

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Tese

Resposta do arroz irrigado por sulco as adubações fosfatada e potássica

Valdecir André Kirch

Pelotas-RS, 2026

Valdecir André Kirch

Resposta do arroz irrigado por sulco as adubações fosfatada e potássica

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientadora: Dra. Walkyria Bueno Scivittaro

Co-orientador: Prof. Dr. Filipe Selau Carlos

Pelotas-RS, 2026

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

K58r Kirch, Valdecir André

Resposta do arroz irrigado por sulco as adubações fosfatada e potássica [recurso eletrônico] / Valdecir André Kirch ; Walkyria Bueno Scivittaro, orientadora ; Filipe Selau Carlos, coorientador. — Pelotas, 2026.

106 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. Oryza sativa L. 2. Irrigação por sulco. 3. Fósforo. 4. Potássio. 5. Adubo. I. Scivittaro, Walkyria Bueno, orient. II. Carlos, Filipe Selau, coorient. III. Título.

CDD 633.18912

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Valdecir André Kirch

Resposta do arroz irrigado por sulco as adubações fosfatada e potássica

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências (área do conhecimento Manejo e Conservação do Solo e da Água), da Universidade Federal de Pelotas.

Data de defesa: 30/06/2026

Banca examinadora:

Dra. Walkyria Bueno Scivittaro (Orientadora)

Doutora em Ciências - Energia Nuclear na Agricultura, pela USP

Dr. Ezequiel H. Pasa

Doutor em Ciências - Manejo e Conservação do Solo e da Água, pela UFPel

Dr. Giovani Theisen

Doutor em Agronomia - Ciência Vegetal, pela Universidade de Wageningen

Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Doutor em Ciência do Solo, pela UFRGS

Dedicatória:

*Dedico este trabalho a minhas filhas Alice, Helena e Cecília,
que são a razão da minha vida.*

Agradecimentos

À Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele esta jornada não seria cumprida.

À minha orientadora, a pesquisadora Dra. Walkyria Bueno Scivittaro, pela orientação, por proporcionar grandes oportunidades, apoio incondicional e pelos ensinamentos e incentivos que foram cruciais para a concretização deste trabalho.

À Embrapa Clima Temperado, pela oportunidade de realizar e o financiamento deste trabalho de pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (PPG MACSA), da Universidade Federal de Pelotas, pelos ensinamentos, bons conselhos, instruções e esclarecimentos.

À Coordenação do PPG MACSA, pelo suporte constante.

À todos os funcionários da Embrapa, especialmente à analista Cristina Moreira da Silveira, por todo apoio durante a execução das análises laboratoriais.

À colega Tainara Vaz de Melo, que sempre esteve pronta a ajudar com eficiência e disposição.

Aos colegas do doutorado pela colaboração, apoio, conversas e amizade.

À minha família, que sempre me encorajou, aconselhou e apoiou em todas as horas, sempre com uma palavra de incentivo.

À minha querida Gerusa, pelo amor, carinho, paciência, companheirismo, incentivo e dedicação de sempre.

Aos meus queridos pais, Sergio Nicolau e Vany, pelo amor, apoio, incentivo e principalmente pelas orações. A vocês, dedico inteiramente este trabalho.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudo.

Resumo

KIRCH, Valdecir André. **Resposta do arroz irrigado por sulco às adubações fosfatada e potássica**. 2026. 106f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

O cultivo de arroz irrigado por sulco impõe variabilidade na umidade do solo, caracterizada por condições de solo úmido, saturado e inundado nos terços superior, intermediário e inferior do talhão, respectivamente. Essa variabilidade condiciona o gradiente de potencial de oxirredução no solo, alterando a dinâmica e disponibilidade de nutrientes, como fósforo e potássio. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a resposta do arroz irrigado por sulco às adubações fosfatada e potássica, visando determinar a necessidade de ajuste nas indicações de adubação com esses nutrientes para a manutenção do potencial produtivo do arroz em cultivo irrigado por sulco, relativamente às recomendações disponíveis para o sistema irrigado por inundação do solo. Para tanto foram desenvolvidos dois estudos, o primeiro voltado ao fósforo (Capítulo 1) e o segundo, ao potássio (Capítulo 2). Ambos os estudos foram realizados em Planossolo Háplico, em Capão do Leão, RS. Para o estudo de fósforo, foram realizados dois experimentos, em três safras agrícolas 2020/2021, 2022/2023 e 2024/2025, avaliando-se doses de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e determinando-se efeito da dose de P e condição de umidade do solo sobre o estado nutricional, acumulação de macronutrientes e desempenho produtivo do arroz. De forma geral, a nutrição e desempenho produtivo do arroz foram favorecidos na porção inundada do talhão, contrariamente, as condições oxidativas da porção superior do talhão limitaram, em nível variável, a disponibilidade de nutrientes e desempenho produtivo do arroz, evidenciando a necessidade de maior atenção ao fornecimento do nutriente. A elevação na dose de fósforo compensou eventuais restrições na disponibilidade de fósforo decorrentes da ausência de lâmina de água na porção superior do talhão, onde o solo é mantido úmido. O estudo de potássio incluiu um experimento realizado em duas safras agrícolas (2022/2023 e 2024/2025), e o intervalo de doses de 0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O. Embora com efeito menos acentuado que para o fósforo, o desempenho produtivo e absorção de macronutrientes pelo arroz foram favorecidos pela maior disponibilidade hídrica presente nas porções saturada e, principalmente, inundada do talhão. A resposta da cultura ao potássio foi ampliada em condições de maior disponibilidade hídrica. Doses excessivas de potássio, correspondentes a 1,5 a 2,0 vezes a dose recomendada para o sistema irrigado por inundação, limitaram a produtividade da cultura, especialmente sob condições de menor umidade do solo, sugerindo desequilíbrios catiônicos na rizosfera. O manejo da adubação fosfatada e potássica no arroz irrigado por sulco deve considerar a variabilidade da condição hídrica no talhão. Sendo que a adubação fosfatada requer maior adequação das recomendações vigentes, enquanto a adubação potássica pode ser manejada com base nas recomendações estabelecidas para o sistema irrigado por inundação, evitando-se aplicações excessivas em condições de menor disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L.; irrigação por sulco; fósforo; potássio; adubo; eficiência

Abstract

KIRCH, Valdecir André. **Response of furrow-irrigated rice to phosphate and potassium fertilization.** 2026. 106f. Thesis (Doctoral Degree). Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water (PPG-MACSA). The Federal University of Pelotas, Pelotas, 2026.

Furrow-irrigated rice cultivation creates soil moisture variability, characterized by moist, saturated, and flooded soil conditions in the upper, middle, and lower sections of the field, respectively. This variability establishes a soil redox potential gradient, altering the dynamics and availability of nutrients such as phosphorus and potassium. This study aimed to evaluate the response of furrow-irrigated rice to phosphorus and potassium fertilization, seeking to determine whether fertilizer recommendations for these nutrients need adjustment—relative to those established for flood-irrigated systems—to maintain yield potential under furrow irrigation. Two studies were conducted: the first focused on phosphorus (Chapter 1) and the second on potassium (Chapter 2). Both studies took place on a Haplic Planosol in Capão do Leão, RS. For the phosphorus study, two experiments were conducted over three growing seasons (2020/2021, 2022/2023, and 2024/2025), evaluating P₂O₅ rates of 0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹ and determining the effects of P rate and soil moisture conditions on rice nutritional status, macronutrient accumulation, and yield performance. Overall, rice nutrition and yield performance were favored in the flooded section of the field; conversely, the oxidative conditions in the upper section limited nutrient availability and yield performance to varying degrees, highlighting the need for greater attention to nutrient supply. Increasing the phosphorus rate compensated for potential limitations in phosphorus availability caused by the absence of a standing water layer in the upper section of the field, where the soil is maintained only in a moist state. The potassium study involved an experiment conducted over two growing seasons (2022/2023 and 2024/2025) using K₂O application rates of 0, 100, 150, and 200 kg ha⁻¹. Although the effect was less pronounced than that observed for phosphorus, rice yield performance and macronutrient uptake benefited from the higher water availability found in the saturated and—especially—flooded sections of the field. The crop's response to potassium was enhanced under conditions of higher water availability. Excessive potassium rates—ranging from 1.5 to 2.0 times the rate recommended for flood-irrigated systems—limited crop yield, particularly under conditions of lower soil moisture, suggesting cationic imbalances in the rhizosphere. Management of phosphorus and potassium fertilization in furrow-irrigated rice must account for the variability in water conditions across the field. Phosphorus fertilization requires greater adjustment of current recommendations, whereas potassium fertilization can be managed based on established guidelines for flood-irrigated systems, provided that excessive applications are avoided in areas with lower water availability.

Keywords: *Oryza sativa* L.; furrow irrigation; phosphorus; potassium; fertilizer; efficiency.

Lista de Figuras

Figura 1	Vista aérea da área experimental cultivada com arroz irrigado por sulco (fase de estabelecimento da cultura) no Centro Tecnológico da RiceTec, em Capão do Leão, RS.....	30
Figura 2	Vista da área experimental cultivada com soja utilizando a tecnologia sulco-camalhão, precedendo o cultivo de arroz na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS.....	30
Figura 3	Representação de corte transversal de lavoura de arroz irrigado por sulco, retratando as porções inferior, intermediária e superior, bem como sua condição de umidade do solo. Dimensão aproximada do sulco de irrigação 150 m e declividade de 0,1%.....	35
Figura 4	Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021.....	39
Figura 5	Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	41
Figura 6	Teor de nitrogênio na folha bandeira (a, b) e nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/2023 e 2024/2025.....	45
Figura 7	Teor de fósforo na folha bandeira (a, b) e fósforo acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025.....	49
Figura 8	Teor de potássio na folha bandeira (a, b) de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/23 e 2024/25.....	53
Figura 9	Quantidade de potássio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo. Dados médios para as	

	condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	55
Figura 10	Teor de cálcio na folha bandeira (a, b) e cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/23 e 2024/25.....	56
Figura 11	Teor de magnésio na folha bandeira (a, b) e magnésio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	62
Figura 12	Produtividade de grãos de lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2020/21 e 2024/25.....	66
Figura 13	Percentuais de grãos inteiros (a, b) e quebrados (c, d) em lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2021/22, 2022/23 e 2024/25.....	67
Figura 14	Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássio. Dados médios das condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025.....	77
Figura 15	Teor de nitrogênio na folha bandeira (a, b) e nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de potássio, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	79
Figura 16	Fósforo acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássio (a) e condição de umidade do solo (b). Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	81
Figura 17	Teor de potássio na folha bandeira (a, b) e potássio acumulado na parte aérea de planta de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de potássio, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	83

Figura 18	Teor de cálcio na folha bandeira (a) e cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado por sulco (b) em função da dose de potássio. Valores médios para as condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	85
Figura 19	Teor de magnésio na folha bandeira (a, b) e magnésio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	87
Figura 20	Produtividade de grãos de lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássico, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/25.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1	Resultados da análise química do solo ¹ da área experimental antecedendo o cultivo do arroz nas safras agrícolas 2021/22 (Centro Tecnológico RiceTec); 2022/23 e 2024/25 (Estação Experimental Terras Baixas). Capão do Leão-RS.....	32
Tabela 2	Características gerais das cultivares de arroz irrigado utilizadas nos Experimentos 1 e 2.....	33

Sumário

Resumo.....	7
Abstract.....	8
1 Introdução.....	13
2 Hipóteses.....	19
3 Objetivos.....	20
3.1 Objetivo geral.....	20
3.2 Objetivos específicos.....	20
4 Revisão de literatura.....	21
4.1 Solos de terras baixas e métodos de irrigação do arroz.....	21
4.2 Sistemas de irrigação e a disponibilidade de nutrientes para o arroz.....	23
Capítulo 1 - Manejo da adubação fosfatada para o arroz irrigado por sulco em terras baixas do Rio Grande do Sul	26
Introdução	26
Material e métodos.....	29
Caracterização da área experimental e seleção da cultivar de arroz irrigado.....	31
Tratamentos e delineamento experimental	33
Implantação, condução, avaliação e colheita do arroz	34
Análise estatística	37
Resultados e discussão	37
Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz	37
Estado nutricional da cultura e acumulação de nutrientes na parte aérea das plantas de arroz.....	42
Teor foliar e nitrogênio acumulado na planta de arroz	42
Teor foliar e fósforo acumulado na planta de arroz	46
Teor foliar e potássio acumulado na planta de arroz.....	50
Teor foliar e cálcio acumulado na planta de arroz.....	55
Teor foliar e magnésio acumulado na planta de arroz.....	59
Desempenho produtivo e qualidade de grãos do arroz	63
Conclusões	68
Capítulo 2 - Produtividade de grãos e absorção de nutriente de arroz irrigado por sulco: efeito da adubação potássica e condição de umidade do solo.....	69

Introdução.....	69
Material e métodos.....	72
Caracterização da área experimental e seleção da cultivar de arroz irrigado.....	73
Tratamentos e delineamento experimental.....	73
Implantação, condução, avaliação e colheita do arroz.....	74
Análise estatística.....	76
Resultados e discussão.....	77
Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz.....	77
Estado nutricional da cultura e acumulação de nutrientes na parte aérea das plantas de arroz.....	78
Teor foliar e nitrogênio acumulado na planta de arroz	78
Teor foliar e fósforo acumulado na planta de arroz	80
Teor foliar e potássio acumulado na planta de arroz	81
Teor foliar e cálcio acumulado na planta de arroz	84
Teor foliar e magnésio acumulado na planta de arroz	85
Desempenho produtivo e qualidade de grãos do arroz	88
Conclusões	90
5 Considerações finais.....	90
6 Referências	91

1 Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das principais culturas de grãos cultivada no mundo, com produção estimada de 542,82 milhões de toneladas na safra 2025/2026 (USDA, 2026); o cereal constitui a base alimentar para mais de metade da população do planeta. O cenário estatístico atualizado da cadeia global de arroz aponta para uma dinâmica de forte concentração geográfica. Nesse sentido, o continente asiático não apenas domina o mercado consumidor devido à sua alta densidade demográfica, mas também responde por quase 87% de toda a produção e consumo global do cereal (FAO, 2025; USDA, 2026).

O Brasil se posiciona como um agente estratégico, sendo o maior produtor de arroz fora da Ásia e um dos principais consumidores do Ocidente. Atualmente, o País ocupa a décima posição no ranking global de produção de arroz, sendo responsável por 1,5% do total produzido (USDA, 2026). Na safra 2025/2026, a produção brasileira de arroz foi estimada em 11,083 milhões de toneladas, proveniente do cultivo de 1,52 milhões de hectares, com produtividade média de 7.281 kg/ha (CONAB, 2026).

O cultivo de arroz no Brasil é altamente concentrado e sustentado pela tecnificação, com destaque absoluto para a região Sul. O estado do Rio Grande do Sul é a potência orizícola do país, sendo responsável por cerca de 8,5 milhões de toneladas (aproximadamente 70% de todo o arroz brasileiro). A produção gaúcha baseia-se fortemente no sistema irrigado por inundação. Na sequência vem Santa Catarina, estado que se consolida como o segundo maior produtor nacional e, assim como o Rio Grande do Sul, destaca-se pelo cultivo irrigado e pela produtividade elevada. Estados como Tocantins e Mato Grosso mantêm produções relevantes, mas o arroz de terras altas (“sequeiro”) vem perdendo espaço para culturas de grãos mais rentáveis, como a soja e o milho, tornando-se mais uma cultura de oportunidade (CONAB, 2026; IRGA, 2026).

O diferencial do arroz brasileiro não está na área cultivada, mas sim na alta produtividade em razão do alto nível tecnológico das lavouras da região Sul, que garante autossuficiência e excedente para exportação mesmo com uma área plantada bem menor que a dos países produtores asiáticos. Nesse sentido, um fator determinante para as elevadas produtividades alcançadas é o cultivo irrigado por inundação do solo que, pela concentração da produção na região Sul, atualmente é

predominante no Brasil, respondendo por mais de 90% do total produzido (IRGA, 2026).

Especificamente no Rio Grande do Sul, a combinação do uso de cultivares com alto potencial produtivo e tecnologias avançadas de manejo da cultura também são determinantes para o bom desempenho da orizicultura. Apesar disso, na última década, insucessos econômicos sucessivos estimularam a diversificação de culturas nas terras baixas gaúchas, com a inserção da soja no sistema de produção, em rotação ao arroz, trazendo inúmeros benefícios para o sistema e ganhos importantes ao produtor. Confrontou-se, porém, com o desafio de superar os estresses por excesso hídrico, decorrente da drenagem natural deficiente dos solos de terras baixas e, também, por déficit hídrico, comumente presente na região durante o verão.

O cultivo da soja em sistema sulco-camalhão, com adoção crescente nas terras baixas do Rio Grande do Sul, mostrou-se opção promissora para redução dos efeitos dos estresses hídricos, favorecendo a drenagem superficial do solo e viabilizando a irrigação da cultura por sulco. Recentemente, passou-se a considerar a possibilidade de aproveitamento da infraestrutura de sulcos e camalhões, estabelecida para a soja e outras espécies de “sequeiro”, para o cultivo do arroz, caracterizando o cultivo irrigado por sulco (CAMPOS *et al.*, 2021).

A produção de arroz irrigado por sulco traz diferentes benefícios, como a simplificação na sistematização com vistas à rotação de culturas, por meio da redução da intensidade e tempo de operações de preparo do solo, com menor demanda de mão-de-obra e de custos (HARDKE; CHLAPECKA, 2020), bem como significativa economia de água (50 a 60%) (WILSON JR.; BRANSON, 2006) em comparação à irrigação por inundação (BROOKS *et al.*, 2010; STEVENS *et al.*, 2020). Outros benefícios da irrigação do arroz por sulco dizem respeito à redução no conteúdo de arsênio nos grãos (LINQUIST *et al.*, 2015) e no potencial de emissão de gases de efeito estufa da lavoura de arroz, particularmente metano (BROOKS *et al.*, 2010).

Especificamente com relação ao manejo da adubação do arroz, há que se considerar que, quando inundados, os solos sofrem transformações decorrentes do processo de redução provocado por microrganismos anaeróbios (PONNAMPERUMA, 1972). Essas transformações favorecem a disponibilização de nutrientes no solo, de forma que a resposta do arroz irrigado à adubação, especialmente a fosfatada é menor que a de outras culturas. No sistema irrigado por sulco, a condição de solo inundado

ocorre, apenas, na parte inferior da lavoura. Portanto, a disponibilidade de fósforo (P) no solo deve ser menor que no restante da área, requerendo a avaliação da disponibilidade no solo, nível na planta e efeito na produtividade, considerando a variabilidade desses indicadores ao longo dos sulcos de irrigação (SHAHANDEH, HOSSNER, TURNER, 2003). Assim como o P, outros nutrientes como o potássio (K) e, eventualmente alguns micronutrientes, podem ter sua disponibilidade reduzida no cultivo de arroz irrigado por sulco, sendo recomendável o acompanhamento das variações na lavoura e reflexos no desempenho da cultura, visando estabelecer a necessidade de ajustes nas indicações de adubação.

Com base no exposto, desenvolveu-se o presente trabalho que teve por objetivo avaliar a influência da irrigação por sulco sobre a nutrição e desempenho produtivo do arroz, bem como estabelecer a resposta da cultura às adubações fosfatada e potássica nesse sistema de cultivo, visando identificar a necessidade e subsidiar eventuais ajustes nas indicações de adubação para a cultura, que foram estabelecidas para o cultivo irrigado por inundação do solo.

Para atender ao objetivo proposto, desenvolveu-se o presente trabalho, que está organizado na forma de seções/capítulos, contemplando dois estudos desenvolvidos para testar as hipóteses propostas. O primeiro deles trata do efeito da adubação fosfatada e o segundo, da adubação potássica sobre o estado nutricional, absorção de nutrientes e desempenho produtivo do arroz em cultivo irrigado por sulco nas terras baixas do Rio Grande do Sul. O trabalho contempla, ainda, revisão bibliográfica dirigida à caracterização e fundamentação do problema de pesquisa identificado.

2 Hipóteses

A variabilidade na condição de umidade do solo em lavouras de arroz irrigado por sulco, compreendendo regiões com solo inundado, saturado e drenado, proporciona potencial de oxirredução crescente, reduzindo a disponibilidade dos nutrientes P e K no solo, e por consequência na absorção dos nutrientes pelo arroz.

A resposta do arroz irrigado às adubações fosfatada e potássica é maximizada da zona com solo inundado para aquelas com solos saturado e drenado, devido à redução no potencial de oxirredução e consequente alteração na disponibilidade de P e K no solo.

A irrigação por sulco requer incremento crescente nas indicações de P e K especificamente nas zonas com solo saturado e drenado, relativamente às indicações de adubação com esses nutrientes estabelecidas para o sistema irrigado por inundação do solo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo geral

Desenvolver estratégias de manejo da adubação das adubações fosfatada e potássica para o arroz irrigado por sulco em terras baixas do Rio Grande do Sul, considerando a variabilidade na umidade do solo e disponibilidade desses nutrientes ao longo dos sulcos de irrigação da cultura.

3.2 Objetivos específicos

Determinar a resposta à adubação fosfatada e potássica do arroz em cultivo irrigado por sulco.

Determinar o efeito de doses de P e de K sobre a nutrição e desempenho produtivo do arroz irrigado por sulco, considerando a variabilidade na umidade do solo ao longo dos sulcos de irrigação.

Determinar a necessidade de ajuste nas indicações das adubações fosfatada e potássica para manutenção do potencial produtivo do arroz em cultivo irrigado por sulco, relativamente às recomendações disponíveis para o sistema irrigado por inundação do solo.

4 Revisão da literatura

4.1 Solos de terras baixas e métodos de irrigação do arroz

As terras baixas do Rio Grande do Sul caracterizam-se pela altitude até 50 m e declividade até 5%, representando cerca de 22,6% do território estadual, totalizando uma área de aproximadamente 60.650 km². Desse total, cerca de 3 milhões de hectares possuem infraestrutura de irrigação para o cultivo de arroz. As áreas terras baixas compreendem solos de várias classes: Planossolos (56%), Gleissolos (7%), Chernossolos (16%), Neossolos (12%), Plintossolos (7%) e Vertissolos (1,4%) (CARMONA *et al.*, 2018). Os Planossolos, classe predominante de solo das terras baixas gaúchas, ocorrem em áreas com relevo plano a suavemente ondulado e apresentam como característica marcante a drenagem deficiente, condição que está associada à textura arenosa do horizonte superficial com transição abrupta para textura argilosa do horizonte subsuperficial, condição que dificulta o manejo desses solos especialmente para espécies de sequeiro devido ao caráter expansivo das argilas 2:1, que sob condição de umidade elevada possuem consistência plástica e pegajosa e quando secos são extremamente duros (STRECK *et al.*, 2008).

Nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul utilizadas para o cultivo de arroz, predomina o uso da irrigação por inundação contínua do solo (PINTO *et al.*, 2017), método que é favorecido pelas características dos solos presentes e que beneficia sobremaneira o desempenho da cultura do arroz. Em contrapartida, demanda grande volume de água e apresenta baixa eficiência de irrigação (STONE, 2005). Este aspecto estimulou ao longo do tempo inúmeras iniciativas regionais e, também globais, voltadas ao desenvolvimento e adequação de sistemas de irrigação e práticas de manejo para economizar água pelo arroz, incluindo a irrigação controlada, irrigação intermitente, redução da lâmina de água, entre outros (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; FENG *et al.*, 2007; GOMES *et al.*, 2008; NGUYEN *et al.*, 2009; YAO *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2018). Em geral, os resultados mostram que os sistemas de irrigação/práticas de manejo utilizados para economizar água promovem aumento da eficiência de irrigação, mas normalmente estão associados a alguma redução na produtividade do arroz (CLEMMENS *et al.*, 2008).

Um outro método, menos comum no cultivo de arroz, é a irrigação por sulco. Trata-se de um sistema de irrigação por superfície (gravidade), onde a distribuição da água ocorre em pequenos canais laterais (sulcos) paralelos às linhas de plantas, movimentando-se ao longo do declive do terreno. A água infiltra no fundo e laterais dos sulcos, movimentando-se vertical e horizontalmente no perfil do solo, proporcionando umidade ao leito vegetado (OLITTA, 1986; HARDKE *et al.*, 2017). Para o cultivo de arroz, a ausência parcial de lâmina de água sobre a superfície do solo reduz a evaporação (HE, 2010), proporcionando economia de água e demandando menos mão-de-obra que a irrigação por inundação (STEVENS *et al.*, 2018).

O sistema de irrigação por sulco, embora ainda pouco expressivo em termos de área, já há bastante tempo vem sendo testado com o objetivo principal de economizar água em importantes regiões produtoras de arroz no mundo, como Japão (UEKI; ARBOLEDA, 1976); Austrália (OCKERBY; FUKAI, 2001); Estados Unidos (VORIES *et al.*, 2002) e China (HE, 2010; WANG *et al.*, 2018). Recentemente, o interesse pelo sistema aumentou bastante nas principais regiões produtoras de arroz americanas (HARDKE *et al.*, 2017; STEVENS *et al.*, 2018; 2020), alcançando cerca de 10% da área cultivada do País (HARDKE; CHLAPECKA, 2020). Nesse sistema, o arroz aproveita a infraestrutura de sulcos e camalhões estabelecida para culturas como soja, algodão, milho e trigo, cultivadas em rotação (BROOKS *et al.*, 2010; OCKERBY; FUKAI, 2001; YAO *et al.*, 2012).

No Brasil, a produção de arroz em sistema irrigado por sulco é uma atividade recente, mas de interesse crescente do setor produtivo das terras baixas do Rio Grande do Sul. Surgiu como oportunidade para reduzir custos e aumentar a rentabilidade da lavoura arrozeira para produtores que cultivam soja em sistema sulco-camalhão, sendo aplicável às demais culturas de sequeira produzidas com essa tecnologia.

Resultados de pesquisa mostram que em áreas adequadas ao cultivo inundado, a irrigação por sulco, em geral, não proporciona ganhos em produtividade (STEVENS *et al.*, 2020). Mas traz inúmeros e importantes benefícios, como a simplificação da rotação de culturas, redução de tempo, mão-de-obra e custos com operações de preparo do solo (HARDKE; CHLAPECKA, 2020), bem como significativa economia de água (50 a 60%) (WILSON JR.; BRANSON, 2006), em comparação à

inundação do solo (BROOKS *et al.*, 2010; STEVENS *et al.*, 2020). A irrigação por sulco viabiliza a aplicação de fertilizantes e defensivos químicos via terrestre, evitando aplicações aéreas, diminuindo o risco de contaminação de corpos d'água e de deriva e reduzindo custos. Outros benefícios da irrigação por sulco dizem respeito à redução no conteúdo de arsênio nos grãos (LINQUIST *et al.*, 2015) e no potencial de emissão de gases de efeito estufa da lavoura de arroz, particularmente metano (BROOKS *et al.*, 2010).

Mas a irrigação por sulco impõe, também, grandes desafios, o principal deles é evitar perdas de produtividade e qualidade decorrentes do cultivo de arroz na ausência de lâmina de água (STEVENS *et al.*, 2020), dado que as cultivares modernas são desenvolvidas para o sistema inundado, faltando-lhes adaptação. Além da tolerância ao estresse hídrico, a reação a doenças, em especial a brusone, devido à ausência de lâmina de água, é outro aspecto crítico na seleção de cultivares para o sistema irrigado por sulco (BROOKS *et al.*, 2010). Estudos recentes sugerem que cultivares híbridas, por desenvolverem sistema radicular mais robusto, podem apresentar maior tolerância ao déficit hídrico e capacidade de absorção de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, na porção superior da lavoura, onde o solo é mantido apenas úmido (HARDKE; CHLAPECKA, 2020).

4.2 Sistemas de irrigação e a disponibilidade de nutrientes para o arroz

Apesar da economia potencial de água e demais benefícios técnicos, ambientais e logísticos associados à irrigação por sulco para o arroz, o manejo da água interage com fatores abióticos, particularmente o clima e o solo, além de outras práticas culturais. Com relação a este particular, a irrigação por sulco, por proporcionar condições variáveis de umidade do solo da lavoura de arroz, onde coexistem áreas com presença de lâmina de água permanente (terço inferior), solo saturado (terço intermediário) e solo úmido (terço superior), resulta em disponibilidade diferencial de nutrientes no solo e, possivelmente, em exigência diferencial da cultura à adubação nas diferentes porções da lavoura (CAMPOS *et al.*, 2021). Isto porque a inundação altera o equilíbrio de elementos e compostos presentes no solo, em resposta a transformações físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas (SOUSA *et al.*, 2006). Desta forma, alguns nutrientes, que não se encontram em formas prontamente

disponíveis em um ambiente bem drenado tornam-se disponíveis sob condições de submersão (SCIVITTARO; MACHADO, 2004). Outros, porém, têm sua disponibilidade reduzida ou ficam mais sujeitos a perdas (VAHL; SOUSA, 2004; SOUSA *et al.*, 2006).

O P e o K figuram como os nutrientes mais beneficiados pela inundação do solo. O aumento na disponibilidade de P em solos inundados é atribuído à sua liberação da matéria orgânica, à redução de fosfatos férricos a formas ferrosas mais solúveis, à hidrólise de fosfatos de ferro e de alumínio causada pelo aumento do pH de solos ácidos e à liberação do fósforo adsorvido nas argilas ou nos hidróxidos de ferro e de alumínio, por troca aniônica (PONNAMPERUMA, 1972, 1977; SANCHEZ, 1980). Já a maior disponibilidade de K sob inundação se deve ao aumento da difusão, ao deslocamento dos sítios de troca para a solução do solo, pelos cátions Amônio (NH_4^+), Ferro (Fe^{2+}) e Manganês (Mn^{2+}) (MACHADO, 1985), e à liberação de K das frações não-trocável e estrutural do solo (CASTILHOS; MEURER, 1999a, CASTILHOS; MEURER, 1999b; CASTILHOS; MEURER; PINTO, 1999).

Os cátions cálcio (Ca) e magnésio (Mg) não participam diretamente das reações de oxirredução em solos alagados, mas têm a solubilidade aumentada devido ao deslocamento para a solução do solo pelo manganês (Mn) e, principalmente, pelo ferro (Fe), que ocupa proporção considerável dos sítios de troca (SOUSA *et al.*, 2006).

Em solo inundado, o enxofre (S) presente na forma de sulfatos é reduzido a sulfeto. A dinâmica da redução é dependente de atributos do solo (VAHL; SOUSA, 2004); em solos ácidos, os teores de sulfato solúvel em água diminuem lentamente, podendo permanecer durante alguns meses após o início da inundação. O sulfeto formado, por sua vez, pode reagir com hidrogênio, formando gás sulfídrico, que é tóxico às plantas de arroz, ou reagir com metais pesados, como Fe, zinco (Zn) e cobre (Cu), diminuindo sua disponibilidade (VAHL; SOUSA, 2004).

Também as concentrações de Mn e Fe são aumentadas pela inundação do solo, com efeitos distintos sobre a planta de arroz. A maior disponibilidade desses nutrientes pode favorecer a nutrição da cultura mas os níveis atingidos também podem ser tóxicos, prejudicando as plantas (SOUSA *et al.*, 2006).

A dinâmica do nitrogênio (N) em solos inundados é particular; na forma nítrica, o nutriente fica sujeito a perdas por desnitrificação (VAHL; SOUSA, 2004) e, ocasionalmente, por lixiviação. Em decorrência, a disponibilidade de N para o arroz

pode ser reduzida pela inundação do solo, embora o N na forma amoniacal seja mantido no solo em condições de redução (BEYROUTY *et al.*, 1994).

Também os micronutrientes Cu e Zn têm sua disponibilidade reduzida pela inundação do solo. Esses nutrientes formam com facilidade compostos de baixa solubilidade, como hidróxidos, carbonatos e sulfetos, com consequente redução da concentração na solução de solos inundados. Em solos ácidos, esse efeito se deve, ainda, à adsorção desses elementos aos colóides orgânicos, em resposta à elevação do pH (SOUSA *et al.*, 2006).

Pelo exposto, fica clara a influência do sistema de irrigação e práticas de manejo da água sobre a disponibilidade de nutrientes no solo e, consequentemente, a absorção de nutrientes pelo arroz, o que pode requerer eventuais adequações nas indicações de adubação para a cultura.

Capítulo 1 - Manejo da adubação fosfatada para o arroz irrigado por sulco em terras baixas do Rio Grande do Sul

Introdução

O agroecossistema de terras baixas é um ambiente diferenciado e geograficamente delimitado à metade sul do Rio Grande do Sul (RS) e à região litorânea de Santa Catarina (SC) (ALMEIDA *et al.*, 2017). No Rio Grande do Sul, ocupa extensas áreas com relevo variando de plano a suavemente ondulado das regiões Litoral Sul, Planície Costeira Interna e Externa, Depressão Central, Campanha e Fronteira Oeste, totalizando aproximadamente 4,4 milhões de hectares (ha) (PINTO *et al.*, 2017).

A agricultura é a principal atividade produtiva desenvolvida nas terras baixas do RS, estando tradicionalmente alicerçada no binômio arroz irrigado/pecuária de corte extensiva. Apresenta importância estratégica, dado que o sistema de produção predominante responde por mais de 70% da produção nacional de arroz (CONAB, 2026) e por fração significativa da produção pecuária de bovinos e ovinos (THEISEN, 2017).

A partir da década passada principalmente, insucessos econômicos sucessivos estimularam a inclusão da soja no sistema de produção, em rotação ao arroz, sob o incentivo principal dos preços favoráveis alcançados pela oleaginosa no mercado internacional e estabilidade do mercado comprador. Assim, a área de soja em terras baixas passou de 11.150 ha, na safra 2009/10, (atingindo mais de 500.000 hectares na safra 2022/2023) para 375.062 ha, na safra 2024/25, correspondendo a 38,7% da área cultivada com arroz no RS (IRGA, 2025). Tecnicamente, a rotação com a cultura da soja representa uma ferramenta de manejo integrado de plantas daninhas a fim de permitir que a tecnologia de resistência a herbicidas, permita a continuidade de sua eficiência para evitar o surgimento de arroz daninho resistente e de outras espécies de plantas daninhas de difícil controle, principal limitante da lavoura arrozeira gaúcha na atualidade (AGOSTINETTO *et al.*, 2017). Contribui, também, para a minimizar o impacto negativo das principais doenças e pragas do arroz, favorece a ciclagem de nutrientes, aporta N ao sistema, via fixação biológica de N, e reduz a demanda de adubação da cultura, pela melhoria da fertilidade do solo ao longo do tempo.

Benefícios como a otimização do uso de máquinas e mão-de-obra na propriedade também são evidenciados. Portanto, a soja constitui-se em opção de cultivo e renda ao produtor. Já a cultura do milho, outra alternativa interessante para rotação com o arroz, com demanda elevada no mercado regional, para o uso de grãos e silagem tem avançado mais lentamente nas terras baixas, devido principalmente a limitações técnicas relacionadas a estresses hídricos e bióticos, mas também devido à grande oscilação dos preços pagos ao produtor e ao maior custo de produção em relação à soja (SILVA *et al.*, 2020).

Qualquer que seja a conformação do sistema de produção, rotação com soja ou milho, confronta-se com o desafio de superar os estresses por excesso hídrico, decorrente da drenagem natural deficiente dos solos de terras baixas, e, também, por déficit hídrico, comumente presente na região durante o verão. O cultivo da soja em sistema sulco-camalhão, com adoção crescente nas áreas de terras baixas, tem se mostrado opção promissora para a superação desses estresses, favorecendo a drenagem superficial do solo e viabilizando a irrigação da cultura por sulco (CAMPOS *et al.*, 2021).

Recentemente, passou-se a considerar a possibilidade de aproveitamento da infraestrutura de sulcos e camalhões, estabelecida para a soja, também para o arroz, caracterizando o cultivo irrigado por sulco. A adoção desse sistema permite o cultivo de arroz em semeadura direta sobre a resteva da soja ou da cobertura de solo estabelecida durante o outono/inverno, dispensando operações de preparo do solo (HARDKE *et al.*, 2017), o que é favorável sob os aspectos técnico, econômico e ambiental.

A irrigação do arroz por sulco dispensa a construção de taipas, necessárias à irrigação por inundação, resultando em economia de combustível, tempo e mão-de-obra dessa operação, reduzindo custos (STEVENS *et al.*, 2020). A implantação em plantio direto contribui, também, para a semeadura do arroz na época correta, evitando atrasos decorrentes de períodos chuvosos, muito comuns na primavera no RS, que se traduzem em perdas de produtividade (STEINMETZ *et al.*, 2009). Após a colheita do arroz, o preparo do solo necessário para o cultivo da soja é bem menor, dado que não há taipas para serem removidas, representando economia adicional de tempo, mão-de-obra e recursos financeiros (HARDKE; CHLAPECKA, 2020). Todos esses benefícios são importantes e desejados, mas possivelmente o principal

diferencial da irrigação por sulco seja a economia de água, em relação à inundação contínua, sendo esse aspecto crítico para a lavoura de arroz no RS, que é extremamente cobrada pela elevada demanda hídrica e baixa eficiência de irrigação. Essa problemática torna-se ainda mais sensível em anos secos, quando a agricultura compete mais fortemente com os setores urbano e a indústria pelo uso de recursos hídricos, exacerbando os conflitos pelo uso da água (GOMES *et al.*, 2008).

Um diferencial da irrigação por sulco para o arroz, comparativamente aos cultivos de sequeiro, refere-se à necessidade de construção de uma taipa transversalmente aos sulcos na parte mais baixa da lavoura, retendo a água conduzida pelos sulcos, que é acumulada, estabelecendo uma lâmina de água semelhante à presente em lavouras irrigadas por inundação, mas com altura decrescente a partir da porção mais baixa da lavoura, normalmente desaparecendo no terço intermediário da lavoura, onde o solo mantém-se saturado e o conteúdo de umidade do solo decresce à medida que se aproxima do terço superior. As lavouras de arroz irrigado por sulco caracterizam-se, portanto, pela coexistência de três condições de umidade do solo: solo inundado no terço inferior; solo saturado no terço intermediário; e solo úmido (drenado) no terço superior (CAMPOS *et al.*, 2021).

Assim, apesar dos inúmeros benefícios, a irrigação do arroz por sulco impõe grandes desafios, o principal deles é evitar perdas em produtividade e qualidade decorrentes do cultivo de arroz na ausência de lâmina de água contínua, dado que as cultivares utilizadas no sistema de produção regional são desenvolvidas para o sistema inundado, faltando-lhes adaptação ao cultivo em condições mais restritivas de disponibilidade hídrica, como aquelas presentes nas porções superior e intermediária de lavouras irrigadas por sulco.

Além da tolerância ao déficit hídrico, o manejo da fertilidade do solo e adubação é outro aspecto sensível no manejo do arroz em cultivo irrigado por sulco. Isto porque a inundação promove uma série de transformações físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas no solo (SOUSA *et al.*, 2006), alterando o equilíbrio e disponibilidade de diversos nutrientes essenciais. Alguns deles, que não se encontram em formas prontamente disponíveis em um ambiente bem drenado, tornam-se disponíveis sob condições de inundação. Esse efeito é particularmente importante para o fósforo, cuja resposta da planta de arroz à adubação é relativamente baixa em solo inundado (SCIVITTARO; MACHADO, 2004; SCIVITTARO; GOMES, 2009).

O aumento na disponibilidade de fósforo na solução de solos inundados deve-se aos seguintes fatores: liberação do fósforo da matéria orgânica, redução de fosfatos férricos a formas ferrosas mais solúveis, hidrólise de fosfatos de ferro e de alumínio, causada pelo aumento do pH de solos ácidos, e liberação do fósforo adsorvido nas argilas ou nos hidróxidos de ferro e de alumínio, por troca aniônica (PONNAMPERUMA, 1972, 1977; SANCHEZ, 1980).

Entender a relação causa/efeito da variabilidade da umidade do solo em lavoura de arroz irrigado por sulco sobre a disponibilidade de P no solo e a nutrição do arroz é essencial para otimizar o manejo do nutriente e a produtividade da cultura.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a influência de doses e do manejo da adubação fosfatada no cultivo de arroz irrigado por sulco, considerando que esse sistema de irrigação estabelece diferentes condições de umidade do solo, influenciando, portanto, na disponibilidade do nutriente para o arroz.

Como principal hipótese de trabalho, considerou-se que o incremento de doses de adubação fosfatada pode compensar a redução na disponibilidade do nutriente nas porções superior e intermediária da lavoura de arroz, proporcionada pela ausência de lâmina de água. Busca-se, assim, subsidiar o estabelecimento de estratégias de manejo da adubação fosfatada para o cultivo de arroz irrigado por sulco, uniformizando e otimizando a produtividade de grãos.

Material e métodos

O estudo compreendeu dois experimentos de manejo da adubação fosfatada para o arroz irrigado por sulco, realizados em safras agrícolas sucessivas. O Experimento 1 foi realizado no Centro Tecnológico da Ricetec (CTR), em Capão do Leão, RS, na safra 2020/21 (Figura 1). Por sua vez, o Experimento 2 foi realizado em áreas adjacentes da Estação Experimental Terras baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, também localizada no município de Capão do Leão, RS, nas safras agrícolas 2022/23 e 2024/25. A safra agrícola 2023/24 foi perdida devido à ocorrência de sucessivos eventos climáticos extremos na região entre setembro de 2023 e maio de 2024, que inviabilizaram o cultivo de arroz irrigado (COPAAERGS, 2023). Em ambos os experimentos, o arroz irrigado foi cultivado em área previamente cultivada com soja utilizando a tecnologia sulco-camalhão (Figura 2). No período de

outono/inverno, as áreas foram mantidas em pousio, com desenvolvimento de vegetação espontânea (ressemeadura natural de azevém) durante o outono/inverno. Exclusivamente no Experimento 1, aproveitou-se a cobertura vegetal estabelecida para atividade pecuária.

Figura 1 - Vista aérea da área experimental cultivada com arroz irrigado por sulco (fase de estabelecimento da cultura) no Centro Tecnológico da RiceTec, em Capão do Leão, RS



Fonte: Afonso Brum, 2021.

Figura 2 - Vista da área experimental cultivada com soja utilizando a tecnologia sulco-camalhão, precedendo o cultivo de arroz na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS



Fonte: José Maria Barbat Parfitt, 2022.

Caracterização da área experimental e seleção da cultivar de arroz irrigado

O solo de ambas as áreas experimentais é classificado como Planossolo Háplico (STRECK *et al.*, 2008). Os resultados da análise química do solo, na profundidade de 0 a 20 cm, antecedendo o cultivo de arroz irrigado em cada safra agrícola são apresentados na Tabela 1. Os teores de matéria orgânica, P e K são interpretados, respectivamente, como baixo, alto e baixo, na safra 2021/22; e baixo, muito alto e médio, nas safras 2022/23 e 2024/25, para a cultura de arroz irrigado (REUNIÃO..., 2022). Ressalta-se que o teor de fósforo no solo acima do nível crítico para o arroz irrigado por inundação do solo em ambos os experimentos deve-se particularmente à rotação com soja, cultura mais exigente e responsiva ao nutriente, recebendo portanto maior aporte via adubação, com consequente residual no solo. O clima local é classificado como subtropical (Cfa - Köppen) (WREGE *et al.*, 2012). A precipitação e a temperatura média anual são de 1.367 mm e 17,8°C (ESTAÇÃO, 2017).

No Experimento 1, realizado no Centro Tecnológico da RiceTec (safra 2021/22), cultivou-se o híbrido de arroz irrigado XP 117, da empresa Ricetec

Sementes Ltda., de ciclo médio. Por sua vez, no Experimento 2, realizado na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, utilizou-se em ambas as safras (2022/23 e 2024/25) a cultivar BRS Pampa CL, de ciclo precoce, gerada pelo Programa de Melhoramento Genético de Arroz da Embrapa (Tabela 2).

Tabela 1 - Resultados da análise química do solo¹ da área experimental antecedendo o cultivo do arroz nas safras agrícolas 2021/22 (Centro Tecnológico RiceTec); 2022/23 e 2024/25 (Estação Experimental Terras Baixas). Capão do Leão-RS

Safra	pH água	Índice SMP	M.O.	P	K	H+Al	Al	Ca	Mg	CTC _{pH7,0}	Argila
			g dm ⁻³	----- mg dm ⁻³ -----		-----		cmol _c dm ⁻³ -----			g dm ⁻³
2021/22	5,1	6,0	16,0	7,0	49	4,3	0,4	2,8	1,9	9,2	220
2022/23	5,8	6,2	10,0	13,5	61	1,6	0,0	5,5	1,8	9,1	220
2024/25	5,4	6,4	12,0	13,7	62	2,8	0,2	6,7	2,4	11,9	240

¹ TEDESCO *et al.* (1995).

Fonte: O autor, 2026.

Tabela 2. Características gerais das cultivares de arroz irrigado utilizadas nos Experimentos 1 e 2

Cultivar	Tipo	Perfilhamento	Ciclo	Floração
			dias	dias
BRS Pampa CL	Índica	Alto	Precoce / 118	88
XP 117	Índica	Alto	Médio / 130	ND

ND: informação não disponível.

Fonte: O autor, 2026.

Tratamentos e delineamento experimental

No Experimento 1, os tratamentos incluíram quatro doses de fósforo para o arroz: 0, 30, 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Como fonte de fósforo, utilizou-se, superfosfato triplo. Para evitar interferência de outros nutrientes sobre a resposta do arroz à adubação fosfatada, todas as parcelas experimentais receberam a aplicação de 150 e 105 kg ha⁻¹ de N e K₂O, respectivamente. Estas quantidades foram estabelecidas considerando-se os resultados da análise química do solo e expectativa muito alta de resposta da cultura à adubação (REUNIÃO..., 2018).

Para todos os tratamentos, os fertilizantes fosfatado e potássico foram aplicados integralmente em pré-semeadura, a lanço em superfície. Por sua vez a adubação nitrogenada foi parcelada em pré-semeadura (20 kg ha⁻¹) e em cobertura, parcelada em três aplicações nos estádios V4 (50%); V7 (25%) e R0 (25%). Como fontes de nitrogênio e potássio utilizaram-se ureia e cloreto de potássio, respectivamente.

Os tratamentos do Experimento 1 foram delineados em faixas, constituídas por 20 linhas de plantas, espaçadas entre si em 17,5 cm (quatro camalhões com 0,90 m de largura), com cerca de 200 m de comprimento. Nas porções superior, intermediária e inferior das faixas foram distribuídas, ao acaso, quatro repetições dos tratamentos, com 6 m de comprimento.

Por sua vez, no Experimento 2, na safra 2022/23, os tratamentos compreenderam a dose recomendada de fósforo (DRP) para o arroz irrigado, estabelecida com base nos resultados da análise química de solo e considerando resposta alta da cultura à adubação (60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), e os múltiplos 1,5 DRP (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e 2,0 DRP (120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) (REUNIÃO..., 2018). Na safra 2024/25, além desses tratamentos, incluiu-se um tratamento com omissão da

adubação fosfatada para o arroz. Em ambas as safras, as doses de nitrogênio e de potássio foram fixas, caracterizando-se pela aplicação da dose recomendada de N (130 kg ha^{-1} de N) e de K (85 kg ha^{-1} de K_2O) para o arroz, considerando expectativa alta de resposta da cultura à adubação (REUNIÃO..., 2018). A adubação nitrogenada em cobertura foi parcelada em duas aplicações nos estádios de três a quatro folhas (V3/V4) (65% da dose) e de iniciação da panícula (R0) (35% da dose). A porção da adubação potássica não aplicada na base foi aplicada conjuntamente à primeira cobertura nitrogenada para o arroz, em V3/V4.

Assim como no Experimento 1, em ambas as safras, os tratamentos foram delineados em faixas constituídas por 20 linhas de plantas, espaçadas entre si em 17,5 cm (quatro camalhões com 0,90 m de largura), com 190 m de comprimento. Nas porções superior, intermediária e inferior das faixas, foram delimitadas quatro repetições dos tratamentos, com 5 m de comprimento, distribuídas de forma equidistante ao longo de toda a extensão da área experimental.

Implantação, condução, avaliação e colheita do arroz

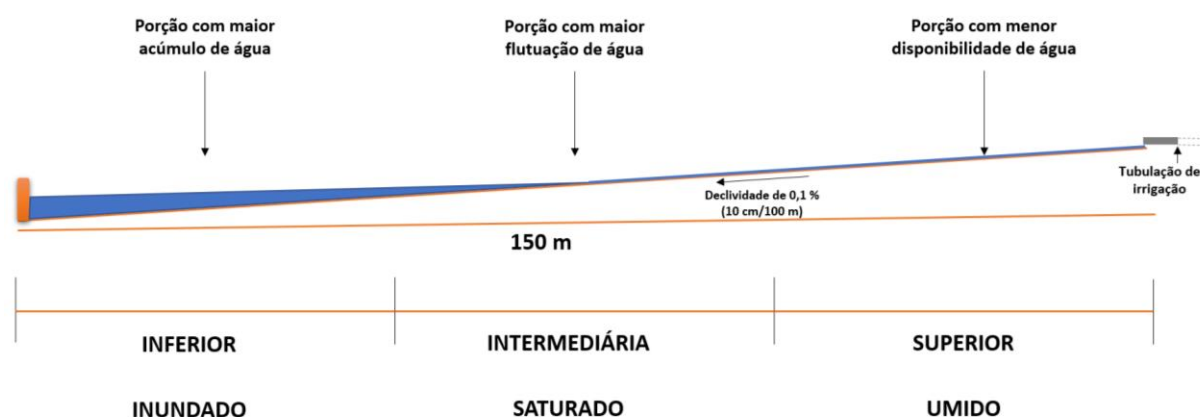
No Experimento 1, o arroz foi semeado no dia 17 de outubro de 2021 em semeadura direta sobre a resteva da vegetação espontânea estabelecida no período de outono/inverno e aproveitada para atividade pecuária durante o inverno. Utilizou-se espaçamento entre linhas de 17,5 cm e densidade de semeadura de 50 kg ha^{-1} de sementes.

No Experimento 2, a semeadura do arroz ocorreu nos dias 8 de novembro de 2022 e 11 de novembro de 2024, também em semeadura direta sobre a resteva da vegetação desenvolvida durante o período de outono/inverno. O espaçamento entre linhas foi de 17,5 cm e a densidade de semeadura de 110 kg ha^{-1} de sementes. A adubação básica de semeadura consistiu na aplicação de 310 e 330 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20 localizada no sulco de semeadura, respectivamente, nas safras 2022/23 e 2024/25. O restante dos fertilizantes fosfatado e potássico previsto nos tratamentos, foi aplicado em pré-semeadura, a lanço e em superfície.

A área experimental relativa ao Experimento 1 apresentava declividade de 0,1% e os sulcos de irrigação cerca de 150 m de comprimento (Figura 3). No experimento 2, a declividade era de 0,12% e o comprimento dos sulcos de 190 m. Em

ambos os experimentos, o terço inferior da lavoura permaneceu integralmente inundado ao longo de todo o período de cultivo do arroz; a porção intermediária foi mantida a maior parte do tempo com solo saturado e a porção superior, com solo úmido (drenado), sendo esta última, portanto, a área mais oxidada e com maior variabilidade no conteúdo de água no solo.

Figura 3 - Representação de corte transversal de lavoura de arroz irrigado por sulco, retratando as porções inferior, intermediária e superior, bem como sua condição de umidade do solo. Dimensão aproximada do sulco de irrigação 150 m e declividade de 0,1%



Fonte: Ilustração: Filipe Selau Carlos, 2020.

Em ambos os experimentos, para a estimativa dos estádios de desenvolvimento das cultivares de arroz, utilizou-se o método de graus-dia (STEINMETZ *et al.*, 2013). A partir das estimativas geradas foram planejadas e aplicadas as práticas de manejo da cultura.

O controle de plantas daninhas e demais tratos culturais seguiram as indicações técnicas da pesquisa para a cultura de arroz irrigado na região Sul (REUNIÃO..., 2018).

A irrigação do arroz por sulco foi procedida durante todo o ciclo da cultura, a partir da emergência, adotando-se turno de rega de três dias. A duração de cada irrigação foi definida em estudos preliminares de avaliação da capacidade de infiltração de água do solo, definindo o perímetro de molhamento. De forma geral, eventos de chuva superior a 8 mm substituíram uma irrigação. O monitoramento da umidade do solo foi realizado diariamente utilizando-se conjuntos de tensiômetros, instalados na profundidade de 15 cm, nas porções superior, intermediária e inferior da lavoura.

O efeito dos tratamentos foi avaliado separadamente nas unidades experimentais dispostas nos três setores da lavoura, superior, intermediário e inferior, que são representativos das condições de solo úmido, saturado e inundado, respectivamente. Abrangeu, ainda, linhas dispostas nos sulcos e nos camalhões, dado que a semeadura do arroz é realizada de forma contínua em ambas as porções da lavoura.

Os tratamentos foram avaliados pela determinação do estado nutricional da cultura, produção de matéria seca da parte aérea e acúmulo/absorção de nutrientes pelas plantas, desempenho agrônomo e produtivo do arroz.

As amostragens de planta para avaliação do estado nutricional da cultura foram realizadas no florescimento pleno (estádio R4), consistindo na coleta da folha bandeira de 48 plantas por parcela experimental. As amostras coletadas foram secas em estufa até massa constante, moídas e submetidas à análise química, determinando-se os teores dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg no tecido vegetal (TEDESCO *et al.*, 1995). Os valores determinados foram utilizados para a comparação do efeito dos tratamentos de manejo da adubação fosfatada para o arroz, bem como contrastados com padrões estabelecidos para a cultura (SOCIEDADE..., 2016).

Para a determinação da acumulação de matéria seca e acúmulo/absorção de nutrientes pelas plantas de arroz, utilizaram-se amostras constituídas pelas plantas contidas em 0,5 m de linha de cada unidade experimental, por ocasião da maturação fisiológica. O material vegetal colhido foi separado em colmos e folhas e panículas com grãos e, posteriormente, seco em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, até massa constante. Após, as amostras foram pesadas, moídas e analisadas, para determinação das concentrações de macronutrientes no tecido vegetal, segundo método descrito em Tedesco *et al.* (1995).

Na maturação da colheita, foram realizadas as avaliações do desempenho agrônomo e produtivo do arroz, determinando-se as seguintes variáveis: estatura de planta, número de perfilhos, número de panículas, estatura da planta, produtividade de grãos e componentes de produtividade do arroz. Foi determinado, também, o rendimento de engenho (grãos inteiros e quebrados).

Análise estatística

Os dados relativos a todas as variáveis foram avaliados sob a hipótese de realização da análise conjunta dos experimentos conduzidos nas três safras, utilizando modelos lineares mistos. Assim, inicialmente os dados foram avaliados pelo critério de homogeneidade dos quadrados médios dos resíduos proposto por Pimentel-Gomes; Garcia (2002) e Banzatto; Kronka (2008). Quando esse critério foi atendido, os dados dos três experimentos foram submetidos à análise conjunta, segundo o modelo linear misto do delineamento em faixas combinado entre safras, conforme preconizado por Cochran; Cox (1957) e Ramalho, Ferreira e Oliveira (2005). Mas quando não atendido, as análises foram realizadas individualmente para cada experimento, de modo a evitar distorções nas estimativas dos erros experimentais e na validade dos testes de hipóteses. Quando a premissa da análise conjunta não foi atendida, dado que tal característica cerceia a ampla modelagem dos modelos de regressão, na primeira safra, o Experimento 2 por possuir apenas 3 níveis (fator quantitativo – doses de P) e, portanto, somente 2 graus de liberdade para essa fonte de variação, não foram realizadas as análises individuais para esse experimento. Quando significativas ao nível de 5%, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% (para o fator qualitativo – condição de umidade do solo) e modelos de regressão ao nível de 5% (para o fator quantitativo – doses de P), considerando-se os efeitos simples e/ou a interação entre os fatores. As análises estatísticas foram realizadas com suporte de linguagem estatística R (R CORE TEAM, 2024), utilizando o pacote lmer com interface interativa construída no framework Shiny, sendo que doses e condições de solo foram analisados sob a estrutura de modelos fixos.

Resultados e discussão

Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz

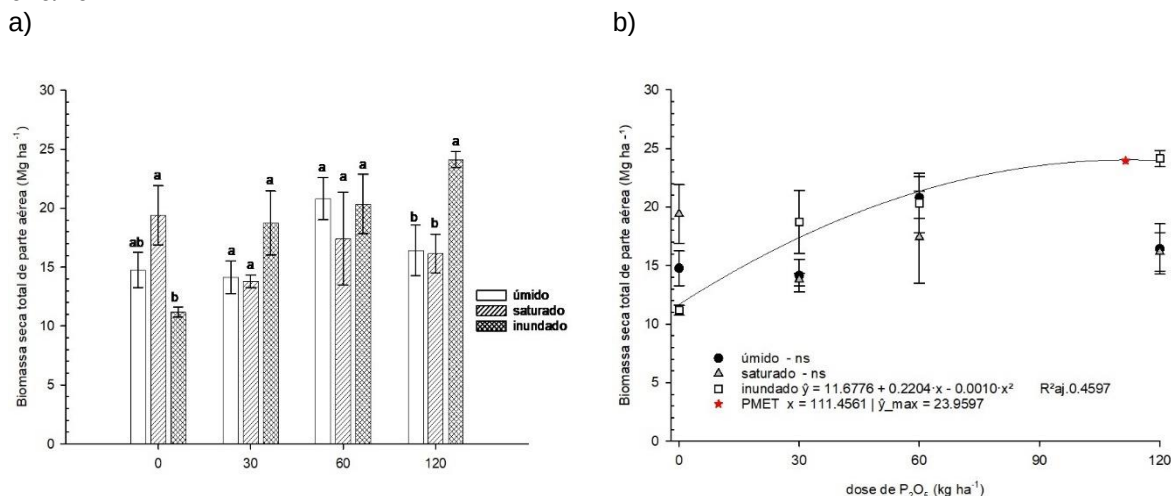
A variável biomassa seca da parte aérea das plantas de arroz não atendeu ao critério de homogeneidade dos quadrados médios dos resíduos, de forma que, na

análise estatística, suprimiram-se os dados da primeira safra do Experimento 2 (2022/23), considerando-se, apenas, os dados das safras 2020/21 e 2024/25.

Na safra 2020/21, a variável biomassa seca total da parte aérea das plantas de arroz por sulco apresentou interação significativa entre os fatores dose de P e condição de umidade do solo (Figura 4). Sob omissão da adubação fosfatada, maior produção de biomassa da parte aérea ocorreu em solo saturado, superando a condição de solo inundado; a condição de solo úmido proporcionou efeito intermediário, não diferindo estatisticamente das demais. Com o uso das doses intermediárias de P (30 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), não houve distinção entre as condições de umidade do solo quanto à produção de biomassa do arroz. Porém, com o uso da dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, maior produção de biomassa foi determinada em solo inundado, superando as demais condições de umidade do solo (Figura 4a). De forma geral, o comportamento observado tem respaldo na dinâmica geoquímica do fósforo; sob condições redutoras, que favorecem a disponibilidade de P, em razão da dissolução microbiana dos óxidos de ferro Fe₃⁺, liberando os fosfatos adsorvidos para a solução do solo (LI; CHEN; LIU, 2022; WANG *et al.*, 2022). No entanto, conforme demonstraram Wang *et al.* (2022), as condições redutoras suprem apenas parcialmente a demanda de P das plantas de arroz, sendo necessário o aporte do nutriente via adubação, para o adequado suprimento, particularmente em fases críticas de crescimento (DOBERMANN; FAIRHURST, 2000). Isto porque o gradiente de concentração de P na solução do solo é o principal regulador do fluxo do nutriente para as raízes (SHEN *et al.*, 2011).

A análise de regressão revelou que somente na condição de solo inundado houve efeito significativo da variação na dose de P. A partir da derivação da equação ajustada, obteve-se o ponto de máxima eficiência técnica (PMET) que correspondeu à dose de 111,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅, que proporcionou produção de biomassa estimada de 23,9 Mg ha⁻¹, indicando que, nas condições experimentais avaliadas (ambiente inundado), a adubação fosfatada foi determinante para a maximização do crescimento e produção do arroz (Figura 4b).

Figura 4 - Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2020/2021



Fonte: O autor, 2026.

Os resultados obtidos evidenciam que, nas condições experimentais avaliadas, a disponibilidade de P no solo foi determinante para maximizar o crescimento e produção do arroz irrigado por sulco. Assim, a despeito do teor inicial alto de P no solo, considerando interpretação estabelecida para o arroz irrigado por inundação do solo (REUNIÃO..., 2022), o nutriente foi limitante ao desenvolvimento das plantas de arroz em sistema irrigado por sulco. Sob doses menores de P, o incremento do fornecimento do nutriente promoveu aumento expressivo da produção de biomassa, havendo redução gradual da taxa de resposta à medida que se aproximou da faixa de suficiência nutricional para a cultura. O modelo de regressão quadrático ajustado para a condição de solo inundado, com redução progressiva da taxa de resposta após o ponto de máxima eficiência técnica, condiz com a lei dos incrementos decrescentes para macronutrientes em culturas anuais à medida que a suficiência nutricional é atingida (SHEN *et al.*, 2011), momento em que o incremento de biomassa torna-se desproporcional à dose de P aplicada, implicando em redução da eficiência econômica e maior risco de perdas de P por escoamento superficial em solo de terras baixas (LI; CHEN; LIU, 2022; WANG *et al.*, 2022). Esse comportamento é consistente com a dinâmica fisiológica do P nas plantas, uma vez que a deficiência do nutriente restringe processos metabólicos essenciais ao crescimento; mas suprida a demanda fisiológica, novos incrementos na disponibilidade do nutriente passam a produzir respostas progressivamente menores (TAIZ *et al.*, 2024).

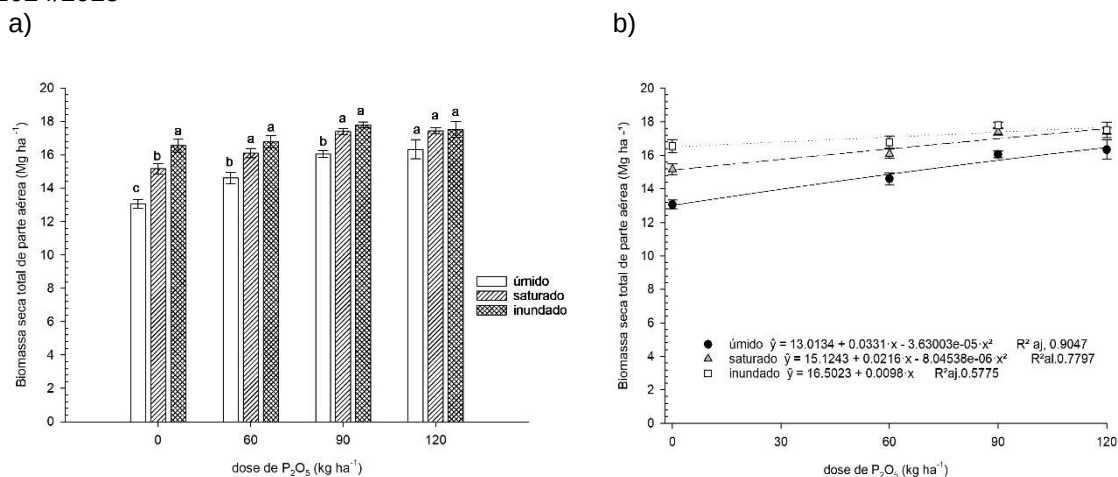
A magnitude da resposta observada está associada às funções bioquímicas do P no metabolismo energético (TAIZ *et al.*, 2024) e, também, ao seu efeito sobre o desenvolvimento da planta. Nesse contexto, Dobermann; Fairhurst (2000) destacam que o adequado suprimento de P durante o estabelecimento da cultura favorece o crescimento inicial do arroz, promovendo o desenvolvimento vegetativo e a produção de matéria seca, especialmente em solos com baixa disponibilidade inicial do nutriente. Os resultados obtidos concordam com dados relativos à eficiência de uso do P por plantas de arroz (HAYES *et al.*, 2022), segundo os quais genótipos capazes de utilizar o P mais eficientemente apresentam maior produção de biomassa mesmo sob disponibilidade limitada do nutriente no solo, evidenciando que o acúmulo de matéria seca depende tanto da absorção quanto da eficiência de utilização de P. Assim, plantas com maior eficiência fisiológica mantêm elevada produção de biomassa, mediante melhor redistribuição interna do nutriente e a manutenção da atividade fotossintética.

De forma complementar, Han, White e Cheng (2022) ressaltam que a eficiência de utilização do P pelas plantas resulta da integração da capacidade de aquisição pelas raízes, da redistribuição interna e da utilização metabólica do nutriente. Assim, o aumento da disponibilidade de P favorece inicialmente o crescimento vegetal; entretanto, à medida que a planta se aproxima da suficiência nutricional, a eficiência marginal do fertilizante diminui, tornando progressivamente menores os incrementos de biomassa decorrentes de novas aplicações do nutriente.

Na safra 2024/2025, também se determinou significância da interação entre os fatores dose de P e condição de umidade do solo. Exceto para a dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para a qual não houve efeito da condição de umidade do solo sobre a produção de biomassa do arroz, para todas as demais doses de P, em solo úmido, a produção de biomassa da parte aérea foi menor que em solo saturado e inundado (Figura 5a). Especificamente sob omissão da adubação fosfatada, a condição de solo saturado também propiciou valores de biomassa inferiores (15,2 Mg ha⁻¹) à condição de solo inundado (16,5 Mg ha⁻¹). A produção de biomassa seca da parte aérea das plantas de arroz nas condições de solo inundado e saturado foi estatisticamente semelhante com a aplicação das doses 60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, indicando que o uso de doses intermediárias de P, a condição de saturação hídrica proporcionou efeito equivalente ao da inundação do solo. Portanto, sanadas as principais limitações

relacionadas à disponibilidade de P, a saturação do solo já é suficiente para otimizar o crescimento e produção do arroz, à semelhança do observado com o uso da maior dose de P (120 kg ha^{-1} de P_2O_5).

Figura 5 - Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

Ao se contrastarem todas as condições de umidade do solo e doses de P, os maiores valores absolutos de biomassa seca de parte aérea do arroz foram obtidos em solo inundado, com valores médios de 16,6; 16,8; 17,8 e 17,5 Mg ha^{-1} , correspondentes, respectivamente, à aplicação de 0; 60; 90 e 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Esses resultados são corroborados por Somaweera *et al.*, (2016), que identificaram redução de biomassa em decorrência de deficiência conjunta de P e K, especialmente em solo drenado. Isto porque, no cultivo de arroz irrigado, a inundação modifica profundamente a química do solo, promovendo redução do potencial de oxirredução e alterações que podem aumentar a disponibilidade de P na solução do solo e favorecer sua absorção pelas plantas, especialmente em solos onde parte do P encontra-se inicialmente adsorvida aos óxidos de ferro e alumínio (PONNAMPERUMA, 1972; DOBERMANN; FAIRHURST, 2000).

A figura 5a ainda revela tendência consistente de maior acúmulo de biomassa no ambiente inundado, característica plausível para com o fato de que o arroz ser uma espécie adaptada evolutivamente ao cultivo em solos alagados, apresentando características morfofisiológicas (aerênquima) com elevada capacidade de transporte

interno de oxigênio, que permite a manutenção da atividade radicular mesmo sob condições de baixa disponibilidade de oxigênio (KIRK, 2004).

Já o desdobramento das condições de umidade do solo dentro das doses de P evidenciou que a resposta da biomassa seca da parte aérea foi influenciada pela variação na dose de P, ajustando-se a modelos quadráticos em todas as condições de solo úmido, mas com um comportamento crescente ao longo do intervalo de doses testado (Figura 5b). Esses resultados mostram aumentos expressivos em produção de biomassa do arroz decorrentes do uso de doses menores de P (60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), em relação à omissão do nutriente, mas o incremento é menor com o uso da maior dose de P testada (120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Tal comportamento é característico da resposta agrônômica de culturas anuais ao suprimento de nutrientes essenciais, como o P, refletindo a transição entre uma condição inicial de deficiência e outra próxima da suficiência nutricional, em que os incrementos adicionais tendem a diminuir em virtude da redução da eficiência marginal do P (FAGERIA, BALIGAR e LI, 2008), ainda que o intervalo de doses testadas não tenha sido suficiente para saturar a demanda fisiológica da cultura em cada condição de umidade do solo.

Estudo recente sobre eficiência de utilização de P pelo arroz realizado por Hayes *et al.* (2022) corrobora os resultados do presente trabalho, ao demonstrarem que a produção de biomassa aumenta enquanto o suprimento de P é limitante aos processos metabólicos relacionados ao crescimento. A resposta das plantas ao P fósforo resulta da interação entre disponibilidade do nutriente no solo, eficiência de absorção pelas raízes e capacidade metabólica de utilização do elemento. Porém, o aumento da disponibilidade do nutriente será convertido em incremento na produção de matéria seca somente até que outros fatores passem a restringir seu desenvolvimento (HAN, WHITE e CHENG, 2022).

Estado nutricional da cultura e acumulação de nutrientes na parte aérea das plantas de arroz

Teor foliar e nitrogênio acumulado na planta de arroz

Para a variável teor foliar de nitrogênio foi determinada significância da interação entre os fatores dose de P e condição de umidade do solo. Variações

devidas à umidade do solo ocorreram, apenas, quando do uso de P na adubação da cultura (Figura 6). Na ausência de adubação fosfatada, os teores foliares de N mantiveram-se altos (2,5% a 2,6%) nas três condições de umidade do solo (Figura 6a). Esse comportamento indica que sem estímulo ao crescimento proporcionado pelo P, a absorção de N foi suficiente para manter a concentração foliar adequada, independentemente do nível de umidade do solo.

No entanto, com o uso de P na adubação, de forma geral, a concentração foliar de N foi maior na condição de solo inundado, relativamente às condições de solo saturado ou úmido. Esse comportamento se explica pela maior variabilidade nas condições de oxirredução do solo nas porções da lavoura com solo úmido e, particularmente, com solo saturado, que favorecem a alternância dos processos de nitrificação e desnitrificação e, conseqüentemente, as perdas do N como óxido nitroso (N_2O) (REDDY; DELAUNE, 2008). Esse resultado concorda com relato de Della Lunga *et al.* (2024), de que as flutuações hídricas frequentes, promovendo alternância em ciclos de oxidação e redução, tornam o manejo da adubação um dos maiores desafios agrônômicos associado à irrigação do arroz por sulco.

O efeito da variação na dose de P sobre o teor foliar de N ocorreu exclusivamente em solo inundado (Figura 6b). Os dados ajustaram-se a modelo quadrático negativo, com redução mais pronunciada no teor de N foliar em doses superiores a 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . A manutenção de teores foliares de N maiores em solo inundado, relativamente ao solo saturado pode ser atribuída à redução do potencial redox (Eh), induzindo a redução do ferro da forma férrica (Fe^{3+}) à forma ferrosa (Fe^{2+}), resultando em liberação do P adsorvido aos colóides férricos, tornando-o biodisponível (CAMARGO *et al.*, 1999). De forma sinérgica, a camada anaeróbia gerada pela presença de lâmina d'água bloqueia a conversão e perda de amônia, mantendo o nutriente na forma amoniacal (NH_3^+), um cátion prontamente assimilável e menos suscetível a perdas. Conseqüentemente, a elevada biodisponibilidade simultânea de N e P em solo inundado garante a translocação de compostos nitrogenados para a folha bandeira, suprimindo a forte demanda do nutriente imposta pelo uso de doses elevadas de fertilizante fosfatado, sem diluir a reserva nutricional foliar (KÖGEL-KNABNER *et al.*, 2010). A discreta redução no teor foliar de N sob doses mais altas de P pode ser atribuído ao efeito de diluição, decorrente da promoção

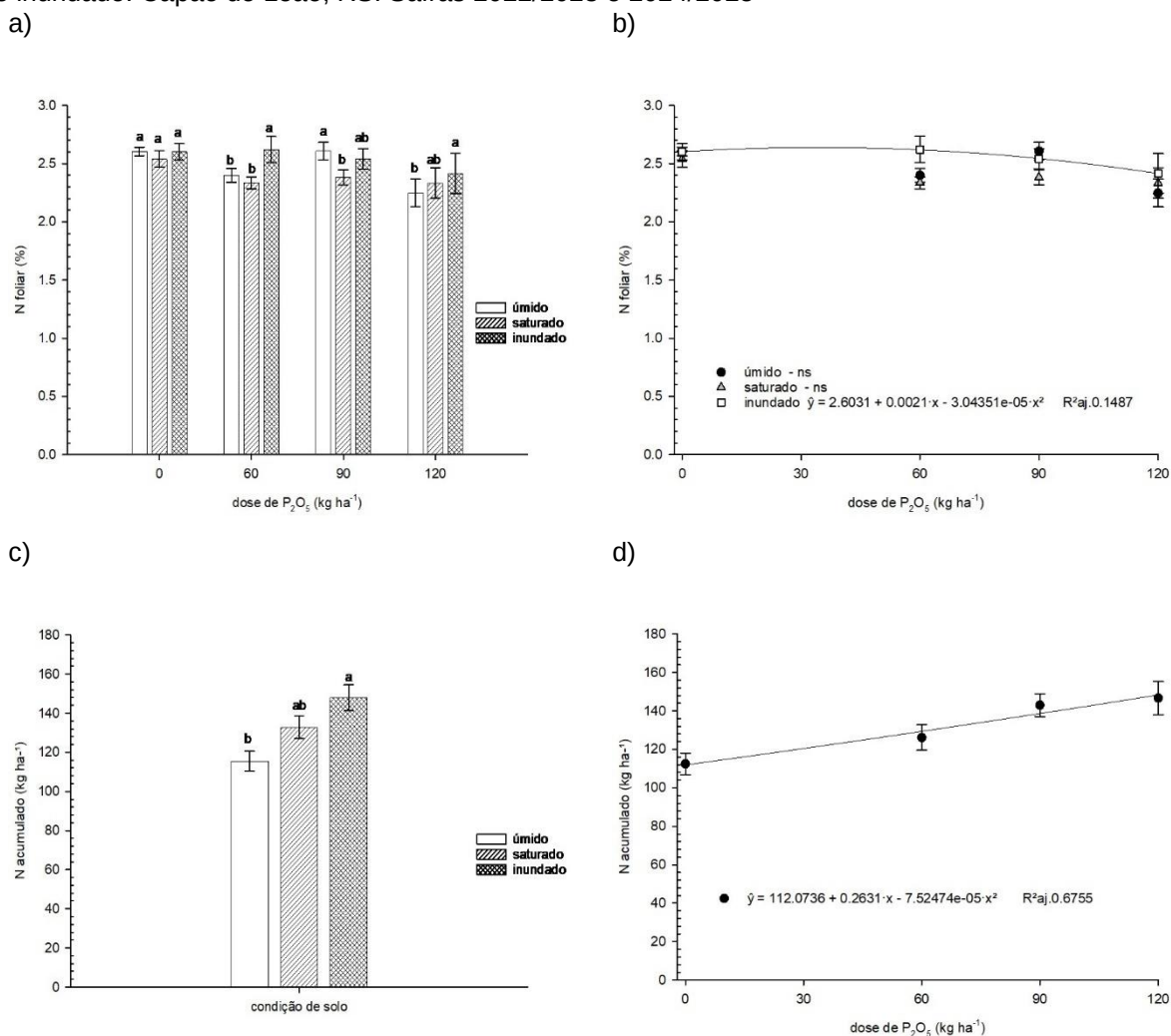
do crescimento e produção de matéria seca das plantas de arroz (FAGERIA; BALIGAR, 2005).

O efeito da condição de umidade do solo sobre a quantidade de N acumulado na parte aérea das plantas de arroz foi único para todas as doses de P (Figura 6c), havendo incremento no acúmulo da condição de solo úmido ($115,5 \text{ kg ha}^{-1}$) para solo inundado ($147,9 \text{ kg ha}^{-1}$); a condição de solo saturado apresentou desempenho intermediário, não diferindo das demais. Explica-se esse comportamento pela dinâmica intensa de perdas de N em lavouras de arroz irrigado sujeitas à alternância hídrica (SCIVITTARO *et al.*, 2010). Ademais, há que se considerar a predominância da forma de N amoniacal (NH_4^+) em ambiente reduzido — preferencialmente absorvida por plantas de arroz — associada ao fato de que, em sistemas irrigados por sulco, ocorre heterogeneidade lateral de umidade entre o fundo do sulco e a crista do camalhão, assim como porções com solo saturado e úmido, condições que promovem alterações na capacidade de absorção de nutrientes do sistema radicular (HE, 2010). Tal relação, contudo, não foi confirmada por Borja Reis *et al.* (2018a; 2018b), que não encontraram diferença na absorção de N entre regimes hídricos contrastantes em solo tropical intemperizado, reforçando a dependência dessa resposta ao tipo de solo e ao manejo da adubação nitrogenada.

Independentemente da condição de umidade do solo, a acumulação de N pelas plantas de arroz em resposta à variação na dose de P ajustou-se a modelo quadrático crescente, com taxa de incremento marginal decrescente sob doses mais elevadas ($R^2_{aj.} = 0,67$) (Figura 6d). Destaca-se o comportamento da curva ajustada, não se tendo atingido valor máximo dentro do intervalo de doses testado, caracterizando efeito sinérgico contínuo, que reitera a tese de facilitação nutricional cruzada, amplamente corroborada por Rietra *et al.* (2017). Esses autores documentam que a interação N x P em diversas culturas comerciais é predominantemente sinérgica, de modo que a mitigação da deficiência de P promove a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados. Neste sentido, é importante considerar elevar o aporte de P em cultivos de arroz irrigado por sulco, dada às condições oxidativas predominantes, com tendência de precipitação ou adsorção do nutriente aos coloides e complexos de ferro e alumínio, restringindo severamente sua mobilidade e difusão (DELLA LUNGA *et al.*, 2024).

O padrão referido é consistente com a atuação do P na promoção do crescimento radicular e emissão de raízes laterais, ampliando a superfície de absorção e, por consequência, a capacidade de absorção de N (SANT'ANA *et al.*, 2003). Também Yang *et al.* (2021) verificaram incremento na produção de biomassa e acúmulo de nutrientes em cultivares híbridas de arroz em resposta à aplicação de doses crescentes de P, com ganhos proporcionalmente menores em doses superiores a 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sugerindo a existência de um limiar de eficiência agrônômica a partir da qual o retorno adicional em N acumulado tende a diminuir.

Figura 6 - Teor de nitrogênio na folha bandeira (a, b) e nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/2023 e 2024/2025



Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey).

Fonte: O autor, 2026.

Teor foliar e fósforo acumulado na planta de arroz

O teor de P na folha bandeira do arroz foi influenciado pela dose de P e pela umidade do solo (Figura 7). Na ausência de adubação fosfatada, a condição de solo úmido proporcionou menor teor foliar de P (0,80%), que em solo saturado (0,91%) e inundado (1,02%), refletindo o efeito do regime hídrico sobre a disponibilidade de P no solo, ou seja, à medida que a saturação hídrica aumenta, as condições redutoras intensificam-se, promovendo a dissolução redutiva de óxidos de Fe (III) e liberação dos fosfatos adsorvidos, elevando a concentração de P na solução do solo. Esse mecanismo e a mineralização microbiana da matéria orgânica justificam os teores foliares de P superiores em solo inundado, mesmo na ausência de adubação fosfatada.

O efeito da condição de umidade do solo sobre o teor foliar de P manifestou-se, também, com o uso da dose mais baixa de P (60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), não ocorrendo com o uso de doses superiores (90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Esse resultado indica que, a partir de determinada dose de adubo, o aporte de P via adubação é suficiente para suprir a demanda da planta independentemente do regime hídrico. Por sua vez, a semelhança nos teores foliares P sob doses mais altas de adubação reforça a premissa de existência de limiar de suficiência do nutriente no solo, a partir do qual o efeito do regime hídrico é negligenciável.

Sob o aspecto fisiológico, os teores de P foliar observados — situados entre 0,80 e 1,31% — estiveram dentro da faixa de suficiência estabelecida para a cultura do arroz (YOSHIDA, 1981), demonstrando que, mesmo na ausência de adubação fosfatada, o cultivo irrigado por sulco em área previamente corrigida foi capaz de suprir a demanda de P e viabilizar produção satisfatória da cultura. A irrigação por sulco, por condicionar umidade do solo próximas à capacidade de campo (porção superior) ou à saturação (porção intermediária) mantém a continuidade hídrica no perfil sem promover o alagamento persistente — condição que a distingue da irrigação por inundação do solo. Essa distinção tem implicações diretas para a dinâmica do P no solo, dado que, em solos não inundados continuamente, os ciclos de oxidação-redução são mais frequentes, reduzindo a solubilização e disponibilização de fosfatos para a solução do solo (WANG *et al.*, 2024).

Com o incremento das doses de P, todos os regimes hídricos apresentaram acréscimos no teor foliar do nutriente, embora com padrões cinéticos distintos (Figura 7b). Em solo úmido, os dados ajustaram-se a modelo quadrático (R^2 aj. = 0,77), com ponto de máxima eficiência técnica (PMET) correspondente à dose de 88 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Estudo de Oo *et al.* (2023) reportou resposta quadrática do arroz à aplicação de P, enfatizando que o fornecimento excessivo de P nem sempre incrementa o rendimento de grãos.

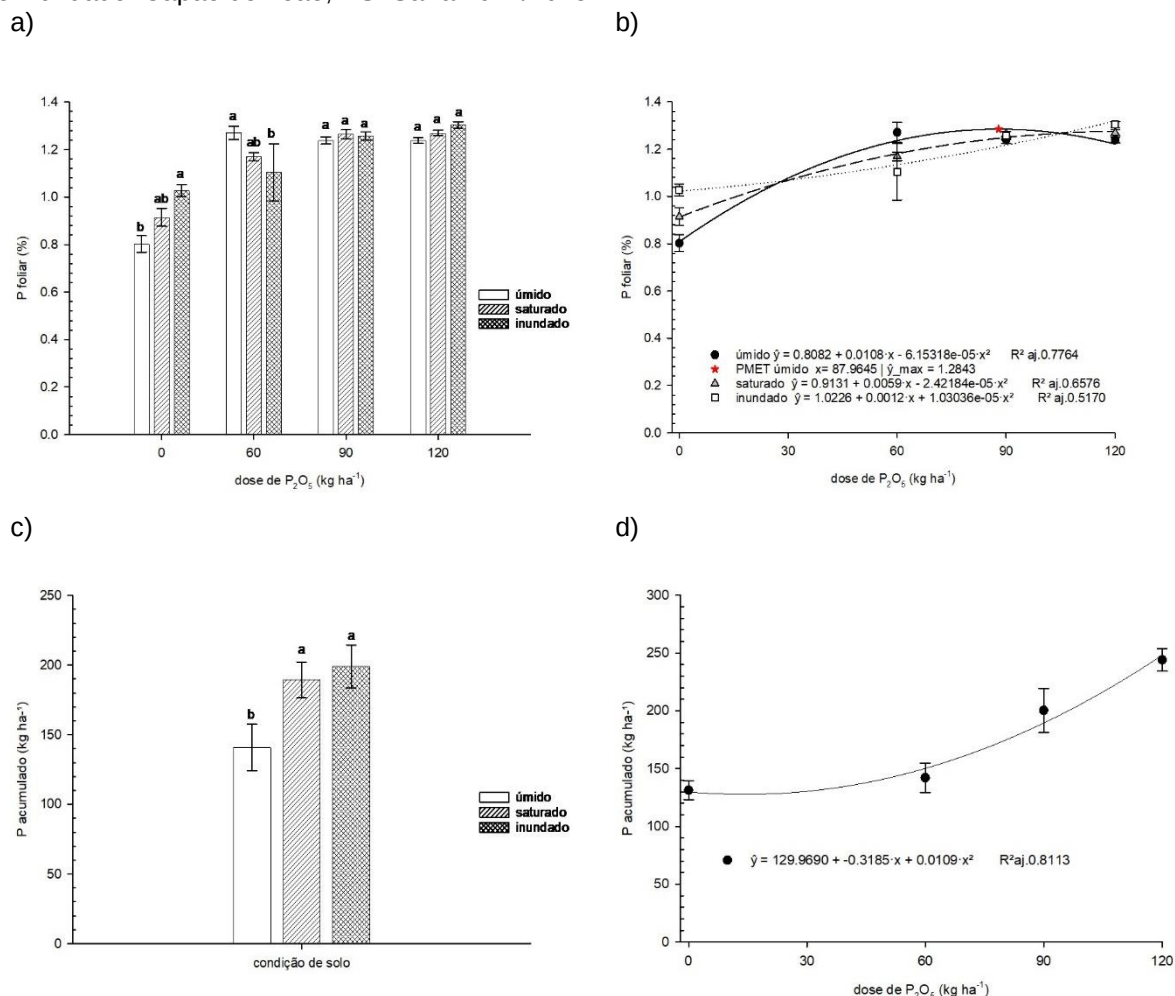
As condições de solo saturado e inundado apresentaram curvas com menor inclinação inicial e R^2 ajustados menores (0,65 e 0,51, respectivamente), sugerindo que, sob umidade elevada, a resposta da cultura à adubação fosfatada é atenuada pela contribuição do P nativo do solo mobilizado pelas reações redox. O fósforo está entre os nutrientes mais favorecidos pela inundação do solo, que promove aumentos significativos em sua disponibilidade para as plantas de arroz, razão pela qual o arroz irrigado apresenta resposta relativamente baixa à adubação fosfatada, mesmo em solos com baixos teores de P disponível (EMBRAPA, 2023).

A resposta crescente do teor foliar de P ao incremento das doses de P com tendência de estabilização em valores entre 1,25% e 1,30%, a partir da dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ é consistente com o conceito de consumo de luxo, amplamente discutido na nutrição mineral de cereais, e também, com o entendimento de que incrementos adicionais de P acima do nível ótimo não resultam em respostas produtivas lineares. O fornecimento excessivo de P pode comprometer a qualidade nutricional dos grãos pelo acúmulo de ácido fítico, que reduz a biodisponibilidade de minerais essenciais no trato digestivo humano (OO *et al.*, 2023). A resposta quadrática ajustada para a condição de solo úmido, com PMET próximo de 88 kg ha⁻¹ de P₂O₅, representa informação prática para o manejo da adubação fosfatada de arroz irrigado por sulco, pois indica a dose que maximiza o teor foliar de P sem incorrer em desperdício ou risco de antagonismos nutricionais com outros elementos. Essa dose, inferior ao limite superior avaliado no experimento (120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), alinha-se às faixas recomendadas para adubação de manutenção em arroz irrigado em solos com teores médios de P.

O efeito da umidade do solo sobre a acumulação de P na parte aérea das plantas de arroz foi semelhante para todas as doses de P avaliadas (Figura 9c), sendo que as condições de solo saturado e inundado proporcionaram acúmulo de P

significativamente superior (199 e 189 kg ha⁻¹) ao determinado em solo úmido (141 kg ha⁻¹). Também esse resultado fundamenta-se nos processos de redução característicos de solos com saturação hídrica (sob saturação ou inundação), onde o decréscimo do potencial redox promove a dissolução dos óxidos de Fe (III), liberando fosfatos adsorvidos a esses minerais para a solução do solo e elevando sua disponibilidade (PONNAMPERUMA, 1972; PALIHAKKARA; BURKITT; ATTANAYAKE, 2023). Em solo úmido, a predominância da aerobiose mantém o Fe em sua forma oxidada (Fe³⁺), preservando os sítios de adsorção de P e restringindo a concentração do nutriente em solução (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 2010). Wang *et al.* (2024), avaliando a competição entre plantas de arroz e microrganismos do solo por distintas fontes de P sob regimes hídricos contrastantes, demonstraram que a inundação contínua não só eleva a disponibilidade de P via redução do Fe₃⁺, mas também suprime a atividade microbiana anaeróbia, favorecendo a absorção do nutriente pelas raízes do arroz em detrimento dos microrganismos do solo. No contexto da irrigação por sulco, Chlapecka *et al.* (2024) documentaram que o acúmulo de P na parte aérea do arroz foi significativamente inibido na porção aeróbia da lavoura, ao passo que, nas regiões de maior saturação hídrica, o acúmulo foi sensivelmente superior, confirmando que as condições redox locais determinam o padrão espacial de absorção de P pela cultura. Complementarmente, Della Lunga *et al.* (2024b) relataram que, em sistemas irrigados por sulco, onde ciclos de secagem e umedecimento são frequentes, o P disponibilizado durante as fases anaeróbias pode ser parcialmente re-imobilizado por re-oxidação nos períodos de maior aerobiose, atenuando as diferenças de disponibilidade entre manejos hídricos em função da dinâmica redox temporal do perfil. A ausência de diferença estatística entre as condições de solo saturado e inundado sugere que a saturação completa dos macroporos já é suficiente para desencadear a dissolução redutiva dos óxidos de ferro e maximizar a liberação de P para a solução do solo, sem que a manutenção de lâmina de água livre represente vantagem adicional no acúmulo do nutriente na biomassa das plantas de arroz.

Figura 7 - Teor de fósforo na folha bandeira (a, b) e fósforo acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey).
Fonte: O autor, 2026.

No que se refere ao efeito das doses de P sobre a quantidade do nutriente acumulado na parte aérea do arroz (Figura 7d), o ajuste quadrático positivo obtido ($R^2_{aj} = 0,81$) revela que incrementos nas doses resultaram em acréscimos progressivamente mais expressivos no acúmulo de P na biomassa aérea, com resposta mais acentuada a partir de doses superiores a 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . A resposta quadrática ascendente à adubação fosfatada é amplamente reportada na literatura para a cultura do arroz, sendo que em solos com elevada capacidade tampão de P, doses crescentes de fertilizante fosfatado saturam progressivamente os sítios de adsorção do solo, elevam a concentração de P em solução e ampliam o gradiente de difusão na rizosfera, potencializando a absorção e o acúmulo do nutriente na parte aérea (FAGERIA, 2014). Della Lunga *et al.* (2024a), em estudo com arroz irrigado por

sulco sob diferentes fontes de P, verificaram que a adubação fosfatada exerceu influência significativa sobre o acúmulo de P na biomassa aérea, corroborando com os resultados do presente estudo. Merece atenção o fato de que, na dose máxima avaliada (120 kg ha^{-1} de P_2O_5), a curva ainda apresentava tendência crescente e sem evidência de platô, indicando que doses superiores poderiam incrementar ainda mais o acúmulo de P na parte aérea da cultura. Em sistemas irrigados por sulco, onde a dinâmica redox é espacialmente heterogênea e o suprimento natural de P pode ser limitado nas zonas mais oxidadas da lavoura (CHLAPECKA *et al.*, 2024), a adubação fosfatada constitui estratégia de manejo fundamental para suprir a demanda da cultura ao longo do ciclo. Os resultados obtidos reforçam, portanto, a necessidade de associação da dose de P ao regime hídrico do solo para maximizar a absorção do nutriente pela cultura e, conseqüentemente, seu desempenho produtivo.

Teor foliar e potássio acumulado na planta de arroz

A variável teor de potássio na folha bandeira do arroz não atendeu ao critério de relação entre variâncias e, portanto, não permitiu a análise conjuntos dos dados das três safras. Os dados avaliados apresentaram significância da interação entre os fatores dose de P e condição de umidade do solo. Também a variável potássio acumulado na planta foi analisada individualmente (safra 2024/25), mas apresentou significância apenas do fator dose de P.

O teor foliar de potássio é um indicador agrônomo de alta confiabilidade para avaliação do estado nutricional da planta de arroz, dado que o nutriente desempenha papel importante na osmorregulação, dinâmica estomática e translocação eficiente de fotoassimilados para o enchimento dos grãos (FAGERIA, 2009; SMIDERLE *et al.*, 2010).

De forma geral, em solo inundado, os teores foliares de potássio mantiveram-se elevados, independentemente da dose de P aplicada, comportamento que é característico de solos alagados, onde a redução eletroquímica altera a dinâmica iônica do nutriente, induzindo o deslocamento dos íons K^+ dos sítios de troca para a solução do solo (SCIVITTARO; MACHADO, 2012).

Diferenças entre as condições de umidade do solo restringiram-se à dose de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para a qual menor teor foliar de potássio foi determinado em solo

saturado (1,06%), relativamente às condições de solo úmido e inundado (1,22% e 1,27%, respectivamente) (Figura 8a). Considerando que na região de solo saturado ocorrem frequentes oscilações no conteúdo de umidade do solo e, apesar da ausência de lâmina d'água livre para impulsionar a difusão máxima do nutriente, ocorre hipóxia moderada, os resultados sugerem que o incremento inicial de fosfato na solução do solo pode ter desencadeado antagonismo iônico transitório ou exigido um ajuste fisiológico que limitou momentaneamente a taxa de absorção de K^+ (VAHL, 2004). Há que se considerar, ainda, que a porção da lavoura com solo saturado caracteriza-se pela interação entre fatores fisiológico/nutricionais e a própria dinâmica hídrica (AIDE, 2024) e por oscilações temporais e espaciais na umidade do solo, responsáveis por produzir gradientes hídricos que variam da saturação no fundo dos sulcos até a capacidade de campo no topo do camalhão (STEINMETZ *et al.*, 2023). Flutuações de umidade que reduzem a mobilidade do fósforo, promovendo sua rápida precipitação e oclusão com óxidos de ferro e alumínio durante as fases de solo oxidado (DELLA LUNGA *et al.*, 2024), de maneira que Aide (2024) relatam a elevação na dose de P como um gatilho morfofisiológico compensatório por parte das plantas, estimulando a ramificação radicular primária e secundária e aumentando a densidade de raízes finas. No entanto, à medida que se elevou o fornecimento de fósforo para 90 e 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , os teores foliares de K estabilizaram-se valores considerados suficientes para plantas de arroz (1,21% a 1,26% de K). Possivelmente, conforme Aide (2024), tais níveis estejam associados ao desenvolvimento radicular mais profundo e vigoroso, estimulado pelo uso de doses maiores de P.

Os teores de potássio (K) na folha bandeira do arroz apresentaram um comportamento quadrático frente às doses crescentes de P em todas as condições de solo (Figura 8b). Em solo inundado, porém, o ajuste de equação quadrática foi baixo ($R^2_{aj.} = 0,27$), indicando elevada variabilidade e ausência de resposta consistente do teor foliar de potássio ao incremento das doses de P, sugerindo que, nessa condição hídrica, os processos que regulam a absorção e o acúmulo foliar de K não foram suficientemente modulados pela adubação fosfatada, haja visto que os valores iniciais de fósforo encontravam-se sob níveis altos (REUNIÃO..., 2022). Para as condições de solo inundado e úmido, o ponto de máxima eficiência técnica (PMET) correspondeu às doses de 69,2 e 74,6 kg ha^{-1} de P_2O_5 , que proporcionaram teores foliares de 1,27% e 1,24% de potássio na folha bandeira, respectivamente. Isso

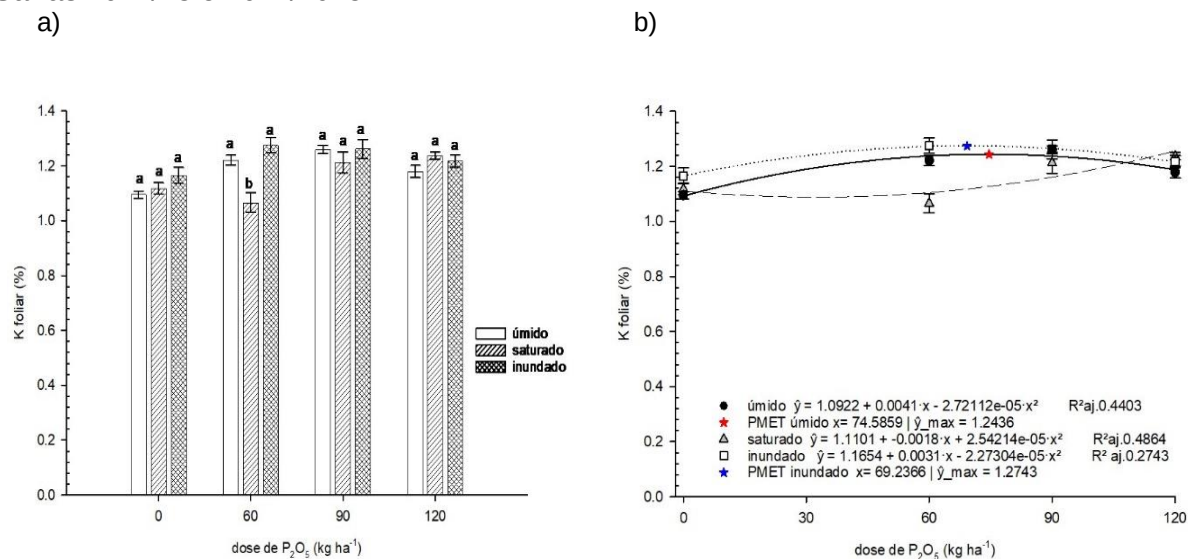
significa uma diferença no aporte de aproximadamente 5,4 kg de P_2O_5 ha^{-1} entre as duas condições de umidade solo, com saldo favorável ao solo inundado, que requereu menor aporte de P para maximizar o acúmulo de K na folha bandeira do arroz. Ambos as doses de fósforo situam-se no intervalo usualmente recomendado pela pesquisa para a cultura do arroz irrigado no Sul do Brasil (REUNIÃO..., 2022).

A resposta quadrática do teor foliar de potássio à adubação fosfatada é consistente com as interações iônicas entre fósforo e potássio no solo e, também, nos processos de absorção e translocação radicular. Segundo MARSCHNER (2012), concentrações adequadas de P na rizosfera estimulam o crescimento do sistema radicular, ampliam a superfície absorptiva e incrementam a atividade metabólica das células corticais, o que indiretamente favorece a absorção de potássio por transportadores de alta afinidade. Esse estímulo é dose-dependente, ou seja, sob concentrações excessivas de fosfato na solução do solo, pode ocorrer inibição da atividade desses transportadores por competição iônica ou por alteração do potencial eletroquímico transmembrana, resultando em redução do influxo líquido de potássio (MENGEL; KIRKBY, 2001). Esse mecanismo biofísico fundamenta a fase descendente do teor de potássio na folha bandeira verificada após o PMET nas condições de solo inundado e saturado.

A influência da condição de umidade do solo sobre a resposta do potássio à adubação fosfatada está estreitamente relacionada às transformações biogeoquímicas desencadeadas em solo inundado (PONNAMPERUMA, 1972). Ademais, sob condições de anaerobiose intensa, a mobilidade do potássio no solo é maior devido à menor competição com outros cátions, especialmente Fe^{2+} e Mn^{2+} , que em altas concentrações ocupam preferencialmente as cargas negativas das superfícies argilosas, liberando potássio para a solução do solo (KIRK, 2004).

Já a condição de solo úmido, onde prevalecem condições aeróbias, a menor liberação de potássio das frações de reserva mineral impõe uma demanda maior por estimulação via P para otimizar o acúmulo foliar do nutriente. Dobermann e Fairhurst (2000) ressaltam que o manejo da água é um dos principais fatores determinantes da eficiência de utilização de potássio pelo arroz irrigado e que sistemas inundados tendem a maximizar a disponibilidade de nutrientes catiônicos em solos com elevada capacidade de troca catiônica efetiva.

Figura 8 - Teor de potássio na folha bandeira (a, b) de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/23 e 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

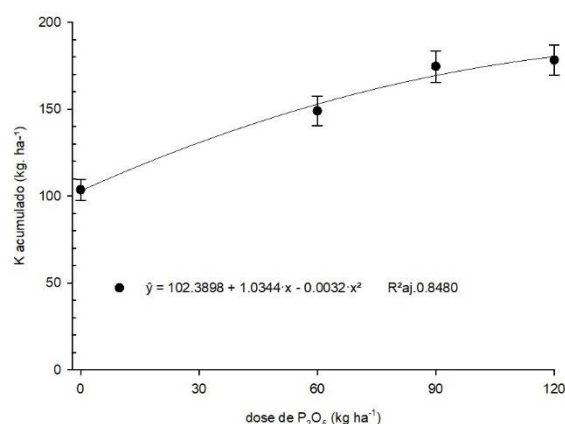
A quantidade de potássio acumulado na parte aérea do arroz respondeu de forma quadrática e positiva às doses crescentes de P (Figura 9), com elevado coeficiente de determinação ($R^2_{aj} = 0,8480$). Pela equação ajustada ($\hat{y} = 102,3898 + 1,0344 \cdot x - 0,0032 \cdot x^2$), o incremento entre a dose recomendada para a condição experimental (60 kg ha^{-1} de P_2O_5) (149 g kg^{-1}) e a dose de 120 kg ha^{-1} (178 g kg^{-1}) foi de 29 kg ha^{-1} de P. A ausência de diferença entre as condições de umidade do solo no modelo ajustado sugere que a alta mobilidade do potássio em solução e a contribuição de formas não trocáveis do nutriente em solos de terras baixas atenuaram a influência do gradiente redox imposto pela irrigação por sulco, equiparando a absorção entre as diferentes condições de umidade do solo (CASTILHOS; MEURER, 2002; SILVA *et al.*, 2015; DELLA LUNGA *et al.*, 2021).

A resposta positiva à adubação fosfatada expressa sinergia entre P e K na cultura de arroz irrigado, onde doses crescentes de P estimulam o crescimento radicular (maior comprimento total, área superficial, volume e número de pontas), ampliando a superfície de absorção e a taxa de captação de K^+ da solução do solo (LIU *et al.*, 2024; PAVINATO; CERETTA, 2004). Fisiologicamente, o potássio é o cátion monovalente mais abundante nas células vegetais, essencial à fotossíntese, ao transporte de assimilados no floema e à ativação enzimática (MARSCHNER, 2012),

sendo que a manutenção da homeostase de K contribui para limitar a translocação excessiva de Fe^{2+} , processo no qual o canal OsAKT1 desempenha papel relevante perante situações de toxidez por ferro (WU *et al.*, 2019). A desaceleração da resposta evidenciada pela concavidade negativa da curva está em consonância com o princípio dos rendimentos decrescentes, indicando que doses acima de 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 proporcionaram retornos marginais decrescentes em acúmulo de K — informação que deve ser considerada frente às recomendações de adubação fosfatada vigentes para o arroz irrigado por sulco no Sul do Brasil (REUNIÃO..., 2022; TIMM *et al.*, 2025).

O comportamento do acúmulo de K caracteriza-se pelo aspecto sinérgico fisiológico entre o fornecimento de P e a capacidade da planta em absorver potássio. Segundo Prado (2020), o aumento da biomassa das raízes decorrente do aporte de P amplia substancialmente o volume de solo explorado pelas plantas. Essa alteração na arquitetura e capilaridade radicular é determinante para a aquisição de potássio, visto que o principal mecanismo de contato íon-raiz para o K é a difusão — um processo limitante e que depende da proximidade física entre os tecidos de absorção da raiz e os sítios de troca da fase sólida do solo (NOVAIS *et al.*, 2007). Ainda, sob o aspecto da fisiologia celular, os mecanismos moleculares de absorção de K^+ na epiderme radicular requerem elevado e constante aporte energético, conforme descrito por Taiz *et al.* (2024), dado que a entrada do íon K^+ nas células radiculares ocorre contra um gradiente de concentração eletroquímico celular, sendo impulsionada primariamente pelo funcionamento de bombas de prótons (H^+ -ATPases) localizadas na membrana plasmática. Como constituinte estrutural obrigatório das moléculas de energia metabólica, como o ATP (adenosina trifosfato), o fosforo aportado assegura a manutenção desse mecanismo (MALAVOLTA, 2006), explicando o incremento nos teores totais de K observados.

Figura 9 - Quantidade de potássio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo. Dados médios para as condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Fonte: O autor, 2026.

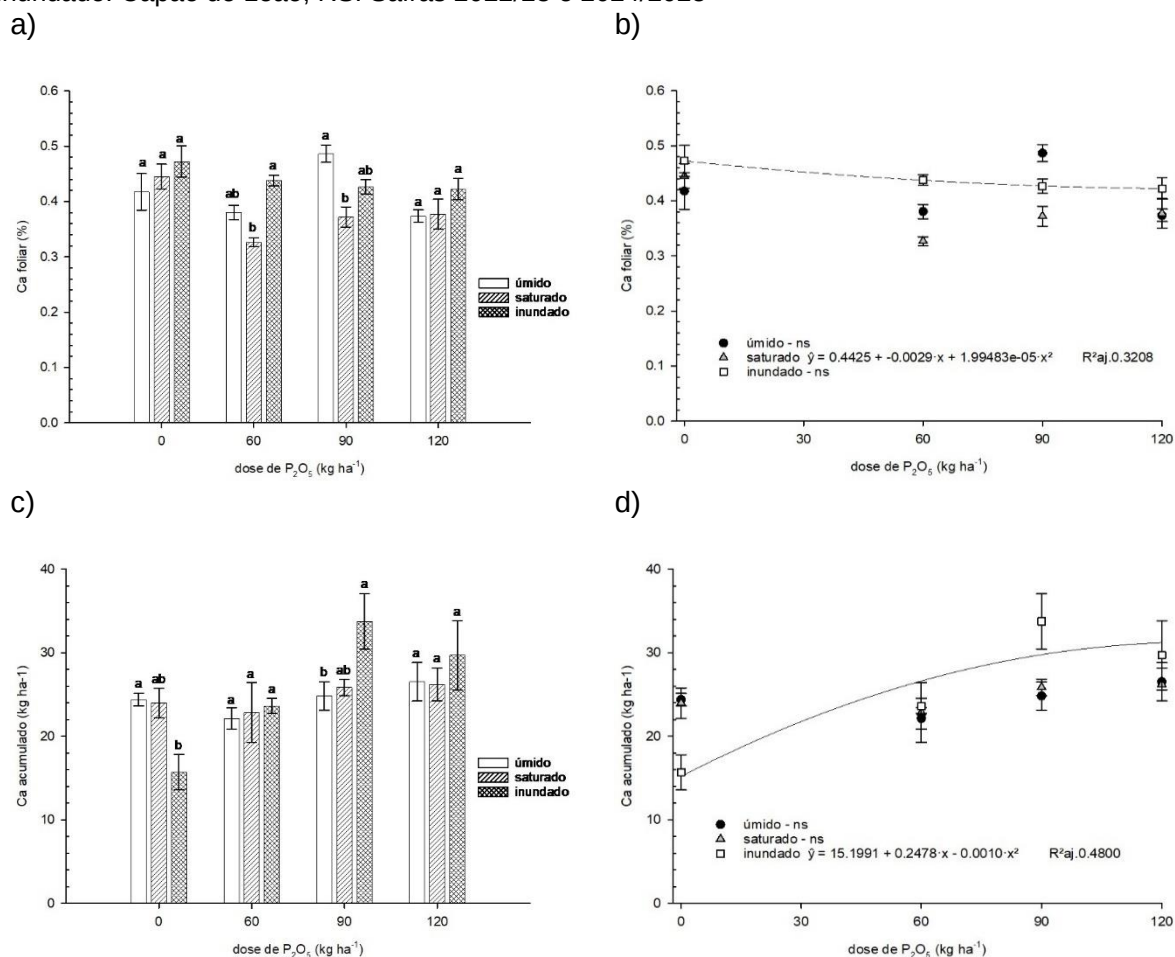
Teor foliar e cálcio acumulado na planta de arroz

A análise da variável Ca foliar mostrou que apesar da significância da interação entre os fatores doses de P e condição de umidade do solo, não foram detectadas diferenças entre as condições de umidade do solo, com o uso das doses 0 e 120 de P₂O₅, indicando que o teor de Ca na folha bandeira do arroz respondeu de forma seletiva às doses de P. As diferenças entre as condições hídricas restringiram-se às doses intermediárias (60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Na dose de 60 kg ha⁻¹ P₂O₅, em solo saturado, o teor foliar de Ca foi menor que no solo inundado e, em solo úmido, apresentou teor intermediário, equiparando-se às demais condições hídricas do solo. Já na dose de 90 kg ha⁻¹ P₂O₅, maior teor foliar de Ca ocorreu na condição de solo úmido, superando a condição de solo saturado, e comportamento intermediário ocorreu em solo saturado (Figura 10a).

A resposta às doses de P sobre o teor foliar de Ca (Figura 10b) manifestou-se, apenas, em solo saturado, sendo os dados descritos pelo modelo quadrático $\hat{y} = 0,4425 - 0,0029x + 1,9948 \times 10^{-5}x^2$, com $R^2_{aj} = 0,32$. Os ambientes úmido e inundado não foram influenciados significativamente pela variação na dose de P, de maneira que o intervalo de doses da adubação fosfatada não foi suficiente para promover alterações mensuráveis no teor foliar de Ca nas condições de solo testadas. O baixo coeficiente de determinação ajustado para o ambiente saturado sugere ainda que

fatores não contemplados pelo modelo contribuem de forma expressiva para a variação total observada.

Figura 10 - Teor de cálcio na folha bandeira (a, b) e cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2022/23 e 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

A menor concentração de Ca foliar na condição de solo saturado em relação ao inundado e úmido, especificamente sob doses intermediárias, pode ser interpretada considerando-se as transformações eletroquímicas decorrentes da variação nas condições hídricas. A redução do potencial redox em solo inundado favorece a dissolução de óxidos de ferro e manganês, potencialmente liberando Ca^{2+} adsorvido e elevando sua concentração na solução do solo, o que beneficia sua absorção por fluxo de massa (PONNAMPERUMA, 1972; KIRK, 2004). Assim, em solo saturado, em razão da maior variação na condição de umidade do solo e por apresentar condições redox intermediárias, pode não ser tão beneficiada pelas

transformações químicas no solo descritas, tornando a absorção de Ca mais sensível à interação com a disponibilidade de P proporcionada pelo aporte de doses intermediárias do nutriente. Por sua vez, a estabilidade do teor foliar de Ca nas condições de solo úmido e inundado independentemente da dose de P reflete o comportamento homeostático característico desse nutriente na planta. O Ca^{2+} , como componente estrutural da lamela média da parede celular e das membranas plasmáticas e como importante mensageiro secundário em diversas vias de sinalização intracelular, tem sua concentração citoplasmática regulada por Ca^{2+} -ATPases, antiportadores $\text{H}^+/\text{Ca}^{2+}$ e canais iônicos específicos, que tamponam grandes oscilações em sua concentração nos tecidos induzidas por variações na disponibilidade de outros nutrientes (DODD; KUDLA; SANDERS, 2010; KUDLA *et al.*, 2018; THOR, 2019; WANG *et al.*, 2023).

A expansão do sistema radicular e, conseqüentemente, sua eficiência exploratória atribuídas ao efeito de doses de P pode ter conduzido à convergência dos teores entre as três condições de umidade do solo na dose de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ (PLAXTON; LAMBERS, 2015); dado que a dose mais elevada de P compensou as diferenças no teor foliar de Ca impostas pelas condições de umidade do solo. Vale destacar a natureza discreta das variações observadas, entre 0,32 e 0,48%, situando-se dentro da faixa adequada reportada para folhas bandeira de arroz irrigado (FAGERIA, 2014).

Com relação aos dados de cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmos e folhas + grãos), evidencia-se dependência da condição de umidade do solo para com as doses de P avaliadas (Figura 10c). Diferenças significativas foram observadas para as doses 0 e 90 de P_2O_5 , sendo os maiores valores determinados na ausência de P em solo úmido ($24,3 \text{ kg ha}^{-1}$), seguido pela condição de solo saturado ($24,0 \text{ kg ha}^{-1}$) e, finalmente, em solo inundado ($15,7 \text{ kg ha}^{-1}$). Outrossim, as diferenças entre as condições de umidade do solo indicam que o adequado suprimento de P reduziu a influência da condição de umidade do solo sobre o acúmulo de cálcio na parte aérea das plantas de arroz, comportamento que está diretamente relacionado às alterações químicas do solo impostas pela inundação (PONNAMPERUMA, 1972). Apesar da adaptação ao cultivo em ambiente alagado, a aquisição de nutrientes pelo arroz depende da manutenção da atividade fisiológica do sistema radicular (KIRK, 2003), sendo que a formação de aerênquima e a perda radial de oxigênio constituem

importantes mecanismos adaptativos para a sobrevivência das raízes em condições anaeróbias, porém essas adaptações alteram simultaneamente o ambiente químico da rizosfera, modificando a disponibilidade e a absorção de diversos nutrientes minerais (WHITE; BROADLEY, 2003; 2013), justificando o maior acúmulo de cálcio em solo úmido na ausência de adubação fosfatada. A robustez celular conferida pelo cálcio também revela-se particularmente vital em sistemas de produção de arroz com menor disponibilidade hídrica, mitigando os danos oxidativos associados a períodos de déficit (FAGERIA *et al.*, 2007).

Já na dose 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a maior acúmulo de cálcio (33,7 kg ha⁻¹) ocorreu em solo inundado, seguido pelas condições de solo saturado (25,8 kg ha⁻¹) e úmido (24,8 kg ha⁻¹). A condição de solo saturado revelou um comportamento intermediário entre as condições de solo inundado e úmido tanto nas doses de 60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sem que esta condição de umidade do solo fosse estatisticamente diferente das demais. No cultivo irrigado por sulco, flutuações frequentes na umidade do solo, como observada na porção mediana da lavoura (solo saturado) podem induzir a precipitação de íons Ca²⁺ na solução do solo ou comprometer a sua mobilidade espacial (ZHANG *et al.*, 2021), o que pode explicar o comportamento observado. No caso do Ca, sua dinâmica fisiológica apresenta características bastante particulares; o nutriente é absorvido predominantemente por fluxo de massa, acompanhando o movimento da água em direção às raízes, sendo posteriormente transportado quase que exclusivamente pelo xilema. Em razão de sua reduzida mobilidade no floema, sua redistribuição para órgãos em crescimento é extremamente limitada, tornando sua concentração dependente da absorção contínua pelas raízes e do fluxo transpiratório (WHITE; BROADLEY, 2003; 2013).

Não houve diferença estatística entre as condições de umidade do solo avaliadas nas doses e 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, comportamento que indica que a adubação fosfatada reduziu a discrepância inicialmente existentes entre as condições de umidade do solo, promovendo maior uniformidade na concentração de Ca na planta sob tais doses. Ademais, ambientes submetidos a restrição hídrica (oscilações no caso da condição saturada) limitam a taxa transpiratória da cultura e por conseguinte, reduzem o fluxo de massa, que constitui o mecanismo primordial de transporte de Ca no perfil do solo até ao sistema radicular (FAGERIA, 2014; ISHFAQ *et al.*, 2020).

O incremento de doses de P influenciou a acumulação de Ca na parte aérea das plantas de arroz somente em solo inundado, sendo os dados ajustados a modelo quadrático ($\hat{y} = 15,1991 + 0,2478x - 0,0010x^2$; $R^2_{aj.0,48}$) (Figura 10d). Esse comportamento sugere que o incremento do conteúdo de P modificou a acumulação de Ca com o uso de até 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, quando há uma tendência de estabilidade no acúmulo de Ca. Esse comportamento é compatível com o conceito de homeostase nutricional, segundo o qual a planta mantém concentrações relativamente constantes de nutrientes envolvidos em funções estruturais essenciais, mesmo quando ocorrem modificações na disponibilidade de outros elementos minerais (HAWKESFORD *et al.*, 2023). O aporte adequado de P estimula a proliferação e o aprofundamento radicular, ampliando o volume de solo explorado e a superfície de intersecção ativa de nutrientes (VANDAMME *et al.*, 2016). A ausência de resposta a doses de P em solo saturado reforça essa interpretação. Nessa condição, a concentração foliar de Ca permaneceu praticamente constante independentemente da dose de P aplicada, indicando que o suprimento de P não limitou a absorção de Ca. Embora o P seja reconhecido como um dos principais elementos responsáveis pelo crescimento radicular e pela eficiência de aquisição de nutrientes, sua influência ocorre predominantemente sobre mecanismos específicos de absorção de fosfato, não havendo evidências consistentes de que incrementos moderados em sua disponibilidade promovam aumentos equivalentes na concentração foliar de cálcio (MIMURA; REID, 2024).

Teor foliar e magnésio acumulado na planta de arroz

Os teores de magnésio na folha bandeira do arroz foram influenciados pela interação entre os fatores condição de umidade do solo e dose de P (Figura 11). Os valores médios absolutos observados variaram de 0,09 a 0,12%, intervalo compreendido dentro da faixa de suficiência para a cultura do arroz (GUO *et al.*, 2016). Nos tratamentos com ausência de adubação fosfatada e com a aplicação da maior dose de P (120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), não houve efeito da condição de umidade do solo sobre o teor foliar de Mg. Possivelmente esse comportamento se deva à reduzida competição iônica do P pelos sítios de absorção radicular de Mg²⁺. Ressalta-se que com o uso da dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, os três regimes hídricos proporcionaram teores foliares de Mg bastante próximos e com valores reduzidos (0,09% a 0,10%),

indicando, por um lado, possível efeito supressor do uso de dose alta de P sobre a absorção de Mg, decorrente do antagonismo P x Mg (GUO *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2025), bem como efeito de diluição decorrente do maior crescimento das plantas de arroz em resposta ao incremento da disponibilidade de P no meio de cultivo.

De forma geral, em condição de solo inundado, os teores foliares de Mg foram superiores ou equivalentes aos dos demais regimes hídricos, evidenciando que a inundação do solo aumenta a mobilização de cátions, incluindo o Mg^{2+} trocável, pela alteração do pH e da dinâmica de troca iônica em condições redutoras (CHLAPECKA *et al.*, 2024). Esse comportamento contrasta, porém, com o observado na condição de solo saturado, onde o uso de doses intermediárias de P (60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅) proporcionou os menores teores foliares de Mg, sugerindo que a transição para a anaerobiose plena, presente em solo inundado, confere maior tamponamento à disponibilização de Mg em comparação à saturação. Liu *et al.* (2024) observaram que a adubação com Mg promove respostas de rendimento mesmo em solos com teor trocável de Mg adequado, demonstrando que a absorção do nutriente é governada pelo conjunto das interações iônicas no solo e não apenas pelo seu estoque total.

O efeito da variação na dose de P manifestou-se apenas para as condições de solo saturado e inundado (Figura 10b), sugerindo que a maior umidade do solo proporciona condições específicas que modularam a disponibilidade e absorção de Mg de forma mais expressiva. Em solo saturado, o ajuste quadrático com mínimo estimado próximo às doses intermediárias de P indica que a elevação da dose de P reduziu os teores foliares de Mg, com recuperação parcial pelo uso de doses maiores de P. Esse comportamento corrobora o fenômeno de antagonismo PxMg em nível de absorção radicular, no qual o excesso de fosfato no meio de cultivo provoca redução da absorção de Mg^{2+} , mecanismo que envolve competição no transporte iônico de cátions divalentes no apoplasto radicular e possível formação de compostos insolúveis Mg-fosfato na solução do solo (GUO *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2025). Xie *et al.* (2021) relataram que os efeitos antagonistas entre K e Mg estendem-se, também, à interação com P e que o balanço catiônico é determinante para a translocação de Mg da raiz para a parte aérea, o que ajuda a compreender por que mesmo sob condições de saturação — onde a disponibilidade geral de cátions é elevada — a maior oferta de P pode eventualmente suprimir o acúmulo de Mg foliar.

Por sua vez, em solo inundado, o ajuste quadrático com tendência decrescente indica resposta em platô com posterior redução dos teores de Mg com o incremento das doses de P. A inundação contínua promove a redução do potencial redox do solo, com dissolução redutiva dos óxidos de ferro ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) e, em consequência, a liberação dos fosfatos adsorvidos a esses óxidos (WANG *et al.*, 2022; MARTINENGO *et al.*, 2023). O aumento da disponibilidade de P na solução do solo sob condições anaeróbias, somado ao P aportado pelo fertilizante, pode ter intensificado a pressão competitiva sobre a absorção de Mg^{2+} com o uso de doses mais elevadas de P. Paralelamente, o efeito de diluição pela biomassa — amplamente documentado em cereais adubados com P (GUO *et al.*, 2016) — pode ter contribuído para a redução dos teores foliares de Mg nas doses maiores, dado que o maior crescimento vegetativo não foi acompanhado de absorção proporcional de Mg.

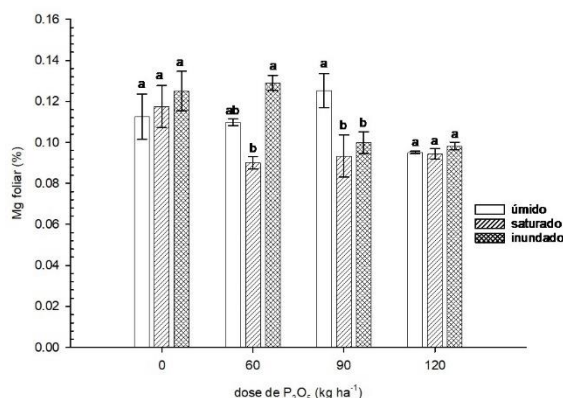
O regime saturado revela elevada variabilidade residual, indicativa de que fatores não controlados pelo experimento — como variabilidade espacial da umidade ao longo do ciclo, dinâmica de lixiviação de Mg^{2+} e competição com outros cátions absorvidos simultaneamente — podem ter atuado sobre esse nutriente de forma expressiva; a baixa hidratação iônica do Mg^{2+} favorece sua competição nos sítios de troca com cátions de maior afinidade, como o K^+ , o que torna sua distribuição foliar particularmente sensível ao conjunto das condições de manejo (XIE *et al.*, 2021; GRANSEE; FÜHRS, 2013).

Com relação à acumulação de Mg na parte aérea das plantas de arroz, determinou-se efeito da umidade do solo, exclusivamente para a dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para a qual, em solo inundado, a acumulação de Mg totalizou $62,6 \text{ kg ha}^{-1}$, superando a condição de solo úmido ($38,0 \text{ kg ha}^{-1}$); a condição de solo saturado proporcionou acumulação intermediária ($48,6 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figura 11c). Esse padrão é compatível com a heterogeneidade redox própria da irrigação por sulco, onde as posições mais baixas da lavoura permanecem saturadas por mais tempo, favorecendo a redução de óxidos de Fe e Al e a liberação de Mg^{2+} previamente adsorvido (DELLA LUNGA *et al.*, 2021; TIMM *et al.*, 2025). Com o uso de doses mais baixas de P, a menor disponibilidade do nutriente pode ter restringido o desenvolvimento radicular das plantas de arroz, limitando o acesso ao Mg disponibilizado no solo devido ao alagamento. Por outro lado, com a dose mais alta de P (120 kg ha^{-1} de P_2O_5), o efeito do alagamento sobre a disponibilidade de Mg é mitigado, comportamento que retrata

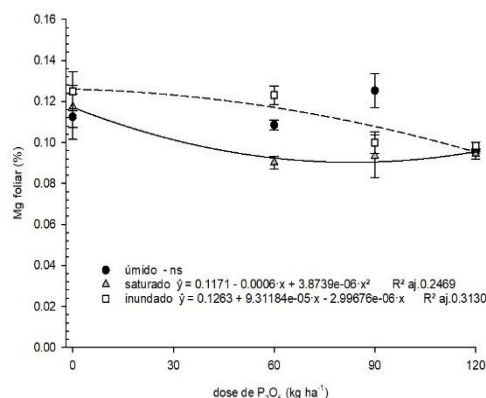
eventual consumo de luxo de P e o antagonismo P-Mg descrito para outras espécies, onde o excesso de P altera a partição e a translocação do Mg entre tecidos (HU *et al.*, 2026).

Figura 11 - Teor de magnésio na folha bandeira (a, b) e magnésio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025

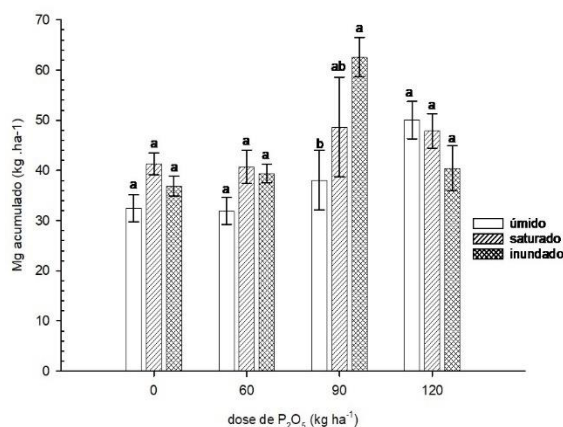
a)



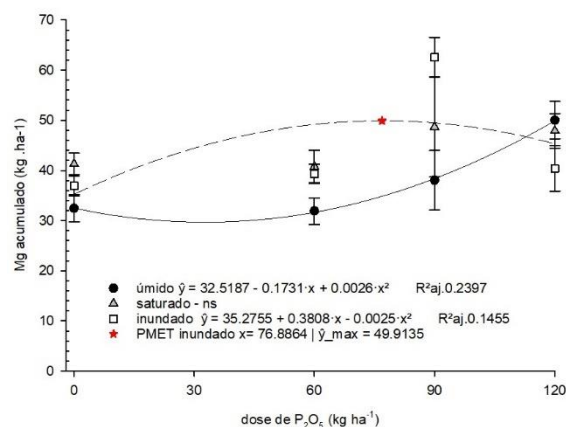
b)



c)



d)



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

As curvas de resposta a doses de P ajustadas (Figura 11d) mostram resposta quadrática em solo úmido, com mínimo ocorrendo em doses intermediárias de P, contrastando com a concavidade inversa em solo inundado, com valor máximo correspondente à dose de 76 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Na condição de solo saturado, não houve efeito significativo da variação na dose de P, o que sugere alternância redox insuficiente para modular de forma consistente a disponibilidade de Mg — quadro compatível com a não linearidade para a interação entre regime hídrico e doses de P no arroz, bem como com os baixos R² ajustados, que podem ser atribuídos à

variabilidade espacial de umidade do solo em cultivo irrigado por sulco (SONG *et al.*, 2021; DELLA LUNGA *et al.*, 2021). Dado o papel do Mg na fotossíntese e na translocação de carboidratos (CAKMAK; KIRKBY, 2008; MARSCHNER, 2012) e considerando que a deficiência do nutriente agrava a toxidez por Fe em arroz irrigado (KOBAYASHI *et al.*, 2018), o maior acúmulo sob inundação pode representar via adicional de atenuação ao excesso de Fe^{2+} típico de solos reduzidos, reforçando a relevância prática desse efeito na adequação das recomendações de adubação fosfatada para a cultura de arroz irrigado no Sul do Brasil (REUNIÃO..., 2022).

Desempenho produtivo e qualidade de grãos do arroz

Em ambas as safras avaliadas (2020/21 e 2024/25), determinou-se efeito isolado dos fatores dose de P e condição de umidade do solo sobre a produtividade de grãos de lavoura de arroz irrigado por sulco (Figura 12). Invariavelmente, maior produtividade de grãos de arroz ocorreu em solo inundado, seguido das condições de solo saturado e solo úmido. Na safra 2020/2021, a amplitude da produtividade de grãos variou de 10,6 Mg ha^{-1} , em solo úmido, a 13,1 Mg ha^{-1} , em solo inundado. Já na safra 2024/25, as produtividades alcançadas foram menores, variando de 8,7 Mg ha^{-1} , em solo úmido, a 10,2 Mg ha^{-1} , em solo saturado (Figura 12a). O decréscimo na produtividade da condição inundado para solo saturado e úmido reflete fenômenos eletroquímicos bem estabelecidos. Sob inundação contínua, a queda do potencial redox (Eh) para valores inferiores a -100 mV promove a redução microbiana do Fe^{3+} a Fe^{2+} , com consequente dissolução dos óxi-hidróxidos de ferro, que adsorvem fosfatos (FAGERIA *et al.*, 2011; DELLA LUNGA *et al.*, 2020). Esse processo aumenta substancialmente a concentração de P na solução do solo, beneficiando a absorção radicular e, por extensão, a produtividade da cultura (FAGERIA; CARVALHO; SANTOS, 2011). Chlapecka *et al.* (2024), em levantamento conduzido em lavouras comerciais de arroz irrigado por sulcos nos EUA, demonstraram que a absorção de P é significativamente inibida na porção aeróbia dos talhões, onde o solo permanece úmido, ratificando que as condições de aerobiose restringem o suprimento de P às plantas. O efeito observado neste estudo alinha-se ao gradiente de disponibilidade de P condicionado pelo grau de redução do solo.

Além do efeito do ano, as diferenças expressivas em produtividade verificadas entre as duas safras agrícolas avaliadas (25% a 30%, dependendo da condição de umidade do solo) estiveram associadas ao potencial de produtivo das cultivares utilizadas em cada uma das safras, híbrido XP 117 (safra 2020/21) e BRS Pampa CL (safra 2024/25). A cultivar XP 117 destaca-se pelo elevado potencial produtivo e ciclo médio de aproximadamente 125 dias, caracterizando-se por alto vigor inicial, elevada capacidade de perfilhamento e tolerância ao acamamento e às principais doenças da cultivar, com expressivo desempenho produtivo registrado em condições de lavouras comerciais (RiceTec Sementes, 2021). Já a cultivar BRS Pampa CL é uma cultivar de ciclo precoce, em torno de 118 dias da emergência à maturação, pertencente ao sistema Clearfield, com potencial produtivo superior a 11 Mg ha⁻¹ e demanda hídrica 15% inferior à de cultivares de ciclos mais longos (EMBRAPA, 2018). A distinção entre os dois genótipos tem base fisiológica clara. Os híbridos de arroz apresentam maior potencial produtivo e capacidade de adaptação aos distintos ambientes em comparação com cultivares convencionais, pela exploração da heterose ou vigor híbrido, que se expressa em características morfológicas como sistema radicular vigoroso, grande capacidade de perfilhamento, maior número de grãos por panícula e maior massa de grãos. Essas características conferem ao híbrido XP 117 um teto produtivo superior ao de cultivares convencionais, como a BRS Pampa CL, independentemente do manejo aplicado. De forma complementar, estudos indicam que a produtividade de grãos de híbridos de arroz pode superar em uma a duas toneladas por hectare a de cultivares convencionais, podendo a diferença ser ainda maior em função do clima e do manejo empregados (EMBRAPA, 2009).

Adicionalmente, o ciclo mais curto da BRS Pampa CL (118 dias) em relação ao XP117 (125 dias) tem efeito direto sobre o potencial produtivo dessas cultivares. De forma geral, quanto menor o ciclo, menor é o potencial produtivo da cultivar, embora esse comportamento possa variar com o local, o manejo e a constituição genética da cultivar (EMBRAPA, 2023).

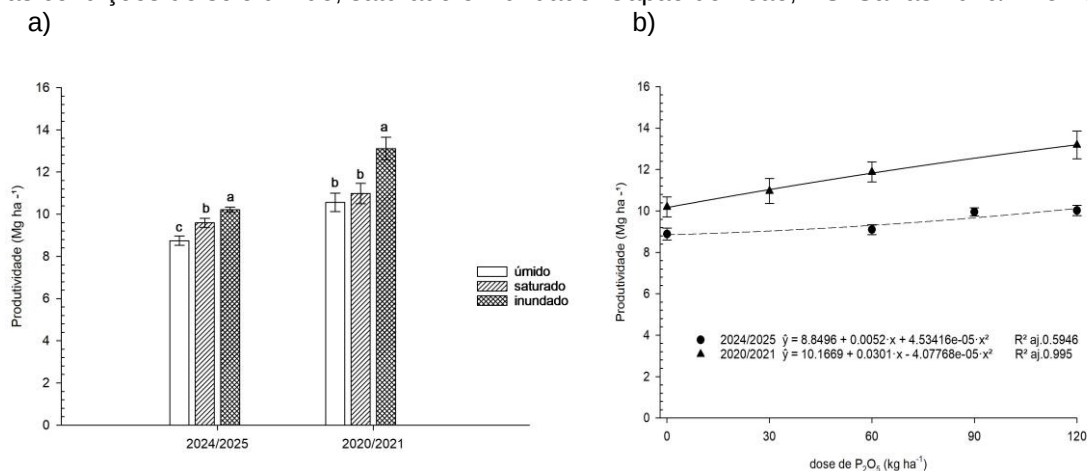
O efeito da variação da dose de P na produtividade do arroz foi distinto entre as safras (Figura 12b). Em 2020/21, os dados ajustaram-se a modelo quadrático ($R^2_{aj} = 0,52$). Segundo Fageria *et al.* (2013), em solos com teores baixo a médio de P disponível, o arroz irrigado responde de forma quadrática à adubação fosfatada, com incrementos expressivos até determinado nível e posterior estabilização ou declínio

da eficiência marginal do nutriente. Na safra 2024/25, embora o ajuste também tenha sido quadrático, as variações foram menores ($R^2_{aj} = 0,59$). A baixa magnitude dos coeficientes e o menor R^2_{aj} sugerem que, nesta safra, outros fatores além da adubação fosfatada influenciaram a produtividade do arroz. Nesse sentido, Fageria *et al.* (1997) relataram que a resposta do arroz irrigado à adubação fosfatada pode ser atenuada quando há aumento da disponibilidade do nutriente decorrente da redução ou quando fatores ambientais desfavoráveis limitam a utilização do P absorvido para a síntese de biomassa e enchimento de grãos. A relação entre disponibilidade hídrica e eficiência da adubação fosfatada é igualmente destacada em cultivo de arroz irrigado por sulco, onde a heterogeneidade espacial da umidade do solo impõe variação na mobilidade do P e na densidade de raízes (DELLA LUNGA *et al.*, 2020; CHLAPECKA *et al.*, 2024).

A interação entre o regime hídrico e adubação fosfatada constitui aspecto crítico para o entendimento do comportamento produtivo do arroz irrigado por sulco, sistema no qual coexistem zonas de solo com gradientes distintos de potencial redox ao longo do perfil e ao longo do comprimento dos sulcos (DELLA LUNGA *et al.*, 2020).

Considerados em conjunto, os resultados indicam que a maximização da produtividade do arroz em cultivo irrigado por sulco depende da associação das variações no regime de inundação com doses adequadas de P, sendo esse efeito mais expressivo em safras com maior potencial produtivo. A recomendação de adubação fosfatada deve, portanto, considerar tanto a disponibilidade inicial de P no solo quanto as condições climáticas da safra, reconhecendo que a eficiência do nutriente aplicado é modulada pelo regime hídrico predominante, pela capacidade redutora do ambiente de cultivo e pelo potencial produtivo intrínseco do genótipo utilizado (REUNIÃO..., 2022).

Figura 12 - Produtividade de grãos de lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2020/21 e 2024/2025



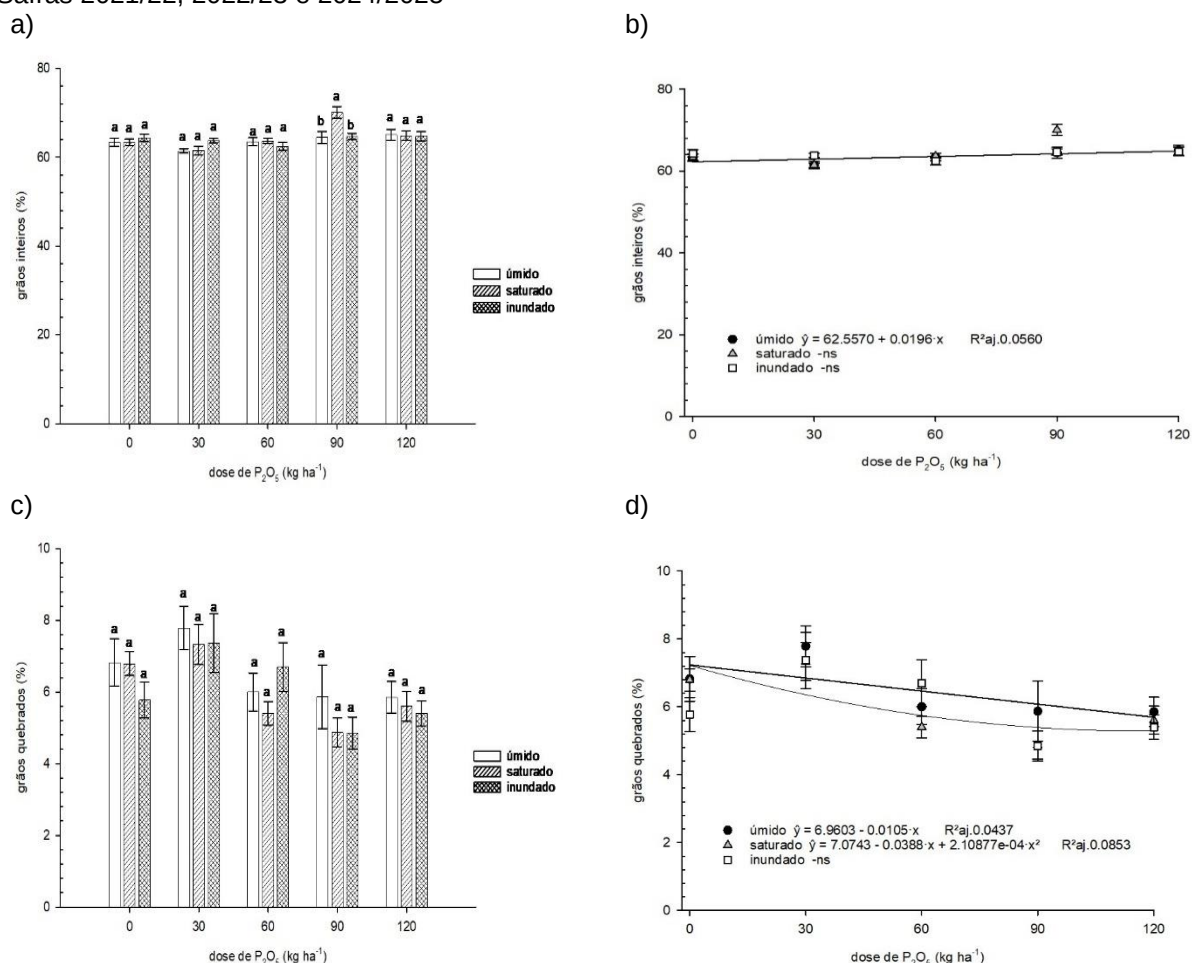
Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey).
Fonte: O autor, 2026.

De forma geral não houve efeito do regime hídrico sobre o percentual de grãos inteiros, exceção feita para a dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na qual valor pouco superior foi determinado em solo saturado (Figura 13a). Vale destacar que os rendimentos de grãos inteiros alcançados foram satisfatórios, considerando-se a variabilidade espacial e temporal na umidade do solo proporcionada pela irrigação por sulco do arroz. O incremento na dose de P fornecida ao arroz proporcionou resposta quadrática positiva sobre o percentual de grãos inteiros na condição de solo úmido (Figura 13b), demonstrando efeito discreto do fornecimento adequado de P à estabilidade e integridade dos grãos de arroz.

A qualidade do grão, expressa pelo rendimento de grãos inteiros, é um aspecto sensível e de atenção à adoção da irrigação por sulco para o arroz. Ainda não há um consenso sobre o efeito da irrigação por sulco sobre a qualidade de grãos do arroz. Deliberto; Harrell (2020) relataram que a irrigação por sulco pode afetar a qualidade de grãos do arroz, o que diverge de Hardke (2021), que não encontrou diferença em qualidade de grãos ao comparar os métodos de irrigação por sulco e por inunda  o. Por sua vez, Song *et al.* (2021) relataram, para sistema de irriga  o com alternância de períodos com solo úmido e saturado, manuten  o na qualidade de gr  os do arroz e aumento da eficiência de utiliza  o de P, comparativamente à inunda  o contínua. Mas, são comuns varia  es em qualidade de grãos oriundos de lavouras irrigadas por sulco, as quais são devidas ao conteúdo de água no solo, que varia ao longo da lavoura, sendo que maiores varia  es ocorrem nas porões superior e intermediária da lavoura, especialmente na região com solo drenado.

Com relação ao percentual de grãos quebrados, o efeito da variação na dose de fósforo manifestou-se para as condições de solo úmido e saturado apenas. Os dados ajustaram-se a modelos linear decrescente, em solo úmido, e quadrático também com tendência decrescente, em solo saturado. Esse resultado é indicativo que o suprimento adequado de P contribui, ainda que de forma discreta, para a redução no percentual de grãos quebrados (Figura 13c, d), minimizando eventuais perdas decorrentes de variações e redução da umidade do solo no ambiente de cultivo nas porções superior e mediana de lavouras de arroz irrigadas por sulco.

Figura 13 - Percentuais de grãos inteiros (a, b) e quebrados (c, d) em lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safras 2021/22, 2022/23 e 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).

Fonte: O autor, 2026.

Conclusões

A condição de umidade do solo e a adubação fosfatada atuam de forma integrada em cultivo de arroz irrigado por sulco, influenciando o estado nutricional, absorção de nutrientes e desempenho produtivo da cultura.

A irrigação por sulco impõe gradientes de umidade e potencial redox no solo, que modulam a disponibilidade e a absorção de nutrientes em lavoura de arroz irrigado por sulco.

O incremento na dose de fósforo compensa a menor disponibilidade natural do nutriente nas porções não inundadas da lavoura irrigada por sulco, sendo capaz de atenuar diferenças na absorção de nutrientes e desempenho produtivo da cultura.

A recomendação de dose de fósforo para o arroz irrigado por sulco deve considerar, conjuntamente, o histórico de fertilidade do solo, potencial produtivo da cultivar utilizada e a variabilidade no regime hídrico da lavoura.

Capítulo 2 - Produtividade de grãos e absorção de nutrientes de arroz irrigado por sulco: efeito da adubação potássica e condição de umidade do solo

Introdução

O arroz é um dos principais alimentos básicos da população humana, sustentando mais de metade da população mundial. O cereal é cultivado em todos os continentes, particularmente na Ásia, que responde por aproximadamente 90% da produção e consumo global (FAO, 2025; USDA, 2026). Em 2026, no Brasil, décimo maior produtor mundial e principal país produtor fora do continente asiático, a produção de arroz superou 11 milhões de toneladas, representando cerca 1,5% do total produzido no mundo (CONAB, 2026; USDA, 2026). A produção brasileira de arroz está concentrada na região Sul, majoritariamente nas terras baixas do Rio Grande do Sul, que respondem por cerca de 70% da produção nacional (CONAB, 2026; IRGA, 2026).

Por se tratar de uma planta semi-aquática, o arroz é tradicionalmente cultivado em sistema irrigado por inundação contínua, no qual o solo é mantido alagado durante a maior parte do período de cultivo, sistema apresenta demanda hídrica elevada e baixa eficiência de irrigação (DELLA LUNGA, 2021). A produção de arroz responde pelo uso de fração considerável (34% a 43%) de toda a água de irrigação do planeta (FAO, 2025; BOUMAN *et al.*, 2007), ocasionando frequentemente conflitos pelo uso da água. Estratégias como a irrigação controlada, irrigação intermitente, irrigação por aspersão e, mais recentemente também, a irrigação por sulco, têm-se mostrado efetivas em reduzir o uso da água na produção de arroz, em relação à irrigação por inundação contínua (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; FENG *et al.*, 2007; GOMES *et al.*, 2008; NGUYEN *et al.*, 2009; YAO *et al.*, 2012; LINQUIST *et al.*, 2015 e WANG *et al.*, 2018).

No Rio Grande do Sul, a irrigação do arroz por sulco é um método recente, que tem gerado atenção e interesse de produtores que utilizam a tecnologia sulco-camalhão para a produção de espécies de sequeiro, particularmente soja, em rotação ao arroz. Ao conferir drenagem superficial ao solo e viabilizar a irrigação das culturas

por sulco, a tecnologia sulco-camalhão garante a superação dos estresses por excesso e déficit hídrico em terras baixas, principais limitantes ao cultivo de espécies de sequeiro em rotação ao arroz nas terras baixas (PARFITT *et al.*, 2017), garantindo ganhos expressivos em produtividade e rentabilidade (PROJETO SULCO, 2020; PARFITT; SCIVITTARO, 2021).

A irrigação por sulco constitui-se em possibilidade de aproveitamento da infraestrutura de sulcos e camalhões, estabelecida para o cultivo de soja ou outra espécie de sequeiro, para a produção de arroz, simplificando a rotação de culturas e reduzindo a demanda de tempo, mão-de-obra e os custos com operações de preparo do solo e práticas de manejo da cultura (HARDKE; CHLAPECKA, 2020). Trata-se de um método de irrigação por superfície, em que a distribuição da água ocorre em pequenos canais laterais (sulcos) dispostos paralelamente às linhas de plantas, movimentando-se ao longo do declive do terreno. A água infiltra no fundo e laterais dos sulcos, movimentando-se vertical e horizontalmente no perfil do solo, proporcionando umidade ao leito vegetado (OLITTA, 1986; HARDKE *et al.*, 2017). A ausência de lâmina d'água sobre a superfície do solo em parte considerável da lavoura reduz a evaporação (HE, 2010), proporcionando economia de água em comparação à inundação do solo (WILSON JR.; BRANSON, 2006; BROOKS *et al.*, 2010; STEVENS *et al.*, 2018, 2020).

O sistema irrigado por sulco, embora ainda pouco expressivo em termos de área, já há bastante tempo vem sendo testado com o objetivo principal de economizar água e de forma exitosa, em importantes regiões produtoras de arroz, como Japão (UEKI; ARBOLEDA, 1976); Austrália (OCKERBY; FUKAI, 2001); Estados Unidos (VORIES *et al.*, 2002) e China (HE, 2010; WANG *et al.*, 2018). Recentemente, o interesse pelo sistema aumentou bastante nas principais regiões produtoras de arroz americanas (HARDKE *et al.*, 2017; STEVENS *et al.*, 2018; 2020), ocupando, nas últimas safras, mais de 10% da área cultivada com arroz no País (HARDKE; CHLAPECKA, 2020; DELLA LUNGA *et al.*, 2021).

A irrigação por sulco, assim como outros métodos alternativos à inundação contínua, não é necessariamente adequada para todas as áreas de cultivo de arroz, devido a restrições topográficas, climáticas e, mesmo, pelo risco de perdas em produtividade (LINGQUIST *et al.*, 2015; STEVENS *et al.*, 2020), sendo importante verificar a adequação do método regionalmente, fortalecendo seus benefícios sem

comprometer o desempenho e potencial produtivo da cultura do arroz, o que é um pré-requisito para o desenvolvimento de estratégias de irrigação alternativas à inundação contínua.

Um dos principais desafios da irrigação por sulco é conferir adaptação ao arroz ao cultivo sob condições ambientais e propriedades de solo variáveis (DELLA LUNGA *et al.*, 2020a, 2020b), uma vez que a maior parte das cultivares de arroz irrigado são desenvolvidas para o sistema inundado. A flutuação principalmente, mas geralmente prolongadas condições de solo apenas úmido superficialmente, favorece a emergência de plantas daninhas, o que pode ser um desafio ao controle ao longo de todo o ciclo (DELLA LUNGA *et al.*, 2021) e elevar o custo de produção (BAGAVATHIANNAN *et al.*, 2011). Outro efeito marcante da irrigação por sulco é a ampla variação da umidade e potencial de oxirredução do solo ao longo do comprimento de lavouras em escala comerciais (DELLA LUNGA *et al.*, 2020a), que nas terras baixas do Rio Grande do Sul comumente alcançam 400 m (PARFITT; SCIVITTARO, 2021). O déficit hídrico proporcionado pela irrigação por sulco pode afetar a produtividade (VORIES *et al.*, 2002) e a qualidade de grãos (NGUYEN *et al.*, 2009) de cultivares não adaptadas ao sistema.

Além da tolerância ao déficit hídrico, o manejo da fertilidade do solo e adubação é outro aspecto sensível no manejo do arroz em cultivo irrigado por sulco. Isto porque a inundação promove uma série de transformações físicas, químicas, eletroquímicas e biológicas no solo (SOUSA *et al.*, 2006), alterando o equilíbrio e disponibilidade de diversos nutrientes essenciais. Alguns deles, que não se encontram em formas prontamente disponíveis em um ambiente bem drenado, tornam-se disponíveis sob condições de inundação. O fósforo e o potássio são os nutrientes mais beneficiados pela submersão do solo, razão pela qual a resposta do arroz irrigado por inundação do solo às adubações fosfatada e potássica é menor que em solos drenados (SCIVITTARO; MACHADO, 2004). O aumento na disponibilidade de fósforo em solos inundados é atribuído à sua liberação da matéria orgânica, redução de fosfatos férricos a formas ferrosas mais solúveis, hidrólise de fosfatos de ferro e de alumínio causada pelo aumento do pH de solos ácidos e à liberação do fósforo adsorvido nas argilas ou nos hidróxidos de ferro e de alumínio, por troca aniônica (PONNAMPERUMA, 1972, 1977). Já a maior disponibilidade de potássio sob inundação deve-se ao aumento da difusão, deslocamento dos sítios de troca para a

solução do solo, pelos cátions NH_4^+ , Fe^{2+} e Mn^{2+} (MACHADO, 1985), e à liberação de potássio das frações não trocável e estrutural (CASTILHOS; MEURE; PINTO, 1999).

Considerando o crescente interesse do setor produtivo pelo cultivo de arroz irrigado por sulco de produtores em rotação com soja ou outra espécie de sequeiro nas terras baixas do Rio Grande do Sul, assume importância conhecer e importante avaliar o efeito de práticas de manejo, como a adubação, sobre o desenvolvimento e produtividade do arroz irrigado por sulco, monitorando o efeito da variação na umidade do solo ao longo do comprimento do declive do terreno em lavouras em escala de produção comercial.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a influência de doses e do manejo da adubação potássica no cultivo de arroz irrigado por sulco, considerando que esse sistema de irrigação estabelece diferentes condições de umidade do solo, influenciando, portanto, na disponibilidade do nutriente para o arroz.

Como principal hipótese de trabalho, considerou-se que o incremento de doses de adubação potássica pode compensar a redução na disponibilidade do nutriente nas porções superior e intermediária da lavoura de arroz, proporcionada pela ausência de lâmina de água. Busca-se, assim, subsidiar o estabelecimento de estratégias de manejo da adubação potássica para o cultivo de arroz irrigado por sulco, uniformizando e otimizando a produtividade de grãos.

Material e métodos

O estudo compreendeu dois experimentos de manejo da adubação potássica para o arroz irrigado por sulco, realizados nas safras agrícolas 2022/23 e 2024/25. Em ambas as safras, os experimentos foram realizados na Estação Experimental Terras baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, localizada no município de Capão do Leão, RS, em áreas adjacentes nas safras agrícolas 2022/23 e 2024/25. A safra agrícola 2023/24 foi perdida devido à ocorrência de sucessivos eventos climáticos extremos na região entre setembro de 2023 e maio de 2024, que inviabilizaram o cultivo de arroz irrigado (COPAAERGS, 2023). Em ambos os experimentos, o arroz irrigado foi cultivado em área previamente cultivada com soja utilizando a tecnologia sulco-camalhão. No período de outono/inverno, as áreas foram mantidas em pousio,

com desenvolvimento de vegetação espontânea (ressemeadura natural de azevém) durante o outono/inverno.

Caracterização da área experimental e seleção da cultivar de arroz irrigado

O solo das áreas experimentais é classificado como Planossolo Háplico (STRECK *et al.*, 2008). Os resultados da análise química do solo, na profundidade de 0 a 20 cm, antecedendo o cultivo de arroz irrigado em cada safra agrícola são apresentados na Tabela 1 (Capítulo 1). Os teores de matéria orgânica, fósforo e potássio são interpretados, respectivamente, como baixo, muito alto e médio, nas safras 2022/23 e 2024/25, para a cultura de arroz irrigado (REUNIÃO..., 2022). O clima local é classificado como subtropical (Cfa - Köppen) (WREGGE *et al.*, 2012). A precipitação e a temperatura média anual são de 1.367 mm e 17,8°C (ESTAÇÃO, 2017).

Em ambas as safras, utilizou-se a cultivar de arroz irrigado de ciclo precoce BRS Pampa CL (média = 118 dias), gerada pelo Programa de Melhoramento Genético de Arroz da Embrapa. Trata-se de uma cultivar de ciclo precoce, escolhida em razão de seu elevado potencial produtivo, resistência a doenças, tolerância aos herbicidas associados ao sistema Clearfiled® e demanda hídrica cerca de 15% menor que cultivares de ciclo mais longo (BERNARDI *et al.*, 2024).

Tratamentos e delineamento experimental

Na safra 2022/23, compararam-se apenas duas doses de potássio, 100 e 150 kg ha⁻¹ de K₂O, que correspondem, respectivamente, a 1,0 e 1,5 vez a dose recomendada de potássio (DRK) para o arroz irrigado (REUNIÃO..., 2018). Por sua vez, na safra 2024/25, avaliaram-se quatro doses de potássio para o arroz: 0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O, correspondendo a zero, 1,0; 1,5 e 2,0 vezes a dose recomendada de potássio para o arroz irrigado (REUNIÃO..., 2022). Para evitar interferência/restrrição de outros nutrientes sobre a resposta do arroz à adubação potássica, todas as parcelas experimentais receberam a aplicação de 130 e 66 kg ha⁻¹ de N e P₂O₅, respectivamente. Estas quantidades foram estabelecidas considerando-se os resultados da análise química do solo e expectativa muito alta de resposta da

cultura à adubação (REUNIÃO..., 2018; 2022). Como fertilização de base, em ambas as safras, aplicaram-se 330 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20 de forma localizado no sulco de semeadura. O restante da adubação potássica para completar a DRK foi aplicado a lanço em superfície imediatamente antes da semeadura do arroz.

Nos tratamentos que previam a aplicação de 1,5 e 2,0 a DRK, quantidades adicionais de fertilizante (cloreto de potássio) foram aplicadas em cobertura, quando as plantas de arroz atingiram o estágio de quatro folhas (V4), coincidindo com o início do perfilhamento do arroz. A adubação nitrogenada, independentemente do tratamento, foi parcelada em pré-semeadura (16,5 kg ha⁻¹) e em cobertura, 65% da dose faltante em V4 e o restante na iniciação da panícula (estádio R0). Como fonte de nitrogênio e utilizou-se ureia.

Os tratamentos foram delineados em faixas, constituídas por 20 linhas de plantas, espaçadas entre si em 17,5 cm (quatro camalhões com 0,90 m de largura), com cerca de 190 m de comprimento. Nas porções superior, intermediária e inferior das faixas foram distribuídas, ao acaso, quatro parcelas experimentais, consideradas repetições dos tratamentos, com 5 m de comprimento, distribuídas de forma equidistante ao longo de toda a extensão da área experimental.

Implantação, condução, avaliação e colheita do arroz

A semeadura do arroz cultivar BRS Pampa CL ocorreu nos dias 8 de novembro de 2022 e 11 de novembro de 2024. Utilizou-se um espaçamento entre linhas de 17,5 cm e a densidade de semeadura de 110 kg ha⁻¹ de sementes.

A área experimental apresentava declividade de 0,1% e os sulcos de irrigação cerca de 190 m de comprimento. Em ambos as safras, o terço inferior da lavoura permaneceu integralmente inundado ao longo de todo o período de cultivo do arroz; a porção intermediária foi mantida a maior parte do tempo com solo saturado e a porção superior, com solo úmido (drenado), sendo esta última, portanto, a área mais oxidada e com maior variabilidade na conteúdo de água no solo.

Para a estimativa dos estádios de desenvolvimento das cultivares de arroz, utilizou-se o método de graus-dia (STEINMETZ *et al.*, 2013). A partir das estimativas geradas foram planejadas e aplicadas as práticas de manejo da cultura.

O controle de plantas daninhas e demais tratos culturais seguiram as indicações técnicas da pesquisa para a cultura de arroz irrigado na região Sul (REUNIÃO..., 2018).

A irrigação do arroz por sulco foi procedida durante todo o ciclo da cultura, a partir da emergência, adotando-se turno de rega de três dias. A duração de cada irrigação foi definida em estudos preliminares de avaliação da capacidade de infiltração de água do solo, definindo o perímetro de molhamento. De forma geral, eventos de chuva superior a 8 mm substituíram uma irrigação. O monitoramento da umidade do solo foi realizado diariamente utilizando-se conjuntos de tensiômetros, instalados na profundidade de 15 cm, nas porções superior, intermediária e inferior da lavoura.

O efeito dos tratamentos foi avaliado separadamente nas unidades experimentais dispostas nos três setores da lavoura, superior, intermediária e inferior, que são representativos das condições de solo drenado (úmido), saturado e inundado, respectivamente. Abrangeu, ainda, linhas dispostas nos sulcos e nos camalhões, dado que a semeadura do arroz foi realizada de forma contínua em ambas as porções da lavoura.

Os tratamentos foram avaliados pela determinação do estado nutricional da cultura, produção de matéria seca da parte aérea e absorção de nutrientes pelas plantas, desempenho agrônômico e produtivo do arroz.

As amostragens de planta para avaliação do estado nutricional do arroz foram realizadas no florescimento pleno (estádio R4), consistindo na coleta da folha bandeira de 48 plantas por parcela experimental. As amostras coletadas foram secas em estufa até massa constante, moídas e submetidas à análise química, determinando-se os teores dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg no tecido vegetal (TEDESCO *et al.*, 1995). Os valores determinados foram utilizados para a comparação do efeito dos tratamentos de manejo da adubação fosfatada para o arroz, bem como contrastados com padrões estabelecidos para a cultura (SOCIEDADE..., 2016).

Para a determinação da acumulação de matéria seca e absorção de nutrientes pelas plantas de arroz, utilizaram-se amostras constituídas pelas plantas contidas em 0,5 m de linha de cada unidade experimental, por ocasião da maturação fisiológica. O material vegetal colhido foi separado em colmos e folhas e panículas com grãos e, posteriormente, seco em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C, até massa

constante. Após, as amostras foram pesadas, moídas e analisadas, para determinação das concentrações de macronutrientes no tecido vegetal, segundo método descrito em Tedesco *et al.* (1995). A acumulação de macronutrientes na parte aérea foi calculada pelo somatório dos valores determinados para as frações colmos e folhas e panículas com grãos.

Na maturação da colheita, avaliou-se, ainda, a produtividade de grãos e rendimento de engenho da cultura (percentuais de grãos inteiros e quebrados), de forma setorizada para as porções superior, mediana e inferior da lavoura de arroz. Os valores foram corrigidos para 13% de umidade.

Análise estatística

Os dados relativos a todas as variáveis foram analisados conjuntamente, utilizando modelos lineares mistos. Inicialmente, os dados foram avaliados pelo critério de homogeneidade dos quadrados médios dos resíduos (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002 e BANZATTO; KRONKA (2008). Atendido esse critério foi, procedeu-se à análise conjunta dos dados das duas safras, utilizando o modelo linear misto do delineamento em faixas (COCHRAN; COX, 1957 e RAMALHO *et al.*, 2005). Mas quando não atendido, as análises foram realizadas individualmente para cada safra, evitando distorções nas estimativas dos erros experimentais e na validade dos testes de hipóteses. Na primeira safra, em razão de o experimento possuir apenas 3 níveis para o fator dose de P e, portanto, 2 graus de liberdade para essa causa de variação, não foram realizadas as análises individuais quando a premissa da análise conjunta não foi atendida.

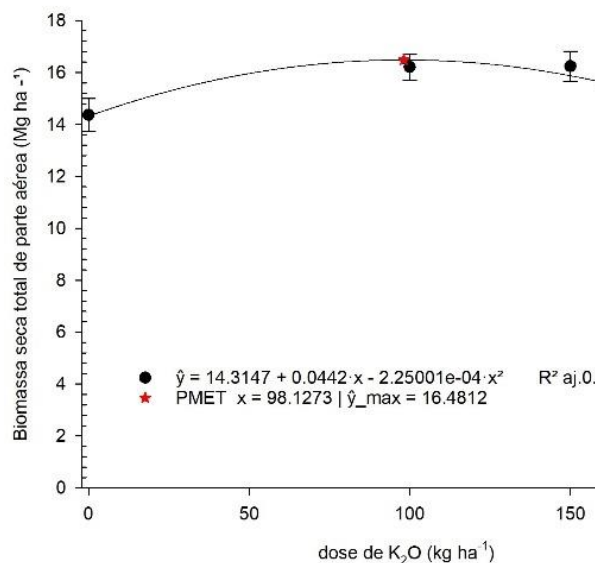
As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% (fator umidade do solo) e utilizando modelos de regressão ao nível de 5% (fator dose de P), considerando-se os efeitos simples e/ou a interação entre os fatores. As análises estatísticas foram realizadas com suporte de linguagem estatística R (R CORE TEAM, 2024), utilizando o pacote lmer com interface interativa construída no framework Shiny.

Resultados e discussão

Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz

A variável produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz foi influenciada, apenas, pela dose de K. Os dados obtidos foram ajustados ao modelo quadrático ($y = 14,3147 + 0,0442x - 2,25001 \times 10^{-4}x^2$; R^2 aj. = 0,37), cujo ponto de máxima eficiência técnica (PMET) foi estimado em 98 kg ha⁻¹ de K₂O, correspondendo a produção de 16,5 Mg ha⁻¹ de matéria seca (Figura 14). A dose de máxima eficiência técnica estimada (98 kg ha⁻¹ de K₂O) insere-se dentro da faixa de adubação com o nutriente recomendada para a cultura de arroz irrigado Sul do Brasil, considerando solos com teor médio de potássio (REUNIÃO..., 2022), indicando adequação das indicações de adubação potássica, estabelecidas para o sistema inundado, para o sistema irrigado por sulco. Doses superiores ao PMET são indicativas de consumo de luxo de potássio (AKTER *et al.*, 2024). Santos *et al.* (1999) relataram que a resposta do arroz irrigado à adubação potássica depende do manejo da água e da disponibilidade do nutriente no solo, reforçando a necessidade de considerar ambos os fatores no estabelecimento de indicações de adubação potássica e maximização da eficiência de uso do nutriente.

Figura 14 - Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássio. Dados médios das condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Fonte: O autor, 2026.

Estado nutricional da cultura e acumulação de nutrientes na parte aérea das plantas de arroz

Teor foliar e nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz

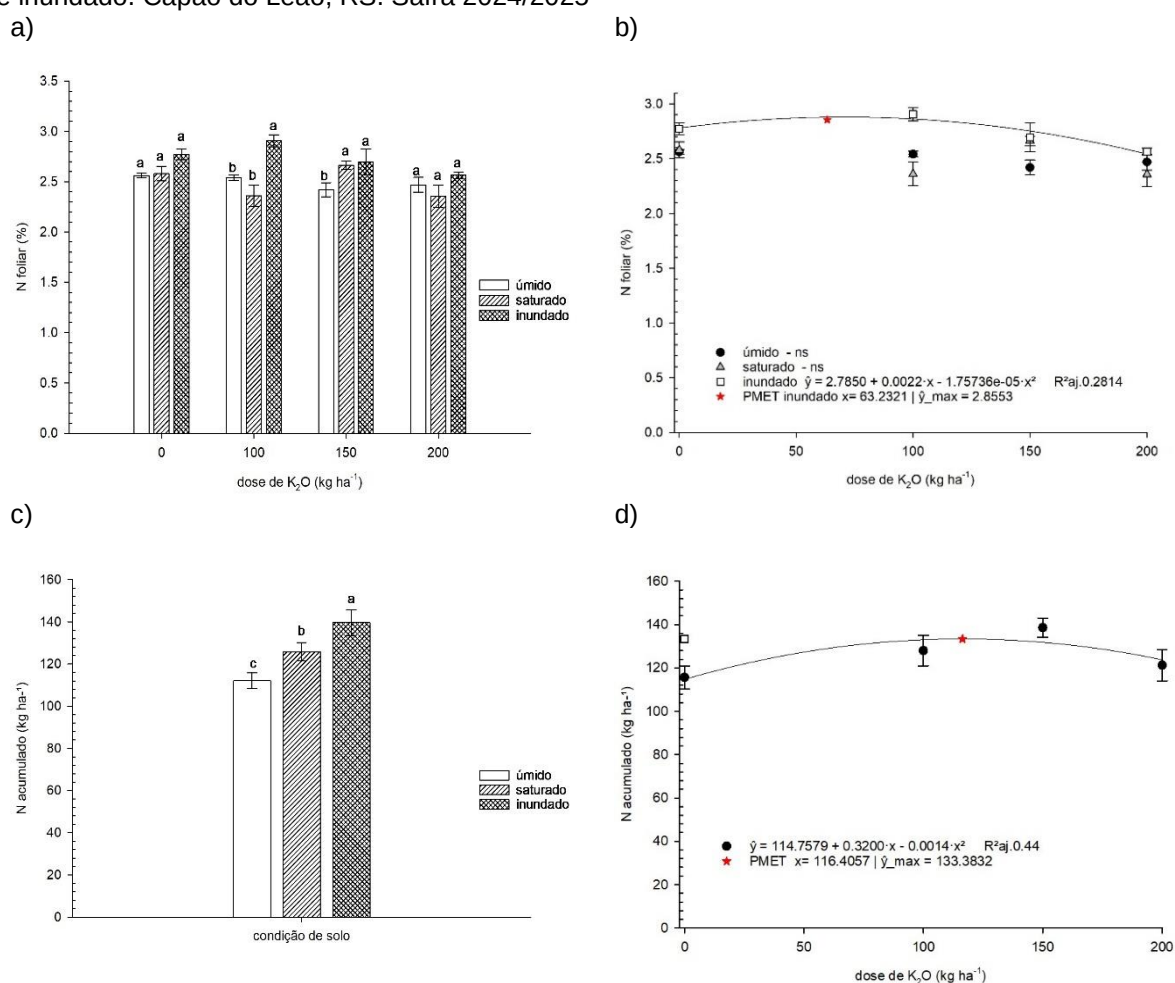
O teor de N na folha bandeira do arroz foi influenciado pela interação entre os fatores dose de potássio e umidade do solo. A condição de solo inundado apresentou valores médios absolutos superiores em todas as doses de K. No entanto, somente nas doses 100 e 150 kg ha⁻¹ de K₂O que houve diferença estatística entre as umidades do solo. Com a menor dose de K (100 kg ha⁻¹ de K₂O), a condição de solo inundado proporcionou maior teor foliar de N que as demais condições de solo úmido e saturado, cujo efeito foi semelhante. Na dose de 150 kg ha⁻¹ de K₂O, o efeito foi distinto, com equivalência das condições de solo inundado e saturado, cujos teores foliares de N foram superiores aos determinados em solo úmido (Figura 15a). Esse resultado está associado ao fato de a inundação do solo promover redução no potencial redox e elevar o pH de solos ácidos, promovendo a liberação de íons NH₄⁺ na solução do solo, forma predominantemente absorvida pelo arroz irrigado (EMBRAPA, 2024). Em solo úmido, prevalecem condições aeróbicas, que favorecem a nitrificação e formação de nitrato (NO₃⁻), forma suscetível a perdas por desnitrificação e lixiviação, reduzindo o N disponível para a absorção radicular (MIRO; ISMAIL, 2013).

A amplitude dos teores de N na folha bandeira do arroz variou de 2,4% a 2,9%, atendendo ou estando pouco abaixo da faixa de suficiência indicada para a cultura, que varia de 2,5% a 3,0% (DOBERMANN; FAIRHURST, 2000; REUNIÃO..., 2022).

O efeito da variação da dose de potássio sobre o teor foliar de N ocorreu somente em solo inundado, não se manifestando em solo úmido e saturado (Figura 15b), indicando que, nestes regimes hídrico, a absorção de N para o arroz foi regida predominantemente pela disponibilidade de N no solo e demanda das plantas de arroz, sem modulação expressiva da dose de K. Em solo inundado, os dados de teor foliar de N foram ajustados a modelo quadrático, com ponto de máxima eficiência técnica (PMET) correspondente à dose de 63,2 kg ha⁻¹ de K₂O, que proporcionou teor foliar de N estimado de 2,85%. O resultado encontrado indica relação sinérgica entre N e K, decorrente da melhoria da eficiência fotossintética e potencial osmótico das células, favorecendo a incorporação de N (HOU *et al.*, 2019). Acima do PMET,

entretanto, o teor de N foliar declinou progressivamente, evidenciando que doses excessivas de K em solo inundado exercem efeito de competição bidirecional sobre a absorção de NH_4^+ . Esse comportamento pode ser explicado pela similaridade física e de carga entre os íons K^+ e NH_4^+ , que competem pelos mesmos transportadores de alta afinidade na membrana plasmática das células radiculares (TEN HOOPEN *et al.*, 2010; HOU *et al.*, 2020).

Figura 15 - Teor de nitrogênio na folha bandeira (a, b) e nitrogênio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de potássio, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

Independentemente da dose de K, a acumulação de N na parte aérea das plantas de arroz decresceu na seguinte ordem: solo inundado (140 kg ha^{-1}) > solo saturado (126 kg ha^{-1}) > solo úmido (112 kg ha^{-1}) (Figura 15c), o que representa uma variação de cerca de 20%. O gradiente encontrado é indicativo de relação direta entre o grau de saturação do solo e a capacidade de absorção e acumulação de N em

plantas de arroz (KEENEY; SAHRAWAT, 1986; WANG *et al.*, 2016). Também o menor acúmulo de N em solo úmido pode ser atribuído às maiores perdas de N em ambiente sujeito a maior alternância nas condições de oxirredução. Contrariamente, em solo inundado, a ocorrência de condições anaeróbias estáveis favorece a redução dos compostos nitrogenados e a formação de NH_4^+ , que pela estabilidade das condições redutoras é menos suscetível a perdas (KEENEY; SAHRAWAT, 1986).

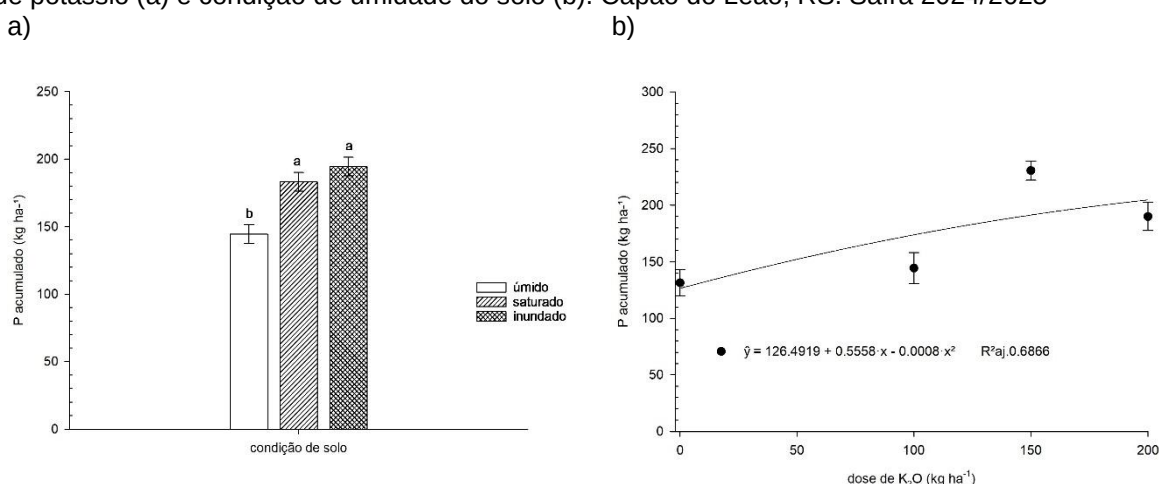
O efeito da variação na dose de potássio sobre a acumulação de N na parte aérea das plantas de arroz foi descrito por modelo quadrático, com PMET correspondente à dose de $116,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (Figura 15d). Esse comportamento retrata interação fisiológica entre os nutrientes K e N, de forma que o potássio favorece a assimilação do nitrogênio por meio da ativação enzimática, manutenção da atividade fotossintética, maior eficiência estomática e incremento do transporte de fotoassimilados, refletindo no acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, de N na parte aérea (CHEN *et al.*, 2024; LIAN *et al.*, 2023).

Teor foliar e fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz

O acúmulo de P nas plantas de arroz foi maior nas porções da lavoura com solo inundado ($194,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de K) e saturado ($183,2 \text{ kg ha}^{-1}$), comparativamente à região com solo úmido ($144,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de K) (Figura 16a). O teor de P na folha bandeira do arroz não foi influenciado pelos fatores dose de potássio e condição de umidade do solo. Por sua vez, o fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz respondeu tanto à variação na umidade do solo, quanto nas doses de K aplicadas. Em solos saturado e inundado, a dissolução redutiva dos óxidos de Fe(III) mobiliza o fosfato adsorvido na superfície dos minerais, elevando substancialmente a concentração de P na solução do solo. Esse processo é mediado por microrganismos, sendo desencadeado quando o potencial redox do solo atinge valores entre -314 mV e $+14 \text{ mV}$ (WANG *et al.*, 2024). Segundo Ponnamperna (1972), a inundação do solo é como o principal determinante do aumento da disponibilidade de P para o arroz, via redução do Fe. Por outro lado, em solo úmido, a manutenção de condições oxidativas preserva o P adsorvido em formas de baixa mobilidade, notadamente compostos Fe(III)-fosfato de menor solubilidade, resultando em menor disponibilidade do nutriente na solução e, conseqüentemente, menor absorção pelas plantas de arroz.

O efeito das doses de K sobre o P acumulado na parte aérea das plantas de arroz foi descrito por modelo quadrático ($R^2_{aj.} = 0,68$) (Figura 16b). Em lavoura de arroz irrigado de alto potencial produtivo, a acumulação equilibrada de P e K na matéria seca da parte aérea está diretamente relacionada à produtividade de grãos, estimando-se a necessidade de 2,6 a 2,7 kg de P por tonelada de grãos produzidos, quando o potássio não é um fator limitante (Dobermann *et al.*, 1998). Kundu *et al.* (2021), ao estudarem a cultura de arroz irrigado, constataram que a adubação potássica promove aumento na quantidade de biomassa seca da parte aérea de plantas, refletindo-se em elevação na acumulação de P na parte aérea, mesmo sem alteração nas doses de fosfato fornecidas à cultura.

Figura 16 - Fósforo acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássio (a) e condição de umidade do solo (b). Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

Teor foliar e potássio acumulado na parte aérea das plantas de arroz

O teor de potássio na folha bandeira do arroz foi influenciado para interação entre os fatores dose de K e condição de umidade do solo. O Efeito da variação na umidade do solo manifestou-se, apenas, para a dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O, para a qual menor teor foliar de K (1,04%) ocorreu em solo saturado, relativamente às condições de solo úmido (1,22%) e inundado (1,27%) (Figura 17a). Por sua vez, o efeito da variação nas doses de K manifestou-se, apenas, nas condições de solo úmido e saturado (Figura 17b). Em solo úmido, o ajuste quadrático resultou em ponto

de máxima eficiência técnica em 149 kg ha^{-1} de K_2O , com teor foliar máximo estimado de 1,22%. Já a condição de solo saturado mostrou tendência ascendente sem inflexão clara, confirmando relato de associação positiva entre o teor de K disponível no solo e produtividade em arroz irrigado por aspersão em solo de terras baixas (PINTO *et al.*, 2016). A ausência de efeito de doses de K em solo inundado confirma a limitada resposta do arroz irrigado em terras baixas, atribuída à liberação reductiva de formas não trocáveis de K sob anaerobiose (CASTILHOS; MEURER, 2002; SILVA *et al.*, 2015).

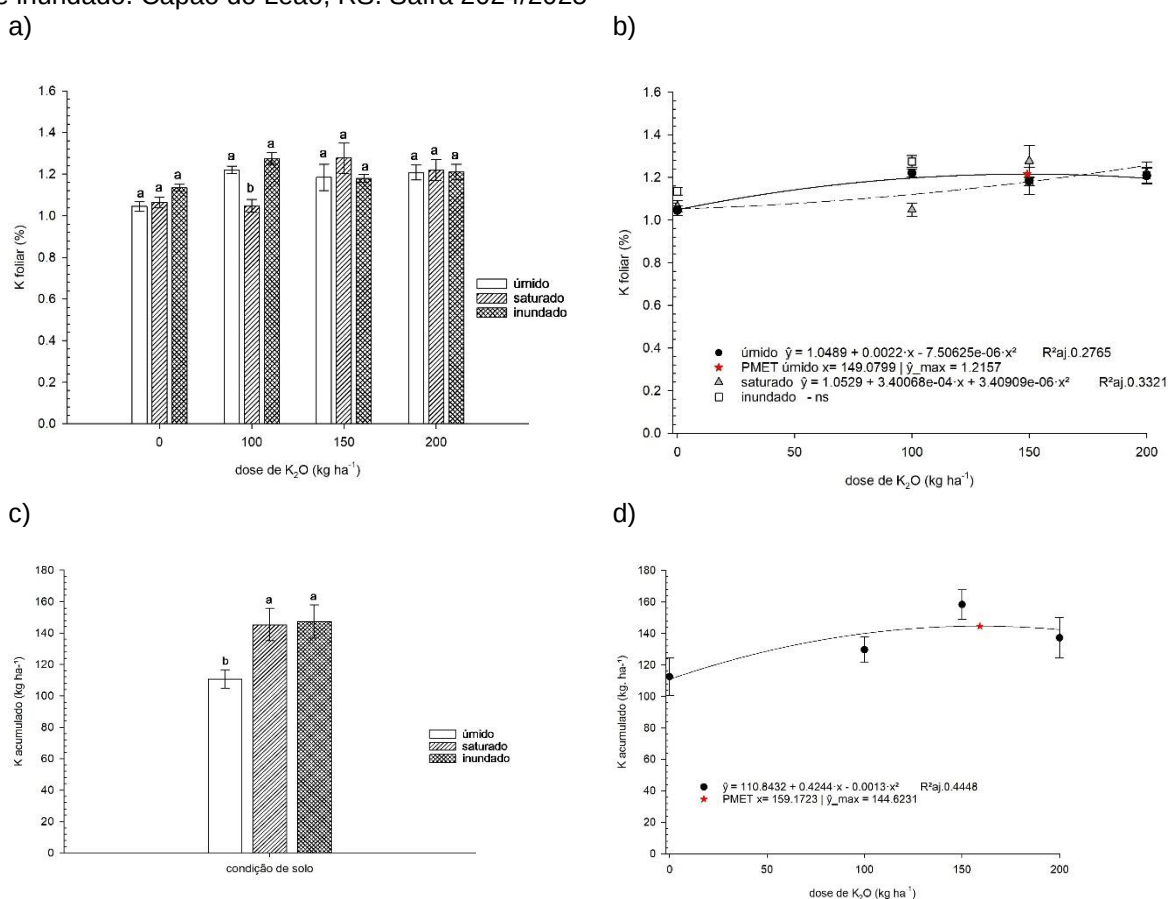
A acumulação de K na parte aérea das plantas de arroz não foi influenciada pela interação entre as fontes de variação dose de K e umidade do solo, determinando-se, porém, efeito isolado de ambos os fatores. Entre as condições de umidade do solo, as maiores acumulações ocorreram em solo inundado e saturado, com valores médios de $147,4$ e $145,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de K, respectivamente, superando a acumulação do nutriente em solo úmido ($110,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de K) (Figura 17c). O gradiente encontrado é consistente com as condições vigentes em sistemas irrigados por sulco. Somaweera *et al.* (2016) demonstraram que diferentes regimes hídricos do solo, incluindo inundação contínua, molhamento e secamento alternados e secagem da camada superficial, alteram a partição e acumulação dos nutrientes N, P e K na parte aérea de plantas de arroz. Chlapecka *et al.* (2024), em levantamento conduzido em lavouras de arroz irrigado por sulco dos EUA, constataram absorção de P e K significativamente menor na porção aeróbica dos talhões (topo dos sulcos), relativamente às porções com solo saturado e inundado, concluindo pela necessidade de recalibração das estratégias de adubação fosfatada e potássica do arroz em cultivo irrigado por sulco.

O efeito de doses de K sobre a acumulação do nutriente na parte aérea das plantas de arroz foi descrito por modelo quadrático, tendo a dose de $159,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O correspondido à máxima eficiência técnica, com acúmulo máximo de K estimado de $144,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 17d). Ainda que a dose correspondente ao ponto de máxima eficiência técnica esteja inserida dentro de faixa de absorção de K preconizada para sistemas intensivos de produção de arroz irrigado (17 a $30 \text{ kg de K Mg}^{-1}$ de grãos) (DOBERMANN *et al.*, 1996), totalizando acumulação de potássio na parte aérea superior a 200 kg ha^{-1} quando a produtividade da cultura é superior a 8 Mg ha^{-1} , essa supera a faixa de doses de K recomendada para o arroz irrigado no Sul do Brasil,

considerando solos com teor Médio de K disponível, que varia de 60 a 120 kg ha⁻¹ de K₂O, para expectativas de resposta da cultura à adubação média a muito alta (REUNIÃO..., 2022).

Em estudo sob condições controladas com a cultura de arroz irrigado utilizando solos de terras baixas do Rio Grande do Sul, Castilhos e Meurer (2002) determinaram que a quantidade de K trocável dos solos não era suficiente para fornecer a quantidade total absorvido pelas plantas, evidenciando participação efetiva das formas não trocáveis na nutrição potássica do arroz.

Figura 17 - Teor de potássio na folha bandeira (a, b) e potássio acumulado na parte aérea de planta de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de potássio, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
 Fonte: O autor, 2026.

Teor foliar e cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz

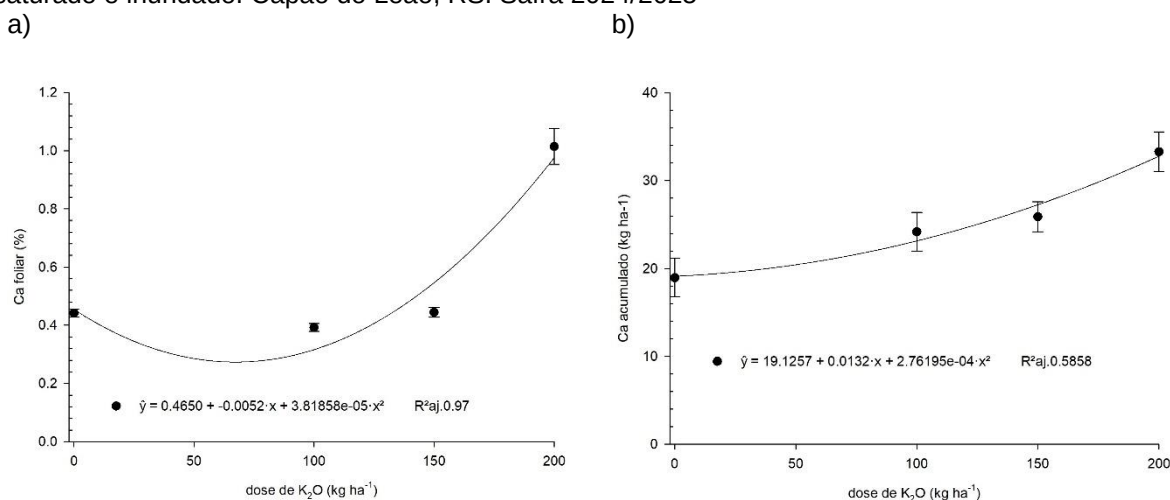
Os teores de Ca na folha bandeira do arroz irrigado por sulco foram influenciados, apenas, pela dose de K fornecida via adubação. Os dados ajustaram-

se a um modelo de regressão quadrático com $R^2_{aj} = 0,97$ (Figura 18a). Na ausência de adubação potássica, o teor foliar de Ca foi próximo a 0,44%, o que é compatível com a faixa de suficiência do nutriente para plantas de arroz (FAGERIA, 2009). Por sua vez, as doses 100 e 150 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionaram, respectivamente, teores foliares médios de cálcio de 0,39% e 0,44%. Esse resultado caracteriza o antagonismo catiônico entre K⁺ e Ca²⁺, segundo o qual o incremento da concentração de K⁺ na solução do solo suprime competitivamente a absorção de Ca²⁺ por canais catiônicos não seletivos presentes na membrana das células radiculares, dado que ambos os íons compartilham sítios de absorção com afinidade semelhante (WANG *et al.*, 2019). Ainda de acordo com WANG *et al.*, (2019), tais canais catiônicos não seletivos por apresentarem baixa seletividade, permitem a permeação tanto de cátions monovalentes quanto divalentes —, mas também possui componente apoplástico: o aumento da atividade de K⁺ na solução do solo desloca Ca²⁺ dos sítios de troca catiônica das pectinas da parede celular radicular (espaço livre de Donnan), reduzindo a fração de Ca²⁺ efetivamente disponível para influxo simplástico. Por outro lado, a elevação nos teores de Ca foliar determinado com o uso da dose de 200 kg ha⁻¹ de K₂O pode ser explicado pelo predomínio do transporte passivo de Ca²⁺ por fluxo de massa na corrente transpiratória, processo que é intensificado pelo suprimento adequado de K⁺, elevando a condutância estomática e a taxa de transpiração da planta (MARSCHNER, 2012).

Também os dados de acumulação de cálcio na parte aérea das plantas de arroz sofreram efeito apenas do fator de doses de K, sendo os dados descritos por modelo quadrático, com comportamento estável entre 0 e 100 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 18b). Esse resultado concorda com observações de Anghinoni *et al.* (2013), de que a resposta do arroz a adubação potássica varia com a capacidade de troca catiônica do solo. O baixo valor de R² ajustado (0,58) reforça que parcela considerável da variação não é explicada pelo modelo, o que é compreensível considerando-se as características do cultivo irrigado por sulco, com elevada heterogeneidade de umidade do solo ao longo do talhão, onde as porções superior e a inferior apresentam lâminas d'água distintas, desde ausente até vários centímetros, alterando localmente os mecanismos de difusão e fluxo de massa responsáveis pelo transporte de Ca até a rizosfera das plantas de arroz (MARSCHNER, 2012), podendo, inclusive, proporcionar perdas por lixiviação de cálcio e potássio (SANTOS *et al.*, 2002). Carmona *et al.* (2009)

determinaram que a absorção de cálcio pelo arroz irrigado não é responde linearmente ao manejo potássico, quando associado a condições distintas de umidade e salinidade do solo. Os resultados de Vijayakumar *et al.* (2022) confirmam esse efeito, ao demonstrarem resposta diferencial do arroz à adubação potássica em função do regime hídrico, com reflexo sobre a produtividade de grãos e eficiência do uso da água da cultura.

Figura 18 - Teor de cálcio na folha bandeira (a) e cálcio acumulado na parte aérea das plantas de arroz irrigado por sulco (b) em função da dose de potássio. Valores médios para as condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

Teor foliar e magnésio acumulado na parte aérea das plantas de arroz

Os teores de Mg da folha bandeira do arroz foram influenciados pela interação entre os fatores dose de K e condição de umidade do solo. O efeito da umidade do solo ocorreu, apenas, com o uso da dose de $100\ kg\ ha^{-1}$ de K_2O , para a qual menor teor foliar de Mg ocorreu em solo saturado, relativamente às condições de solo úmido e inundado, cujo efeito foi semelhante entre si (Figura 19a). O uso de doses maiores de potássio, particularmente $200\ kg\ ha^{-1}$ de K_2O , resultou em decréscimo nos teores absolutos de Mg na folha bandeira do arroz. O antagonismo entre K^+ e Mg^{2+} na cultura de arroz irrigado é um fenômeno clássico, caracterizado pela diminuição na absorção de Mg pelo arroz em meios com elevada disponibilidade de K (DING *et al.*, 2006). A elevada disponibilidade de potássio agrava o estresse oxidativo decorrente da

deficiência de Mg em arroz, reduzindo o teor de clorofila e atividade fotossintética das plantas (DING *et al.* (2008).

O Mg é o elemento central da molécula de clorofila e co-fator essencial para a ativação da Rubisco e de diversas ATPases fosfato-transferases envolvidas no metabolismo fotossintético (CAKMAK; YAZICI, 2010). Teores de magnésio na folha bandeira inferiores a 0,10% indicam condição de deficiência nutricional do nutriente (REUNIÃO..., 2018; WANG *et al.*, 2019), podendo comprometer a manutenção da atividade fotossintética das plantas e a atividade da folha-fonte durante o enchimento de grãos.

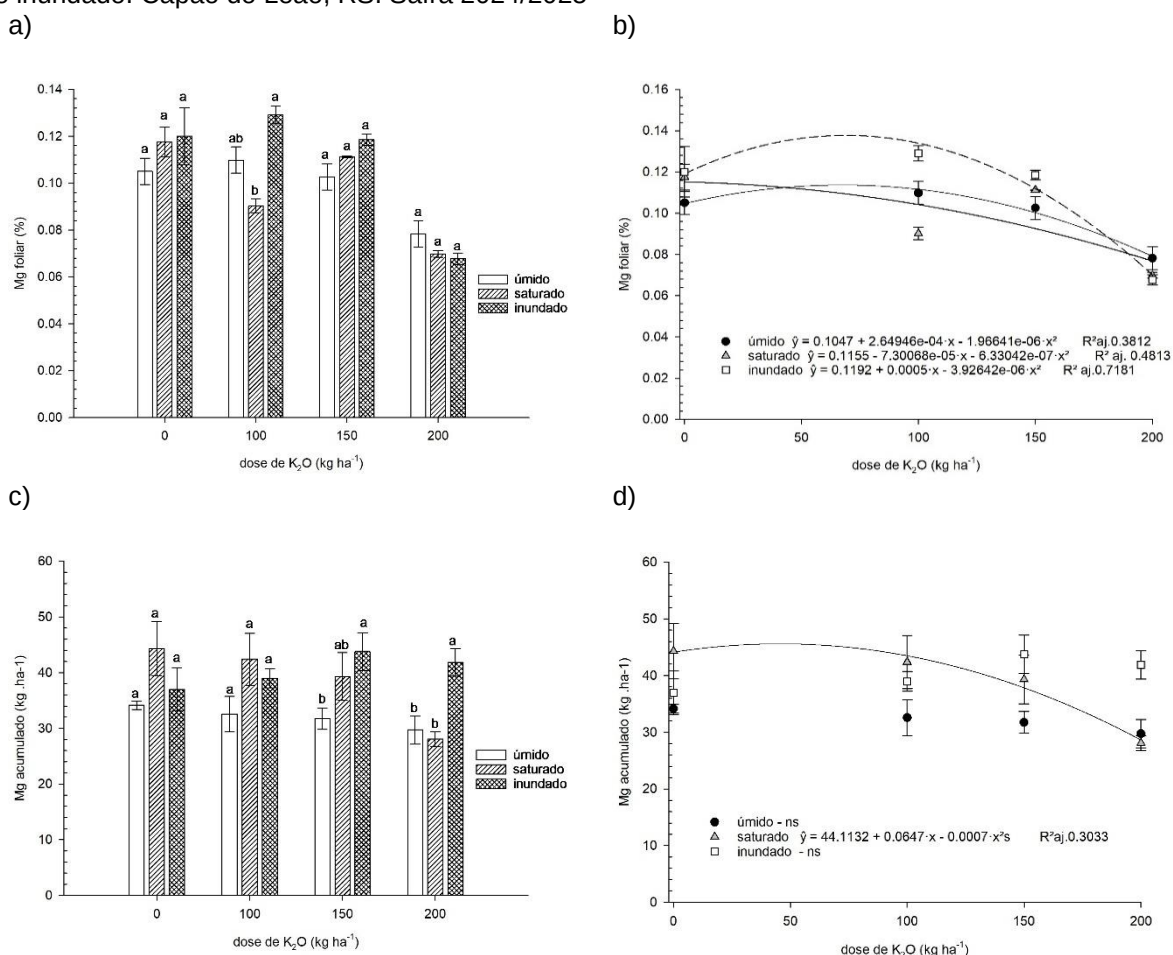
Nas três condições de umidade do solo, o efeito da variação na dose de potássio sobre o teor foliar de magnésio foi descrito por modelos quadráticos decrescentes (Figura 19b).

Variações na acumulação de magnésio na parte aérea das plantas de arroz relacionadas aos regimes hídricos foram determinadas apenas para as duas maiores doses de potássio utilizadas (150 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O), nas quais maior acumulação de Mg ocorreu em solo inundado, apresentando tendência de decréscimo nas condições de solo saturado e úmido (Figura 19c). Atribui-se esse resultado às transformações geoquímicas que ocorrem em solos inundados, com a redução do Fe³⁺ e Mn⁴⁺ a suas formas divalentes solúveis, há o deslocamento de cátions como Mg²⁺ e K⁺ do complexo de troca para a solução do solo, elevando sua disponibilidade e favorecendo sua absorção pelas plantas de arroz (VAHL *et al.*, 2026). Por outro lado, as menores acumulações de Mg nas plantas de arroz em solo úmido e saturado podem ser explicadas pelos ciclos de umedecimento e secagem do solo, associados à elevada mobilidade do Mg no perfil do solo, reduzindo o acesso contínuo ao nutriente (DELLA LUNGA *et al.*, 2020).

A ausência de efeito da dose de potássio sobre a acumulação de Mg nas plantas de arroz em solo úmido e inundado (Figura 19d) sugere que a limitação hídrica impõe restrição ao transporte de ambos os íons no solo (solo úmido), enquanto que, sob inundação, o efeito é contrário, ou seja, o excesso de água propicia elevada disponibilidade de Mg²⁺ na solução do solo, de maneira que mesmo doses elevadas de K não foram suficientes para limitar a acumulação de Mg nas plantas. Por outro lado, em solo saturado, o ajuste polinomial quadrático significativo pode ser interpretado como reflexo do antagonismo entre K e Mg, A partir de determinado limiar

de K disponível no solo, a competição pelos sítios de absorção radicular dificulta progressivamente a entrada de Mg^{2+} nas células da raiz (DING *et al.*, 2006; XIE *et al.*, 2021). O magnésio integra um sistema de interações complexas com K, Ca e outros cátions, de forma que a resposta do arroz à adubação potássica é influenciada pela disponibilidade de Mg no solo (FAGERIA, 2014). Em solo saturado, doses elevadas de potássio podem reduzir o nível de Mg na planta, afetando a fotossíntese, o transporte de fotoassimilados e a ativação enzimática (XIE *et al.*, 2021; GRANSEE; FÜHRS, 2013).

Figura 19 - Teor de magnésio na folha bandeira (a, b) e magnésio acumulado na parte aérea de plantas de arroz irrigado por sulco (c, d) em função da dose de fósforo, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: O autor, 2026.

Desempenho produtivo e qualidade de grãos do arroz

Apenas na ausência de adubação potássica não se determinou efeito da umidade do solo sobre a produtividade de grãos do arroz, que atingiu patamar médio próximo a $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esse resultado reflete o nível médio de suficiência de potássio do solo e confirma resultados de Castilhos e Meurer (2002), de que os solos de terras baixas do Rio Grande do Sul têm reservas minerais de potássio para suprir a demanda de lavouras de arroz com potencial produtivo médio. Por outro lado, com a adubação potássica, independentemente da dose, maior produtividade de grãos de arroz ocorreu em solo inundado, superando o efeito das condições de solo saturado e úmido, exceção feita para a dose de 150 kg ha^{-1} de K_2O , para a qual a produtividade do arroz foi semelhante em solos inundado e saturado (Figura 20a). Esse resultado reflete a dinâmica do K em solos alagados, onde a inundação promove redução do potencial redox e elevação do pH de solos ácidos, alterando a disponibilidade de nutrientes na solução do solo e favorecendo a absorção de K pelo arroz (PONNAMPERUMA, 1972). Sob regime úmido, em condições de alternância entre condições aeróbias e anaeróbias, as formas não trocáveis contribuem significativamente para a nutrição do arroz e pode favorecer a re-fixação do K em sítios de troca de menor labilidade, limitando seu aproveitamento pela planta, conforme demonstrado por Silva *et al.* (2015), ao avaliarem formas de K em solos de terras baixas do Rio Grande do Sul. A queda acentuada da produtividade do arroz em solo úmido associada ao uso de dose elevada de potássio (200 kg ha^{-1} de K_2O), sugere a ocorrência de desequilíbrio catiônico, uma vez que a baixa umidade do solo compromete a diluição e a redistribuição do fertilizante potássico aplicado, elevando temporariamente a concentração iônica na rizosfera. Marschner (2012) relata que concentrações excessivas de K^+ no solo podem competir com a absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} , comprometendo a integridade das membranas celulares e a funcionalidade enzimática. Este efeito seria atenuado nos regimes saturado e inundado, onde a maior umidade promove melhor distribuição e diluição dos sais fertilizantes.

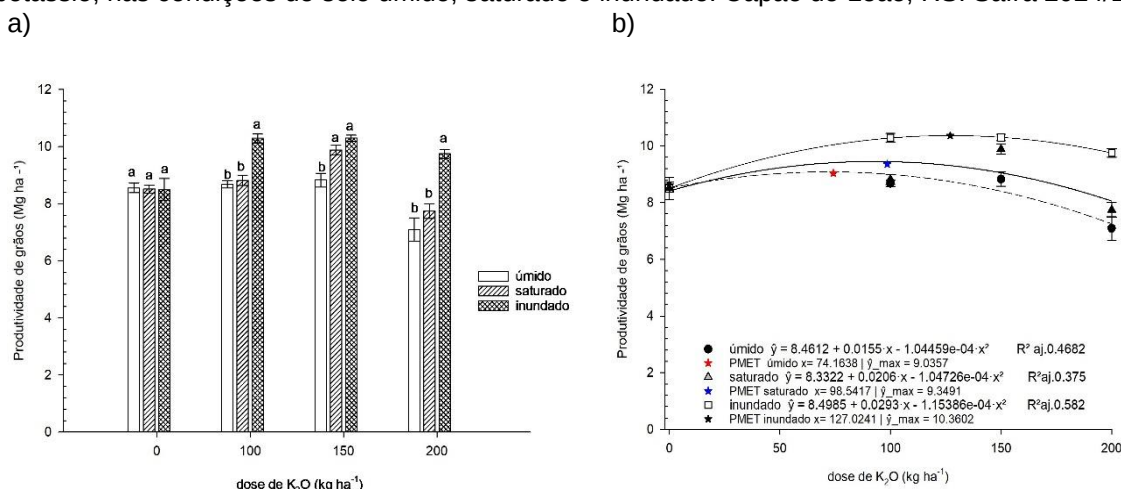
Nas três condições de umidade do solo, a resposta em produtividade do arroz a doses crescentes de potássio foi descrita por modelos quadráticos (Figura 20b), com pontos de máxima eficiência técnica correspondentes às doses de 72,8; 98,6 e $127,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O , respectivamente, em solo úmido, saturado e inundado. A elevação do

PMET do regime hídrico solo úmido para inundado demonstra que a maior disponibilidade de água não apenas favorece a produtividade, mas também amplia a janela de resposta positiva ao potássio.

A magnitude elevada das produtividades máximas alcançadas e estimadas pelas equações de regressão para lavoura de arroz irrigado por sulco mostra desempenho bastante favorável da cultura, superando a média de lavouras comerciais do Rio Grande do Sul, que varia 8 a 9 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2026), evidenciando que a adequação da adubação potássica tem papel importante e potencial para otimizar o potencial produtivo de lavouras irrigadas por sulco.

Sob os aspectos agrônomo e econômico, a dose recomendada de potássio para lavouras de arroz irrigado com expectativa de resposta alta ao nutriente (REUNIÃO..., 2022), varia de 60 a 100 kg ha⁻¹ de K₂O, para solos com teor médio de K disponível, intervalo que abrange as doses correspondentes aos PMET estimadas para as porções de solo úmido e saturado.

Figura 20 - Produtividade de grãos de lavoura de arroz irrigado por sulco em função da dose de potássio, nas condições de solo úmido, saturado e inundado. Capão do Leão, RS. Safra 2024/2025



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (5%).
 Fonte: O autor, 2026.

Não se determinou efeito do regime hídrico ou da dose de potássio sobre o rendimento de grãos do arroz em cultivo irrigado por sulco (percentuais de grãos inteiros e quebrados). Esse resultado confirma observações de Hardke (2021), que não encontrou diferença em qualidade de grãos de arroz em cultivo irrigado por sulco, comparativamente à irrigação por inundação.

Conclusões

A condição de umidade do solo e a adubação potássica atuam de forma integrada em cultivo de arroz irrigado por sulco, influenciando o estado nutricional, absorção de nutrientes e desempenho produtivo da cultura.

O gradiente de umidade do solo afeta diretamente a absorção de nutrientes, resultando em maior acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas localizadas nas porções com solo inundado e saturado do talhão, em comparação à porção apenas úmida.

A produtividade de grãos é maximizada em condições de solo inundado, onde a resposta do arroz à adubação potássica é maior, em comparação às porções com solo saturado e úmido da lavoura.

As recomendações atuais de adubação potássica para o arroz inundado são adequadas para o sistema irrigado por sulco, uma vez que as doses de máxima eficiência técnica estimadas para as porções com solo úmido e saturado (72,8 e 98,6 kg ha⁻¹ de K₂O), respectivamente e inundado (127,0 kg ha⁻¹ de K₂O) estão dentro das faixas preconizadas pela pesquisa regional (60 a 100 kg ha⁻¹ de K₂O).

5 Considerações finais

A premissa central que motivou ambos os capítulos desta tese — de que a variabilidade hídrica intrínseca às lavouras de arroz irrigado por sulco se traduz em gradiente de potencial de oxirredução suficientemente expressivo para modular a disponibilidade de nutrientes e, por extensão, a resposta da cultura à adubação — foi amplamente sustentada pelos dados obtidos.

A adoção da irrigação por sulco no cultivo do arroz em terras baixas do Rio Grande do Sul requer a revisão crítica das recomendações de adubação fosfatada e potássica vigentes, que foram estabelecidas sobre pressupostos da inundação contínua e, portanto, podem não se adequar integralmente às variações na disponibilidade desses nutrientes impostas pelo gradiente hídrico característico do sistema irrigado por sulco, demandando que a condição de umidade do solo seja

considerada conjuntamente ao nível de fertilidade do solo e potencial de resposta da cultura à adubação.

Finalmente, apesar de os resultados obtidos representarem avanço substancial no entendimento da resposta da cultura de arroz irrigado por sulco às adubações fosfatada e potássica, algumas questões permanecem abertas e merecem continuidade e aprofundamento da pesquisa, especificamente, no que se refere a viabilidade de execução de manejo setorizado das adubações e na avaliação do potencial residual das adubações realizadas para os cultivos antecedentes ao arroz.

A adequação dos resultados obtidos em termos de doses de fertilizantes e manejo dos nutrientes em outros tipos de solo e rotações distintas necessita novas avaliações e validações.

6 Referências

Agostinetto, D.; Vargas, L.; Andres, A. Manejo de plantas daninhas em soja e milho. In: Emydio, B. M.; Rosa, A. P. S. A. da; Oliveira, A. C. B. (Eds.). *Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 235-265.

Aide, M. The evolution of sustainable rice production along the lower Mississippi River (USA) with the increasing spector of climate change. In: *Agricultural Sciences*. London: IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.112385.

Akter, M.; Islam, S. M. M.; Islam, M. N.; Rahman, M. S.; Islam, A.; Khanam, M.; Iqbal, M.; Islam, M. R. Optimizing rice yield and nutrient uptake: investigating the interaction between nitrogen and potassium in wet season rice cultivation. *Advances in Agriculture*, v. 2024, 2024. DOI: 10.1155/aia/4984165.

Almeida, I. R. de; Steinmetz, S.; Reisser Júnior, E.; Cuadra, S. V. Descrição climática da região. In: Emydio, B. M.; Rosa, A. P. S. A. Da; Oliveira, A. C. B. (Eds.). *Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 15-22.

ANGHINONI, I.; CARMONA, F. de C.; GENRO JUNIOR, S. A.; BOENI, M. Adubação potássica em arroz irrigado conforme a capacidade de troca catiônica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 48, n. 11, p. 1481-1488, 2013.

Bagavathiannan, M. V.; Norsworthy, J. K.; Scott, R. C. Comparison of weed management programs for furrow-irrigated and flood hybrid rice production in Arkansas. *Weed Technology*, v. 25, p. 556-562, 2011. DOI: 10.1614/WT-D-11-00065.1.

Banzatto, D. A.; Kronka, S. N. *Experimentação agrícola*. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2008. 237 p.

Bernardi, A. C. de C. Nutrient use efficiency in agricultural systems: a Brazilian perspective. *Fertilizer Focus*, v. 41, n. 1, p. 52-53, 2024.

Beyrouthy, C. A.; Grigg, B. C.; Norman, R. J.; Wells, B. R. Nutrient uptake by rice in response to water management. *Journal of Plant Nutrition*, v. 17, n. 1, p. 39-55, 1994. DOI: 10.1080/01904169409364708.

Brooks, S. A.; Anders, M. M.; Yeater, K. M. Effect of furrow irrigation on the severity of false smut in susceptible rice varieties. *Plant Disease*, v. 94, n. 5, p. 570-574, 2010.

Cakmak, I.; Yazici, A. M. Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops*, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.

Camargo, F. A. O.; Santos, G. A.; Zonta, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.

Campos, A. S. de; Centeno, A.; Andres, A.; Parfitt, J. M. B.; Mélo-Araujo, L. B.; Bueno, M. V.; Pinto, M. A. B.; Martins, M. B.; Veber, P. M.; Scivittaro, W. B. *Utilização Da Tecnologia Sulco-Camalhão Na Produção De Soja E Milho Em Terras baixas do Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. 30 p.

Carmona, F. C.; Anghinoni, I.; Meurer, E. J.; Holzschuh, M. J.; Fraga, T. I. Estabelecimento do arroz irrigado e absorção de cátions em função do manejo da adubação potássica e do nível de salinidade no solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, Viçosa, V. 33, N. 2, P. 371-383, 2009.

Carmona, F. C.; Denardin, L. G. O.; Martins, A. P.; Anghinoni, I.; Carvalho, P. C. F. *Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas: a integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arrozeira*. Porto Alegre: edição dos autores, 2018. 160 p.

Castilhos, R. M. V.; Meurer, E. J. Formas de potássio em solos do RS, cultivados com arroz irrigado. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 1.; Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 22., 1999, Pelotas, RS. *Anais [...]*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999a. p. 326-329.

Castilhos, R. M. V.; Meurer, E. J. Suprimento de potássio para o arroz alagado, em solos do RS. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 1.; Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 22., 1999, Pelotas, RS. *Anais [...]*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999b. p. 334-337.

Castilhos, R. M. V.; Meurer, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 977-982, 2002.

Castilhos, R. M. V.; Meurer, E. J.; Pinto, L. F. S. Minerais fontes de potássio em dois planossolos do RS. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 1.; Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 22., 1999, Pelotas, RS. *Anais [...]*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 330-333.

Chen, G.; Duan, Q.; Wu, C.; He, X.; Hu, M.; Li, C.; Ouyang, Y.; Peng, L.; Yang, H.; Zhang, Q.; Jiang, Q.; Lan, Y.; LI, T. Optimizing rice yield, quality and nutrient use efficiency through combined application of nitrogen and potassium. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1335744, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1335744.

Chlapecka, J. L.; Roberts, T. L.; Hardke, J. T. Comparative analysis of nutrient absorption in rice cultivation: aerobic versus anaerobic conditions in furrow-irrigated rice. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, v. 7, n. 2, e20499, 2024. DOI: 10.1002/agg2.20499.

Clemmens, A. J.; Allen, R. G.; Burt, C. M. Technical concepts related to conservation of irrigation and rainwater in agricultural systems. *Water Resources Research*, v. 44, n. 7, W00E03, p. 1-16, 2008.

Cochran, W. G.; Cox, G. M. *Experimental designs*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1957. 617 p.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: ciclo 2025/2026*. Brasília, DF: CONAB, 2026. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2026.

Conselho Permanente de Agrometeorologia Aplicada do Estado do Rio Grande do Sul (COPAAERGS). *Prognósticos e recomendações para o período outubro/novembro/dezembro de 2023*. v. 66. Porto Alegre: COPAAERGS, set. 2023.

Della Lunga, D.; Brye, K. R.; Henry, C. G.; Slayden, J. M. Plant productivity and nutrient uptake as affected by tillage and site-position in furrow-irrigated rice. *Agronomy Journal*, 2021, p. 1-13. DOI: 10.1038/nplants.2016.202.

Della Lunga, D.; Brye, K. R.; Slayden, J. M.; Henry, C. G.; Wood, L. S. Relationship among soil factors and greenhouse gas emissions from furrow-irrigated rice in mid-southern, USA. *Geoderma Regional*, v. 24, e00365, 2020b.

Della Lunga, D.; Brye, K. R.; Slayden, J. M.; Henry, C. G.; Wood, L. S. Soil moisture, temperature, and oxidation-reduction potential fluctuations across a furrow-irrigated rice field on a silt-loam soil. *Journal of Rice Research and Development*, v. 3, p. 103-114, 2020a.

Della Lunga, D.; Brye, K. R.; Roberts, T. L.; Brye, J.; Evans-White, M.; Henry, C. G.; Lessner, D. J.; Arel, C. Struvite-phosphorus effects on greenhouse gas emissions and plant and soil response in a furrow-irrigated rice production system in eastern Arkansas. *Frontiers in Climate*, v. 6, 1342896, 2024. DOI: 10.3389/fclim.2024.1342896.

Della Lunga, D.; Brye, K. R.; Roberts, T. L. *et al.* Water regime and fertilizer-phosphorus source effects on greenhouse gas emissions from rice. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, v. 7, n. 1, e20482, 2024. DOI: 10.1002/agg2.20482.

Ding, Y.; Luo, W.; Xu, G. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*, v. 149, n. 2, p. 111-123, 2006. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2006.00080.x.

Ding, Y. C.; Chang, C. R.; Luo, W.; Wu, Y. S.; Ren, X. L.; Wang, P.; Xu, G. H. High potassium aggravates the oxidative stress induced by magnesium deficiency in rice leaves. *Pedosphere*, v. 18, n. 3, p. 316-327, 2008.

Dobermann, A.; Cassman, K. G.; Mamaril, C. P.; Sheehy, J. E. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, v. 56, n. 1-2, p. 113-138, 1998. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00124-X.

Dobermann, A.; Fairhurst, T. H. *Rice: nutrient disorders & nutrient management*. Los Baños: IRRI; Singapore: PPI; PPIC, 2000. 191 p.

Dobermann, A.; Sta. Cruz, P. C.; Cassman, K. G. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 46, p. 1-10, 1996. DOI: 10.1007/BF00210219.

Dodd, A. N.; Kudla, J.; Sanders, D. The language of calcium signaling. *Annual Review of Plant Biology*, Palo Alto, v. 61, p. 593-620, 2010.

EMBRAPA. *Agência Embrapa de Informação Tecnológica: fertilização do solo para o arroz irrigado*. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fuv6gg6802wyiv80166sqf6vu5nfy.html>. Acesso em: 14 jun. 2026.

EMBRAPA. *Correção do solo e adubação: arroz irrigado na região subtropical*. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-subtropical/correcao-do-solo-e-adubacao>. Acesso em: 12 jun. 2025.

EMBRAPA. *Correção do solo e adubação do arroz irrigado na região subtropical*. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 15 jun. 2025.

Estação Agroclimatológica de Pelotas (Capão do Leão). *Normais climatológicas - mensal/anual*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; UFPel, 2017. Disponível em: <http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/mensal.html>. Acesso em: 26 out. 2017.

Fageria, N. K. *Mineral nutrition of rice*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 569 p.

Fageria, N. K. Otimização da nutrição mineral e produtividade de arroz irrigado. In: Fageria, N. K. (Ed.). *A cultura do arroz no Brasil*. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. p. 250-280.

Fageria, N. K. *The use of nutrients in crop plants*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 430 p.

Fageria, N. K.; Baligar, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 88, p. 97-185, 2005.

Fageria, N. K.; Baligar, V. C.; Jones, C. A. *Growth and mineral nutrition of field crops*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 586 p.

Fageria, N. K.; Baligar, V. C.; Li, Y. C. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty-first century. *Journal of Plant Nutrition*, v. 31, n. 6, p. 1121-1157, 2008.

Fageria, N. K.; Barbosa Filho, M. P. Dry-matter and grain yield, nutrient uptake, and phosphorus use efficiency of lowland rice as influenced by phosphorus fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 38, n. 7-8, p. 1289-1297, 2007.

Fageria, N. K.; Carvalho, G. D.; Santos, A. B.; Ferreira, E. P. B.; Knupp, A. M. Chemistry of lowland rice soils and nutrient availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 42, n. 16, p. 1913-1933, 2011.

Fageria, N. K.; Knupp, A. M.; Moraes, M. F. Phosphorus nutrition of lowland rice in tropical lowland soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 44, n. 20, p. 2932-2940, 2013. DOI: 10.1080/00103624.2013.829485.

Fageria, N. K.; Santos, A. B.; Baligar, V. C. Phosphorus soil test calibration for lowland rice on an Inceptisol. *Agronomy Journal*, Madison, v. 89, n. 5, p. 737-742, 1997. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900050005x.

Fageria, N. K.; Santos, A. B.; Heinemann, A. B. Lowland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency in tropical lowland. *Journal of Plant Nutrition*, v. 34, n. 8, p. 1087-1095, 2011.

Feng, L.; Bouman, B.; Tuong, T. P.; Cabagon, R. J.; Li, Y.; Lu, G.; Feng, Y. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach. I. Field experiments and model evaluation. *Agricultural Water Management*, v. 88, n. 1-3, p. 1-13, 2007.

Food And Agriculture Organization (FAO). *AQUASTAT: FAO's global information system on water and agriculture*.

Food And Agriculture Organization (FAO). *Rice Market Monitor*. Roma: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/markets-and-trade>. Acesso em: 8 jun. 2026.

Gomes, A. da S.; Scivittaro, W. B.; Petrini, J. A.; Ferreira, L. H. G. *A água: distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 44 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 250).

Gransee, A.; Führs, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1567-y.

Guo, W.; Nazim, H.; Liang, Z.; Yang, D. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. *The Crop Journal*, v. 4, n. 2, p. 83-91, 2016. DOI: 10.1016/j.cj.2015.11.003.

Han, Y.; White, P. J.; Cheng, L. Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. *Annals of Botany*, v. 129, n. 3, p. 247-258, 2022.

Hardke, J. T.; Chlapecka, J. L. (Eds.). *Arkansas furrow-irrigated rice handbook*. Fayetteville: University of Arkansas, 2020. 38 p. Disponível em:

<https://www.uaex.edu/farm-ranch/crops-commercial-horticulture/rice/ArkansasFurrowIrrigatedRiceHandbook.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2020.

Hardke, J. T.; Henry, C. G.; Lorenz, G. M.; Scott, B.; Wamishe, Y.; Roberts, T.; Flanders, A. *Managing furrow-irrigated rice in Arkansas*. Fayetteville: University of Arkansas, 2017. 9 p.

Hawkesford, M. J.; Cakmak, I.; Coskun, D.; de Kok, L. J.; Lambers, H.; Schjoerring, J. K.; White, P. J. Functions of macronutrients. In: Rengel, Z.; Cakmak, I.; White, P. J. (Eds.). *Marschner's mineral nutrition of plants*. 4. ed. London: Academic Press, 2023. p. 201-281.

Hayes, P. E.; Adem, G. D.; Pariasca-Tanaka, J.; Wissuwa, M. Leaf phosphorus fractionation in rice to understand internal phosphorus-use efficiency. *Annals of Botany*, v. 129, n. 3, p. 287-302, 2022.

He, C. Effects of furrow irrigation on the growth, production, and water use efficiency of direct sowing rice. *The Scientific World Journal*, v. 10, p. 1483-1497, 2010.

He, W.; Zhang, J.; Gao, W.; Chen, Y.; Wei, Z. Enhancing phosphorus availability and dynamics in acidic soils through rice straw biochar application: a sustainable alternative to chemical fertilizers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 9, art. 1506609, 2025. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1506609.

Hou, W.; Tränkner, M.; Lu, J.; Yan, J.; Huang, S.; Ren, T.; Cong, R.; Li, X. Interactive effects of nitrogen and potassium on photosynthesis and photosynthetic nitrogen allocation of rice leaves. *BMC Plant Biology*, v. 19, n. 1, p. 302, 2019. DOI: 10.1186/s12870-019-1894-8.

Hou, W.; Tränkner, M.; Lu, J.; Yan, J.; Huang, S.; Ren, T.; Cong, R.; Li, X. Diagnosis of nitrogen nutrition in rice leaves influenced by potassium levels. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, art. 165, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00165.

Hu, M.; Wu, C.; Chen, G.; Li, T. Delayed potassium application alters protein accumulation while improving eating quality and yield in rice. *Plants*, v. 15, n. 3, art. 437, 2026. DOI: 10.3390/plants15030437.

Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). *Boletim de resultados da safra 2024/25 em terras baixas: arroz irrigado e soja em rotação*. Porto Alegre: IRGA, 2025. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202604/10081532-relatorio-irga-safra-2024-25-09-04-2026-corrigido.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026.

Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). *Dados estaduais (Rio Grande do Sul): dados técnicos e estatísticas da lavoura orizícola do RS*. Porto Alegre: IRGA, 2026. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2026.

Ishfaq, M.; Farooq, M.; Zulfiqar, U.; Hussain, S.; Akbar, N.; Nawaz, A.; Anjum, S. A. Alternate wetting and drying: a water-saving and ecofriendly rice production system.

Agricultural Water Management, v. 241, art. 106363, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106363.

Keeney, D. R.; Sahrawat, K. L. Nitrogen transformations in flooded rice soils. *Fertilizer Research*, v. 9, n. 1-2, p. 15-38, 1986.

Kirk, G. J. D. Rice root properties for internal aeration and efficient nutrient acquisition in submerged soil. *New Phytologist*, Oxford, v. 159, n. 1, p. 185-194, 2003.

Kirk, G. J. D. *The biogeochemistry of submerged soils*. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 304 p.

Kobayashi, N. I.; Ogura, T.; Takagi, K.; Sugita, R.; Suzuki, H.; Iwata, R.; Nakanishi, T. M.; Tanoi, K. Magnesium deficiency damages the youngest mature leaf in rice through tissue-specific iron toxicity. *Plant and Soil*, v. 428, n. 1-2, p. 137-152, 2018. DOI: 10.1007/s11104-018-3658-x.

Kögel-Knabner, I.; Amelung, W.; Cao, Z.; Fiedler, S.; Frechen, T.; Jahn, R.; Kalbitz, K.; Klümper, A. Biogeochemistry of paddy soils. *Geoderma*, Amsterdam, v. 157, n. 1-2, p. 1-14, 2010.

Kudla, J.; Becker, D.; Grill, E.; Hedrich, R.; Hippler, M.; Kummer, U.; Parniske, M.; Romeis, T.; Schumacher, K. Advances and current challenges in calcium signaling. *New Phytologist*, v. 218, n. 2, p. 414-431, 2018. DOI: 10.1111/nph.14966.

Kundu, A.; Raha, P.; Dubey, A. N. Impact Of Source And Method Of Potassium Application On Dry Matter Accumulation and partitioning of potassium in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, p. 2252-2263, 2021. DOI: 10.1007/s42729-021-00518-9.

Li, Y.; Chen, M.; Liu, X.; Huo, Z. Redox-mediated Fe-P coupling modulates phosphorus releasing in paddy soils: hydrological controls under water-saving irrigation. *Geoderma*, v. 455, art. 117219, 2025. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.117219.

Lian, T.; Wang, X.; Hu, Y.; Mu, Y.; Ma, R.; Li, Y.; Zhai, B. Interactive effects of nitrogen and potassium on apple leaf photosynthesis, nitrogen metabolism, and carbohydrate accumulation. *Scientia Horticulturae*, v. 311, p. 111790, 2023. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111790.

Linquist, B.; Anders, M.; Adviento-Borbe, M. A.; Charney, R.; Nalley, L.; da Rosa, E.; Van Kessel, C. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*, v. 21, p. 407-417, 2015.

Liu, Y.; Gao, J.; Zhao, Y.; Fu, Y.; Yan, B.; Wan, X.; Cheng, G.; Zhang, W. Effects of different phosphorus and potassium supply on the root architecture, phosphorus and potassium uptake, and utilization efficiency of hydroponic rice. *Scientific Reports*, v. 14, art. 21178, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-72287-1.

Machado, M. O. Caracterização e adubação do solo. In: EMBRAPA-CPATB. *Fundamentos para a cultura do arroz irrigado*. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 129-179.

Malavolta, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

Marschner, H. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.

Marschner, P. Processes in submerged soils: linking redox potential, soil organic matter turnover and plants to nutrient cycling. *Plant and Soil*, v. 464, p. 1-12, 2021. DOI: 10.1007/s11104-021-05040-6.

Martinengo, S.; Schiavon, M.; Santoro, V.; Said-Pullicino, D.; Romani, M.; Miniotti, E. F.; Celi, L.; Martin, M. Assessing phosphorus availability in paddy soils: the importance of integrating soil tests and plant responses. *Biology and Fertility of Soils*, v. 59, n. 4, p. 391-405, 2023. DOI: 10.1007/s00374-023-01714-8.

Mengel, K.; Kirkby, E. A. *Principles of plant nutrition*. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

Mimura, T.; Reid, R. Phosphate environment and phosphate uptake studies: past and future. *Journal of Plant Research*, v. 137, p. 307-314, 2024. DOI: 10.1007/s10265-024-01520-9.

Miro, B.; Ismail, A. M. Tolerance of anaerobic conditions caused by flooding during germination and early growth in rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, v. 4, art. 269, 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00269.

Nguyen, H. T.; Fischer, K. S.; Fukai, S. Physiological responses to various water saving systems in rice. *Field Crops Research*, v. 112, p. 189-198, 2009.

Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

Ockerby, S. E.; Fukai, S. The management of rice grown on raised beds with continuous furrow irrigation. *Field Crops Research*, v. 69, p. 215-226, 2001.

Olitta, A. F. L. *Os métodos de irrigação*. São Paulo: Nobel, 1986. 277 p.

Oo, A. Z.; Asai, H.; Kawamura, K.; Marui, J.; Nakahara, K.; Takai, T.; Saito, H.; Win, K. T.; Pariasca-Tanaka, J. Optimizing phosphorus management to increase grain yield and nutritional quality while reducing phytic acid concentration in black rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 7, art. 1200453, 2023. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1200453.

Palihakkara, J.; Burkitt, L.; Attanayake, C. P. Exploring phosphorus dynamics in submerged soils and its implications on the inconsistent rice yield response to added inorganic phosphorus fertilisers in paddy soils in Sri Lanka. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 24, p. 1-20, 2023. DOI: 10.1007/s42729-023-01553-4.

Parfitt, J. M. B.; Scivittaro, W. B. (Eds.). *Utilização da tecnologia sulco-camalhão na produção de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. 30 p.

Parfitt, J. M. B.; Winkler, A. S.; Pinto, M. A. B.; Silva, J. T. da; Timm, L. C. Irrigação e drenagem para cultivo de soja e milho. In: Emydio, B. M.; Rosa, A. P. S. A. da; Oliveira, A. C. B. (Eds.). *Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 45-78.

Pavinato, P. S.; Ceretta, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1779-1784, 2004. DOI: 10.1590/S0103-84782004000600017

Pimentel-Gomes, F.; Garcia, C. H. *Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos*. Piracicaba: FEALQ, 2002.

Pinto, L. F. S.; Miguel, P.; Pauletto, E. A. Solos para o cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: Parfitt, J. M. B.; Scivittaro, W. B. (Eds.). *Cultivo de arroz irrigado por aspersão no Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. p. 30-37. (Embrapa Clima Temperado. Sistema de Produção, 24).

Pinto, M. A. B.; Parfitt, J. M. B.; Timm, L. C.; Faria, L. C.; Scivittaro, W. B. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1584-1593, 2016.

Plaxton, W. C.; Lambers, H. Phosphorus: back to the roots. In: Lambers, H.; Oliveira, R. S. (Eds.). *Plant physiological ecology*. 3. ed. Cham: Springer, 2015. p. 553-595.

Ponnamperuma, F. N. Physico-chemical properties of submerged soils in relation to fertility. Los Baños: International Rice Research Institute, 1977. 32 p. (Research Paper Series, 5).

Ponnamperuma, F. N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, v. 24, p. 29-96, 1972.

Prado, R. M. *Nutrição de plantas*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2020.

Ramalho, M. A. P.; Ferreira, D. F.; Oliveira, A. C. *Experimentação em genética e melhoramento de plantas*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005. 300 p.

R Core Team (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

Reddy, K. R.; Delaune, R. D. *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008.

Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, 32., 2018, Farroupilha. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Cachoeirinha: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2018. 205 p.

Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, 33., 2022, Restinga Seca, RS. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Porto Alegre: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2022. 199 p.

Rietra, R. P. J. J.; Heinen, M.; Dimkpa, C. O.; Bindraban, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017.

Sanchez S., L. F. Aspectos sobre suelos y fertilización del arroz de riego con énfasis en Colombia. *Arroz*, Bogotá, v. 29, n. 309, p. 22-31, 1980.

Sant'ana, E. P.; Sant'ana, E. V. P.; Fageria, N. K.; Freire, A. de B. Utilização de fósforo e características do sistema radicular e da parte aérea da planta de arroz. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 27, n. 2, p. 370-381, mar./abr. 2003.

Santos, A. B. dos; Fageria, N. K.; Stone, L. F.; Santos, C. Manejo de água e de fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 4, p. 565-573, 1999.

Santos, A. B. dos; Fageria, N. K.; Zimmermann, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 12-16, 2002.

Satyanarayana, A.; Thiyagarajan, T. M.; Uphoff, N. Opportunities for saving with higher yield from the system of rice intensification. *Irrigation Science*, v. 25, p. 99-115, 2007.

Scivittaro, W. B.; Gomes, A. da S. Manejo da água e do nitrogênio na produção de arroz irrigado. In: WORKSHOP INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NO BIOMA PAMPA, 1., 2009, Pelotas, RS. *Palestras [...]*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 1 CD-ROM.

Scivittaro, W. B.; Machado, M. O. Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado. In: Gomes, A. da S.; Magalhães Júnior, A. M. de (Eds.). *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 259-303.

Scivittaro, W. B.; Machado, V. A. *Absorção de nutrientes pelo arroz irrigado por aspersão e por inundação*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. 21 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 176).

Shahandeh, H.; Hossner, L.; Turner, F. Phosphorus relationships to manganese and iron in rice soils. *Soil Science*, v. 168, n. 7, p. 489-500, 2003. DOI: 10.1097/01.ss.0000080334.10341.6a.

Shen, J.; Yuan, L.; Zhang, J.; Li, H.; Bai, Z.; Chen, X.; Zhang, W.; Zhang, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology*, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175232.

Silva, L. S. da; Pocojeski, E.; Britzke, D.; Kaefer, S.; Griebeler, G.; Santos, D. R. dos. Disponibilidade de potássio a arroz irrigado por alagamento em solos de várzea. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 379-387, 2015.

Silva, P. R. F. da; Marchesan, E.; Anghinoni, I. *Milho no contexto da lavoura arrozeira: potencialidades, desafios e avanços*. Porto Alegre: IRGA, 2020. 12 p. (Instituto Rio Grandense do Arroz. Circular Técnica, 006).

Smiderle, O. C.; Gianluppi, D.; Moura, G. S. Desenvolvimento e produtividade de arroz irrigado em resposta a diferentes doses de fósforo e potássio, em várzea de primeiro ano, no estado de Roraima. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 660-667, out./dez. 2010.

Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado (SOSBAI). *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Pelotas: SOSBAI, 2016. 200 p.

Somaweera, K. A. T. N.; Suriyagoda, L. D. B.; Sirisena, D. N.; De Costa, W. A. J. M. Accumulation and partitioning of biomass, nitrogen, phosphorus and potassium among different tissues during the life cycle of rice grown under different water management regimes. *Plant and Soil*, v. 401, p. 169-183, 2016. DOI: 10.1007/s11104-015-2541-2.

Song, T.; Das, D.; Hu, Q.; Yang, F.; Zhang, J. Alternate wetting and drying irrigation and phosphorus rates affect grain yield and quality and heavy metal accumulation in rice. *Science of the Total Environment*, v. 752, art. 141862, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141862.

Sousa, R. O.; Camargo, F. A. de O.; Vahl, L. C. Solos alagados: reações de redox. In: Meurer, E. J. (Org.). *Fundamentos de química do solo*. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 185-211.

Sousa, R. O.; Gomes, A. da S.; Vahl, L. C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: Gomes, A. da S.; Magalhães Júnior, A. M. de (Eds.). *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 305-337.

Steinmetz, S.; Fagundes, P. R. R.; Magalhães Júnior, A. M. De; Scivittaro, W. B.; Diebler, A. N.; Theisen, G. *Produtividade de cultivares de arroz irrigado em função da época de semeadura*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. 23 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 111).

Steinmetz, S.; Parfitt, J. M. B.; Scivittaro, W. B.; Theisen, G.; Dias, L. S. Temperaturas do solo, da água e do ar em arroz irrigado por sulco. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v. 31, e27809, 2023.

Steinmetz, S.; Petrini, J. A.; Almeida, I. R. de; Magalhães Júnior, A. M. de; Fagundes, P. R. R.; Deibler, A. N.; Radin, B.; Prestes, S. D.; Silva, M. F. da; Bermudez, D. A. *Uso do método de graus-dia para estimar a data de ocorrência dos principais estádios de desenvolvimento de subgrupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 205). Partes 1 e 2.

Stevens, G.; Nelson, J.; Heiser, J. *Guidelines for producing rice using furrow irrigation*. Oxford: University of Mississippi, 2020. 7 p.

Stevens, G.; Rhine, M.; Heiser, J. Rice production with furrow irrigation in the Mississippi River Delta Region of the USA. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74820. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74820>. Acesso em: 2 jul. 2020.

Stone, L. F. *Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 48 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 176).

Streck, E. V.; Kämpf, N.; Dalmolin, R. S. D.; Klamt, E.; Nascimento, P. C.; Giasson, E.; Pinto, L. F. S.; Flores, C. A.; Schneider, P. *Solos do Rio Grande do Sul*. 3. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 251 p.

Taiz, L.; Møller, I. M.; Murphy, A.; Zeiger, E. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024.

Tedesco, M. J.; Gianello, G.; Bissani, C. A. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

Ten Hoopen, F.; Cuin, T. A.; Pedas, P.; Hegelund, J. N.; Shabala, S.; Schjoerring, J. K.; Pardo, T. P. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and Arabidopsis roots: molecular mechanisms and physiological consequences. *Journal of Experimental Botany*, v. 61, n. 9, p. 2303-2315, 2010.

Theisen, G. *A comprehensive assessment of agriculture in lowlands of south Brazil: characterization and comparison of current and alternative concepts*. 2017. 234 p. PhD thesis – Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 2017.

Thor, K. Calcium—nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, art. 440, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00440.

Timm, P. A.; Scivittaro, W. B.; Parfitt, J. M. B.; Bayer, C.; Campos, A. D. S. de; Vasconcelos, E. E.; Souza, P. A. de; Sousa, R. O. De; Busato, C. C.; Carlos, F. S. A novel irrigation system to reduce methane emissions in paddy fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 130, p. 299-312, 2025. DOI: 10.1007/s10705-024-10392-3.

Ueki, K.; Arboleda, N. P. The relationship between furrow irrigation and rice growth in the warmer district in Japan. I. The effects of various furrow irrigations on the growth of variety IR8. *Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University*, 1976. p. 17-23.

United States Department Of Agriculture (USDA). Foreign Agricultural Service. *Grain: world markets and trade*. Washington, DC: USDA, 2025-2026. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov>. Acesso em: 8 jun. 2026.

Vahl, L. C. Fósforo no solo e na planta. In: Gomes, A. S.; Magalhães Júnior, A. M. (Eds.). *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 303-340.

Vahl, L. C.; Sousa, R. O. de. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: Gomes, A. Da S.; Magalhães Júnior, A. M. de (Eds.). *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 97-118.

Vahl, L. C.; Wolter, R. C. D.; Oliveira, A. C. de; Carlos, F. S.; Reis, R. B. dos; Sousa, R. O. de. Estimation of effective cation exchange capacity and exchangeable iron in paddy fields after soil flooding. *Soil Systems*, v. 10, n. 1, art. 7, p. 1-14, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8789/10/1/7>.

Vandamme, E.; Wissuwa, M.; Rose, T.; Dieng, I.; Drame, K. N.; Fofana, M.; Senthilkumar, K.; Venuprasad, R.; Jallow, D.; Segda, Z.; Suriyagoda, L.; Sirisena, D.; Kato, Y.; Saito, K. Genotypic variation in grain P loading across diverse rice growing environments and implications for field P balances. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, art. 1435, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01435.

Vijayakumar, S.; Kumar, D.; Ramesh, K.; Jinger, D.; Rajpoot, S. K. Effect of potassium fertilization on water productivity, irrigation water use efficiency, and grain quality under direct seeded rice-wheat cropping system. *Journal of Plant Nutrition*, v. 45, n. 13, p. 2023-2038, 2022.

Vories, E. D.; Counce, P. A.; Keisling, T. C. Comparison of flooded and furrow-irrigated rice on clay. *Irrigation Science*, v. 21, p. 139-144, 2002.

Wang, C.; Dippold, M. A.; Kuzyakov, Y.; Dorodnikov, M. Microbial strategies for phosphorus acquisition in rice paddies under contrasting water regimes: multiple source tracing by ³²P and ³³P. *Science of the Total Environment*, v. 918, p. 170738, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170738.

Wang, C.; Thielemann, L.; Dippold, M. A.; Guggenberger, G.; Kuzyakov, Y.; Banfield, C. C.; Ge, T.; Guenther, S.; Bork, P.; Horn, M. A.; Dorodnikov, M. Microbial iron

reduction compensates for phosphorus limitation in paddy soils. *Science of the Total Environment*, v. 837, art. 155810, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155810.

Wang, T.; Chen, X.; Ju, C.; Wang, C. Calcium signaling in plant mineral nutrition: from uptake to transport. *Plant Communications*, v. 4, n. 6, art. 100678, 2023. DOI: 10.1016/j.xplc.2023.100678.

Wang, Y.; Yuan, J. H.; Chen, H.; Zhao, X.; Wang, D.; Wang, S. Q.; Jiang, Y.; Tian, X.; Xu, J. Small-scale interaction of iron and phosphorus in flooded soils with rice growth. *Science of the Total Environment*, v. 669, p. 911-919, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.054.

Wang, Z.; Gu, D.; Beebout, S. S.; Zhang, H.; Liu, L.; Yang, J.; Zhang, J. Effect of irrigation regime on grain yield, water productivity, and methane emissions in dry direct-seeded rice grown in raised beds with wheat straw incorporation. *The Crop Journal*, v. 6, n. 5, p. 495-508, 2018.

Wang, Z. Q.; Zhang, W. Y.; Beebout, S. S.; Zhang, H.; Liu, L. J.; Yang, J. C.; Zhang, J. H. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Research*, v. 193, p. 54-69, 2016.

White, P. J.; Broadley, M. R. Calcium in plants. *Annals of Botany*, Oxford, v. 92, n. 4, p. 487-511, 2003.

White, P. J.; Broadley, M. R. Calcium. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). *Handbook of plant nutrition*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 189-205.

Wilson Jr., C. E.; Branson, J. W. Trends in Arkansas rice production. In: WELLS, B. R. (Ed.). *Rice research studies 2005*. Fayetteville: Arkansas Agricultural Experiment Station, 2006. p. 17-26.

Wrege, M. S.; Steinmetz, S.; Reisser Júnior, C.; Almeida, I. R. (Eds.). *Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul*. 2. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 333 p.

Wu, L. B.; Holtkamp, F.; Wairich, A.; Frei, M. Potassium ion channel gene OsAKT1 affects iron translocation in rice plants exposed to iron toxicity. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, art. 579, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00579.

Xie, K.; Cakmak, I.; Wang, S.; Zhang, F.; Guo, S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, v. 9, n. 2, p. 249-256, 2021. DOI: 10.1016/j.cj.2020.10.005.

Yang, G.; Nabi, F.; Sajid, S.; Kaleri, A. R.; Jakhar, A. M.; Cheng, L.; Raspor, M.; Muhammad, N.; Ma, J.; Hu, Y. Response of root development and nutrient uptake of two Chinese cultivars of hybrid rice to nitrogen and phosphorus fertilization in Sichuan Province, China. *Molecular Biology Reports*, v. 48, p. 8009-8021, 2021. DOI: 10.1007/s11033-021-06835-7.

Yao, F.; Huang, J.; Cui, K.; Nie, L.; Xiang, J.; Liu, X.; Wu, W.; Chen, M.; Peng, S. Agronomic performance of high-yield rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, v. 126, p. 16-22, 2012.

Yoshida, S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. 269 p.

Zhang, T.; He, X.; Chen, B.; He, L.; Tang, X. Effects of different potassium fertilizer rates on yield formation and lodging of rice. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, v. 90, n. 3, p. 815-826, 2021. DOI: 10.32604/phyton.2021.014168.