https://doi.org/10.35685/9nndjq12

MODELAGEM E FISIOLOGIA DO TRANSPORTE VASCULAR EM ARROZ (Oryza sativa L.): UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DOS ASPECTOS MICROFLUIDODINÂMICOS

MODELING AND PHYSIOLOGY OF VASCULAR TRANSPORT IN RICE (Oryza sativa L.): A SYSTEMATIC REVIEW OF MICROFLUIDODYNAMIC ASPECTS

Ricardo Aparecido Santos[1]

Andréa dos Guimarães de Carvalho[2]

1 Universidade Federal de Goiás.

2 Universidade Federal de Goiás.

Resumo: A cultura do arroz (*Oryza sativa L.*) é essencial para a segurança alimentar global, sendo fundamental compreender os mecanismos fisiológicos que sustentam sua produtividade. Esta revisão sistemática analisou 38 estudos publicados entre 2005 e 2025, abordando os aspectos microfluídicos do sistema vascular do arroz, com foco no transporte no xilema e no floema. Os trabalhos foram organizados em três categorias: mecanismos de transporte, fatores que influenciam a eficiência vascular e modelagem teórica. O transporte de água no xilema ocorre pelo modelo de coesão-tensão, enquanto o floema opera por fluxo em massa, ambos dependentes de características anatômicas e condições ambientais. Os resultados mostram que o diâmetro e a densidade dos vasos condutores influenciam diretamente a eficiência do transporte, assim como estresses abióticos, especialmente seca e altas temperaturas, que comprometem o fluxo de água e fotoassimilados. Avanços em modelagem matemática e técnicas de imagem têm ampliado a compreensão da dinâmica vascular, porém ainda existem lacunas na integração desses conhecimentos com aplicações agronômicas. Conclui-se que a eficiência do sistema vascular do arroz resulta da interação entre mecanismos físicos, estrutura anatômica e fatores ambientais. Dessa forma, destaca-se a necessidade de abordagens integradas para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes e resilientes às mudanças ambientais.

Palavras-chave: *Oryza sativa*. Xilema. Floema. Transporte vascular. Fisiologia vegetal. Modelagem hidrodinâmica.

Abstract: Rice (*Oryza sativa L.*) cultivation is essential for global food security, making it crucial to understand the physiological mechanisms that sustain its productivity. This systematic review analyzed 38 studies published between 2005 and 2025, addressing the microfluidic aspects of the rice vascular system, with a focus on transport in the xylem and phloem. The studies were organized into three categories: transport mechanisms, factors influencing vascular efficiency, and theoretical modeling. Water transport in the xylem occurs through the cohesion–tension model, while the phloem operates via mass flow, both depending on anatomical characteristics and environmental conditions. The results show that the diameter and density of conducting vessels directly influence transport efficiency, as do abiotic stresses, especially drought and high temperatures, which impair the flow of water and photoassimilates. Advances in mathematical modeling and imaging techniques have expanded the understanding of vascular dynamics; however, gaps remain in integrating this knowledge with agronomic applications. It is concluded that the efficiency of the rice vascular system results from the interaction between physical mechanisms, anatomical structure, and environmental factors. Therefore, the need for integrated approaches to develop more efficient and resilient cultivars in the face of environmental changes is emphasized.

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

Keywords: *Oryza sativa*. Xylem. Phloem. Vascular transport. Plant physiology. Hydrodynamic modeling.

INTRODUÇÃO

O cultivo do arroz (*Oryza sativa L.*) ocupa uma posição central na produção agrícola global, servindo como alimento básico para mais da metade da população mundial. Além de sua importância socioeconômica, o arroz representa um modelo relevante para estudos fisiológicos em plantas cultivadas, particularmente no que se refere ao transporte interno de água, nutrientes e fotoassimilados, elementos essenciais para o crescimento, a produtividade e a tolerância a estresses abióticos (Wasaya et al., 2022).

O sistema vascular das plantas, composto por xilema e floema, é fundamental para a manutenção da homeostase hídrica e nutricional. O xilema conduz água e minerais das raízes para o restante da planta, enquanto o floema transporta compostos orgânicos das folhas para órgãos de armazenamento ou em crescimento. Embora esses processos ocorram em nível microscópico, eles exercem impacto direto sobre o desempenho agronômico das plantas (Venturas; Hacke; Sperry, 2017).

Sob a perspectiva da biofísica vegetal, o sistema vascular opera de acordo com princípios da dinâmica dos fluidos que regulam o fluxo de líquidos em condutos microscópicos. O modelo de coesão–tensão explica o transporte no xilema por meio da tensão gerada pela transpiração nas folhas, enquanto o modelo de fluxo em massa (Münch) descreve o movimento da seiva floemática impulsionado por diferenças de pressão osmótica entre regiões fonte e dreno (Sane; Singh, 2011).

A compreensão desses mecanismos, juntamente com fatores ambientais (como temperatura, salinidade e disponibilidade hídrica) e fatores anatômicos (como o diâmetro e a densidade dos vasos condutores), é essencial para a interpretação das respostas adaptativas das plantas e para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes (Kirkham, 2014).

Nos últimos anos, avanços tecnológicos como a modelagem hidrodinâmica e técnicas de imageamento não destrutivo têm possibilitado estudos mais precisos da dinâmica vascular. No entanto, apesar da existência de pesquisas sobre o transporte de seiva em plantas, ainda há uma carência de revisões sistemáticas que enfoquem especificamente os aspectos da dinâmica dos fluidos no sistema vascular do arroz, uma cultura cuja fisiologia está intimamente relacionada ao manejo da água e à tolerância a condições adversas (Jensen et al., 2009; Torres-Ruiz et al., 2024).

Dessa forma, o objetivo geral do presente estudo é realizar uma revisão

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

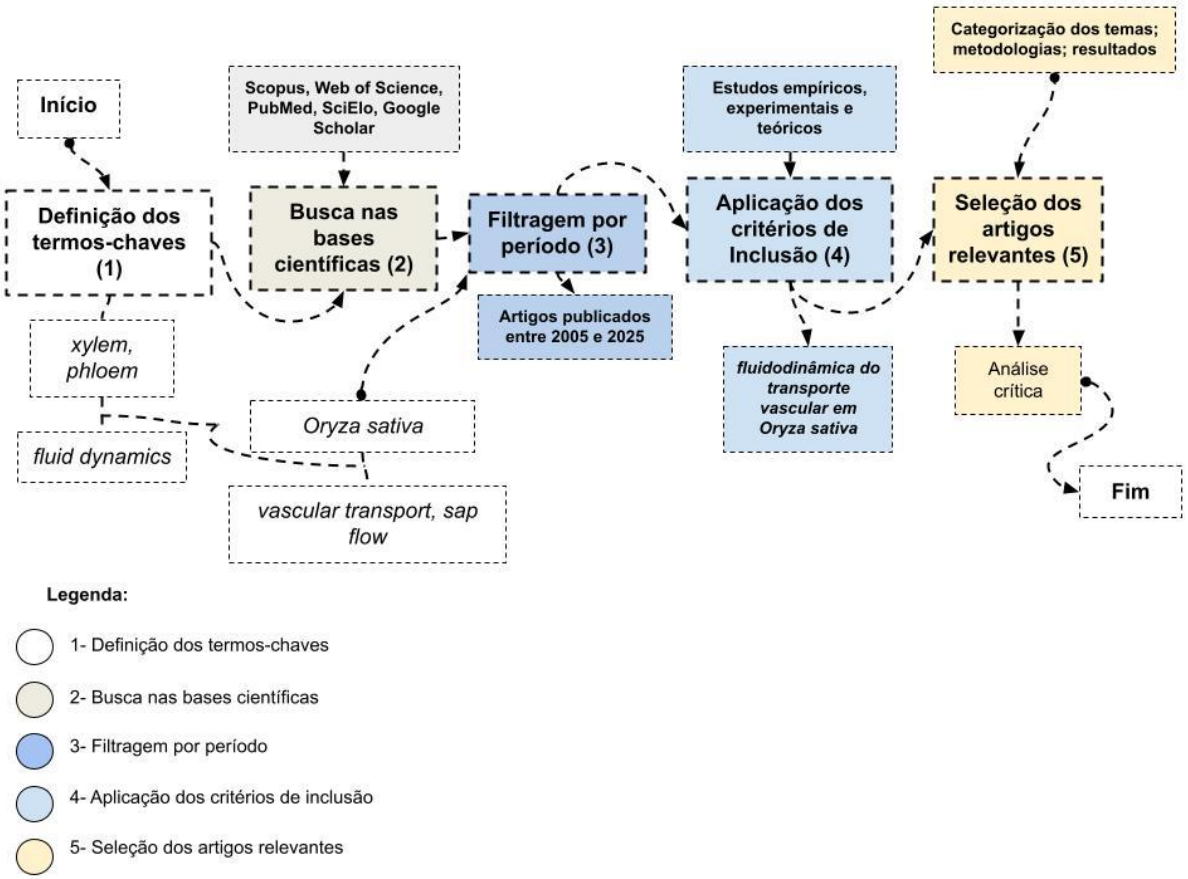
sistemática da literatura científica sobre os aspectos da dinâmica dos fluidos no sistema vascular (xilema e floema) do cultivo do arroz, com o intuito de compreender como os mecanismos de transporte de seiva influenciam o desempenho fisiológico e agronômico da planta. Especificamente, esta revisão busca: identificar e descrever os principais mecanismos de dinâmica dos fluidos envolvidos no transporte de água e solutos pelos vasos do xilema e do floema em plantas de arroz; avaliar os fatores ambientais e anatômicos que influenciam a eficiência do transporte vascular; e sintetizar os modelos teóricos e experimentais utilizados na literatura para o estudo da dinâmica de fluxo no sistema vascular do arroz.

MATERIAIS E MÉTODOS

Diante disso, o presente estudo foi conduzido por meio de uma revisão sistemática da literatura, com base nas diretrizes metodológicas do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Bases de dados científicas como Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO e Google Scholar foram utilizadas para a busca de artigos publicados nos últimos 20 anos (2005–2025), empregando palavras-chave como *xylem*, *phloem, fluid dynamics, Oryza sativa, vascular transport e sap flow*.

Os critérios de inclusão abrangeram estudos empíricos, experimentais e teóricos que abordassem os aspectos de dinâmica dos fluidos do transporte vascular especificamente no cultivo do arroz. Estudos com foco em outras culturas ou que adotassem abordagens exclusivamente moleculares, sem conexão direta com a dinâmica de fluxo, foram excluídos. A Figura 1 a seguir apresenta o fluxograma esquemático do processo de seleção dos estudos aplicado.

Figura 1: Fluxograma do processo de seleção de acordo com o PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)



Fonte: Autores (2026).

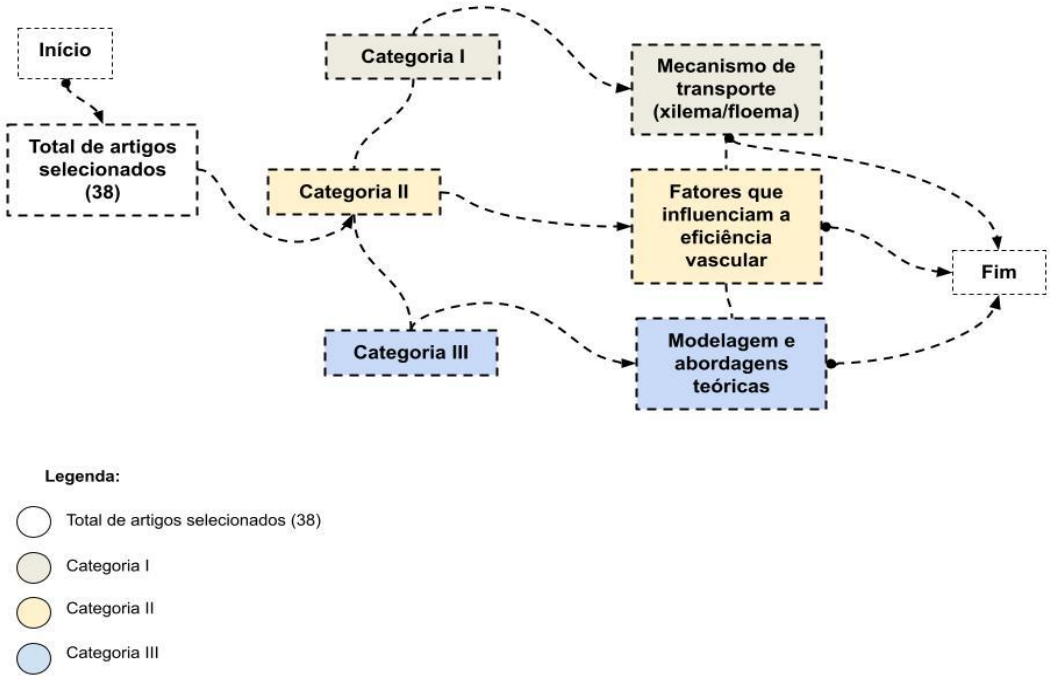
A análise dos dados foi de natureza qualitativa, envolvendo a categorização dos temas abordados, a identificação das abordagens metodológicas e dos principais resultados. Além disso, foi realizada uma análise crítica das lacunas existentes na literatura, acompanhada de sugestões para pesquisas futuras.

Essas informações, integradas por meio das análises, são altamente relevantes considerando os aspectos fluidodinâmicos do sistema vascular (xilema e floema) no cultivo do arroz, conforme evidenciado por uma revisão sistemática. Essa abordagem permite uma representação abrangente e precisa das condições dos sistemas vasculares em plantas de arroz. A combinação dos dados provenientes dos artigos analisados possibilita avaliações mais detalhadas e bem fundamentadas, contribuindo significativamente para a compreensão e o aprimoramento do desempenho fisiológico da cultura.

A revisão sistemática resultou na seleção de 38 artigos científicos publicados entre 2005 e 2025, que abordam direta ou indiretamente os aspectos fluidodinâmicos do transporte vascular em plantas de arroz (*Oryza*

sativa). Esses estudos foram classificados em três categorias temáticas principais: (i) mecanismos de transporte no xilema e no floema; (ii) fatores que influenciam a eficiência vascular; e (iii) modelagem e abordagens teóricas da dinâmica de fluxo em sistemas vegetais. A Figura 2 abaixo apresenta o diagrama esquemático do estudo aplicado para a coleta de dados científicos.

Figura 2: Diagrama esquemático aplicado ao estudo da coleta de dados científicos.



Fonte: Autores (2026).

Essa categorização permitiu uma compreensão mais aprofundada dos avanços e lacunas na literatura sobre a dinâmica dos fluidos no transporte vascular em *Oryza sativa*. Ao sistematizar os dados disponíveis, o presente estudo contribui para a consolidação do conhecimento sobre os mecanismos envolvidos na condução da seiva, fornecendo subsídios para pesquisas futuras voltadas à melhoria da eficiência no uso da água e de nutrientes em cultivos de arroz, especialmente em contextos de mudanças climáticas e escassez de recursos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compreender os mecanismos de transporte vascular em plantas, especialmente no contexto do cultivo do arroz (*Oryza sativa*), é fundamental para avaliar sua eficiência fisiológica sob diferentes condições ambientais, incluindo déficit hídrico,

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

alagamento e variações de nutrientes no solo (Henry et al., 2016).

O transporte de água e solutos pelo xilema e pelo floema está diretamente relacionado à anatomia do tecido vascular, envolvendo características como o diâmetro dos vasos do xilema, a densidade estomática e a disposição dos feixes vasculares, sendo, ainda, fortemente modulada por fatores ambientais, tais como temperatura, radiação solar e salinidade do solo (Qaderi; Martel; Dixon, 2019).

Estudos recentes demonstram que cultivares de arroz adaptados a áreas de várzea apresentam maior densidade de vasos lenhosos e elevada condutância hidráulica, enquanto cultivares de sequeiro desenvolvem adaptações que minimizam a perda de água, como cutículas mais espessas e estômatos altamente reguláveis (Henry et al., 2012). Além disso, a eficiência do transporte pelo floema influencia diretamente a alocação de carboidratos para o desenvolvimento dos grãos, impactando significativamente a produtividade (Li et al., 2022).

Modelos teóricos de fluxo de seiva em arroz indicam que a interação entre disponibilidade hídrica, pressão de turgor e anatomia do xilema é determinante para otimizar a assimilação de nutrientes e reduzir estresses fisiológicos (Luo; Ho; Helliker; Katifori, 2021). A integração dessas informações permite não apenas compreender a dinâmica vascular em condições controladas, mas também subsidiar estratégias de manejo, como irrigação e fertilização, além de orientar a seleção de cultivares mais resilientes a mudanças climáticas e a estresses abióticos (Cardoso; Andrade; Bucior; Martins, 2025).

Mecanismos de transporte no xilema e no floema

Os estudos analisados reforçam que o transporte no xilema é predominantemente impulsionado pelo mecanismo de coesão-tensão, no qual a transpiração foliar cria uma tensão que puxa a água das raízes até as folhas, conforme explicado por Taiz et al. (2017). No caso do floema, o modelo de fluxo em massa (Münch) continua sendo amplamente aceito, no qual a diferença de pressão osmótica entre as fontes (folhas) e os drenos (raízes, grãos) gera o fluxo da seiva elaborada (Turgeon, 2010).

No cultivo do arroz, tem-se observado que a estrutura anatômica dos vasos condutores, especialmente o diâmetro e a densidade dos elementos de vaso do xilema, influencia diretamente a condutividade hidráulica (Kim; Lee, 2010). Estudos que utilizam microscopia e tomografia indicam que cultivares de arroz com vasos mais largos apresentam maior capacidade de transporte de água, particularmente sob condições de déficit hídrico moderado (Hazman; Brown, 2018).

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

Fatores ambientais e anatômicos que influenciam a eficiência do transporte vascular

O transporte vascular das plantas é influenciado pela interação complexa entre fatores anatômicos internos e condições ambientais externas (Agustí; Blanco-Touriñán, 2025). Esses fatores afetam diretamente a condução de água e nutrientes através do xilema e do floema, impactando o crescimento, a sobrevivência e a adaptação das plantas ao ambiente (Sakurai; Miklavcic, 2021).

Condições ambientais, como temperatura, umidade, disponibilidade de água no solo e concentração de CO_2, desempenham papéis cruciais na eficiência do transporte vascular (Dixon, Qaderi & Martel, 2019). Por exemplo, altas temperaturas podem aumentar a taxa de transpiração, intensificando a demanda por transporte de água através do xilema (Sadok; Lopez Jr; Smith, 2021). No entanto, temperaturas extremas podem danificar as células vasculares, comprometendo a eficiência do transporte (Li et al., 2018).

A disponibilidade de água no solo também afeta diretamente a pressão de turgescência e a continuidade da coluna de água no xilema, influenciando a eficiência do transporte (Mencuccini, Manzoni & Christoffersen, 2019). Além disso, a concentração de CO_2 no ambiente pode influenciar a abertura estomática e, consequentemente, a taxa de transpiração e a eficiência do transporte de água (Ahmad et al., 2024). Mudanças nas condições ambientais podem levar as plantas a ajustar suas estruturas anatômicas para otimizar o transporte vascular (Cornelis; Hazak, 2022).

Fatores anatômicos

A anatomia do sistema vascular das plantas, incluindo a estrutura do xilema e do floema, é fundamental para a eficiência do transporte (Skjegstad & Kirkegaard, 2024). O xilema é composto por elementos como traqueídeos e vasos, cujas características, como diâmetro e espessura da parede celular, influenciam a condutividade hidráulica (Mrad et al., 2021).

Vasos mais largos podem aumentar a eficiência do transporte de água, mas também podem tornar as plantas mais suscetíveis à cavitação e ao embolismo, especialmente sob estresse hídrico (Burlett et al., 2022). O floema, por sua vez, é responsável pelo transporte dos produtos da fotossíntese (Nakad, Domec, Sevanto & Katul, 2023).

A estrutura do floema, incluindo a densidade de elementos crivados e a presença de células companheiras, afeta a eficiência do transporte de nutrientes (Knoblauch & Oparka, 2012). Alterações anatômicas no floema podem ocorrer em resposta a variações ambientais, como mudanças na

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

disponibilidade de nutrientes ou estresse hídrico (Comtet, Turgeon & Stroock, 2017).

No caso do arroz (*Oryza sativa L.*), a organização anatômica do sistema vascular evidencia um conjunto de adaptações estruturais e funcionais diretamente relacionadas ao cultivo em ambientes alagados (Stein et al., 2019). O xilema dessa espécie caracteriza-se, de modo geral, pela presença de vasos de menor diâmetro quando comparado ao de plantas adaptadas a ambientes secos, o que constitui uma estratégia eficiente para a redução do risco de falhas hidráulicas, mesmo diante de variações no suprimento hídrico (Barry et al., 2025).

Ademais, a formação de aerênquima nos tecidos radiculares desempenha papel crucial na difusão de oxigênio em solos inundados, contribuindo indiretamente para a manutenção da funcionalidade do sistema vascular (Yamauchi et al., 2013). Outro aspecto relevante em *Oryza sativa* refere-se à sua expressiva plasticidade anatômica em resposta ao estresse hídrico, particularmente em sistemas de cultivo de sequeiro (Kim et al., 2020).

Nessas condições, observam-se modificações estruturais, como o aumento da espessura das paredes celulares dos elementos do xilema e ajustes na proporção entre vasos e traqueídeos, os quais favorecem maior resistência à cavitação (Jacobsen; Ewers; Pratt; Paddock III; Davis, 2005). Tais alterações configuram importantes mecanismos adaptativos, permitindo a manutenção do transporte eficiente de água em ambientes com disponibilidade hídrica limitada (Hassan et al., 2023).

No que concerne ao floema, estudos indicam que a eficiência no transporte de fotoassimilados está intimamente associada à atividade metabólica das células companheiras e à integridade estrutural dos elementos crivados, sobretudo durante a fase reprodutiva da planta (Braun, Wang e Ruan, 2014). A adequada redistribuição de assimilados para os grãos depende de um sistema floemático funcional, sendo que alterações anatômicas ou fisiológicas nesse tecido podem impactar diretamente a produtividade da cultura (Li et al., 2022).

Dessa forma, a anatomia vascular em *Oryza sativa* assume papel central tanto na adaptação da espécie a diferentes condições ambientais quanto no seu desempenho agronômico.

Interações e adaptações

As plantas desenvolvem estratégias adaptativas para equilibrar a eficiência e a segurança do transporte vascular (Liu et al., 2021). Espécies adaptadas a ambientes secos podem apresentar xilema com paredes celulares mais espessas e vasos menores, reduzindo o risco de embolia, mas também diminuindo a eficiência do transporte de água (Lens et al., 2022). Consequentemente,

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

espécies em ambientes com abundância de água podem ter vasos maiores, aumentando a eficiência do transporte, mas tornando-se mais vulneráveis a danos por cavitação (Hacke et al., 2017).

Assim, fatores ambientais podem influenciar a anatomia do sistema vascular nas plantas (Wargowsky et al., 2023). Portanto, o aumento da concentração de CO_2 pode levar a mudanças na estrutura do xilema e do floema, afetando a eficiência do transporte. Essas adaptações anatômicas são essenciais para a sobrevivência e o crescimento das plantas durante períodos de mudança ambiental (Cohen; Lichston; De Macêdo; Rachmilevitch, 2022).

Assim, o transporte vascular nas plantas é o resultado de uma interação dinâmica entre fatores anatômicos e ambientais. Compreender essas interações é crucial para entender como as plantas respondem às mudanças em seu ambiente.

Modelagem e abordagens teóricas aplicadas à dinâmica do fluxo

Do ponto de vista teórico, diversos estudos empregaram modelos hidrodinâmicos e computacionais para simular o fluxo de seiva no sistema vascular do arroz.

Modelos de fluxo contínuo baseados nas equações de Darcy e Hagen-Poiseuille são amplamente utilizados para descrever o transporte no xilema, particularmente em relação à perda hidráulica e às propriedades reológicas da água, como a viscosidade (Loepfe, Martinez-Vilalta, Piñol & Mencuccini, 2007). Esses modelos permitem uma representação quantitativa do movimento da seiva bruta sob gradientes de pressão e permeabilidade tecidual.

Quanto ao floema, simulações computacionais baseadas no modelo de Münch foram aprimoradas com dados experimentais sobre pressão osmótica, possibilitando uma análise detalhada da taxa de transporte de sacarose e outros solutos ao longo do eixo do caule (Münch, 1930). Essa integração de dados empíricos e modelagem teórica tem facilitado avanços na compreensão do mecanismo de translocação de fotoassimilados.

Além disso, técnicas avançadas de imagem, como a tomografia por ressonância magnética nuclear (RMN), têm sido empregadas para validar os modelos propostos, fornecendo informações espaciais e temporais precisas sobre a dinâmica do fluxo vascular em plantas (Blystone et al., 2024).

No entanto, observa-se uma notável escassez de estudos que integrem modelos matemáticos da dinâmica vascular com parâmetros agronômicos relacionados ao desempenho da cultura do arroz. Essa lacuna destaca uma oportunidade promissora para pesquisas futuras, visando conectar a dinâmica do transporte vascular com

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

produtividade, eficiência no uso de recursos e tolerância a estresses abióticos e bióticos.

CONCLUSÕES

Apesar dos avanços significativos na compreensão dos processos de dinâmica de fluidos em plantas de arroz, a literatura atual ainda apresenta lacunas relevantes que limitam uma compreensão abrangente do tema. Primeiro, há uma escassez de estudos que considerem, de maneira integrada, os efeitos combinados de múltiplos estresses abióticos, particularmente água, calor e salinidade, sobre a dinâmica do fluxo de água e o transporte de solutos. Essa abordagem multivariada é importante para refletir as condições reais de campo, onde esses estresses frequentemente ocorrem simultaneamente.

Além disso, a maioria dos modelos disponíveis na literatura permanece restrita às escalas celular ou tecidual, o que limita sua aplicabilidade em contextos agronômicos mais amplos. Estudos utilizando modelagem em escala de planta inteira ou de campo são raros, comprometendo a extrapolação dos resultados para condições práticas de cultivo.

Por fim, há uma falta de investigações que correlacionem direta e quantitativamente a anatomia vascular com o desempenho agronômico no contexto geral de arroz (*Oryza sativa L.)*. Estabelecer essas correlações poderia ser crucial para uma melhor compreensão das bases morfofisiológicas da tolerância ao estresse e para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes em termos de transporte de água e produtividade.

REFERÊNCIAS

AHMAD, S.; YIOTIS, C.; XU, W.; KNAPPE, J.; GILL, L.; MCELWAIN, J. Lower grass stomatal conductance under elevated CO_2 can decrease transpiration and evapotranspiration rates despite carbon fertilization. **Plant Direct**, v. 8, n. 10, e70013, 2024.

AGUSTÍ, J.; BLANCO-TOURIÑÁN, N. Environmental regulation of plant vascular networks. **Trends in Plant Science**, 2025.
BARRY, L.; CABRERA, J. C. B.; LUCAS, M.; LOBET, G.; BOURSIAC, Y.; GRONDIN, A. Role of xylem in root hydraulics: functionality and implications for drought adaptation. **Quantitative Plant Biology**, v. 6, p. e42, 2025.

BLYSTONE, S.; NUIXE, M.; TRAORÉ, A. S.; COCHARD, H.; PICON-COCHARD, C.; PAGÉS, G. Towards portable MRI in the plant sciences. **Plant Methods**, v. 20, n. 1, p. 31, 2024.

BRAUN, D. M.; WANG, L.; RUAN, Y. L. Understanding and manipulating sucrose phloem loading, unloading, metabolism, and signalling to enhance crop yield and food security. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 7, p. 1713–1735, 2014.

BURLETT, R.; PARISE, C.; CAPDEVILLE, G.; COCHARD, H.; LAMARQUE, L. J.; KING, A.; DELZON, S. Measuring xylem hydraulic vulnerability for long-vessel species: An improved methodology with the flow centrifugation technique. **Annals of Forest Science**, v. 79, n. 5, p. 5, 2022.

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

CARDOSO, A. A.; ANDRADE, M. T.; BUCIOR, E. R.; MARTINS, S. C. Plant hydraulic traits influencing crop production in water-limited environments. **Plant Physiology**, v. 199, n. 3, p. kiaf521, 2025.

COHEN, I.; LICHSTON, J. E.; DE MACÊDO, C. E. C.; RACHMILEVITCH, S. Leaf coordination between petiole vascular development and water demand in response to elevated CO_2 in tomato plants. **Plant Direct**, v. 6, n. 1, e371, 2022.

COMTET, J.; TURGEON, R.; STROOCK, A. D. Phloem loading through plasmodesmata: A biophysical analysis. **Plant Physiology**, v. 175, n. 2, p. 904–915, 2017.

CORNELIS, S.; HAZAK, O. Understanding the root xylem plasticity for designing resilient crops. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n. 6, p. 664–676, 2022.

DIXON, S. L.; QADERI, M. M.; MARTEL, A. B. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 65, 2019.

HACKE, U. G.; SPICER, R.; SCHREIBER, S. G.; PLAVCOVÁ, L. An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. **Plant, Cell & Environment**, v. 40, n. 6, p. 831–845, 2017.

HASSAN, M. A.; DAHU, N.; HONGNING, T.; QIAN, Z.; YUEMING, Y.; YIRU, L.; SHIMEI, W. Drought stress in rice: morpho-physiological and molecular responses and marker-assisted breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1215371, 2023.

HAZMAN, M.; BROWN, K. M. Progressive drought alters architectural and anatomical traits of rice roots. **Rice**, v. 11, p. 62, 2018.

HENRY, A.; CAL, A. J.; BATOTO, T. C.; TORRES, R. O.; SERRAJ, R. Root attributes affecting water uptake of rice (**Oryza sativa**) under drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 13, p. 4751–4763, 2012.

HENRY, A.; WEHLER, R.; GRONDIN, A.; FRANKE, R.; QUINTANA, M. Environmental and physiological effects on grouping of drought-tolerant and susceptible rice varieties related to rice (**Oryza sativa**) root hydraulics under drought. **Annals of Botany**, v. 118, n. 4, p. 711–724, 2016.

JACOBSEN, A. L.; EWERS, F. W.; PRATT, R. B.; PADDOCK III, W. A.; DAVIS, S. D. Do xylem fibers affect vessel cavitation resistance? **Plant Physiology**, v. 139, n. 1, p. 546–556, 2005.

JENSEN, K. H.; RIO, E.; HANSEN, R.; CLANET, C.; BOHR, T. Osmotically driven pipe flows and their relation to sugar transport in plants. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 636, p. 371–396, 2009.

KIM, H. K.; LEE, S. J. Synchrotron X-ray imaging for nondestructive monitoring of sap flow dynamics through xylem vessel elements in rice leaves. **New Phytologist**, v. 188, n. 4, p. 1085–1098, 2010.

KIM, Y.; CHUNG, Y. S.; LEE, E.; TRIPATHI, P.; HEO, S.; KIM, K. H. Root response to drought stress in rice (**Oryza sativa** L.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 4, p. 1513, 2020.

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. 2. ed. Academic Press, 2014.

KNOBLAUCH, M.; OPARKA, K. The structure of the phloem—still more questions than answers. **The Plant Journal**, v. 70, n. 1, p. 147–156, 2012.

LENS, F.; GLEASON, S. M.; BORTOLAMI, G.; BRODERSEN, C.; DELZON, S.; JANSEN, S. Functional xylem characteristics associated with drought-induced embolism in angiosperms. **New**

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

Phytologist, v. 236, n. 6, p. 2019–2036, 2022.

LI, B.; GAO, K.; REN, H.; TANG, W. Molecular mechanisms governing plant responses to high temperatures. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 60, n. 9, p. 757–779, 2018.

LI, G.; CUI, K.; HU, Q.; WANG, W.; PAN, J.; ZHANG, G.; PENG, S. Phloem unloading in developing rice caryopses and its contribution to non-structural carbohydrate translocation from stems and grain yield formation. **Plant and Cell Physiology**, v. 63, n. 10, p. 1510–1525, 2022.

LI, G.; ZHOU, C.; YANG, Z.; ZHANG, C.; DAI, Q.; HUO, Z.; XU, K. Low nitrogen enhances apoplastic phloem loading and improves the translocation of photoassimilates in rice leaves and stems. **Plant and Cell Physiology**, v. 63, n. 7, p. 991–1007, 2022.

LIU, H.; YE, Q.; GLEASON, S. M.; HE, P.; YIN, D. Weak tradeoff between xylem hydraulic efficiency and safety: Climatic seasonality matters. **New Phytologist**, v. 229, n. 3, p. 1440–1452, 2021.

LOEPFE, L.; MARTINEZ-VILALTA, J.; PIÑOL, J.; MENCUCCINI, M. The relevance of xylem network structure for plant hydraulic efficiency and safety. **Journal of Theoretical Biology**, v. 247, n. 4, p. 788–803, 2007.

LUO, Y.; HO, C. L.; HELLIKER, B. R.; KATIFORI, E. Leaf water storage and robustness to intermittent drought: A spatially explicit capacitive model for leaf hydraulics. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 725995, 2021.

MENCUCCINI, M.; MANZONI, S.; CHRISTOFFERSEN, B. Modelagem de fluxos de água em plantas: Dos tecidos à biosfera. **New Phytologist**, v. 222, n. 3, p. 1207–1222, 2019.

MRAD, A.; JOHNSON, D. M.; LOVE, D. M.; DOMEC, J. C. The roles of conduit redundancy and connectivity in xylem hydraulic functions. **New Phytologist**, v. 231, p. 996–1007, 2021.

MÜNCH, E. **Stoffbewegungen in der Pflanze**. G. Fischer, 1930.

NAKAD, M.; DOMEC, J. C.; SEVANTO, S.; KATUL, G. Toward a realistic representation of sucrose transport in the phloem of plants. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 128, n. 3, e2022JG007361, 2023.

QADERI, M. M.; MARTEL, A. B.; DIXON, S. L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 65, 2019.

SADOK, W.; LOPEZ, J. R.; SMITH, K. P. Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n. 7, p. 2102–2116, 2021.

SAKURAI, G.; MIKLAVCIC, S. J. On the efficacy of water transport in leaves: A coupled xylem-phloem model. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 615457, 2021.
SANE, S. P.; SINGH, A. K. Water movement in vascular plants: A primer. arXiv, 2011.

SKJEGSTAD, L. E. J.; KIRKEGAARD, J. B. Modeling full-scale leaf venation networks. arXiv, 2024.

STEIN, R. J., DUARTE, G. L., SCHEUNEMANN, L., SPOHR, M. G., DE ARAÚJO JÚNIOR, A. T., RICACHENEVSKY, F. K., ... & FETT, J. P. Genotype variation in rice (Oryza sativa L.) tolerance to Fe toxicity might be linked to root cell wall lignification. Frontiers in plant science, v. 10, p. 746, 2019.

https://doi.org/10.35685/9nndjq12

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Artmed, 2017.

TORRES-RUIZ, J. M.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BOIVIN, T.; BURLETT, R.; CAILLERET, M.; … MARTIN-ST PAUL, N. K. Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. New Phytologist, v. 241, n. 3, p. 984–999, 2024.

TURGEON, R. The role of phloem loading reconsidered. **Plant Physiology**, v. 152, n. 4, p. 1817–1823, 2010.

VENTURAS, M. D.; HACKE, U. G.; SPERRY, J. S. Plant xylem hydraulics: What we understand, current research, and future challenges. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 59, n. 6, p. 356–389, 2017.

WARGOWSKY, I. K.; SMITH, J. E. N.; GAJJAR, N.; HOLDO, R. M. Root vascular anatomy predicts maximum growth rates in savanna trees and grasses. **Biotropica**, v. 55, n. 6, p. 1159–1164, 2023.

WASAYA, A.; YASIR, T. A.; SARWAR, N.; MUBEEN, K.; RAJENDRAN, K.; HADIFA, A.; SABAGH, A. E. Mudanças climáticas e segurança global do arroz. In: Técnicas Modernas de Produção de Arroz. Springer, 2022. p. 13–26.

YAMAUCHI, T.; SHIMAMURA, S.; NAKAZONO, M.; MOCHIZUKI, T. Aerenchyma formation in crop species: a review. **Field Crops Research**, v. 152, p. 8–16, 2013.