

## PEGADAS HÍDRICA AZUL E VERDE NA ORIZICULTURA: UMA ANÁLISE ESPACIAL NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Rafael Nunes dos Santos<sup>1</sup>; Francisco Alexandre de Moraes<sup>2</sup>; Annette Droste<sup>3</sup>.

Palavras-chave: *Oryza Sativa*, demanda hídrica do arroz, dependência de irrigação, recursos hídricos, variabilidade climática.

### Introdução

Estima-se que cerca de 70% do uso global de água seja destinado à agricultura (HADDELAND et al., 2019). A isso, associa-se a projeção de um aumento de 50% na demanda mundial de água até 2030 (ONU, 2019), o que torna urgente a adoção de estratégias que promovam o seu uso racional, especialmente no meio agrícola. Nesse contexto, a Pegada Hídrica surge como um indicador relevante para mensurar o consumo hídrico na produção de alimentos, sendo composta por três componentes: Pegada Hídrica Azul (PHA), Pegada Hídrica Verde (PHV) e Pegada Hídrica Cinza (PHC). A Pegada Hídrica Verde refere-se à água da chuva consumida pela planta; a Pegada Hídrica Azul corresponde à água de irrigação proveniente de rios ou lençóis freáticos; e a Pegada Hídrica Cinza é o volume de água necessário para diluir a poluição gerada durante a produção (HOEKSTRA, 2011). Para manejo mais eficiente da água nas lavouras orizícolas, é desejável maximizar o uso da água da chuva e reduzir a dependência da irrigação proveniente de mananciais. No estado do Rio Grande do Sul (RS), o arroz é cultivado em seis regiões orizícolas, sujeitas a diferentes regimes pluviométricos. Mensurar espacialmente essa proporção é essencial para identificar áreas críticas e direcionar estratégias de uso racional da água na orizicultura. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a variação espacial das Pegadas Hídrica Azul e Verde na orizicultura no RS, considerando vinte bacias hidrográficas, ao longo de quatro safras agrícolas.

### Material e Métodos

O estudo foi realizado em vinte bacias hidrográficas do estado do RS com cultivo de arroz irrigado, visando à análise da PHA e da PHV. Foram utilizados dados meteorológicos diários, incluindo precipitação, temperaturas do ar mínima e máxima, radiação solar global, umidade relativa do ar e velocidade do vento, provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), obtidos de estações localizadas em áreas representativas de cada bacia hidrográfica (BH). As bacias estudadas e suas respectivas estações meteorológicas foram: BHRG – Rio Gravataí (Porto Alegre - Jardim Botânico; Lat. -30° 03' 13", Long. -51° 10' 29"), BHRS – Rio dos Sinos (Canela; Lat. -29° 22' 08", Long. -50° 49' 38"), RC – Rio Caí (Canela; Lat. -29° 22' 08", Long. -50° 49' 38"), RTA – Rio Taquari-Antas (Bento Gonçalves; Lat. -29° 09' 52,49", Long. -51° 32' 03,13"), VVM – Vacacaí–Vacacaí Mirim (São Gabriel; Lat. -30° 20' 29", Long. -54° 18' 39"), BJ – Baixo Jacuí (Rio Pardo; Lat. -29° 52' 20", Long. -52° 22' 55"), LG – Lago Guaíba (Porto Alegre - Jardim Botânico; Lat. -30° 03' 13", Long. -51° 10' 29"), RP – Rio Pardo (Rio Pardo; Lat. -29° 52' 20", Long. -52° 22' 55"), RTD – Rio Tramandaí (Tramandaí; Lat. -30° 00' 37", Long. -50° 08' 09"), LM – Litoral Médio (Mostardas; Lat. -31° 14' 54", Long. -50° 54' 23"), RCQ – Rio Camaquã (Camaquã; Lat. -30° 48' 28,63", Long. -51° 50' 03,26"), MSG – Mirim – São Gonçalo (Rio Grande; Lat. -32° 04' 44", Long. -52° 10' 04"), RM – Rio Mampituba (Torres; Lat. -29° 21'

<sup>1</sup> Dr.º Rafael Nunes dos Santos, Pesquisador, Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), Avenida Bonifácio Carvalho Bernardes, 1494. Vila Carlos Wilkens. Cachoeirinha/RN. CEP 94930-030, rafael-santos@irga.rs.gov.br

<sup>2</sup> Dr.º Francisco Alexandre de Moraes, Pesquisador, Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), francisco-moraes@irga.rs.gov.br

<sup>3</sup> Dra. Annette Droste, Professora, Universidade Feevale, annette@feevale.br.

01", Long. -49° 44' 00"), RPN – Rio Piratinim (São Luiz Gonzaga; Lat. -28° 25' 02", Long. -54° 57' 45"), RI – Rio Ibicuí (Uruguaiana; Lat. -29° 50' 23,53", Long. -57° 04' 54,84"), RQ – Rio Quaraí (Quarai; Lat. -30° 22' 06,88", Long. -56° 26' 13,61"), RSM – Rio Santa Maria (Dom Pedrito; Lat. -31° 00' 09", Long. -54° 37' 05"), RN – Rio Negro (Bagé; Lat. -31° 20' 52", Long. -54° 00' 48"), RIJ – Rio Ijuí (Cruz Alta; Lat. -28° 36' 12,38", Long. -53° 40' 24,95") e BI – Butuí – Icamaquã (São Borja; Lat. -28° 39' 00", Long. -56° 00' 59"). Os cálculos da PHA e da PHV foram realizados segundo a metodologia original proposta por Hoekstra et al. (2011), que estima indiretamente a demanda hídrica da cultura, excluindo o uso da água proveniente da percolação, conforme apresentado na Figura 1.

#### Pegada Hídrica Verde

$$(1) \text{PHverde} = \frac{\text{DHCverde}}{P}$$

$$(2) \text{DHCverde} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{pdc}} \text{ETverde}_d$$

$$(3) \text{ETverde} = \min(\text{ETc}, \text{Pefect})$$

$$(4) \text{ETc} = \text{modelo FAO-Penman-Monteith}$$

$$(5) \text{Pefect} = \begin{cases} P_{\text{total}} / 125 \times (125 - 0.2 \times P_{\text{total}}), & \text{se } P_{\text{total}} \leq 250 \text{ mm} \\ (125 + 0.1 \times P_{\text{total}}), & \text{se } P_{\text{total}} \geq 250 \text{ mm} \end{cases}$$

#### Pegada Hídrica Azul

$$(6) \text{PHazul} = \frac{\text{DHCAzul}}{P}$$

$$(7) \text{DHCAzul} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{pdc}} \text{ETazul}_d$$

$$(8) \text{ETazul} = \min(0, \text{ETc} - \text{Pefect})$$

$$(9) \text{ETc} = \text{modelo FAO-Penman-Monteith}$$

$$(10) \text{Pefect} = \begin{cases} P_{\text{total}} / 125 \times (125 - 0.2 \times P_{\text{total}}), & \text{se } P_{\text{total}} \leq 250 \text{ mm} \\ (125 + 0.1 \times P_{\text{total}}), & \text{se } P_{\text{total}} \geq 250 \text{ mm} \end{cases}$$

Figura 1. Etapas para os cálculos da PHA e da PHV na cultura do arroz irrigado. Fonte: Hoekstra et al. (2011). Legenda: PHverde: Pegada Hídrica Verde ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ); PHazul: Pegada Hídrica Azul ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ); DHCverde: Demanda hídrica verde da cultura ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ); DHCAzul: Demanda hídrica azul da cultura ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ); P: Produtividade de grãos ( $\text{t ha}^{-1}$ ); ETverde: Evapotranspiração da água verde ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); ETazul: Evapotranspiração da água azul ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); ETc : Evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); Pefect: Precipitação efetiva ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); Ptotal: Precipitação total ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

O cálculo considerou um ciclo de 120 dias da cultura do arroz, definido com base nas datas médias de semeadura em cada safra (IRGA, 2023). Foram analisadas quatro safras consecutivas (2014/2015 a 2017/2018), em que os períodos estimados de ciclo da cultura foram os seguintes: na safra 2014/2015, entre 28/10/2014 e 28/02/2015; na de 2015/2016, entre 08/11/2015 e 08/03/2016; na de 2016/2017, entre 14/10/2016 e 14/02/2017 e, na safra 2017/2018, entre 08/11/2017 e 08/03/2018. Os dados de produtividade de grãos de arroz foram coletados por município e fornecidos pelo IRGA, sendo agregados por bacia, conforme a proporção da área municipal pertencente a cada uma, segundo critérios da SEMA/RS (SEMA/RS, 2022). A análise estatística foi realizada por meio do teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), aplicado após a verificação da normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e as transformações necessárias. Cada safra foi considerada uma repetição no teste. Além disso, foi realizada uma análise de correlação de Spearman entre PHA e PHV, cujos resultados foram interpretados conforme critérios descritos por Callegari-Jacques (2003).

## Resultados e Discussão

A análise espacial das PHA e PHV médias no período de 2014/15 a 2017/18 revelou variações significativas entre as vinte bacias hidrográficas orizícolas do RS, como apresentado na Figura 2.

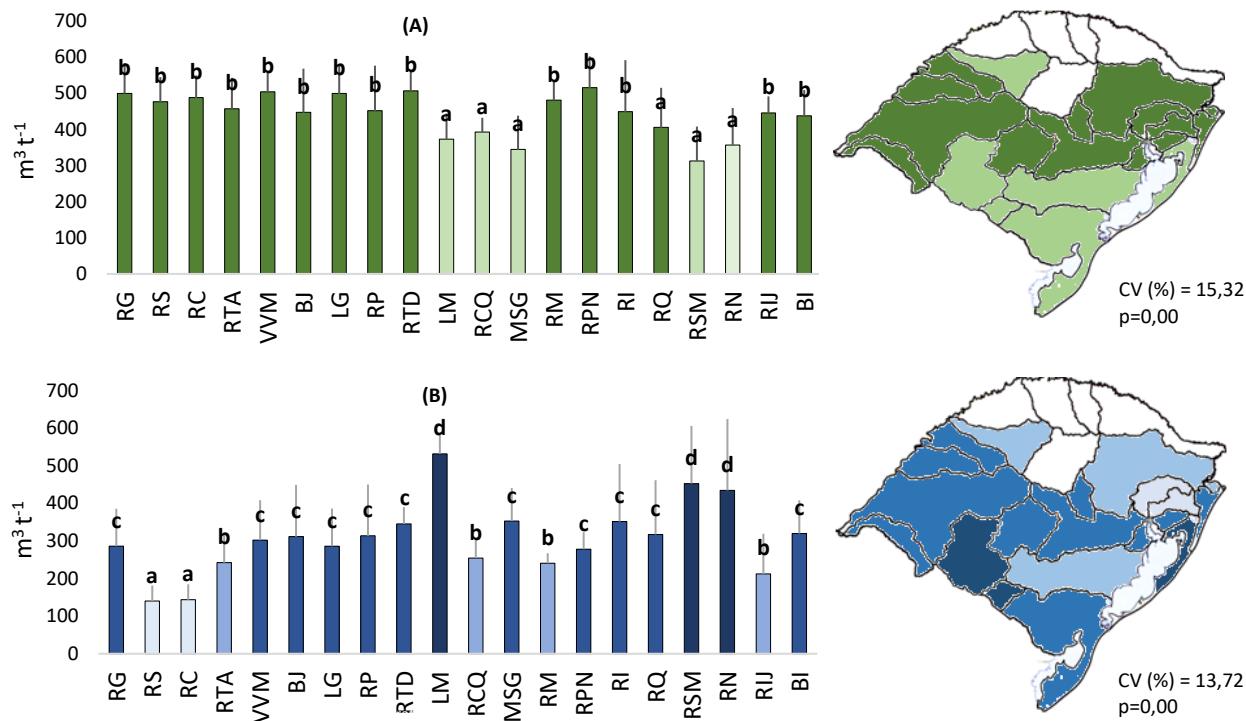


Figura 2. Valores médios das Pegadas Hídrica Verde (PHV) (A) e Azul (PHA) (B) nas vinte bacias hidrográficas do estado do RS durante quatro safras (2014/15 a 2017/18) de arroz irrigado. As médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ), indicando diferenças significativas entre as bacias com letras distintas. Legenda: RG – Rio Gravataí; RS – Rio dos Sinos; RC – Rio Caiá; RTA – Rio Taquari-Antas; VVM – Vacacaí–Vacacaí Mirim; BJ – Baixo Jacuí; LG – Lago Guaíba; RP – Rio Pardo; RTD – Rio Tramandaí; LM – Litoral Médio; RCQ – Rio Camaquã; MSG – Mirim – São Gonçalo; RM – Rio Mampituba; RPN – Rio Piratinim ou Piratini; RI – Rio Ibicuí; RQ – Rio Quaraí; RSM – Rio Santa Maria; RN – Rio Negro; RIJ – Rio Ijuí e BI – Butuí – Icamaquã.

O período correspondente às quatro safras de arroz irrigado analisadas (2014/15 a 2017/18) foi marcado por condições climáticas distintas, incluindo um El Niño fraco (2014/15), um El Niño muito forte (2015/16) e duas fases fracas de La Niña (2016/17 e 2017/18), que influenciaram a disponibilidade hídrica e as necessidades de irrigação nas lavouras de arroz. A PHV, que representa o consumo de água da chuva armazenada no solo, apresentou valor médio de  $443 m^3 t^{-1}$ , variando entre 313 a  $516 m^3 t^{-1}$  nas diferentes bacias. O teste de Scott-Knott identificou diferenças significativas entre as regiões, agrupando-as em dois grupos. As cinco bacias localizadas mais ao sul do Estado, Mirim-São Gonçalo (MSG), Rio Camaquã (RCQ), Litoral Médio (LM), Rio Santa Maria (RSM) e Rio Negro (RN) apresentaram menores valores de PHV em relação às demais.

Já a Pegada Hídrica Azul (PHA), que mede o uso de água superficial ou subterrânea, teve média, no período correspondente às cinco safras de arroz irrigado analisadas (2014/15 a 2017/18), de  $306 m^3 t^{-1}$ , com variação de 109 a  $702 m^3 t^{-1}$ . Três bacias (Rio Santa Maria (RSM), Rio Negro (RN) e Litoral Médio (LM)) destacaram-se com os maiores valores de PHA, indicando maior dependência de irrigação. Por outro lado, duas bacias (Rios dos Sinos (RS) e Caiá (RC)), com regimes pluviométricos mais regulares, apresentaram os menores índices de PHA. A análise de correlação mostrou forte relação inversa entre PHV e PHA ( $-0,72$ ), ou seja, quando a água da chuva é menor (PHV), o uso de irrigação aumenta (PHA), e vice-versa. Essa dinâmica ajuda a entender como o cultivo do arroz responde às mudanças no clima e pode orientar estratégias de manejo da água adaptadas às condições locais.

A PHV foi responsável por suprir cerca de 59% da demanda hídrica média das lavouras de arroz irrigado nas quatro safras analisadas. Esses resultados contrastam com os observados em outros países, especialmente em regiões como o continente asiático, onde a PHA responde

por até 95% do uso total de água (ALDAYA; MUNÓZ; HOEKSTRA, 2010). No Iraque, também na Ásia, estudo recente apontou que a PHA representou 99% da água utilizada no cultivo do arroz (EWAID et al., 2021), evidenciando forte dependência de sistemas de irrigação.

## Conclusões

A análise espacial da oricultura no Rio Grande do Sul revela diferenças nas PHV e PHA entre as bacias hidrográficas, influenciadas por condições climáticas e geográficas distintas. Bacias do sul e litoral, como as dos rios Santa Maria, Negro e Litoral Médio, mostram maior vulnerabilidade à escassez hídrica, enquanto outras, como as dos rios Sinos e Caí, apresentam maior resiliência. Destaque para a PHV, que atende, em média, 59% da demanda hídrica do arroz, um percentual superior ao observado em alguns países do continente asiático, evidenciando o grande papel da água da chuva na produção gaúcha. Assim, é essencial desenvolver estratégias de gestão de água adaptadas a cada região, com foco nas áreas mais vulneráveis, para otimizar o uso dos recursos hídricos e garantir a sustentabilidade da oricultura no estado.

## Referências

- ALDAYA, M. M.; MUÑOZ, G.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprint of cotton, wheat and rice production in Central Asia. Delft: UNESCO-IHE, 2010.
- BOUMAN, B. A. M.; TUONG, T. P.; BHUIYAN, S. I. Rice and water. Advances in Agronomy, New York, v. 92, p. 187–237, 2007.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Aramed, 2003. 255 p.
- EWAID, S. H.; AL-ANSI, M. A. A.; ALI, N. S. Water Footprint of Rice in Iraq. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Bristol, v. 722, n. 1, p. 012008, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1755-1315/722/1/012008>>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- HADDELAND, I.; HEAVISIDE, C.; BOSSIO, D.; LEVY, P. E. Global water resources affected by human interventions and climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington, v. 111, p. 3251–3256, 2014.
- HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. Manual de avaliação da Pegada Hídrica. Londres: Earthscan, 2011. 191 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Tabela de dados das estações. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ (IRGA). Boletim de resultados da safra 2020/2021 em terras baixas: arroz irrigado e soja. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202109/27151231-boletim-de-resultados-da-safra-2020-2021-compressed.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2024.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris, 2019. Disponível em: <[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48225/0000367138\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48225/0000367138_por)>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO RIO GRANDE DO SUL. Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>>. Acesso em: 4 dez. 2024.