figura 56 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18534 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 34 cm e Froude 0.07 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



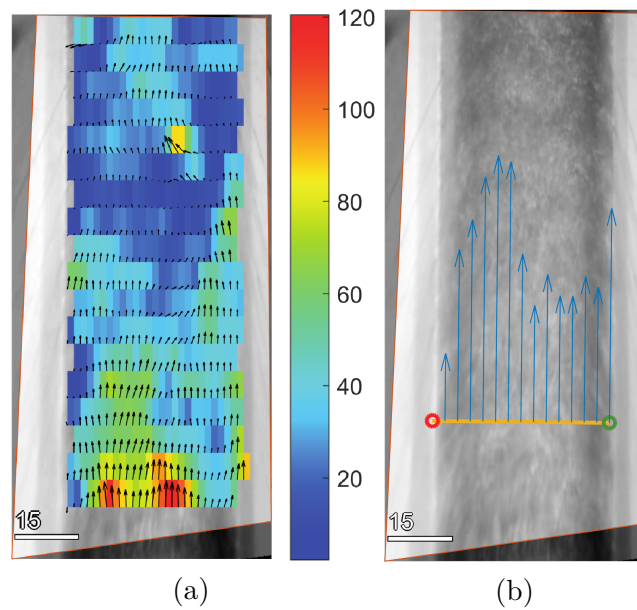
Fonte: Autor.

Figura 57 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q18544 com Vazão de 18,5 L/s, altura de lâmina d'água 44 cm e Froude 0.05 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



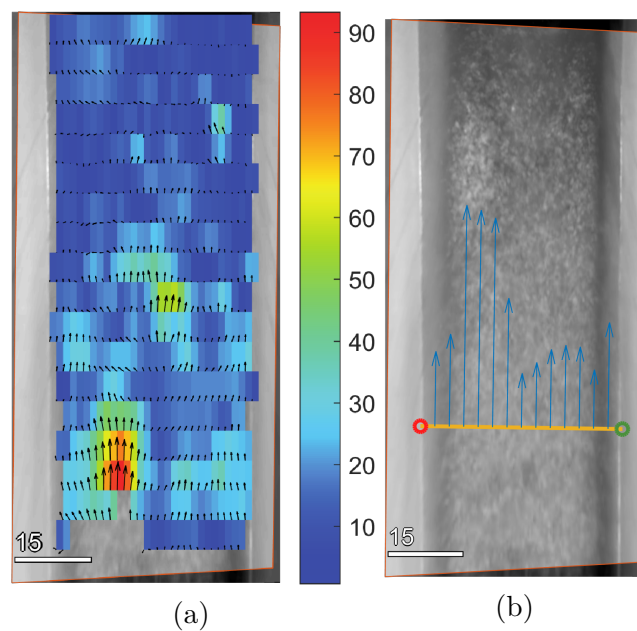
Fonte: Autor.

Figura 58 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27332 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d'água 32 cm e Froude 0.12 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



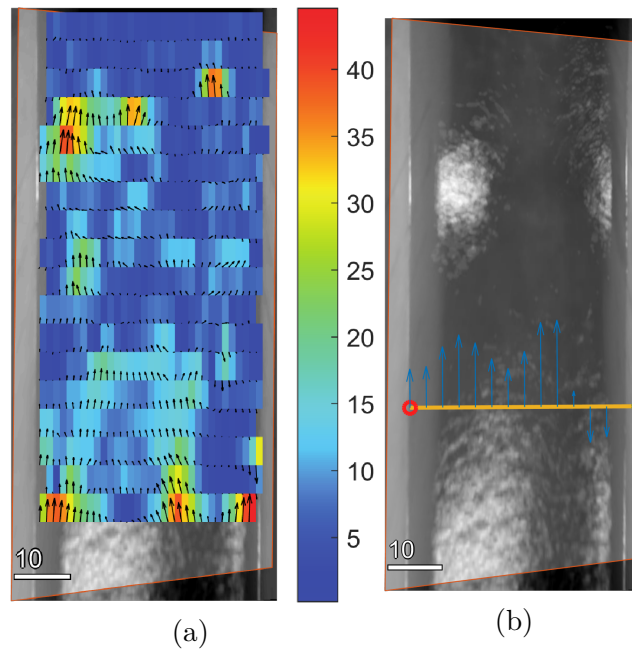
Fonte: Autor.

Figura 59 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27333 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d'água 33 cm e Froude 0.11 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



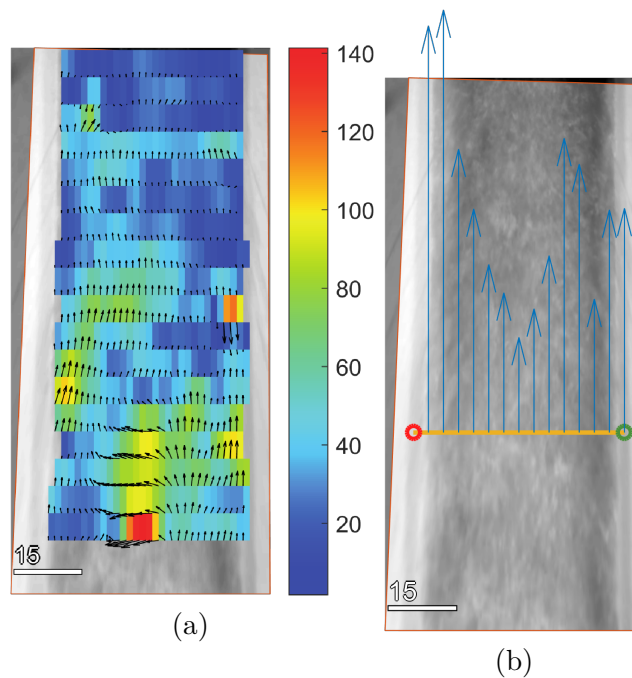
Fonte: Autor.

Figura 60 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q27342 com Vazão de 27,3 L/s, altura de lâmina d'água 42 cm e Froude 0.08 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



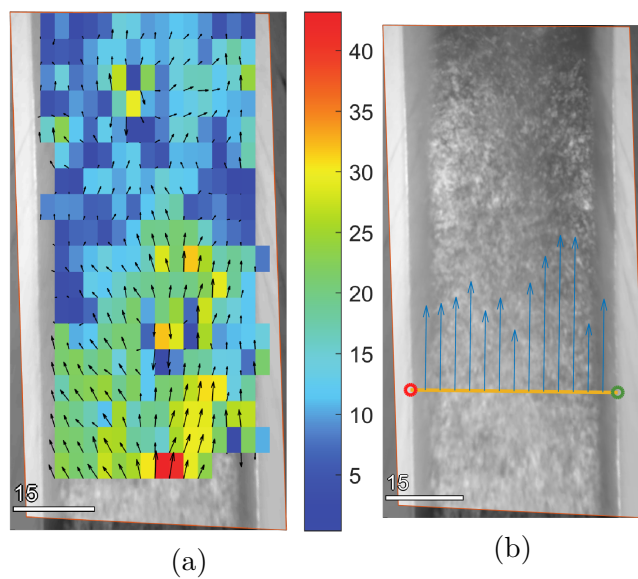
Fonte: Autor.

Figura 61 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q34432 com Vazão de 34,4 L/s, altura de lâmina d'água 32 cm e Froude 0.15 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



Fonte: Autor.

Figura 62 – (a) Campo de velocidades (em cm/s) para a amostra Q34438 com Vazão de 34,4 L/s, altura de lâmina d'água 38,5 cm e Froude 0.11 e (b) Seção transversal considerada para o cálculo da vazão da amostra.



Fonte: Autor.