

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DA VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV) NA CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM CANAL HIDRÁULICO NA PRESENÇA DA MACRÓFITA FLUTUANTE *PISTIA STRATIOTES*

Luana Ramira da Costa¹; Rodrigo Bahia Pereira² & Johannes Géron Janzen³

Abstract

This study investigated the applicability of the Particle Image Velocimetry (PIV) technique for characterizing flow in a hydraulic channel in the presence of the floating macrophyte *Pistia stratiotes*. The research was conducted in an experimental channel with controlled depth and lateral transparency, using a PIV system composed of a CCD Imager pro SX 5M camera and an Nd:YAG laser. The plant was positioned at the center of the channel, with its root zone free to interact with the flow. Images were processed using DaVis 8.1.3 software, allowing for the acquisition of vector fields, contour maps, and velocity profiles. The results indicated a significant reduction in the mean flow velocity after passing through the plant's root zone (from 0.122 m/s to 0.054 m/s), representing a percentage difference of approximately 55%. This deceleration increases the hydraulic detention time (HDT), which is relevant for vegetation-based treatment systems. Furthermore, greater instability was observed in the region downstream of the roots, suggesting increased turbulence and potential for particle retention. The study demonstrated that, despite the challenges posed by the complex morphology of the roots, the PIV technique is effective in obtaining high-resolution hydrodynamic data, proving promising for applications in vegetated systems. Future research should explore variations in flow regimes and root geometries to deepen the understanding of the influence of floating macrophytes on hydraulic processes.

Keywords – Particle Image Velocimetry (PIV); *Pistia stratiotes*; Hydrodynamics

¹ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Av. Costa e Silva| Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande - MS | Telefone: +55 (67) 3345-7000, reitoria@ufms.br.

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Av. Costa e Silva| Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande - MS | Telefone: +55 (67) 3345-7000, reitoria@ufms.br.

³ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul | Av. Costa e Silva| Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande - MS | Telefone: +55 (67) 3345-7000, reitoria@ufms.br.

Resumo

Este estudo investigou a aplicabilidade da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) na caracterização do escoamento em canal hidráulico na presença da macrófita flutuante *Pistia stratiotes*. A pesquisa foi realizada em canal experimental com controle de profundidade e transparência lateral, utilizando um sistema PIV composto por câmera CCD LaVision Imager Pro SX 5M e laser Nd:YAG de dupla cavidade. A planta foi posicionada no centro do canal, com sua zona radicular livre para interagir com o fluxo. As imagens foram processadas no software DaVis 8.1.3, permitindo a obtenção de campos vetoriais, mapas de contorno e perfis de velocidade. Os resultados indicaram uma significativa redução na velocidade média do escoamento após a passagem pela zona radicular da planta (de 0,122 m/s para 0,054 m/s), representando uma diferença percentual de 227,33%. Essa desaceleração aumenta o tempo de detenção hidráulico (TDH), relevante para sistemas de tratamento com base em vegetação. Além disso, observou-se maior instabilidade na região posterior às raízes, sugerindo aumento da turbulência e potencial para retenção de partículas. O estudo demonstrou que, apesar dos desafios impostos pela morfologia complexa das raízes, a técnica PIV é eficaz na obtenção de dados hidrodinâmicos de alta resolução, sendo promissora para aplicações em sistemas vegetados. Pesquisas futuras devem explorar variações de regime de escoamento e geometrias radiculares para aprofundar a compreensão da influência de macrófitas flutuantes sobre os processos hidráulicos.

Palavras-Chave – Velocimetria por Imagem de Partículas; *Pistia stratiotes*; Hidrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Macrófitas aquáticas desempenham um papel fundamental nos ecossistemas de água doce, sendo capazes de modificar significativamente a hidrodinâmica do ambiente por meio de seus elementos estruturais — folhas, caules e raízes — que interagem diretamente com o escoamento (Gu et. al, 2024). Entre elas, as macrófitas flutuantes se destacam por ocuparem a interface ar-água, formando estruturas verticalmente separados: uma estrutura aérea, composta pelas folhas, e uma estrutura submersa, constituída pelas raízes. Espécies como *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, *Pistia stratiotes* L., *Salvinia molesta* D. Mitch e *Hydrocotyle umbellata* L. desenvolvem sistemas radiculares que permanecem suspensos na coluna d'água, criando estruturas submersas com forte influência sobre o padrão de escoamento.

Essas plantas são tipicamente flexíveis e apresentam reconfiguração morfológica em resposta ao aumento da velocidade do fluxo. À medida que o escoamento se intensifica, a zona radicular tende a se alinhar ao fluxo, reduzindo o arrasto em comparação com estruturas rígidas (Wu et. al, 2023). Esse comportamento modifica a resistência hidrodinâmica, e possui implicações fisiológicas relevantes. Em particular, a configuração das raízes influencia processos de troca de massa, como a absorção de nutrientes, ao afetar a espessura da camada limite difusiva. Fluxos mais rápidos, perpendiculares às raízes, promovem o afinamento dessa camada, resultando em taxas de transferência de nutrientes potencialmente mais elevadas. Para compreender esses fenômenos em detalhe, são necessárias técnicas de medição de alta resolução espacial e temporal.

A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) emerge como uma técnica de medição de campo de velocidade não-invasiva e de alta resolução, ideal para a investigação de escoamentos complexos como os encontrados em ambientes vegetados (Adrian & Westerweel, 2011; Raffel et al., 1998). O PIV permite a obtenção de campos de vetores de velocidade instantâneos e médios, bem como a quantificação de parâmetros turbulentos, oferecendo uma visão detalhada da interação entre o fluido e as estruturas físicas. Sua capacidade de capturar a dinâmica do escoamento em múltiplas escalas o torna particularmente adequado para o estudo de interações planta-escoamento.

Embora o PIV tenha sido amplamente aplicado em diversos contextos hidrodinâmicos, sua utilização para detalhar as complexas interações entre o escoamento e estruturas radiculares de macrófitas flutuantes, como a *Pistia stratiotes*, ainda apresenta desafios e oportunidades para a demonstração metodológica robusta. Estudos anteriores, como o de Downing-Kunz e Stacey (2012) com *Eichhornia crassipes*, utilizaram Velocimetria Doppler Acústica (ADV) para obter medições pontuais, demonstrando o potencial de caracterização hidrodinâmica desses ambientes. No entanto, a variação morfológica e a complexidade radicular de diferentes espécies, somadas à necessidade de informações de campo completo, exigem avaliações específicas da aplicabilidade de técnicas como o PIV. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo principal demonstrar a aplicabilidade e discutir os aspectos metodológicos da Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) na caracterização do desenvolvimento espacial do escoamento no entorno da zona radicular da macrófita flutuante *Pistia stratiotes* em um canal hidráulico.

METODOLOGIA

Descrição do Canal

O estudo foi conduzido no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), utilizando um canal ICAM que nos possibilita alterar velocidades e declividade, além de possuir paredes em vidro. O canal possui as seguintes dimensões: 4 metros de comprimento, 0,15 metros de largura e 0,40 metros de profundidade. A profundidade do fluxo foi controlada por uma comporta localizada na extremidade a jusante do canal, mantendo uma profundidade constante de 0,30 metros ao longo do experimento.

Configuração das Raízes

No experimento, foi utilizada uma única raiz de *Pistia stratiotes* com aproximadamente 15 cm de comprimento, cuidadosamente selecionada para representar a complexidade morfológica típica da espécie. A planta foi previamente cultivada em um reservatório de 1 m³, preenchido com água e exposto à luz solar direta, de modo a garantir seu desenvolvimento saudável. Durante o experimento, a raiz foi posicionada no centro da largura do canal, fixada de forma a simular as condições de flutuação natural para permitir que suas estruturas finas interagissem livremente com o escoamento.

PIV

O sistema PIV utilizado foi composto por uma câmera CCD Imager pro SX 5M de alta resolução e um laser Nd:YAG de dupla cavidade. As partículas traçadoras utilizadas foram as partículas naturalmente presentes na água, que apresentaram comportamento satisfatório no seguimento do escoamento.

A região de medição abrangeu uma área de 30 cm na direção longitudinal (x) por 30 cm na direção vertical (z), estrategicamente posicionada de modo a capturar tanto o início da zona radicular quanto a região imediatamente a jusante da planta. Essa configuração permitiu a obtenção de campos de velocidade capazes de descrever as perturbações e os padrões de escoamento induzidos pela interação do fluxo com a massa radicular da *Pistia stratiotes*.

As imagens foram adquiridas a uma taxa de 7,2 Hz sendo cada par de imagens processado por meio do método de correlação cruzada com múltiplas passagens, utilizando janelas iniciais de 64 ×

64 pixels e finais de 32×32 pixels, com sobreposição de 50%. O processamento foi realizado no software DaVis 8.1.3 (LaVision GmbH, Alemanha).

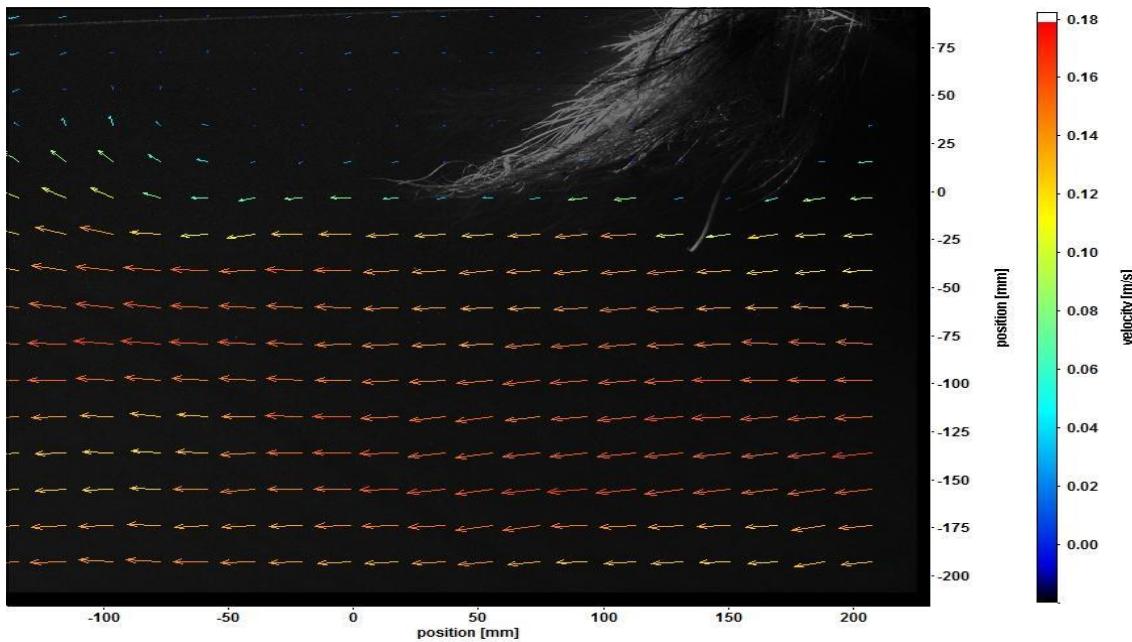
Na etapa de pré-processamento, foi inserida uma máscara especificamente na região correspondente à raiz da *Pistia stratiotes*, para delimitar a área de interesse. Além disso, a calibração espacial foi realizada com base no comprimento conhecido da raiz, para que os deslocamentos medidos em pixels fossem corretamente convertidos em medidas físicas.

A partir dos deslocamentos médios das partículas, e conhecendo o intervalo entre os quadros (Δt), foi possível determinar os campos vetoriais de velocidade do escoamento.

RESULTADOS

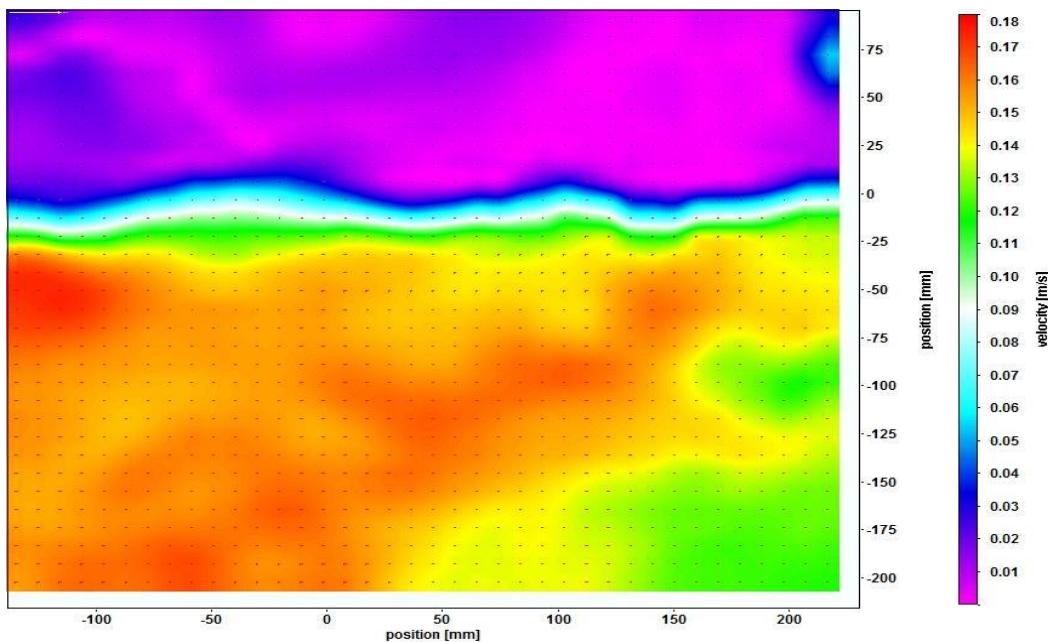
A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) revelou padrões hidrodinâmicos ao redor da zona radicular de *Pistia stratiotes*. A Figura 1 mostra um campo vetorial de velocidades instantâneas, com vetores de menor magnitude sob a planta, indicando uma zona de baixa velocidade e possível recirculação a jusante.

Figura 1: Campo vetorial de velocidade obtido por PIV no entorno das raízes de *Pistia stratiotes*.



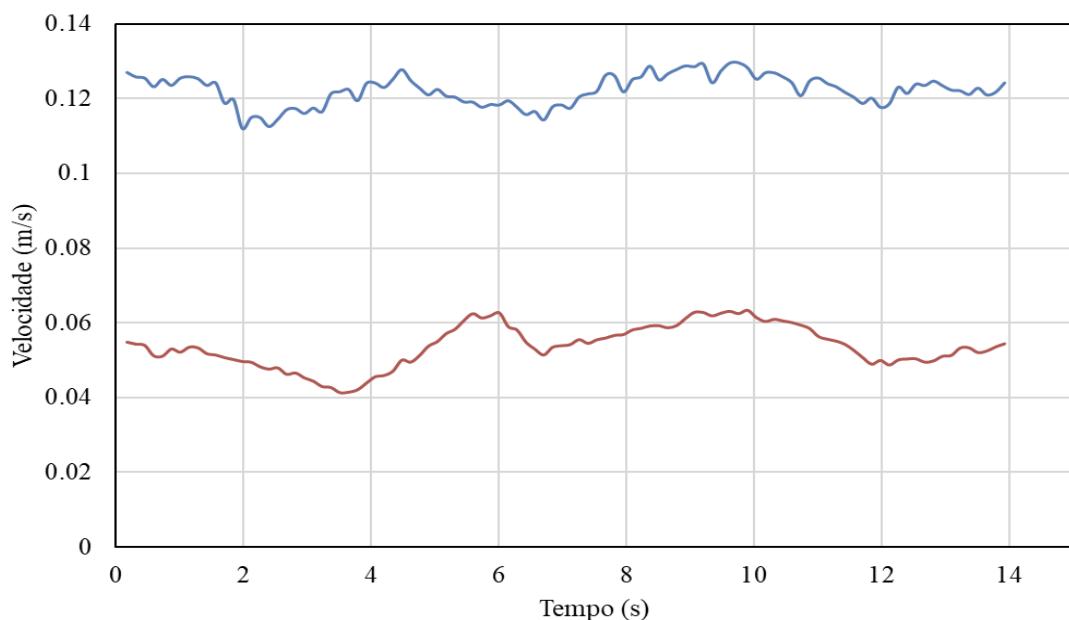
A Figura 2 ilustra o mapa de contorno da velocidade ao longo da profundidade do canal, com velocidades reduzidas nas camadas superiores (tons azulados) devido à obstrução radicular, enquanto as regiões inferiores mantêm velocidades mais elevadas.

Figura 2: Mapa de contorno da magnitude da velocidade (m/s) do escoamento, obtido por PIV, na presença de *Pistia stratiotes*.



A Figura 3 apresenta a variação temporal da velocidade em dois pontos: (i) antes da zona radicular (curva azul, média de 0,122 m/s) e (ii) a jusante, na camada influenciada pelas raízes (curva vermelha, 0,054 m/s), indicando uma redução de 55,74%.

Figura 3: Variação temporal da velocidade em dois pontos: curva azul – antes da zona radicular; curva vermelha – a jusante da zona radicular.



A redução de 55,74% na velocidade média (0,122 m/s para 0,054 m/s) confirma a capacidade de *Pistia stratiotes* de alterar a hidrodinâmica (Wu et al., 2023), aumentando o tempo de detenção hidráulico (TDH), essencial para wetlands flutuantes (Kadlec & Wallace, 2009). Comparado a *Eichhornia crassipes*, que reportou reduções >75% na velocidade longitudinal usando ADV (Downing-Kunz & Stacey, 2012), a redução menor pode refletir a menor densidade radicular de *Pistia stratiotes* ou diferenças no regime de escoamento.

As flutuações na curva vermelha (Figura 3) indicam turbulência amplificada a jusante, promovendo mistura local que aumenta o contato de poluentes (ex.: nitrogênio, metais pesados) com raízes e biofilmes, favorecendo adsorção e degradação microbiana (Nepf, 2012). Vórtices e recirculação prendem partículas suspensas, promovendo sedimentação (Kadlec & Wallace, 2009). Esse efeito, aliado ao TDH elevado, sugere que *Pistia stratiotes* optimiza a remoção de poluentes em sistemas flutuantes.

Contudo, o sombreamento radicular introduziu incertezas nas velocidades medidas. O estudo, restrito a um exemplar e regime fixo, limita a generalização. Futuras pesquisas devem explorar variações na densidade radicular, profundidade e velocidade do escoamento para quantificar a transferência de massa e otimizar sistemas de tratamento baseados na natureza.

CONCLUSÕES

O software se destaca por sua robustez e riqueza de ferramentas, permitindo ao usuário explorar o escoamento em diferentes níveis de detalhe e profundidade analítica. Entretanto, as limitações do presente estudo incluem o fato de as medições serem bidimensionais, não capturando completamente a natureza tridimensional do escoamento. Contudo, a clareza e o detalhe das visualizações bidimensionais são um passo fundamental para futuras investigações.

Novos estudos serão realizados utilizando a técnica PIV, com objetivo de investigar o impacto de diferentes regimes de escoamento (velocidades, profundidades) na reconfiguração das raízes e na hidrodinâmica resultante. Esses estudos formam a pesquisa base para compreendermos como a interação entre fluido e densidade zona porosa podem potencializar o tempo de detenção hidráulico em sistemas de tratamento baseados em vegetação flutuante.

REFERENCIAS

ADRIAN, Ronald J.; WESTERWEEL, Jerry. **Velocimetria de imagem de partículas**. Cambridge University Press, 2011.

DOWNING-KUNZ, Maureen A.; STACEY, Mark T. Observations of mean and turbulent flow structure in a free-floating macrophyte root canopy. **Limnology and Oceanography: Fluids and Environments**, v. 2, n. 1, p. 67-79, 2012.

GUI, Ziqin; SHAN, Yuqi; LIU, Chao. Flow velocity adjustment in a channel with a floating vegetation canopy. **Journal of Hydrology**, v. 628, p. 130528, 2024.

KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott. **Treatment wetlands**. CRC press, 2008.

NEPF, Heidi M. Fluxo e transporte em regiões com vegetação aquática. **Revisão anual de mecânica dos fluidos**, v. 44, n. 1, p. 123-142, 2012.

Raffel M , Willert C , Komphans J. 1998 . **Velocimetria de imagens de partículas: um guia prático** Berlim: Springer.

WU, Chenhui et al. Hydrodynamics affected by submerged vegetation with different flexibility under unidirectional flow. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 1041351, 2023