



PAULA MUNIZ COSTA

**MARCHA DE ABSORÇÃO DO ARROZ E AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE
PRODUÇÃO EM ÁREAS DE ABERTURA COM ARROZ-SOJA NO CERRADO
MARANHENSE**

TERESINA – PI

2024

PAULA MUNIZ COSTA

**MARCHA DE ABSORÇÃO DO ARROZ E AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE
PRODUÇÃO EM ÁREAS DE ABERTURA COM ARROZ-SOJA NO CERRADO
MARANHENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador

Dr. Henrique Antunes de Souza

Coorientadores

Dr. Edvaldo Sagrilo

Dr. Luciano Cavalcante Muniz

TERESINA – PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação Temática da Informação

C387m Costa, Paula Muniz.
Marcha de absorção do arroz e avaliação dos custos de produção em áreas de abertura com arroz-soja no cerrado maranhense / Paula Muniz Costa. -- 2024.
135 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2024.

“Orientador: Prof. Dr. “Henrique Antunes de Souza.”

1. Acúmulo de nutrientes. 2. Calcário. 3. Fronteira Agrícola. 4. Gestão rural. I. Souza, Henrique Antunes de. II. Título.

CDD 633.18

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa - CRB3/1163

PAULA MUNIZ COSTA

**MARCHA DE ABSORÇÃO DO ARROZ E AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO EM
ÁREAS DE ABERTURA COM ARROZ-SOJA NO CERRADO MARANHENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

APROVADA em 23 de abril de 2024

Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Ricardo Silva de Sousa – UFPI /Membro Interno



Prof. Dr. Edvaldo Sagrilo – EMBRAPA Meio Norte /Membro Externo

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANO CAVALCANTE MUNIZ
Data: 23/04/2024 16:38:08-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Luciano Calvante Muniz – UEMA/Membro Externo



Prof. Dr. Hilário Júnior de Almeida – EMBRAPA Meio Norte /Membro Externo



Prof. Dr. José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior – EMBRAPA Meio Norte /Membro Externo

Prof. Dr. Henrique Antunes de Souza – EMBRAPA Meio Norte/Presidente
(Orientador)

TERESINA-PI
2024

*Dedico,
À minha família,
em especial à minha mãe, Maria do Carmo,
por sempre acreditar no meu potencial e
compreender minha ausência ao longo
dessa jornada.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre estar ao meu lado, renovando minhas forças diariamente e por não desistir de mim. Agradeço ao Senhor pela vida e por todas as oportunidades que Ele tem me proporcionado até este momento.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudo, que permitiu mais essa conquista na minha carreira profissional científica.

À Embrapa Meio-Norte, por toda oportunidade de crescimento profissional vivido ao longo dessa jornada. Fazer parte dessa instituição contribuiu significativamente para o desenvolvimento da minha carreira. Gostaria de agradecer aos técnicos de laboratório, Sr. Duarte, Afonso, Vera, Maurício e, especialmente, ao Sr. Moreira, pelo valioso auxílio nas análises realizadas. A colaboração e suporte de toda a equipe foram essenciais para o êxito deste trabalho.

À Fazenda Barbosa, por disponibilizar os dados de custo de produção, a área experimental e por fornecer suporte durante a condução do experimento, sempre disponível quando necessário.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro (431305/2018-8) concedido para a realização deste estudo. Minha gratidão também à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo auxílio financeiro (FNDCT/CT-AGRO/FINEP- Convênio 01.22.0080.00, Ref. 1219/21). Esses suportes financeiros foram fundamentais para o desenvolvimento e condução deste projeto.

À minha mãe, Maria do Carmo, meu maior exemplo e para quem atribuo e dedico todas as conquistas até aqui realizadas. Obrigada mãezinha por me apoiar de todas as formas possíveis, agradeço diariamente a Deus por sua vida. A cada conquista fica mais próximo de eu lhe proporcionar um futuro melhor.

Ao meu orientador, Dr. Henrique Antunes de Souza, por ser um exemplo de ser humano incrível. Agradeço pela preocupação com os orientados, pela disposição em ajudar de todas as formas possíveis e impossíveis. Sua paciência, atenção,

disponibilidade e ensinamentos durante esta etapa, assim como nas atividades em campo, são inestimáveis. Gratidão por ter acreditado no meu potencial desde o início.

Aos meus coorientadores, Dr. Edvaldo Sagrilo e Prof. Dr. Luciano Cavalcante Muniz pelo suporte, disponibilidade e ensinamentos científicos cruciais para a realização deste trabalho. A colaboração de vocês foi fundamental para o sucesso deste projeto.

Aos docentes do PPGA, agradeço por todos os ensinamentos repassados.

Ao secretário da Coordenação de Pós-graduação, Silas, pela atenção e ajuda sempre que precisei.

Ao Paulo Junio, por seu constante apoio, colaboração nas correções desta dissertação e, principalmente, por incentivar os meus sonhos. Mesmo nos momentos em que tudo parecia impossível, sua presença trouxe palavras certas e soluções. Agradeço por fazer parte da minha vida.

À Francisca, uma pessoa incrível que eu tive o privilégio de conhecer em Teresina. Obrigada minha "irmã" por todo suporte na minha vida espiritual, graças à sua orientação e apoio, pude encontrar uma conexão mais profunda com Deus. Além disso, quero agradecer por sempre cuidar do meu filho, "Batman", quando estou em viagens.

Aos amigos da Embrapa e pós-graduação: Hosana Andrade, Daiane Sousa, Carlos Pedro, Edson Neto, Ivana Tito, Rita de Kássia e Hilário Junior, agradeço a cada um pela amizade, pelos momentos de descontração, por todo o apoio nesse período. Conhecer vocês foi incrível. Que essa amizade seja fortalecida com o tempo. Gratidão a todos.

Meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram com esta conquista. Muito obrigada.

“Consagre ao Senhor tudo o que
você faz, e os seus planos serão
bem sucedidos.” (Provérbios 16:3)

RESUMO GERAL

A análise da estrutura de custos e o seu impacto na viabilidade da safra, juntamente com o estudo do acúmulo e da exportação de nutrientes pelas plantas, são fundamentais para orientar as decisões gerenciais e incrementar a lucratividade nas propriedades rurais. Diante disso, objetivou-se com esse estudo determinar a marcha de absorção dos nutrientes do arroz, estimar os custos de produção e avaliar a viabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no cerrado maranhense. Foram realizados dois experimentos na Fazenda Barbosa, em Brejo, Maranhão, durante a safra 2021/2022. No primeiro experimento, foram coletados dados referentes aos custos de produção da implantação dos cultivos de arroz, cultivar BRS Sertaneja, e de soja, cultivar PP9510 IPRO. A metodologia de análise utilizada foi o estudo de caso descritivo. Os custos associados à abertura de área e à produção do arroz e soja foram, respectivamente, de R\$ 9.049,73 e R\$ 14.488,10 ha⁻¹. No cultivo de arroz, os custos operacionais constituíram a maior parcela dos gastos, atingindo R\$ 3.610,47 ha⁻¹. Para a soja, os gastos mais significativos foram com insumos, somando R\$ 7.430,60 ha⁻¹. A produção de soja apresentou um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 4.821,83, uma taxa de rentabilidade de 114,87%, uma taxa interna de retorno de 27,31% e um período de *payback* no quarto ano. Por outro lado, a produção de arroz resultou em um VPL negativo e um índice de lucratividade desfavorável, indicando que não houve retorno sobre o investimento. Em suma, o cultivo da soja se mostra viável em relação à produção do arroz em novas áreas abertas no cerrado maranhense. O segundo experimento foi conduzido em campo com um delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas com três repetições. As parcelas nas áreas cultivadas com arroz com calagem (ACC) e sem calagem (ASC) foram consideradas como parcelas principais, enquanto os seis tempos de coleta pós-emergência das plantas, aos 30, 43, 55, 69, 83, e 99 dias, representaram as subparcelas. Em cada tempo foram realizadas as análises biométricas e o particionamento da planta em folhas, colmo e panícula para a determinação dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S), micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) e do silício. Os resultados biométricos do arroz, como altura de planta, número de folhas e área foliar, não foram influenciados pela calagem. O acúmulo de nutrientes no arroz seguiu uma sequência decrescente de N>K>Mg>Ca>S>P para macronutrientes e Mn>Fe>Zn>B>Cu para micronutrientes. A calagem promoveu um maior acúmulo de Si, tanto no colmo quanto na planta inteira, em comparação com as áreas sem calagem. A exportação de macronutrientes pelos grãos em ordem decrescente foi para a ACC: N>P>Mg>K=S>Ca; e para a ASC: N>P>Mg>Ca>S>K. Quanto aos micronutrientes, em ambos os tratamentos apresentaram comportamentos similares: Cu>Zn>B>Mn>Fe. Em suma, a calagem aumentou o acúmulo de fósforo e boro pelas plantas de arroz, embora não tenha alterado significativamente a ordem de acúmulo dos macronutrientes e micronutrientes nas áreas de abertura no cerrado maranhense.

Palavras-chave: Acúmulo de nutrientes; calcário; fronteira agrícola; gestão rural

GENERAL ABSTRACT

A detailed analysis of cost structure and its impact on crop viability, along with the study of nutrient accumulation and export by plants, is fundamental for guiding managerial decisions. These elements are crucial for increasing profitability in rural properties. Therefore, this study aimed to determine the absorption rate of rice, estimate production costs, and evaluate the economic viability of rice and soybean crops in newly opened areas of the Maranhão cerrado. Two experiments were conducted, both at Fazenda Barbosa, in Brejo, Maranhão, during the 2021/2022 growing season. In the first experiment, data on production costs were collected for the implementation of rice (cultivar BRS Sertaneja) and soybean (cultivar PP9510 IPRO) crops. The analysis methodology used was a descriptive case study. The costs associated with land clearing and the production of rice and soybean were R\$ 9,049.73 and R\$ 14,488.10 ha⁻¹, respectively. In rice cultivation, operational costs constituted the largest portion of expenses, reaching R\$ 3,610.47 ha⁻¹. For soybeans, the most significant expenses were with inputs, totaling R\$ 7,430.60 ha⁻¹. The economic viability analysis revealed that soybean production had a Net Present Value (NPV) of R\$ 4,821.83, a profitability rate of 114.87%, an internal rate of return of 27.31%, and a payback period in the fourth year. On the other hand, rice production resulted in a negative NPV and an unfavorable profitability index, indicating an absence of return on investment. In summary, soybean cultivation is viable compared to rice production in newly opened areas of the Maranhão cerrado. The second experiment was conducted in the field with a randomized block design with split plots and three replications. The plots in areas cultivated with limed (ACC) and non-limed (ASC) rice were considered the main plots, while the six post-emergence collection times of the plants, at 30, 43, 55, 69, 83, and 99 days, represented the subplots. At each time, biometric analyses and plant partitioning into leaves, stems, and panicles were performed to determine the levels of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg, S), micronutrients (B, Cu, Fe, Mn, Zn), and silicon. The biometric results of rice, such as plant height, number of leaves, and leaf area, were not influenced by liming. Nutrient accumulation in rice followed a decreasing sequence of N>K>Mg>Ca>S>P for macronutrients and Mn>Fe>Zn>B>Cu for micronutrients. Liming promoted greater accumulation of Si in both stems and the whole plant compared to non-limed areas. The export of macronutrients by grains in descending order was for ACC: N>P>Mg>K=S>Ca; and for ASC: N>P>Mg>Ca>S>K. Regarding micronutrients, both treatments showed similar behaviors: Cu>Zn>B>Mn>Fe. In summary, liming increased the accumulation of phosphorus and boron by rice plants, although it did not significantly alter the order of macronutrient and micronutrient accumulation in newly opened areas of the Maranhão cerrado.

Keywords: Nutrient accumulation; limestone; agricultural frontier; rural management

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1.** Características químicas do solo da área experimental do arroz (a) e soja (b), na camada de 0-20 cm. Brejo, Maranhão, 2022.41
- Tabela 2.** Estimativa do custo de produção em áreas de abertura para cultura do arroz e da soja no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.53
- Tabela 3.** Indicadores de rentabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.57
- Tabela 4.** Análise de viabilidade dos cultivos de arroz e soja no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.59
- Tabela 5.** Análise de sensibilidade dos cultivos de arroz e soja no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.59

CAPÍTULO II

- Tabela 1.** Acúmulo de graus-dia durante o ciclo do arroz em área com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.80
- Tabela 2.** Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para altura de plantas, número de folhas e área foliar, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz ao longo do seu ciclo. Brejo, Maranhão, 2022.82
- Tabela 3.** Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para massa seca da folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz, ao longo de seu ciclo. Brejo, Maranhão, 2022.85
- Tabela 4.** Taxa de crescimento relativo da folha, colmo, panícula e total de arroz com e sem calagem, em função do acúmulo de graus-dia ao longo do ciclo produtivo. Brejo, Maranhão, 2022.86
- Tabela 5.** Acúmulo de nitrogênio no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.88
- Tabela 6.** Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de nitrogênio nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.88
- Tabela 7.** Acúmulo de fósforo no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.90

Tabela 8. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de fósforo nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	91
Tabela 9. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de macronutrientes nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	93
Tabela 10. Acúmulo de boro no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	97
Tabela 11. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de boro nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	98
Tabela 12. Acúmulo de manganês no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	100
Tabela 13. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de manganês nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	100
Tabela 14. Acúmulo de ferro no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	102
Tabela 15. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de ferro nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	103
Tabela 16. Acúmulo de zinco no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	105
Tabela 17. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de zinco nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	105
Tabela 18. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de cobre nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	107
Tabela 19. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de silício nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.	109

Tabela 20. Acúmulo de nutrientes associado à produção de matéria seca na cultura do arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.....	113
--	-----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima durante o período experimental na fazenda Barbosa, Brejo-MA.....41
- Figura 2.** Distribuição da estimativa dos custos de produção em áreas de abertura, por etapa do processo produtivo do arroz e soja no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.55
- Figura 3.** Custo de produção por saca versus preço comercializado do arroz e da soja no município de Brejo-MA, na safra 2021/22.57

CAPÍTULO II

- Figura 1.** Precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima durante o período experimental na Fazenda Barbosa, Brejo-MA.....72
- Figura 2.** Croqui da área experimental do arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....74
- Figura 3.** Estádios fenológicos da cultura do arroz de ciclo curto e os tempos correspondentes as coletas.....74
- Figura 4.** Altura de plantas (a), número de folhas (b) e área foliar (c) de plantas de arroz, em função do acúmulo de graus-dia ao longo ciclo produtivo. Brejo, Maranhão, 2022.82
- Figura 5.** Produtividade de arroz em área com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.83
- Figura 6.** Acúmulo e particionamento da massa seca na cultura do arroz em função da soma térmica e estágio fenológico. Brejo, Maranhão, 2022.....84
- Figura 7.** Acúmulo e particionamento do nitrogênio em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.90
- Figure 8.** Acúmulo e particionamento do fósforo em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.92
- Figura 9.** Acúmulo e particionamento do potássio (a), cálcio (b), magnésio (c) e enxofre (d) (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....96
- Figura 10.** Acúmulo e particionamento do boro em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.99
- Figura 11.** Acúmulo e particionamento do manganês em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.102

Figura 12. Acúmulo e particionamento do ferro em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....104

Figura 13. Acúmulo e particionamento do zinco em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.107

Figura 14. Acúmulo e particionamento de cobre (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.108

Figura 15. Acúmulo e particionamento de silício (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.110

LISTA DE APÊNDICE

- Apêndice 1.** Características químicas e granulométricas do solo da área experimental do arroz com calagem, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.....124
- Apêndice 2.** Características químicas e granulométricas do solo da área experimental da soja, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.....125
- Apêndice 3.** Fluxo de caixa da cultura da soja em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....126
- Apêndice 4.** Fluxo de caixa da cultura do arroz em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....127
- Apêndice 5.** Características químicas e granulométricas do solo da área experimental do arroz sem calagem, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.....128
- Apêndice 6.** Resumo da análise de variância para as variáveis biométricas de plantas de arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.....129
- Apêndice 7.** Resumo da análise de variância para o acúmulo de matéria seca (kg ha^{-1}) em plantas de arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.....129
- Apêndice 8.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas folhas de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....130
- Apêndice 9.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nos colmos de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....130
- Apêndice 10.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas panículas das plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....131
- Apêndice 11.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na planta inteira de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....131
- Apêndice 12.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas folhas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....132
- Apêndice 13.** Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nos colmos de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo Maranhão, 2022.....132

Apêndice 14. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas panículas de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	133
Apêndice 15. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na planta inteira de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	133
Apêndice 16. Resumo da análise de variância para acúmulo do silício (Si) em plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.....	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Cerrado maranhense	17
2.2 Cadeia produtiva do arroz	18
2.3 Produção de soja no Maranhão	20
2.4 Custos de produção	21
2.5 Desenvolvimento do arroz e absorção de nutrientes	23
2.6 Correção de solos do cerrado	27
REFERÊNCIAS	30
CAPÍTULO I: Viabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no cerrado maranhense: um estudo de caso	37
RESUMO	37
ABSTRACT	38
1 INTRODUÇÃO	39
2 MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1 Localização e descrição da fazenda	40
2.2 Caracterização da área experimental	41
2.2.1 Manejo do arroz	42
2.2.2 Manejo da soja.....	43
2.3 Custo de produção.....	45
2.3.1 Indicadores de rentabilidade.....	46
2.4 Indicadores de viabilidade econômica	48
2.5 Análise de sensibilidade.....	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	64
CAPÍTULO II: Absorção de nutrientes e silício em arroz de terras altas em resposta a calagem em áreas de abertura no cerrado maranhense	68
1 INTRODUÇÃO	70
2 MATERIAL E MÉTODOS	72
2.1 Caracterização da área experimental	72
2.2 Instalação do experimento	73
2.3 Delineamento experimental	74
2.4 Variáveis respostas.....	75
2.4.1 Acúmulo de graus-dias	75

2.4.2 Variáveis biométricas.....	75
2.4.3 Acúmulo de massa seca, rendimento de grãos e taxa de crescimento relativo	76
2.4.4 Acúmulo e particionamento de macro, micronutrientes e de silício	76
2.5 Análise estatística	78
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
3.1 Acúmulo de graus-dia	80
3.2 Variáveis biométricas	81
3.2 Produtividade de grãos, acúmulo de massa seca e taxa de crescimento relativo.....	83
3.3 Acúmulo de nutrientes em plantas de arroz.....	87
3.3.1 Acúmulo de macronutrientes	87
3.3.2 Acúmulo de micronutrientes	97
3.4 Extração e exportação de nutrientes e Silício	110
4. CONCLUSÕES	114
REFERÊNCIAS.....	115
APÊNDICES	120

1 INTRODUÇÃO GERAL

Ocupando parte do bioma Cerrado, alguns municípios do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia destacam-se pela intensa expansão da última fronteira agrícola, região conhecida como MATOPIBA. As condições edafoclimáticas, topografia plana, fácil acesso a novas tecnologias de produção e o baixo custo das terras favorecem o aumento do volume de produção agrícola, especialmente de grãos (Araújo *et al.*, 2019).

Estima-se que entre 2010 e 2020, houve um aumento de 71% no total de áreas com uso agrícola nas regiões Centro, Sul e Leste do Maranhão, o que reflete o crescimento gradual da produção de culturas anuais, com destaque para o cultivo da soja, algodão, milho e arroz (IBGE, 2022; CONAB, 2022a).

Os solos de áreas recém-abertas no cerrado em geral apresentam baixa fertilidade natural, devido à elevada acidez, alta saturação de alumínio e baixa quantidade de nutrientes, o que limita a produção (Sousa; Lobato, 2004). Além disso, esses solos são profundos e porosos, permitindo boa infiltração, embora tenham baixa capacidade de retenção de água devido à textura arenosa (Sousa; Lobato, 2004).

Apesar do melhoramento genético que proporcionou cultivares mais adaptadas as condições do ambiente, as culturas de soja e milho que lideram essa expansão agrícola ainda são altamente exigentes em fertilidade do solo e sensíveis à acidez (Spehar, 1998; Zhang *et al.*, 2020). Para incorporar esses solos ao processo produtivo, é indispensável o uso adequado de corretivos, como calcário e gesso. A calagem é a prática mais difundida para corrigir a acidez do solo (Sousa; Lobato, 2004). Em áreas de baixa fertilidade, maiores quantidades de calcário, fertilizantes e defensivos agrícolas são necessárias, o que pode diminuir a viabilidade econômica da atividade (Roberts; Johnston, 2015).

As culturas graníferas são responsáveis por 70% do consumo de fertilizantes no Brasil. A soja é a cultura de maior importância econômica do agronegócio brasileiro e mundial, representando 50% do consumo total de fertilizantes utilizado no país (ANDA, 2023). Tendo em vista que 80% dos insumos são importados, o custo de produção é impactado negativamente (ANDA, 2023).

Os preços dos insumos agrícolas aumentaram drasticamente a partir de 2020, inicialmente devido aos impactos da pandemia de Covid-19, que resultaram no

fechamento de indústrias e na escassez de matérias-primas. Depois a guerra entre Rússia e Ucrânia agravou essa situação (MAPA, 2023), acarretando prejuízos para as cadeias de distribuição. Esses fatores tornaram a manutenção da viabilidade econômica da produção agrícola ainda mais complexa (CEPEA, 2022a).

Os custos de produção em áreas recém-implantadas apresentam valores elevados devido ao maior número de operações agrícolas e à construção inicial da fertilidade do solo, quando comparado a áreas de produção já consolidadas (Silva *et al.*, 2014; Rocha *et al.*, 2016). Visando diminuir o custo de produção, uma das estratégias no cerrado brasileiro, incluindo o Leste maranhense, sempre foi abrir as áreas com o cultivo do arroz, cultura de menor exigência em fertilidade do solo, para posteriormente se introduzir culturas de maior exigência, como a soja ou o milho, sendo costumeira até a sucessão arroz-soja, em detrimento da soja-soja, devido à sua maior compatibilidade com a baixa fertilidade das áreas recém-abertas (Rocha *et al.*, 2016).

Neste contexto, o conhecimento dos custos de produção é fundamental para otimizar as decisões gerenciais, visando elevar a lucratividade das propriedades rurais (Chanda *et al.*, 2019). Além disso, entender a demanda nutricional específica das cultivares empregadas na região de abertura de área é essencial, pois permite otimizar a identificação das necessidades nutricionais das plantas nos diferentes estádios fenológicos, direcionando o momento e as quantidades mais adequadas para aplicação de corretivos e fertilizantes (Tamagno *et al.*, 2017). Isso aumenta a eficiência no manejo da cultura e a produtividade a partir do uso racional dos insumos agrícolas (Prado, 2020).

Embora já existam estudos sobre a marcha de absorção de nutrientes em culturas de soja e milho no cerrado maranhense (Clarck, 2022; Ferreira *et al.*, 2023; Silva, 2023), observa-se uma falta de dados similares para a cultura do arroz na região. Portanto, a análise da estrutura dos custos de produção e seu impacto na viabilidade econômica das safras, juntamente com a investigação sobre a marcha de absorção de nutrientes do arroz na região do MATOPIBA, são aspectos que merece maior consideração científica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cerrado maranhense

O cerrado maranhense tem se destacado como uma região de grande potencial para o desenvolvimento agrícola. Nesse estado, o cerrado constitui o bioma predominante, abrangendo 65% de sua extensão total e ocorrendo em aproximadamente 135 municípios (Araújo *et al.*, 2016).

A expansão da agricultura no cerrado ao longo dos últimos anos foi o alicerce para o desenvolvimento econômico do Maranhão. O estado ocupa a terceira posição em produção de soja no MATOPIBA, concentrando sua produção principalmente na mesorregião Sul maranhense, com destaque para os municípios de Tasso Fragoso e Balsas (Bolfe *et al.*, 2020; IBGE, 2023a). Atualmente, o crescimento da cultura se estendeu para outras regiões do estado, incluindo o Leste maranhense, que se destaca como a mesorregião mais próxima do porto do Itaqui (Almeida *et al.*, 2019; IBGE, 2023a).

Entre as culturas da lavoura temporária, a soja assume uma posição principal no cenário agrícola. A expansão dessa cultura no estado ganhou impulso nos anos 1990, estimulada por políticas públicas como o Programa Corredor de Exportação Norte e o Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados (PRODECER III) (Paludzyszyn Filho, 1995; Vieira *et al.*, 2008). A partir dos avanços científicos nas lavouras, a implementação de pacotes tecnológicos adaptados às condições tropicais desempenhou um papel crucial, facilitando a expansão da soja ao longo do tempo para outras regiões (Bolfe *et al.*, 2020).

A expansão da área plantada de soja no estado no período de 2010 a 2022, passando de 494.236 mil hectares em 2010 para 1.099.871 milhão de hectares em 2022, um aumento de 123% (IBGE, 2023a). Conseqüentemente, a produção de soja acompanhou esse crescimento, registrando um aumento expressivo de 168%.

Esses dados destacam não apenas a expansão territorial da cultura, mas também um notável avanço na produtividade, com um incremento de cerca de 20% (IBGE, 2023a). Vários fatores contribuíram para este incremento, como o uso de sementes de alto potencial produtivo, aplicação de fertilizantes na quantidade necessária para o desenvolvimento da cultura, época ideal para semeadura, aumento da eficiência no controle de pragas e doenças, entre outros (Roberts; Johnston, 2015).

Na safra 2022/23, a produção de soja na região do MATOPIBA atingiu cerca de 19 milhões de toneladas, com os estados da Bahia liderando a produção, respondendo por 40% do total, seguido por Tocantins (23%), Maranhão (20%) e Piauí (18%) (IBGE, 2023a). Juntos, esses estados representam 13% da área plantada e 16% da produção nacional.

Outras culturas de destaque no estado incluem o milho, a cana-de-açúcar e o arroz (IBGE, 2023a). O arroz, especialmente o de terras altas, atuou como cultura pioneira durante o processo inicial de ocupação agrícola do bioma cerrado brasileiro (Bolfe *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2016).

Tradicionalmente, o arroz de terras altas desempenhava um papel crucial na abertura de áreas para a agricultura, especialmente em solos de cerrado, caracterizados por alta acidez e baixa fertilidade (Souza; Lobato, 2004). Sua capacidade de desenvolvimento nessas condições específicas tornava-se uma escolha estratégica para a preparação e utilização de solos anteriormente considerados impróprios para a agricultura (Lacerda; Nascente, 2016). Assim, o cultivo do arroz desempenha um papel estratégico ao melhorar os atributos químicos e biológicas do solo, dando mais tempo para se construir a fertilidade do solo, e preparando-o para culturas subsequentes, como milho e soja (Farias Filho; Ferraz Junior, 2009; Nascente; Stone, 2018).

O Maranhão ocupa atualmente a quinta posição entre os maiores produtores de arroz do país e lidera a região Nordeste. Contudo, é importante destacar que ainda não alcançou a autossuficiência na produção (Santos *et al.*, 2020).

2.2 Cadeia produtiva do arroz

A cadeia produtiva do arroz destaca-se como uma das mais significativas no agronegócio brasileiro, sendo este cereal amplamente consumido no mercado interno do país, alcançando uma média de 32 kg por pessoa ao ano (MAPA, 2023a; ETENE, 2023). Os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina se destacam como os dois principais produtores de arroz, alcançando produtividades superiores a seis toneladas por hectare (MAPA, 2023a).

O Maranhão apresenta uma produção de 165.095 mil toneladas, abrangendo uma área de 88.262 mil hectares (IBGE, 2023a). Isso evidencia a importância dessa cultura para o estado, exercendo influência tanto no aspecto social, ao contribuir para a segurança alimentar, quanto no econômico, por ser potencial gerador de renda (Farias Filho; Ferraz Junior, 2009).

A produção desse cereal enfrenta desafios no estado e no Brasil, reforçado pelo declínio do consumo nacional de arroz em 15%, saindo de 12,2 milhões de toneladas em 2016/17 para 10,6 milhões em 2022/23 (MAPA, 2023a). Os fatores que contribuíram para esse cenário, principalmente no Maranhão incluem o baixo nível tecnológico do sistema de cultivo, os baixos preços recebidos pelo produtor, os desafios de cultivo devido às condições climáticas e a competição com outras culturas que oferecem uma rentabilidade superior, como é o caso da soja e do milho (CONAB, 2023).

De acordo com IBGE (2023a), o estado mostrou uma redução significativa da área plantada de arroz na última década, passando de 476.255 mil hectares em 2010 para 99.868 mil hectares em 2022, uma redução de 80%. Simultaneamente, a produção de arroz acompanhou essa tendência decrescente, registrando uma queda significativa de 69% no mesmo período. No entanto, houve um incremento de 47% na produtividade da safra 2022, sugerindo uma modernização no sistema de produção da cultura (IBGE, 2023a).

A rizicultura no país é praticada em três sistemas de produção distintos: terras altas, irrigadas em regime de inundação controlada e em várzeas úmidas. No Maranhão segue um padrão semelhante, com uma predominância do cultivo em terras altas (Silva; Wander, 2014). No estado, o cultivo do cereal é principalmente conduzido pela agricultura familiar, contribuindo com 65% da produção e representando 89% dos estabelecimentos agropecuários dedicados a essa cultura (Santos *et al.*, 2020; IBGE, 2023b). Presente em praticamente todo o território maranhense, com áreas predominantemente menores que 50 hectares, a maior concentração das lavouras ocorre nas mesorregiões Norte, Centro e Sul do Maranhão (Garcia *et al.*, 2022).

A produtividade foi incrementada entre os anos de 2010 e 2020, indicando uma adoção de novas tecnologias no sistema de produção, como por exemplo, novas variedades adaptadas às regiões. Apesar disso, a competitividade do cultivo de arroz no Maranhão enfrenta um declínio notável, principalmente devido à expressiva redução das áreas cultivadas ao longo dos últimos anos (MAPA, 2023a; Garcia *et al.*, 2022).

Essa redução pode estar relacionada a implantação de outras culturas mais atrativas, como a soja e o milho, além do uso das áreas agrícolas para a pecuária (Garcia *et al.*, 2021). Neste caso, para promover a competitividade da orizicultura no estado, é essencial a implementação de ações que envolvam tanto instituições

públicas quanto privadas, oferecendo incentivos aos produtores, com foco no aprimoramento do sistema produtivo tecnificado, acesso ao crédito rural e assistência técnica (Garcia *et al.*, 2021).

2.3 Produção de soja no Maranhão

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, alcançando uma produção total de 154,6 milhões de toneladas na safra 2022/23. Os estados do Mato Grosso, Paraná, Goiás, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul lideram a produção, representando conjuntamente 73,4% da produção nacional (MAPA, 2023a).

O sistema de produção de soja no país se destaca por ser mecanizado e especializado, com uso de insumos e equipamentos modernos (Hirakuri, 2012). Isto reflete a busca constante por eficiência e produtividade no setor agrícola, com a adoção de pacotes tecnológicos avançados para otimizar o processo de cultivo da soja.

Atualmente, essa é a principal cultura do agronegócio brasileiro, sendo a oleaginosa mais cultivada anualmente devido ao seu excelente retorno financeiro. A expansão significativa da soja no país é atribuída, em grande parte, ao avanço tecnológico contínuo, caracterizado pelo lançamento regular de novas variedades adaptadas ao clima tropical, tecnologias para o manejo do solo em diversas regiões, além de uma cadeia produtiva bem estruturada (Hirakuri; Lazzarotto, 2014).

No Maranhão, na safra 2022/23 a cultura apresentou um aumento de 8,2% em relação à safra 2021/22, com uma quantidade produzida de 3.744 toneladas (IBGE, 2023a). O cultivo da oleaginosa é conduzido pela agricultura empresarial, contribuindo com 99% da produção e representando 92% dos estabelecimentos agropecuários dedicados a essa cultura no estado (IBGE, 2023b).

A concentração da produção de soja ocorre na região Sul maranhense, com destaque para o município de Tasso Fragoso, com produção de 640.548 toneladas na safra 2022. O estado está entre os dez estados brasileiros com maiores produções da oleaginosa, sendo o segundo maior produtor da região nordeste, atrás apenas da Bahia (IBGE, 2023b).

Em 2023, a soja foi o produto agrícola mais exportado no Maranhão, totalizando 3,9 milhões de toneladas, representando 71% de todas as exportações agrícolas do estado (AGROSTAT, 2023). O aumento nas exportações desse produto é resultado da valorização dos preços internacionais da *commodity* e do crescente

interesse da China e de países em desenvolvimento, reforçando a importância desse setor para o crescimento econômico do país (IMESC, 2023).

2.4 Custos de produção

Devido às peculiaridades da atividade agrícola, é importante realizar escolhas racionais e utilizar de forma eficiente os fatores produtivos. Esse processo de tomada de decisão não apenas influencia o custo total da produção, mas também repercute na viabilidade da atividade, sendo, portanto, um elemento crucial para a competitividade do empreendimento agrícola (CONAB, 2010).

Com base na definição de Reis (2007), o custo de produção pode ser caracterizado como a soma dos valores de todos os recursos empregados no processo produtivo de uma atividade agrícola, em um determinado período de tempo. A mão de obra, preparo do solo, aquisição de sementes, adubos, defensivos e combustíveis representam exemplos de custos de produção agrícola que ocorrem desde o período que antecede o plantio até a pós-colheita (Andrade *et al.*, 2012).

Os componentes dos custos de produção são classificados como operacional efetivo, operacional total e custo total (Matsunaga *et al.*, 1976). O Custo Operacional Efetivo (COE) é um indicador que quantifica os custos diretamente associados à produção de uma determinada cultura, englobando despesas essenciais como sementes, fertilizantes, defensivos agrícolas, combustíveis e mão de obra. O Custo Operacional Total (COT) representa a soma dos desembolsos diretos e indiretos associados à produção, incluindo a depreciação de máquinas, implementos e benfeitorias, além das taxas associadas ao processo de produção (Matsunaga *et al.*, 1976). Ao somar o COT com o custo de oportunidade, obtém-se o Custo Total de Produção (CTP). O custo de oportunidade representa a remuneração esperada sobre o capital investido em máquinas, equipamentos, benfeitorias e a terra. O CTP indica a situação econômica do empreendimento, considerando todos os custos durante o processo produtivo.

A escolha do sistema de cultivo, incluindo práticas como o manejo de solo, uso de insumos, pacotes tecnológicos, entre outros, desempenha um papel crucial na determinação dos custos envolvidos na produção agrícola. Assim, o modelo agrícola adotado, que pode variar desde práticas convencionais até métodos mais sustentáveis, influencia diretamente os custos operacionais e, conseqüentemente, os resultados financeiros do empreendimento (CONAB, 2010).

Segundo o CEPEA, o CTP da soja no Brasil em cinco safras, 2016/17 a 2020/21, apresentaram média de R\$ 2.841,25 por hectare (CEPEA, 2022b). Esse valor é inferior ao encontrado no Maranhão, que apresenta uma média no mesmo período de R\$ 3.053,78 por hectare, um aumento de 7,5% nos custos de produção (CONAB, 2022b). A elevação dos custos está associada à escassez de empresas especializadas na comercialização de insumos na região, exigindo a aquisição desses insumos em regiões distantes da área produtiva (CONAB, 2022b; Rego *et al.*, 2017).

Além disso, houve neste período um forte impacto da pandemia da Covid-19 na economia, tanto nacional quanto global, abrangendo não apenas a produção e comercialização de insumos agrícolas, mas também provocando uma considerável oscilação nos preços. Esta volatilidade acentuada nos valores dos produtos agrícolas contribuiu para a elevação dos custos de produção, tornando mais onerosa a produção de alimentos (Schneider *et al.*, 2020).

As cadeias de distribuição de insumos agrícolas foram impactadas pelos crescentes custos internacionais de matérias-primas e transporte, resultando em aumentos significativos nos preços desses produtos a partir de 2020 (CEPEA, 2022a). Em 2021, os preços dos fertilizantes registraram um aumento histórico, com uma média de elevação de 104%. Essa tendência foi parcialmente atribuída à guerra entre Rússia e Ucrânia, introduzindo maior incerteza no mercado (ANDA, 2023).

De acordo com a CONAB, o COE do arroz de terras altas no Maranhão na safra 2020/2021 apresentou um notável aumento de 78,53%. Em 2020, o levantamento indicou custos variáveis de R\$ 2.409,55 por hectare, com uma produtividade média de 2.400 kg ha⁻¹. Já na safra 2021/22, observou-se um aumento expressivo, com valores médios de R\$ 4.301,72 por hectare, mantendo a mesma produtividade (CONAB, 2022b). Essas flutuações nos custos de produção mais elevados são atribuídas aos significativos aumentos nos preços de fertilizantes, defensivos agrícolas, sementes, diesel e manutenção preventiva das máquinas (CONAB, 2022b). Essa conjuntura torna a manutenção da viabilidade econômica da produção agrícola ainda mais complexa (CEPEA, 2022a).

Os custos de produção em áreas recém-implantadas apresentam valores elevados devido ao maior número de operações agrícolas e ao estabelecimento da fertilidade do solo, quando comparado a áreas de produção já consolidadas (Silva *et al.*, 2014; Rocha *et al.*, 2016). Visando diminuir o custo de produção, uma das estratégias no cerrado brasileiro, incluindo no Leste maranhense, sempre foi abrir as

áreas com a cultura do arroz, cultura de menor exigência em fertilidade do solo, para posteriormente se introduzir culturas de maior exigência, como a soja ou o milho, sendo costumeira a sucessão arroz-soja, em detrimento da soja-soja, devido à sua maior compatibilidade com a baixa fertilidade das áreas recém-abertas (Rocha *et al.*, 2016). Porém, este cenário tem sido alterado com a abertura de áreas com a cultura da soja, devido à alta rentabilidade desta cultura e uso de elevadas doses de corretivos (Lustosa Filho *et al.*, 2021)

Estudos mostram a importância da cultura do arroz como uma alternativa na rotação de culturas, oferecendo uma série de benefícios para a sustentabilidade da agricultura no Cerrado (Nascente; Stone, 2018; Carvalho *et al.*, 2020). Entre os benefícios destacam-se a melhoria dos atributos químicos e biológicas do solo, estabilidade de produção, redução na incidência de pragas, doenças e plantas daninhas, entre outros (Carvalho *et al.*, 2020).

Apesar do cenário de importância das culturas da soja e do arroz na região, a análise da estrutura de custos e sua repercussão sobre a viabilidade da safra na região do MATOPIBA não tem sido avaliada cientificamente. Identificar métodos de manejo mais adequados, visando a obtenção de maior lucratividade nos empreendimentos agrícolas, representa uma abordagem que pode contribuir significativamente para a sustentabilidade e longevidade da produção agrícola na região.

2.5 Desenvolvimento do arroz e absorção de nutrientes

O arroz (*Oriza sativa*) é uma gramínea anual pertencente à família Poaceae e adaptada a diversas condições edafoclimáticas (Vieira; Donha, 2019). No Maranhão, a cultura tem sido cultivada em terras altas, com os plantios concentrados durante a estação chuvosa, geralmente de dezembro a junho (Silva; Wander, 2014). Para expressar seu potencial produtivo, a cultura do arroz requer uma temperatura na faixa de 24 a 35°C, condições que são atendidas na região do estudo (Guimarães *et al.*, 2002).

Na cultura do arroz, a classificação do desenvolvimento da planta é geralmente definida pelo número de dias após emergência (DAE) (Freitas *et al.*, 2006). Essa cultura geralmente completa seu ciclo em um período que varia de três a seis meses, iniciando com a germinação e finalizando com a maturação dos grãos. A

duração pode ser influenciada pela cultivar utilizada e pelas condições ambientais (Yoshida, 1981).

Diversas escalas de desenvolvimento foram propostas para o arroz, sendo uma das mais amplamente usadas a de Counce et al. (2000) (Tabela 1). Essa escala foi desenvolvida através de estudos com cultivares americanas e divide o ciclo de desenvolvimento do arroz em três fases: plântula, vegetativa e reprodutiva, identificadas pelas letras S, V e R, respectivamente (Counce *et al.*, 2000).

Na fase de plântula, existem quatro estádios de crescimento: semente não embebida (S0), emergência da radícula (S1), coleóptilo da semente (S2), emergência do prófalo e coleóptilo (S3). O desenvolvimento vegetativo consiste nos estágios V1, V2...Vn; sendo “n” igual ao número final de folhas completamente expandidas presentes no colmo principal. Nessa fase ocorre o surgimento de folhas em intervalos regulares, o perfilhamento ativo e o aumento gradual da altura da planta (Counce *et al.*, 2000). O perfilhamento pode começar quando o colmo principal desenvolve a 5ª ou a 6ª folha (Fageria, 1984). As variedades de ciclo precoce têm estágios vegetativos curtos (Yoshida, 1981).

No plantio de semeadura direta o arroz inicia o processo de perfilhamento mais precocemente, em comparação com o arroz transplantado. Isso ocorre devido ao crescimento contínuo sem interrupções causadas pelos danos durante o desenraizamento (Counce *et al.*, 2000; Yoshida, 1981). Segundo Yoshida (1981), cada planta de arroz proveniente de semeadura direta geralmente produz entre 2 e 5 perfilhos, enquanto as plantas transplantadas apresentam uma faixa mais ampla, variando de 10 a 30 perfilhos.

A fase reprodutiva do arroz compreende o período que vai desde o início do desenvolvimento da panícula até a maturação dos grãos. Nas cultivares de ciclo precoce, o início do desenvolvimento da panícula (R0) inicia aproximadamente de 40 a 45 dias após plantio (Fageria, 1984).

Tabela 1. Estádios fenológicos e a descrição dos estádios da cultura do arroz, conforme Counce et al. (2000).

Fase de desenvolvimento	Estádio	Descrição dos estádios
Plântula	S0	Semente não embebida
	S1	Emergência da radícula
	S2	Coleóptilo da semente
	S3	Emergência do prófalo e coleóptilo
Vegetativa	V1	Formação do colar da 1ª folha do colmo principal

	V2	Formação do colar da 2ª folha do colmo principal
	Vn	Formação da n folha no colmo principal
Reprodutiva	R0	Início do desenvolvimento da panícula.
	R1	Diferenciação da panícula.
	R2	Formação do colar da folha-bandeira.
	R3	Emissão da panícula na bainha, ponto acima do colar.
	R4	Antese: um ou mais floretes da panícula em antese. Expansão do grão em comprimento: ao menos uma cariopse da panícula do colmo apresenta expansão.
	R5	Expansão do grão em espessura: ao menos uma cariopse da panícula do colmo principal cheio.
	R6	Secamento do grão: ao menos um grão do colmo principal apresenta pericarpo amarelo.
	R7	Maturação do colmo: ao menos um grão do colmo principal apresenta pericarpo marrom.
	R8	Completa maturidade da panícula; todos os grãos apresentam pericarpo marrom.
	R9	

As plantas de arroz são muito sensíveis a estresses abióticos, tais como baixa temperatura, radiação solar reduzida, deficiência hídrica e nutricional, especialmente de N (Fageria, 1980).

As condições climáticas, principalmente temperatura do ar e o fotoperíodo são os principais responsáveis pela variação do ciclo da cultura (Yoshida, 1981), influenciando a fase reprodutiva, especialmente a diferenciação da panícula (R1) (Stansel, 1975). Por essa razão, torna-se mais apropriado estimar os estádios fenológicos da cultura por meio de graus-dia (GD), em detrimento do uso do número de dias do calendário (Streck *et al.*, 2006; Steinmetz *et al.*, 2013).

O método de graus-dias é baseado na quantidade específica de energia que as plantas necessitam, para completar determinada fase de desenvolvimento ou o ciclo total, representada pela soma térmica acima de uma temperatura base (Souza *et al.*, 2011). Essa demanda está intrinsecamente ligada à temperatura, que é o principal regulador das reações metabólicas nas plantas, influenciando seus estádios fenológicos (Segantini *et al.*, 2014).

Neste caso, considerar os estádios fenológicos e as características morfológicas da planta é essencial para aplicar estratégias de manejo no momento mais apropriado para a cultura (Vieira; Donha, 2019). A análise de crescimento é uma técnica que investiga as alterações morfofisiológicas da planta ao longo do tempo, incluindo a avaliação da produção fotossintética por meio do acúmulo de matéria seca (Concenço *et al.*, 2011).

São realizadas avaliações periódicas para quantificar a biomassa produzida ao longo do desenvolvimento da planta e suas estruturas, como folhas, caules, panículas e grãos (Benincasa, 2004). Essa abordagem possibilita uma análise abrangente do crescimento final da planta, permitindo a avaliação da contribuição de cada órgão para o desenvolvimento total (Campos *et al.*, 2008).

Para uma produção sustentável de arroz é importante atender às exigências nutricionais da cultura, especialmente no período em que ocorre maior demanda por nutrientes. Esse período pode ser definido através de estudos de marcha de absorção, uma técnica que permite melhor compreensão sobre a capacidade da planta em absorver nutrientes do solo (Liu *et al.*, 2018). Essa técnica pode contribuir para programas de adubação mais eficientes e, conseqüentemente, para maiores produtividades da cultura.

Na cultura do arroz, o N é o nutriente que as plantas mais acumulam em quantidade, seguido do potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e fósforo (P). Dentre os micronutrientes, destaca-se o manganês (Mn), seguido do ferro (Fe), boro (B), zinco (Zn) e cobre (Cu) (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2019). Esses nutrientes precisam estar prontamente disponíveis nas épocas de maior demanda da planta, para favorecer uma maior produtividade dos grãos (Crusciol *et al.*, 2016; Sánchez-Reinoso *et al.*, 2019).

A necessidade nutricional e o período de maior absorção da planta são fatores determinantes para a adubação do arroz (Fageria *et al.*, 2000). A demanda por N, P e S exercem uma influência significativa no crescimento inicial das plantas do arroz e na produção de perfilhos (Fageria, 1984). Esses nutrientes desempenham diversas funções, dentre elas, atuam no processo fotossintético, através da acumulação e uso de energia no metabolismo. Dessa forma, auxiliam no aumento do número de perfilhos, contribuindo assim para o incremento do número de panículas na planta, e conseqüentemente na produção de grãos.

Os principais fatores que influenciam a quantidade de nutrientes extraídos pelo arroz são o clima, o solo e a genética da semente (Barbosa Filho; Fageria, 2013). Para produzir uma tonelada de grãos em uma lavoura de arroz de terras altas são extraídos do solo cerca de 30 kg de N (50%), 5 kg de P (70%), 30 kg de K (20%), 6 kg de Ca (25%), 2,5 kg de Mg (25%), 4 kg de S (25%), 12,5 g de B (30%), 18 g de Cu (60%), 65 g de Zn (50%), 140 g de Fe (22%) e 355 g de Mn (25%) (Barbosa Filho; Fageria, 2013). É importante destacar que do total desses nutrientes absorvido pela

planta, é exportado pelos grãos na colheita, conforme indicado pelos valores em percentuais entre parênteses. Esses dados ressaltam a relevância de práticas adequadas de manejo de adubação para garantir a sustentabilidade e a produtividade das lavouras de arroz.

Crusciol et al. (2016) avaliaram a extração e a remoção de macronutrientes em cultivares de arroz de terras altas do tipo tradicional, intermediário e moderna. A cultivar Maravilha (moderna) e a Caiapó (intermediária) apresentaram produtividade de panícula semelhante, embora a primeira tivesse maior exigência nutricional. Já a BRS Primavera (tradicional) apresentou maior produtividade de panícula, entorno de 6.660 kg ha⁻¹. Apesar dessas diferenças, as cultivares apresentaram o período de maior absorção de K, Ca, Mg e S entre 45 a 60 DAE, enquanto para o N isso ocorreu após 65 DAE. Quanto ao P, verificou-se que a cultivar BRS Primavera apresentou maior taxa de absorção aos 70 DAE, enquanto as cultivares Caiapó e Maravilha aos 90 DAE.

2.6 Correção de solos do cerrado

Os solos nativos do cerrado brasileiro são naturalmente ácidos por serem intemperizados. Apresentam baixa fertilidade natural, alta saturação de alumínio e fixação de fósforo. Nessa região, as classes de solos predominantes são os Latossolos e os Argissolos, sendo que a maioria apresenta uma textura média a arenosa (Lopes; Guilherme, 2016).

As condições climáticas são caracterizadas por elevados índices de precipitação e altas temperaturas, o que favorece a acidificação dos solos, as reações químicas do intemperismo e à intensa lixiviação de bases. Esses fatores contribuem para o empobrecimento do material de origem, aumentando a proporção de minerais secundários, principalmente óxidos de ferro e alumínio (Lepsch *et al.*, 2011).

Além disso, diversos outros processos naturais podem contribuir para o aumento da acidez do solo. Entre eles, se destaca a decomposição da matéria orgânica, chuva ácida, absorção de nutrientes, a nitrificação do amônio e as práticas agrícolas (Lepsch *et al.*, 2011; Lopes; Guilherme, 2016; Natale *et al.*, 2012).

A acidez do solo é um dos principais fatores que limitam a produção no Cerrado (Natale *et al.*, 2012). Essa limitação decorre do excesso de íons de hidrogênio (H⁺) na solução do solo, o qual prejudica o desenvolvimento das plantas, especialmente da raiz. A deficiência de cálcio, magnésio e potássio também exerce

impacto nesse aspecto (Sousa; Lobato, 2004). Em condições de baixo pH e altas concentrações de óxidos de ferro e alumínio, o fósforo da solução do solo tende a precipitar na forma de fosfatos de ferro e alumínio, tornando-se insolúvel e, conseqüentemente, indisponível para as plantas (Lepsch *et al.*, 2011; Sousa; Lobato, 2004).

Para incorporar estes solos ao processo produtivo é indispensável o uso adequado de corretivos, como o calcário. A calagem é a prática mais difundida para corrigir acidez do solo (Sousa; Lobato, 2004). O calcário é obtido a partir de rochas calcárias moídas, que contêm carbonatos de cálcio (CaCO_3) e de magnésio (MgCO_3) em sua composição. A calagem tem a função de corrigir acidez do solo e também fornecer cálcio e magnésio as plantas, no caso do arroz, o suprimento nutricional é essencial para o desenvolvimento dessa cultura (Barbosa Filho; Fageria, 2013).

Dentre as culturas anuais, o arroz de terras altas se destaca pela maior tolerância à acidez do solo. Além disso, pode tolerar uma saturação de alumínio de até 70%, o que não significa que a calagem não deva ser utilizada (Barbosa Filho; Fageria, 2013). Existem variações na resposta à calagem e nas concentrações elevadas de alumínio entre as cultivares (Fageria *et al.*, 2015; Wielewicki *et al.*, 1998).

Fageria *et al.* (2015) realizaram um trabalho no qual foram avaliados trinta genótipos de arroz de terras altas quanto à tolerância à acidez. Os autores observaram que, dentre os trinta genótipos, 30% foram classificados como tolerantes, 53% como moderadamente tolerantes e 17% como suscetíveis à acidez do solo. Esses autores identificaram que genótipos como AB072083, BRSGO Serra Dourada, BRS Sertaneja e BRS Primavera apresentaram uma maior produtividade de grãos em solos ácidos, em comparação com outros genótipos. A explicação para tais resultados está no fato de que algumas variedades de arroz, especialmente as de terras altas, possuem genes que conferem tolerância à acidez, resultado de seleção em solos ácidos, o que contribui significativamente para essa característica. Esses resultados reforçam a existência de diferenças significativas entre variedades e a importância do conhecimento específico para cada uma delas.

De acordo Wielewicki *et al.* (1998), ao avaliarem os efeitos da correção da acidez do solo e o momento de início de irrigação na absorção de nutrientes pelas plantas de arroz irrigado, observaram que a antecipação do início da irrigação, de 35 dias para 15 dias após a emergência, proporcionou maior produção de MS na parte aérea das plantas de arroz e maior absorção de nutrientes. No entanto, a incorporação

de calcário em diferentes doses (300 kg ha^{-1} ; $1,6$ e $3,2 \text{ t ha}^{-1}$) não demonstrou influência significativa na absorção de nutrientes pelas plantas de arroz e nem promoveu aumento na produção de MS.

O uso do calcário em quantidades adequadas tem o poder de neutralizar os efeitos nocivos da acidez do solo. Isso se reflete no aumento do pH do solo, saturação por bases e a inativação de elevadas concentrações de ferro, alumínio e manganês na solução do solo (Kumara *et al.*, 2014). Esse produto apresenta baixa solubilidade e sua ação neutralizante depende da superfície de contato e do tempo de reação com o solo (Sousa; Lobato, 2004).

O índice de pH a ser alcançado para uma produção de grãos economicamente viável é entre 5,5 a 6,5. Nesse intervalo, as plantas apresentam condições favoráveis de assimilação dos nutrientes, além do aumento da capacidade de troca de cátions e da atividade microbiana (Lopes; Guilherme, 2016; Sousa; Lobato, 2004).

Nas áreas de abertura, o uso do gesso em solos com elevadas concentrações de alumínio pode ser uma opção complementar ao calcário, especialmente devido à ação limitada da calagem às camadas superficiais (Caires *et al.*, 2003; Soratto *et al.*, 2010). Este produto, por ser solúvel em água, favorece a movimentação dos cátions, especialmente de cálcio em profundidade (Caires *et al.*, 2003). Esse processo contribui para a redução do teor de alumínio tóxico, melhorando a solução do solo e promovendo o aprofundamento das raízes, aumentando assim, a eficiência na utilização dos nutrientes (Brasil *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

ANDA- **Associação nacional para a difusão de adubos**. Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2022. Comitê de estatística, São Paulo, 2023.

AGROSTAT. **Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro**.

Programa. Brasília, DF: MAPA, 2023. Disponível em:

<https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 18 outubro 2023.

ALMEIDA, J. G.; SODRÉ, R. B.; MATTOS JÚNIOR, J. S. DE. O matopiba nas chapadas maranhenses: impactos da expansão do agronegócio na microrregião de chapadinha. **Revista nera**, n. 47, p. 248–271, 2019.

ANDRADE, M. G. F.; PIMENTA, P. R.; MUNHÃO, E. E.; MORAIS, M. I. Controle de custos na agricultura: Um estudo sobre a rentabilidade na cultura da soja. **Custos e @agronegócio online**, n. 8, p. 24-45, 2012.

ARAÚJO, L. S. de; SILVA, G. B. S. da; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D. de C.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. V. Conservação da biodiversidade do Estado do Maranhão: Cenário atual em dados geoespaciais. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, p. 29, 2016.

ARAÚJO, M. L. S., SANO, E. E., BOLFE, E. L., SANTOS J. R. N., SANTOS, J. S., SILVA, F. B. Spatio temporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, n. 1, p. 57-67, 2019.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K. Calagem e adubação. In: SANTIAGO, C. M.; BRESEGHELLO, H. C. P.; FERREIRA, C. M. **Arroz, 500 perguntas**. Brasília, DF: Embrapa, 2. ed., p. 245, 2013.

BENICASA, M. M. P. **Análise de Crescimento de Plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FUNEP, p.42, 2004.

BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções. Brasília, DF: **Embrapa**, v.1, n. 1, p. 23-312, 2020.

BRASIL, E. C.; LIMA, E. V.; CRAVO, M.S. Uso de gesso na agricultura. IN: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. Brasília, DF: Embrapa, 2. ed., p. 145, 2020.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAMPOS, M. F.; ONO, E. O.; BOARO, C. S. F.; RODRIGUES, J. D. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. **Revista Biotemas**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 53-63, 2008.

CARVALHO, M. T. de M.; CASTRO, A. P. de; FERREIRA, C. M.; LACERDA, M. C.; LANNA, A. C.; SILVA-LOBO, V. L.; SILVA, M. A. S. da; COLOMBARI FILHO, J. M. O

arroz de terras altas como estratégia para segurança alimentar, intensificação ecológica e adaptação à mudança do clima: rumo aos objetivos de desenvolvimento sustentável para o milênio. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, v.1, p.14, 2020.

CEPEA - **Centro de estudos avançados em economia aplicada**. Custos agrícolas. Piracicaba: Cepea, 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/categoria/relatorios-agricolas.aspx>. Acesso em: 25 de maio 2022a.

CEPEA - **Centro de estudos avançados em economia aplicada**. Custos agrícolas. Piracicaba: Cepea, 2021. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0866315001661798371.pdf>. Acesso em: 1 de novembro 2022b.

CHANDA, S. C., ALI, M. A., HAQUE, M. E., ABDULLAH, M. R., SARWAR, A. K. M. G. Cost of production and cost benefit analysis of different rice in Sirajganj district. **Asian Journal of Crop, Soil Science and Plant Nutrition**, v. 01, n.01, p. 07-14. 2019.

CLARK, M. V. G. **Absorção e particionamento de nutrientes na soja cultivada em sistema de integração lavoura-floresta com eucalipto**. 2022, 102 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2023.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento** Custos de produção agrícola: a metodologia da Conab. Brasília, DF: CONAB, 2010.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 8ºoitavo levantamento, abril 2022a.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Portal de informação agropecuárias-custo de produção. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/custos-de-producao.html>. Acesso em: 25 de outubro de 2022b.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Portal de informação agropecuárias-custo de produção. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/custos-de-producao.html>. Acesso em: 25 de outubro de 2023.

CONCENÇO, G.; ASPIAZÚ, I.; GALON, L.; FERREIRA, E.A.; FREITAS, M. A. M.; FIALHO, C. M. T.; SCHWANKE, A. M. L.; FERREIRA, F. A.; SILVA, A. A. Photosynthetic characteristics of hybrid and conventional rice plants as a function of plant competition. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. p. 4, 803-809, 2011.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. L. A uniform and adaptive system for expressing rice development **Crop Science**, Madison, v. 40, p.436-443, 2000.

CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; ALVAREZ, R. C. F. Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. **Revista brasileira de ciência do solo**, V. 40, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; MANCUSO, M. A. C.; GARCIA, R. A.; CASTRO, G. S. A. Crescimento radicular e aéreo de cultivares de arroz de terras altas em função da calagem. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p.256-263, 2012.

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus, p.341,1984.

FAGERIA, N. K. Deficiência hídrica em arroz de cerrado e resposta ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.15, n.3, p. 259- 65,1980.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2303-2307, 2000.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P.; CARVALHO, M. C. S.; COLOMBARI FILHO, J. M. Upland Rice Genotype Evaluations for Acidity Tolerance. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 9, p. 1076-1096, 2015.

FARIAS FILHO, M. S.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. de L. A cultura do arroz em sistema de vazante na baixada maranhense, periferia do sudeste da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 82–91, 2009.

FERREIRA, A. C. M.; SOUZA, H. A. de; SAGRILO, E.; SILVA JUNIOR, G. B. da; NATALE, W.; SOBRAL, A. H. S.; VERA, G. de S.; SANTOS, S. F. da C. B. Absorption, partitioning, and export of nutrients by phenological stage in maize cultivated in Eastern Maranhão, Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 2, p. 240-256, 2023.

FIALHO, C. M. T.; SCHWANKE, A. M. L.; FERREIRA, F. A.; SILVA, A. A. Photosynthetic characteristics of hybrid and conventional rice plants as a function of plant competition. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 803-809, 2011.

FREITAS, T. F. S.; SILVA, P. R. F.; STREIDER, M. L.; SILVA, A. A. Validação de escala de desenvolvimento para cultivares brasileiras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 36, p. 404-410, 2006.

GARCIA, U. S.; RIBEIRO, L. A.; ALVES, L. R. A especialização da produção de arroz nas mesorregiões do estado do maranhão, Brasil. **Anais do 60º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER)**. Natal, UFRN, 2022.

GARCIA, U. S.; WANDER, A. E.; MUNIZ, L. C.; CUNHA, C. A. da.; FERREIRA, C. M. O perfil socioeconômico e tecnológico dos rizicultores no município de São Mateus do Maranhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 56264-56288, 2021.

GUIMARÃES, C. M.; FAGERIA, N. K.; FILHO, M. P. B. Como a planta de arroz se desenvolve. **Arquivo do agrônomo**, n.13, 2002.

HIRAKURI, H. M. Viabilidade econômica da cultivar de soja BRS 232 na microrregião de Campo Mourão. In: GUIDUCCI, R. do C. N.; LIMA FILHO, J. R.; MOTA, M. M. (Ed.). Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de caso. Brasília, DF: **Embrapa**, p. 451-476, 2012.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. Londrina: **Embrapa Soja**, n. 349, p.70, 2014.

IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção Agrícola Municipal, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso: outubro de 2023a.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Agropecuário 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos>. Acesso em: 02 de novembro de 2023b.

IMESC. **Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos**. Maranhão, MA: SEPLAN, 2023. Disponível em: <https://imesc.ma.gov.br/portal/Post/view/socioeconomicos/634> . Acesso em: 18 outubro 2023.

KUMARA, R.; CHATTERJEEA, D.; KUMAWATB, N.; PANDEYC, A.; ROYC, A.; KUMARA, M. Productivity, quality and soil health as influenced by lime in ricebean cultivars in foothills of northeastern India. **The crop journal**, p. 338-344, 2014.

LACERDA, M. C.; NASCENTE, A. S. Effects of row spacing and nitrogen topdressing fertilization on the yield of upland rice in a no-tillage system. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 38, n. 4, p. 493-502, 2016.

LEPSCH, I.F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, p.1-793, 2011.

LIU, X., RAHMAN, T., SONG, C., YANG, F., SU, B., CUI, L., BU, W., YANG, W. Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping. **Field Crops Research**, v. 224, p.91-101, 2018.

LUSTOSA FILHO, J. F.; SOUZA, H. A.; ALMEIDA, R. E. M.; LEITE, L. F. C. Conservação e manejo da fertilidade do solo no Cerrado do Matopiba. In: IWATA, B. de F.; ROCHA, I. L. (org.). **Cerrado: capital natural e serviços ambientais**. Jundiaí: Paco Editorial, 2021. Cap. 2. p. 75-97.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A Career Perspective On Soil Management In The Cerrado Region Of Brazil. **Advances In Agronomy**, v.137, p.1-72, 2016.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Projeções do Agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33- Projeções de Longo Prazo. Brasília - DF. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todaspublicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf/view> . Acesso outubro de 2023a.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Projeções do Agronegócio: Brasil 2020/21 a 2030/31: projeções de longo prazo. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todaspublicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2020-2021-a-2030-2031.pdf/view>. Acesso em: 17 set. 2023b.

MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N. de; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, v. 23, n. 1, p. 123-139, 1976.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018.

NATALE, W.; ROZANE, D. E.; PARENT, L. E.; PARENT, S.É. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 1294-1306, 2012.

PALUDZYSZYN FILHO, E. A cultura da soja no sul do Maranhão. Londrina: **EMBRAPA-CNPSO**, p. 34, 1995.

PRADO, R. M. Nutrição de Plantas. São Paulo, **Editora Unesp**, 414 p, 2020.

REIS, R. P. Fundamentos de economia aplicada. Lavras: **UFLA/FAEPE**, 2007.

REGO, C. A. R. de M.; REIS, V. R. R.; WANDER, A. E.; CANTANHÊDE, I. S. de L.; COSTA, J. B.; MUNIZ, L. C.; COSTA, B. P.; LÓPEZ de HERRERA, J. Cost analysis of corn cultivation in the setup of the crop-livestock-forest integration system to recover degraded pastures. **Journal of Agricultural Science**, V. 9, n. 6, p. 168-174, 2017.

ROBERTS, T. L.; JOHNSTON, A. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 275-281, 2015.

ROCHA, A.; LORENZON, J.; PAULA, R. D.; MAIA, R.; FELITO, R. A.; ROBOREDO, D. Viabilidade econômica da produção de arroz de Terras Altas na Região Médio Norte de Mato Grosso: Um estudo de caso. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n. 03, 2016.

SÁNCHEZ-REINOSO, A. D., NIETO, M. F., DOSSMANN, J., CAMACHO-TAMAYO, J. H., RESTREPO-DÍAZ, H. Nutrient uptake, partitioning, and removal in two modern high-yielding Colombian rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 18, p. 2373-238, 2019.

SANTOS, I. P.; CARNEIRO, M. S.; MATTOS, J. S.; FURTADO, C. A. Agricultura familiar no maranhão: uma breve análise do censo agropecuário 2017. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 51, n. Suplemento Especial, p. 55–70, 2020.

SCHNEIDER, S.; CASSOL, A.; LEONARDI, A.; MARINHO, M. de M. Os efeitos da pandemia da Covid-19 sobre o agronegócio e a alimentação. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 100, p. 167-188, 2020.

SEGANTINI, D.M.; LEONEL, S.; CUNHA, A. R.; FERRAZ, R. A.; RIPARDO, A. K. S. Exigência térmica e produtividade da amoreira-preta em função das épocas de poda. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 3, p. 568-575, 2014.

SILVA, I. F.; BARBOSA, A. M. B.; CARLOS, S.T.; CATUCHI, T. A. Adubação boratada na cultura do arroz em solos de cerrado de baixa fertilidade. **Colloquium Agrariae**, vol. 10, n. Especial, p. 01-08, 2014.

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. O arroz no Brasil: evidências do Censo Agropecuário 2006 e anos posteriores. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, p. 58, 2014.

SILVA, M. E. C. **Absorção e particionamento de nutrientes no consórcio milho com capim-marandu em sistema de integração lavoura-pecuária no leste maranhense.** 2023, 165 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2023.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; MELLO, F. F. C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 965-974, 2010.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 416, 2004.

SOUZA, E. F. C.; SORATTO, R. P.; PAGANI, F. A. Aplicação de nitrogênio e inoculação com rizóbio em feijoeiro cultivado após milho consorciado com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 4, p. 370-377, 2011.

SPEHAR, C.

R. Comparison between hill and row plots methods on selection of soybeans for aluminium tolerance in a brazilian savannah (cerrado) acid soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n. 06, 1998.

STANSEL, J. W. The rice plant its development and yield. In: Six decades of rice research in texas. Beaumont: **Texas Agricultural Experiment Station**, p. 9-21, 1975.

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. Versão Resumida. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, p. 108, 2013.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; MICHELON, S.; WALTER, L. C.; MARCOLIN, E. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, p.1086-1093, 2006.

TAMAGNO, S., BALBOA, G. R., ASSEFA, Y., KOVÁCS, P., CASTEEL, S. N., SALVAGIOTTI, F., CIAMPITTI, I. A. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. **Field Crops Research**, v. 200, p. 18-27, 2017.

VIEIRA, A. S.; BARROSO, A. R.; SILVA JÚNIOR, A. F. A economia da soja no estado do Maranhão. In: SCHLESINGER, S.; NUNES, S. P.; CARNEIRO, M. S. A agricultura familiar da soja na região sul e o monocultivo no Maranhão: duas faces do cultivo da soja no Brasil. 1 ed. Rio de Janeiro: **Editora FASE**, p. 80-88, 2008.

VIEIRA, M. M.; DONHA, R. M. A. Fitotecnia: arroz, feijão e trigo. Londrina: **Editora e Distribuidora Educacional S.A.**, p.192, 2019.

ZALLES, V.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; STEHMAN, S. V.; TYUKAVINA, A.; PICKENS, A.; SONG, X.P.; ADUSEI, B.; OKPA, C.; AGUILAR, R.; JOHN, N.; CHAVEZ, S. Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 428–435, 2019.

ZHANG, L.X.; WEI, L.I.U.; TSEGAW, M.; Xin, X.U.; QI, Y.P.; SAPEY, E.; LIU, L.P.; WU, T.T.; SHI, S.U.N.; HAN, T.F. Principles and practices of the photo-thermal adaptability improvement in soybean. **Journal of integrative agriculture**, v. 19, n. 2, p. 295-310, 2020.

WIELEWICKI, A. P.; MARCHEZAN, E.; STORCK, L. Absorção de nutrientes pelo arroz em resposta à calagem e a época de início de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.28, n.1, p.17-21, 1998.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, p. 269, 1981.

CAPÍTULO I

VIABILIDADE ECONÔMICA DOS CULTIVOS DE ARROZ E SOJA EM ÁREAS DE ABERTURA NO CERRADO MARANHENSE: UM ESTUDO DE CASO

RESUMO

A compreensão dos custos de produção é uma etapa crucial para as decisões gerenciais visando o aumento da lucratividade nas propriedades rurais. Nesse contexto, objetivou-se com este trabalho estimar os custos de produção e avaliar a viabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no cerrado maranhense. Os dados foram coletados durante a safra de 2021/2022 na Fazenda Barbosa, localizada em Brejo, Maranhão. Foram analisados os custos para abertura de áreas e a produção de arroz (cultivar BRS Sertaneja) e soja (cultivar PP9510 IPRO). Os dados de custos de produção foram empregados no cálculo do Custo Operacional Efetivo (COE), Custo Operacional Total (COT) e o Custo Total de Produção (CTP) por hectare. Os indicadores de viabilidade avaliados foram: receita bruta (RB), margem bruta (MB), margem líquida (ML), índice de lucratividade (IL), valor presente líquido (VPL), *payback*, taxa de rentabilidade (TR) e taxa interna de retorno (TIR). O método de análise utilizado foi o estudo de caso descritivo, no qual os dados de custo e preço foram obtidos junto ao produtor. O custo para abertura de área e produção do arroz e soja foi R\$ 9.049,73 e R\$ 14.488,10 ha⁻¹, respectivamente. No cultivo de arroz, os custos operacionais representam a parcela mais significativa, totalizando R\$ 3.610,47 ha⁻¹. Enquanto na soja, os gastos mais relevantes são com insumos, totalizando R\$ 7.430,60 ha⁻¹. A produtividade média do arroz foi de 49,34 sacas de 60 kg por hectare, com cada saca sendo comercializada ao preço de R\$ 66,00, resultando em uma RB de R\$ 3.256,44. Após os pagamentos de todos os custos diretos, a MB foi de R\$ -4.909,69, indicando que a produção de arroz não foi suficiente para cobrir os gastos da lavoura em áreas de abertura. Como resultado, o IL foi de -154,11%, gerando um prejuízo na ML de R\$ -5.018,45 ha⁻¹. Por outro lado, o cultivo da soja apresentou uma produtividade média de 67,60 sacas por hectare. O preço de venda da saca de 60 kg foi de R\$ 160,00, resultando em uma RB de R\$ 10.816,13 por hectare. No entanto, a MB foi de R\$ -2.788,36, indicando que a produtividade obtida não foi suficiente para cobrir os custos de produção, em áreas de abertura. Como resultado, a RL foi de R\$ -2.897,12, com um IL de -26,79%. A análise de viabilidade econômica revelou que a produção de soja apresentou um VPL de R\$ 4.821,83, TR de 114,87%, TIR de 27,31% e um período *payback* no quarto ano. Por outro lado, a produção do arroz apresentou VPL, IL e TR negativos, sem retorno do capital investido. Concluiu-se que o cultivo de arroz e soja em áreas de abertura no cerrado maranhense gera prejuízo no primeiro ano agrícola. O cultivo da soja é viável no médio prazo, enquanto o arroz foi considerado inviável nessas condições.

Palavras-chave: Fronteira agrícola, Gestão rural, Planejamento

ECOECONOMIC VIABILITY OF RICE AND SOYBEAN CROPS IN OPEN AREAS IN THE MARANHÃO CERRADO: A CASE STUDY

ABSTRACT

Understanding production costs is a crucial step for management decisions aimed at increasing profitability in rural properties. In this context, this study aimed to estimate production costs and evaluate the economic viability of rice and soybean crops in newly opened areas of the Maranhão cerrado. Data were collected during the 2021/2022 growing season at Fazenda Barbosa, located in Brejo, Maranhão. The costs for land clearing and the production of rice (cultivar BRS Sertaneja) and soybean (cultivar PP9510 IPRO) were analyzed. Production cost data were used to calculate the Effective Operational Cost (EOC), Total Operational Cost (TOC), and Total Production Cost (TPC) per hectare. The viability indicators evaluated were: gross revenue (GR), gross margin (GM), net margin (NM), profitability index (PI), net present value (NPV), payback period, profitability rate (PR), and internal rate of return (IRR). The analysis method used was a descriptive case study, in which cost and price data were obtained from the producer. The cost for land clearing and the production of rice and soybean was R\$ 9,049.73 and R\$ 14,488.10 per hectare, respectively. In rice cultivation, operational costs represent the most significant portion, totaling R\$ 3,610.47 per hectare. For soybeans, the most relevant expenses are with inputs, totaling R\$ 7,430.60 per hectare. The average productivity of rice was 49.34 bags of 60 kg per hectare, with each bag being sold at R\$ 66.00, resulting in a GR of R\$ 3,256.44. After paying all direct costs, the GM was R\$ -4,909.69, indicating that rice production was not sufficient to cover the crop expenses in newly opened areas. As a result, the PI was -154.11%, generating a net loss NM of R\$ -5,018.45 per hectare. On the other hand, soybean cultivation had an average productivity of 67.60 bags per hectare. The selling price of a 60 kg bag was R\$ 160.00, resulting in a GR of R\$ 10,816.13 per hectare. However, the GM was R\$ -2,788.36, indicating that the obtained productivity was not sufficient to cover production costs in newly opened areas. As a result, the NM was R\$ -2,897.12, with an PI of -26.79%. The economic viability analysis revealed that soybean production had an NPV of R\$ 4,821.83, a TR of 114.87%, an IRR of 27.31%, and a payback period in the fourth year. On the other hand, rice production showed negative NPV, PI, and PR, with no return on the invested capital. It was concluded that rice and soybean cultivation in newly opened areas of the Maranhão cerrado generates a loss in the first agricultural year. Soybean cultivation is viable in the medium term, while rice was considered unviable under these conditions.

Keywords: Agricultural frontier, Rural management, Planning

1 INTRODUÇÃO

O cerrado maranhense se destaca como uma região de grande potencial para o desenvolvimento agrícola, impulsionado principalmente pelo cultivo de grãos (IBGE, 2023; Zalles *et al.*, 2019). A soja é a principal cultura em termos de produção e expansão agrícola no estado, ocupando atualmente uma área de um milhão de hectares (IBGE, 2023).

O custo de produção em áreas de abertura apresenta valores elevados devido ao maior número de operações agrícolas e ao estabelecimento da fertilidade do solo, quando comparado a áreas de produção já consolidadas (Rocha *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2014). O cultivo de arroz de terras altas visa atenuar os impactos do elevado custo de produção inicial, uma vez que o arroz apresenta baixos custos, é menos exigente em fertilidade do solo e possui tolerância à acidez (Fageria, 2006; Pacheco *et al.*, 2011; Souza; Lobato, 2004).

O cultivo estratégico do arroz no Cerrado contribui significativamente para a melhoria dos atributos químicos e biológicas do solo, preparando-o adequadamente para culturas subsequentes como milho e soja, culturas estas que demandam condições de solo melhoradas para uma produção eficiente (Farias Filho; Ferraz Junior, 2009; Nascente; Stone, 2018). Isso é importante em solos de cerrado, caracterizados por alta acidez e baixa fertilidade (Souza; Lobato, 2004). Contudo, o expressivo retorno econômico da soja, impulsionado pela crescente demanda internacional, tem motivado os produtores a cultivar esta oleaginosa, mesmo em condições menos ideais (MAPA, 2023). Essa tendência é evidenciada pelo aumento de 156% na área cultivada com soja no leste maranhense nos últimos dez anos (IBGE, 2023).

Diante deste contexto, surge a questão: qual cultura representa a melhor oportunidade financeira para abertura de novas áreas? Para determinar o desempenho econômico entre as culturas de arroz e soja, é crucial considerar os custos de produção. Atualmente, não existem levantamentos recentes que avaliem diretamente a viabilidade econômica das safras nessa região específica. Portanto, objetivou-se com o trabalho estimar os custos de produção e avaliar a viabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no Cerrado maranhense. O presente estudo oferece informações que podem fundamentar a tomada de decisão por produtores e técnicos, além de orientar futuras pesquisas na área.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e descrição da fazenda

O experimento foi realizado por meio de coleta de dados na Fazenda Barbosa, situada no município de Brejo, na microrregião de Chapadinha, no Leste do estado do Maranhão, Brasil. Essa microrregião se destaca como uma área de crescente expansão agrícola no cultivo de grãos, sendo uma das microrregiões do MATOPIBA que mais cresce em área cultivada e volume de produção (IBGE, 2023). A fazenda Barbosa está situada nas coordenadas 3°42'01,4"S; 42°56'25,3"W; 104 metros de altitude.

A fazenda possui uma área total de cerca de 1.150 hectares, sendo que 755 hectares foram destinados ao cultivo agrícola na safra 2021/2022. A atividade principal na propriedade é o plantio de soja. No entanto, o produtor adota a estratégia de plantio consorciado de milho com capim (braquiária) em alguns talhões, visando aprimorar a qualidade do solo em áreas com histórico de sucessivas safras de soja. Esse manejo é implementado de forma rotativa nos talhões da fazenda, em alternância com a lavoura de soja solteira, além do emprego da integração lavoura-pecuária nos talhões que recebem o milho consorciado com braquiária (Toledo *et al.*, 2017).

Nas áreas de abertura há a tradição de cultivar arroz, porém esse cenário está mudando e, em algumas dessas áreas, a opção tem sido substituir o plantio de arroz pela introdução da soja.

A destinação da produção varia de acordo com o produto. A soja é comercializada por meio do envio para o porto na capital do Maranhão, São Luís, sendo destinada à exportação. Quanto ao milho e ao arroz, uma parte é armazenada e consumida internamente na própria fazenda, enquanto outra parte é vendida localmente no varejo.

A propriedade está localizada no bioma Cerrado e o clima da região é classificado como Aw' de acordo com a classificação de Köppen & Gerger. Este clima tropical é caracterizado por duas estações do ano bem definidas: a estação chuvosa, de dezembro a junho, e a seca, de julho a novembro. A precipitação pluviométrica média nos últimos três anos foi de 1.748 mm e a temperatura média anual de 27°C, com máxima de 33°C e mínima de 24°C (INMET, 2023).

Os dados de temperatura do ar foram mensurados utilizando a estação meteorológica de Chapadinha, Maranhão (INMET, 2023), enquanto os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos através de um pluviômetro de campo

instalado na fazenda durante o ano de 2022. A precipitação total no período de dezembro a maio de 2022 foi de 1.744,6 mm, condizente com as médias históricas da região (Figura 1).

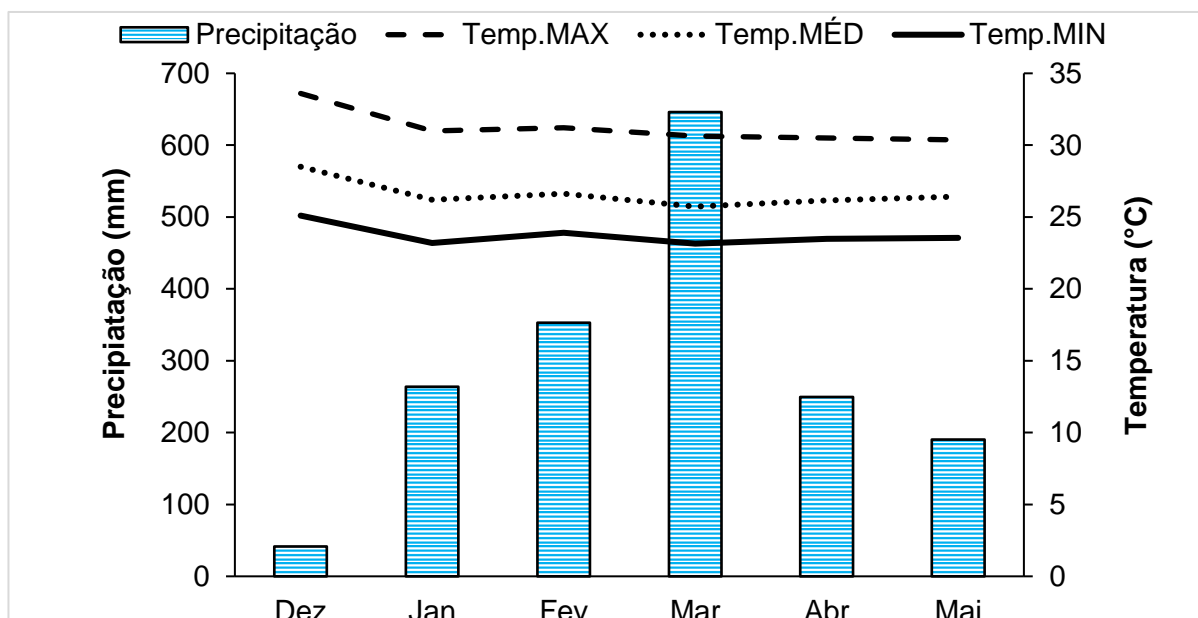


Figura 1. Precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima durante o período experimental na Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão.

2.2 Caracterização da área experimental

Antes da implantação das culturas de arroz e soja, as áreas estavam cobertas predominantemente por vegetação nativa do cerrado. O manejo teve início com a demarcação da área, seguido pela derrubada da mata com correntão, enleiramento, queima das leiras e uma primeira catação manual de tocos e raízes. O preparo do solo em ambas as áreas seguiu o sistema convencional, iniciando com a aração, seguida por uma nova catação de tocos e raízes.

Antes da correção do solo, amostras foram coletadas nas camadas de 0-20 cm para a caracterização química da fertilidade do solo na área experimental (Tabela 1), realizada de acordo com Teixeira et al. (2017). Posteriormente, foram aplicadas a lanchê três toneladas por hectare de calcário (dolomítico) com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 88%, com 29,6% de óxido de cálcio (CaO) e 16,6% de óxido de magnésio (MgO), juntamente com uma tonelada por hectare de gesso agrícola com concentração de cálcio de 21,2% e enxofre de 15,5%.

Tabela 2. Características químicas do solo da área experimental do arroz (a) e soja (b), na camada de 0-20 cm, antes das aplicações dos corretivos e fertilizantes. Brejo, Maranhão, 2022.

A) Área do arroz

Camada cm	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	M.O g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al
						cmol _c dm ³		
0-20	5,1	3,8	28	1,5	0,03	0,4	0,3	0,8
H+Al	SB	CTC	V	m	Cu	Fe	Mn	Zn
	cmol _c dm ³		--- % ---			----- mg dm ⁻³ -----		
5,6	0,7	6,4	11	53	0,2	106	0,2	1,7

B) Área da soja

Camada cm	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	M.O g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al
						----- cmol _c dm ³ -----		
0-20	5,7	4,5	33	3,1	0,06	0,9	0,6	0,2
H+Al	SB	CTC	V	m	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- cmol _c dm ³ -----		--- % ---			----- mg dm ⁻³ -----		
5,3	1,6	6,9	23	11	0,04	96	0,3	0,5

M.O (matéria orgânica): Walkey e Black (oxidação via úmida); P, K, Cu, Fe, Mn, Zn: Melich⁻¹ ou duplo ácido; Ca, Mg e Al: cloreto de cálcio; H+Al: Acetato de cálcio. SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V (%): saturação de bases; m (%): saturação por alumínio.

Com base nas análises de solo, observa-se que os solos destinados aos cultivos de arroz e soja apresentam uma elevada concentração de acidez potencial e saturação por alumínio. Além disso, evidencia-se uma disponibilidade limitada de nutrientes, acompanhada por uma saturação por bases muito baixa. Nesse cenário, torna-se imprescindível a realização de calagem, visando elevar a saturação por bases aos níveis ideais de 60%, conforme as exigências das culturas, e recomendação de Sousa e Lobato, (2004).

2.2.1 Manejo do arroz

Após a aplicação dos corretivos, foi realizada a distribuição de 200 kg ha⁻¹ de NPK, com a formulação 12-32-00, seguido por uma segunda aração para a incorporação dos corretivos e da adubação de fundação. Posteriormente, utilizou-se uma grade niveladora para finalizar o preparo do solo. Essas etapas de correção e adubação foram concluídas em janeiro de 2022, coincidindo com o início do período chuvoso e do plantio.

Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com o fungicida com princípio ativo Fludioxonil e o inseticida Fipronil, ambos na dosagem de 0,11 L ha⁻¹. A semeadura foi realizada no início de fevereiro, com as sementes sendo lançadas e

incorporadas por meio de uma única passagem de correntão leve. Para o plantio de um hectare, utilizou-se um total de 30 kg de sementes de arroz da cultivar BRS Sertaneja.

A cultivar BRS Sertaneja é uma variedade precoce de arroz, caracterizada por grãos da classe longo fino que apresenta plantas vigorosas, colmos grossos e perfilhamento moderado. Possui porte médio, folhas largas e panículas longas, destacando-se pelo elevado número de grãos por panícula. Essa cultivar demonstra adaptabilidade a diversas condições de cultivo, sendo indicada para rotação de culturas, renovação de pastagens, áreas de abertura e integração lavoura-pecuária, e seu ciclo de desenvolvimento é de aproximadamente 110 dias (Breseghello *et al.*, 2006).

Aos 30 dias após a emergência (DAE), realizou-se a adubação de cobertura com o uso de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 10-00-30 NPK. No mesmo período, para o controle de plantas daninhas e doenças, utilizou-se uma calda composta por herbicida com princípio ativo 2,4-D (1 L ha⁻¹), fungicidas Tiofanato-metilico (1 L ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Com 45 DAE, efetuou-se a adubação foliar com Profol Exclusivo na dosagem de 1 kg ha⁻¹, com óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Aos 60 DAE para o controle de plantas daninhas, pragas e realizar a segunda adubação foliar, foram utilizados uma calda composta por herbicida Bentazona (1 L ha⁻¹), inseticida Fipronil (0,05 L ha⁻¹), Profol Exclusivo (1 kg ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Com 80 DAE, realizaram-se as aplicações de fungicida Triciclazol + Tebuconazol (0,5 L ha⁻¹), inseticida Metomil (1 L ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). A aplicação desses fertilizantes e defensivos químicos foi realizada de acordo com as operações padrão de plantio e manejo da Fazenda Barbosa.

A colheita para avaliação dos dados foi realizada de forma manual em maio, com o auxílio de uma moldura de 0,5 m² lançada aleatoriamente em seis pontos distintos de um hectare. Todas as plantas contidas dentro da moldura foram coletadas e, posteriormente, as panículas debulhadas para avaliação da produtividade. O ciclo completo da cultura foi de 100 DAE.

2.2.2 Manejo da soja

Após o preparo do solo e aplicação do calcário e do gesso, foi realizada a adubação de fundação, consistindo na aplicação de 400 kg ha⁻¹ de superfosfato

simples (SSP), 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) e 38 kg ha⁻¹ de micronutrientes balanceados-MIB (3% S, 1,8% B, 0,8% Cu, 0,1% Mo, 2% Mn e 9% Zn). Em seguida, procedeu-se a uma segunda aração para a incorporação dos corretivos e da adubação de fundação. Posteriormente, utilizou-se uma grade niveladora para concluir a preparação da área. Essas etapas de correção e adubação foram finalizadas em dezembro de 2021, coincidindo com o início do período chuvoso.

O cultivo ocorreu entre janeiro e maio de 2022, iniciando com o plantio no dia 09 de janeiro em condições de sequeiro. Utilizou-se a cultivar Pampeana PP9510 IPRO, caracterizada pelo hábito de crescimento indeterminado, pertencente ao grupo de maturação 9.5, ou seja, com ciclo de 136 dias. Essa cultivar apresenta alto potencial produtivo, ramificação robusta, rusticidade e desempenho otimizado em áreas de abertura, além de uma baixa sensibilidade à deficiência nutricional (SEMENTES PAMPEANA, 2023).

Antes do plantio, procedeu-se à aplicação de herbicidas pré-emergentes, incluindo Diclosulam (0,03 g ha⁻¹), Imazetapir (0,8 L ha⁻¹), inseticida Lambda-Cialotrina (0,1 L ha⁻¹), ácido bórico Borosol (1,0 kg ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹).

A semeadura foi realizada de forma mecanizada, adotando um espaçamento de 0,5 m entre plantas e alcançando uma população de 296.000 plantas por hectare. Antes da semeadura, as sementes foram submetidas a um tratamento que incluiu os fungicidas com princípio ativo Fludioxonil (0,05 L ha⁻¹), Difenconazol (0,03 L ha⁻¹), os inseticidas Ciantraniliprole (0,08 L ha⁻¹), Fipronil (0,05 L ha⁻¹) e um estimulante, o Up Seeds, na dosagem de 0,1 L ha⁻¹.

No sulco de plantio, foi aplicado 150 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), juntamente com uma calda biológica composta por nematicida biológico (0,1 kg ha⁻¹), fungos *Trichoderma* (0,1 L ha⁻¹), bactéria promotora de crescimento *Azospirillum* (1 L ha⁻¹) e inoculante de *Bradyrhizobium japonicum*. A adubação de cobertura foi realizada com 30 dias contendo 200 kg ha⁻¹ de NPK da fórmula 04-30-10 e 200 kg ha⁻¹ de NPK da fórmula 10-00-30.

Na fase V4, foi realizada a primeira adubação foliar, composta pelo micronutriente manganês (0,3 kg ha⁻¹) e zinco (0,15 kg ha⁻¹), juntamente com o fungicida Difenconazol + Propiconazol (0,15 L ha⁻¹), herbicida glifosato (1,5 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Já na fase V8, efetuou-se a segunda adubação foliar

com o Profol produtividade (1,0 kg ha⁻¹), um estimulante hormonal (1,0 kg ha⁻¹) e o adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹).

No início da fase reprodutiva (R1), para o controle de pragas e doenças, aplicou-se o fungicida Piraclostrobina + Fluxapiroxade (0,3 L ha⁻¹), inseticida Lambda-Cialotrina + Clorraniliprole (0,1 L ha⁻¹), Clorotalonil (1 L ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e o adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Adicionalmente, realizou-se a terceira adubação foliar com o Profol Produtividade (1,0 kg ha⁻¹) e o adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹).

Na fase R4, ocorreu a quarta adubação foliar, composta por nitrato de potássio (1,5 l ha⁻¹), fertilizante mineral misto (2,0 L ha⁻¹), Profol Mg (1,5 L ha⁻¹), K-fol (1,0 L ha⁻¹) e adjuvante TA35 (0,05 L ha⁻¹). Aplicou-se também, durante o enchimento de grãos o fungicida Mancozebe + Tebuconazol+ Azoxistrobina (1,5 kg ha⁻¹) e o inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrina (0,25 L ha⁻¹) para o controle de pragas e doenças.

Na fase R6, aplicou-se uma calda composta por inseticida Lambda-Cialotrina + Clorraniliprole (0,1 L ha⁻¹), Acefato (1,0 L ha⁻¹), fungicida Mancozebe (1,0 L ha⁻¹) e Difenconazol (0,3 L ha⁻¹). Por fim, na fase R7-R8, para uniformizar a maturação das vagens, foi realizado a dessecação da área com os princípios ativos Glufosinato (1,0 L ha⁻¹), Flumioxazina (0,04 L ha⁻¹), óleo mineral (0,2 L ha⁻¹) e o adjuvante TA35 (0,15 L ha⁻¹).

A determinação da produtividade de grãos ocorreu quando a soja atingiu o ponto de colheita aos 135 DAE. Para isso, foram coletadas três linhas de dois metros de comprimento em seis pontos aleatórios ao longo de um hectare. A correção da umidade dos grãos para 13% foi realizada, e a produtividade foi estimada em kg por hectare.

2.3 Custo de produção

O trabalho foi conduzido durante a safra 2021/22, abrangendo todo o processo produtivo, desde o preparo inicial do solo até a colheita, como mencionando anteriormente. Foram considerados aspectos como manejo do solo, semeadura, adubação, tratos culturais e demais práticas relacionadas, com o objetivo de estimar todos os custos envolvidos na produção de arroz e de soja.

Adotou-se o método de análise de estudo de caso descritivo, no qual os dados de custos e preços foram coletados diretamente junto ao produtor (Rego *et al.*, 2017). Após a obtenção de todos os custos relacionados aos sistemas produtivos, foram

estimados os custos de produção por hectare utilizando como base a metodologia descrita por Matsunaga et al. (1976).

A) Custo operacional efetivo (COE): inclui todas as despesas diretas referentes às operações mecanizadas (hora/máquina), manuais (hora/homem) e insumos necessários para a implantação e condução da lavoura de soja e arroz por hectare.

B) Custo operacional total (COT): resulta da soma do COE com outros custos operacionais, incluindo a depreciação de maquinário e benfeitorias. Para o cálculo, foram considerados os equipamentos utilizados no experimento, como trator, distribuidor de calcário, grade aradora, niveladora, semeadora e o pulverizador. Foi levado em conta o tempo de trabalho e a vida útil de 15 anos para máquinas e implementos, enquanto as benfeitorias, como o galpão de máquinas e de armazenamento de grãos foram consideradas com uma vida útil de 40 anos.

C) Custo total de produção (CTP): corresponde à soma do COT com outros custos fixos, incluindo o custo de oportunidade da terra.

2.3.1 Indicadores de rentabilidade

Os indicadores de rentabilidade econômica foram descritos segundo a metodologia de Martin et al. (1998).

A) Receita bruta (RB): Calcula-se multiplicando a produtividade de cada lavoura pelo preço de comercialização da saca, seguindo a seguinte fórmula:

$$RB = Pr \times Ps$$

Onde:

Pr: Produtividade

Ps: Preço da saca (60 kg)

B) Margem bruta (MB): Representa a porcentagem do capital que permanece com o produtor após quitar o COE, conforme a equação:

$$MB = \frac{RB - COE}{RB} \times 100$$

Onde:

RB: Receita bruta

COE: Custo operacional efetivo

C) Margem líquida (ML): A ML fornece uma visão imediata da lucratividade da atividade, permitindo a definição das condições financeiras e operacionais que a

atividade apresenta a curto prazo. Calcula-se pela diferença entre a RB e o COT, conforme a equação:

$$ML = RB - COT$$

Onde:

RB: Receita bruta

COT: Custo operacional total

D) Índice de lucratividade (IL): O IL demonstra a porcentagem de receita disponível após a quitação de todos os custos operacionais, evidenciando a eficiência financeira da operação. Esse índice expressa a relação percentual entre a ML e a RB, fornecendo uma medida clara da rentabilidade da atividade, seguindo a seguinte fórmula:

$$IL = \frac{ML}{RB} \times 100$$

Onde:

ML: Margem líquida

RB: Receita bruta

E) Produtividade total dos fatores (PTF): A PTF deve ser no mínimo igual a um para garantir a sustentabilidade do sistema de produção. Quanto mais elevada for a PTF, melhor será a rentabilidade do investimento e mais eficiente o sistema de produção (Guiducci *et al.*, 2012). Calcula-se pela razão entre RB e CTP, conforme a equação:

$$PTF = \frac{RB}{CTP}$$

Onde:

RB: Receita bruta

CTP: Custo total de produção

F) A taxa de rentabilidade (TR): é uma medida financeira que avalia a eficiência e rentabilidade de um investimento (Guiducci *et al.*, 2012), expressa em porcentagem. Calcula-se subtraindo um da PTF, seguindo a seguinte fórmula:

$$TR = PTF - 1$$

Onde:

PTF: Produtividade total dos fatores

G) Preço de nivelamento (PN): Representa a produção mínima necessária para que o produtor cubra os custos de produção, considerando a produtividade atingida para o produto.

(7)

$$PN = \frac{CTP}{Pr}$$

Onde:

CTP: Custo total de produção

Pr: Produtividade em saca de 60 kg

H) Ponto de nivelamento (PoN): Representa a quantidade mínima de produção que deve ser alcançada para garantir que a receita bruta adquirida seja suficiente para cobrir todos os custos de produção. É determinado em função da produtividade mínima necessária para cobrir o CTP, considerando o preço unitário estabelecido pelo mercado e expresso em sacas por hectare.

(8)

$$PoN = \frac{CTP}{Ps}$$

Onde:

CTP: Custo total de produção

Ps: Preço da saca de 60 kg

2.4 Indicadores de viabilidade econômica

Os resultados dos custos de produção foram utilizados na construção dos fluxos de caixa para ambas as culturas. Esses fluxos de caixa foram então empregados para calcular os indicadores de viabilidade abrangendo um horizonte de 10 anos, iniciando com o investimento no preparo da área de abertura para o desenvolvimento das culturas de arroz e soja.

O processo produtivo teve início no ano um, correspondente à safra 2021-22, e a entrada e saída de recursos financeiros relacionados à produção das culturas foram consideradas constantes até o término do projeto. As saídas do fluxo de caixa foram representadas pelos custos de implantação e manutenção das lavouras, enquanto as entradas foram provenientes da venda, referente à produção de arroz e soja. A taxa de desconto utilizada para o cálculo dos indicadores de viabilidade foi de 6% (Richetti; Guiducci, 2012).

Na elaboração do fluxo de caixa, foram considerados como despesas de investimento os custos relacionados ao preparo da área e correção do solo. Esses custos incluem a demarcação da área, aluguel de trator de esteira, mão de obra, enleiramento, combustível, grade aradora e niveladora, catação de tocos, implemento para distribuição de calcário e do gesso. Os fluxos de caixa das culturas analisadas estão disponíveis no APÊNDICE 3 e 4.

A análise da viabilidade econômica da cultura do arroz e da soja do estudo de caso em questão englobou os indicadores: valor presente líquido, valor presente líquido anualizado, taxa interna de retorno, *Payback* descontado, índice de lucratividade e taxa de rentabilidade (Guiducci *et al.*, 2012).

A) O valor presente líquido (VPL) consiste na soma dos fluxos de rendimentos esperados para cada período, trazidos a valores do período zero e descontados por uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TMA, que reflete os juros de financiamento rural no mercado, foi estabelecida em 6% (Guiducci *et al.*, 2012). O VPL foi estimado conforme a Equação 9.

(9)

$$VPL = -C_0 + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{(1 + TMA)^n}$$

Em que:

C_0 = investimento inicial no período 0.

a_n = fluxo de rendimento no período n.

TMA= taxa mínima de atratividade

n= período, em que n=1,2,..., N.

Para que o investimento seja considerado viável, é necessário que o fluxo esperado de rendimento seja superior ao valor do investimento que o gerou, ou seja, o VPL deve ser maior que zero (Guiducci *et al.*, 2012).

B) O valor presente líquido anualizado (VPLA) indica o montante disponível anualmente para o produtor manter a atividade em produção, levando em consideração a distribuição do VPL ao longo da vida útil do projeto, aplicando a TMA (Guiducci *et al.*, 2012). Representa o saldo líquido dos fluxos de caixa em cada ano.

(10)

$$VPLA = PGTO(r; n; -VPL)$$

Onde:

PGTO= função pagamento no Excel

r= taxa de juros a 6%

n= período em n anos

VPL= valor presente líquido

C) A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa anual de retorno do investimento. O projeto é considerado viável quando a TIR é superior à TMA.

(11)

$$f(r) = \frac{a_1}{1+r} + \frac{a_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{a_n}{(1+r)^n} = C$$

Onde:

f(r)= soma dos fluxos de caixa

r= taxa interna de retorno

C= valor do investimento

D) O *Payback* descontado é o período de tempo necessário para a recuperação do investimento, considerando fluxos de caixa descontados à TMA.

(12)

$$Payback = \frac{II}{f}$$

Onde:

II= Investimento Inicial

f= fluxos de caixa futuros descontados à taxa mínima de atratividade

E) O Índice de lucratividade (IL) é dado pela relação entre o VPL dos fluxos de caixa positivos (entradas) e o VPL dos fluxos de caixa negativos (saídas), utilizando a TMA do projeto. O investimento será considerado rentável quando o valor presente das entradas líquidas de caixa superar os valores investidos, ou seja, sempre que o IL for maior ou igual a um (Guiducci *et al.*, 2012).

(13)

$$IL = \frac{VPL(\text{fluxo de caixa positivo})}{VPL(\text{fluxo de caixa negativo})}$$

Onde:

VPL= valor presente líquido

F) Taxa de rentabilidade (TRe) é calculada subtraindo um de IL. É considerado atraente o investimento que obtiver TRe maior ou igual a zero. É uma medida em porcentagem do retorno do investimento dada por:

(14)

$$TRE(\%) = IL - 1$$

Onde:

IL= índice de lucratividade

2.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma ferramenta essencial para o processo de tomada de decisão no contexto agrícola, proporcionando ao produtor rural uma visão do comportamento econômico-financeiro de uma atividade produtiva em relação a parâmetros específicos (Guiducci *et al.*, 2012).

Essa análise possibilita avaliar o impacto da variação de parâmetros, como taxa de juros, receitas e despesas, na rentabilidade de um projeto. Limites superiores e inferiores foram estabelecidos, e por meio dessa análise de sensibilidade, é possível determinar quais variáveis são mais sensíveis e têm o potencial de inviabilizar o projeto (Pierozan Júnior *et al.*, 2018).

Para esta análise, foram avaliados os comportamentos dos indicadores econômicos, como VPL, VPLA, TIR, *Payback* descontado e IL, aplicando variações nos custos de produção, preço de comercialização da saca e produtividade em quatro cenários distintos (Pierozan Júnior *et al.*, 2018):

Cenário 1: Redução de 20% no custo de produção;

Cenário 2: Aumento de 20% na produtividade;

Cenário 3: Redução de 20% no preço de comercialização da saca da soja e arroz;

Cenário 4: Redução de 20% no custo de produção e no preço de comercialização da saca.

O intervalo de 20% foi estabelecido com base na realidade das variações de preços dos produtos agrícolas, especificamente para a safra 2021/22 (Guiducci *et al.*, 2012). A tabulação dos dados foi realizada em planilhas eletrônicas do software Microsoft Excel® 2021.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O CTP apresenta valores elevados devido aos custos decorrentes da implantação das duas lavouras em área de abertura (Tabela 3). Nesse contexto, foi necessário realizar um número maior de operações agrícolas, aplicar corretivos e fertilizantes para a construção da fertilidade do solo, especialmente por se tratar de solo de cerrado, caracterizado pela elevada acidez e menor concentração de nutrientes (Rocha *et al.*, 2016; Sousa; Lobato, 2004). Outro fator que impactou a produção agrícola foi o efeito da pandemia do Covid-19, que favoreceu o aumento da volatilidade nos preços e dos custos com insumos (Schneider *et al.*, 2020; Souza, 2021).

Na cultura do arroz, os custos mais significativos da produção estão relacionados às operações agrícolas, totalizando R\$ 3.610,47 por hectare. Individualmente, o componente que mais impactou o custo de produção foi o preparo da área, representando 31,54% (Tabela 3). Os custos com insumos totalizaram cerca de R\$ 3.072,82, sendo os fertilizantes (14,57%), corretivos (9,98%), herbicidas (3,09%) e sementes (2,43%) os segundos componentes que mais elevam os custos. Quando somados esses percentuais aos demais itens, eles representam 33,95% do CTP.

Na cultura da soja, os gastos mais significativos estão relacionados aos insumos, totalizando R\$ 7.430,60 por hectare. Individualmente, o componente que mais contribuiu para o aumento do custo de produção foi os fertilizantes (29,70%). Quanto às operações agrícolas, os custos mais expressivos estão relacionados ao preparo da área, representando 22,40%, seguido pelo combustível (2,27%) e a colheita (2,21%).

De acordo com a CONAB (2022b), o custo médio de produção de soja na safra 2021/22 no Maranhão atingiu R\$ 7.750,60 por hectare, registrando um aumento expressivo de 68% em comparação com a safra anterior. Essa tendência também foi observada na produção de arroz no estado, que apresentou um incremento de 78% nos custos de produção em áreas já consolidadas durante o mesmo período da soja. É importante destacar que, enquanto os levantamentos da CONAB são mais abrangentes, envolvendo diversas unidades produtivas, o levantamento realizado em nosso estudo é mais específico, sendo conduzido em uma única fazenda localizada no cerrado maranhense.

Tabela 3. Estimativa do custo de produção em áreas de abertura para cultura do arroz e da soja no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

Componentes dos custos	Arroz		Soja	
	(R\$ ha ⁻¹)	(%)	(R\$ ha ⁻¹)	(%)
1. Insumos	R\$ 3.072,82	33,95	R\$ 7.430,60	51,29
Sementes	220,00	2,43	720,00	4,97
Corretivos	903,00	9,98	903,00	6,23
Fertilizantes	1.318,40	14,57	4.302,76	29,70
Herbicidas	279,63	3,09	224,21	1,55
Inseticidas	189,46	2,09	398,47	2,75
Fungicidas	100,81	1,11	363,45	2,51
Adjuvantes	25,00	0,28	88,88	0,61
Foliar	36,52	0,40	269,14	1,86
Biológico	-	-	160,70	1,11
2. Operações agrícolas	3.610,47	39,90	4.133,79	28,53
Preparo da área	2.854,64	31,54	3.244,64	22,40
Semeadura	17,87	0,20	25,42	0,18
Aplicação de corretivos	25,00	0,28	25,00	0,17
Aplicação de fertilizantes	25,00	0,28	37,50	0,26
Aplicação de defensivos	68,97	0,76	122,24	0,84
Aplicação de Foliar	30,56	0,34	30,56	0,21
Combustível	268,43	2,97	328,43	2,27
Colheita	320,00	3,54	320,00	2,21
3. Custos administrativos	1.482,84	16,39	2.040,10	14,08
Mão de obra	393,14	4,34	732,66	5,06
Transporte externo	518,27	5,73	736,01	5,08
Armazenagem	571,43	6,31	571,43	3,94
A) COE (1+2+3)	8.166,13	90,24	13.604,49	93,90
4. Depreciação	78,54	0,87	78,54	0,54
Depreciação de benf./instalações	5,83	0,06	5,83	0,04
Depreciação de implementos	44,53	0,49	44,53	0,31
Depreciação de máquinas	28,18	0,31	28,18	0,19
5. Manutenção	30,23	0,33	30,23	0,21
Manutenção de máq./implementos	7,38	0,08	7,38	0,05
Manutenção de benfeitorias	22,85	0,25	22,85	0,16
B) COT (A+4+5)	8.274,89	91,44	13.713,25	94,65
6. Custo de oportunidade	774,84	8,56	774,84	5,35
Terra	480,00	5,30	480,00	3,31
Máquinas e implementos	127,46	1,41	127,46	0,88
Benfeitorias	167,38	1,85	167,38	1,16
Custo total (B+6)	R\$ 9.049,73	100,00	R\$ 14.488,10	100,00

COE: custo operacional efetivo; COT: custo operacional total.

Na produção de grãos, os gastos com fertilizantes se destacam como um dos principais, uma vez que esses adubos são essenciais para o desenvolvimento das lavouras, atendendo às exigências específicas de cada cultura. Entre os nutrientes utilizados em maior concentração, se destaca o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), desempenhando diversas funções cruciais, promovendo o aumento da

produtividade e, conseqüentemente, gerando lucro para os produtores (Pires *et al.*, 2023).

Os preços dos fertilizantes aumentaram drasticamente entre 2021 e 2022, inicialmente devido aos impactos da pandemia de covid-19, que resultaram no fechamento de indústrias e na escassez de matérias-primas. A guerra entre Rússia e Ucrânia agravou essa situação (MAPA, 2023). A Rússia desempenha um papel importante como exportadora de fertilizantes para o Brasil, principalmente com os adubos nitrogenados (15,5%), fosfatados (26,6%) e potássicos (27,8%). Com a escalada das tensões na guerra, as dificuldades logísticas associadas ao escoamento desses insumos na região do Mar Negro agravaram o cenário e aumentaram os riscos de indisponibilidade e alta nos preços (ANDA, 2023).

O Brasil importa cerca de 85% dos fertilizantes que consome, sendo o cloreto de potássio um dos produtos mais importados, respondendo por cerca de 95% do volume total utilizado (ANDA, 2023). Além disso, o corretivo utilizado em grande parte das lavouras brasileiras, o calcário, apresentou um aumento médio de 41% em 2022, em comparação ao ano anterior no Maranhão (CONAB, 2023a). Todos esses elementos contribuem para a crescente complexidade da produção agrícola, tornando a tomada de decisões por parte do produtor um desafio.

Os custos administrativos representaram 16,39% e 14,08% do CTP no cultivo de arroz e soja, respectivamente (Tabela 3). Outro componente importante é o custo de oportunidade, que representa a remuneração esperada sobre o capital investido em terra, máquinas, implementos e benfeitorias, correspondendo, em média para as duas culturas, a 6,96% do custo total.

Os CTP da soja foram superiores em comparação com o arroz em todos os componentes (Figura 2). O preparo da área para o arroz representa 42,07% do custo total, enquanto para a soja, esse valor é menor, apenas de 28,80%.

O preparo da área de ambas as culturas foi semelhante, envolvendo demarcação do terreno, preparo primário e secundário do solo e aplicação de corretivos. No entanto, houve diferença quanto ao maior número de repetições para a limpeza e remoção de restos vegetais, o que resultou em um custo 9,6% maior na área da soja.

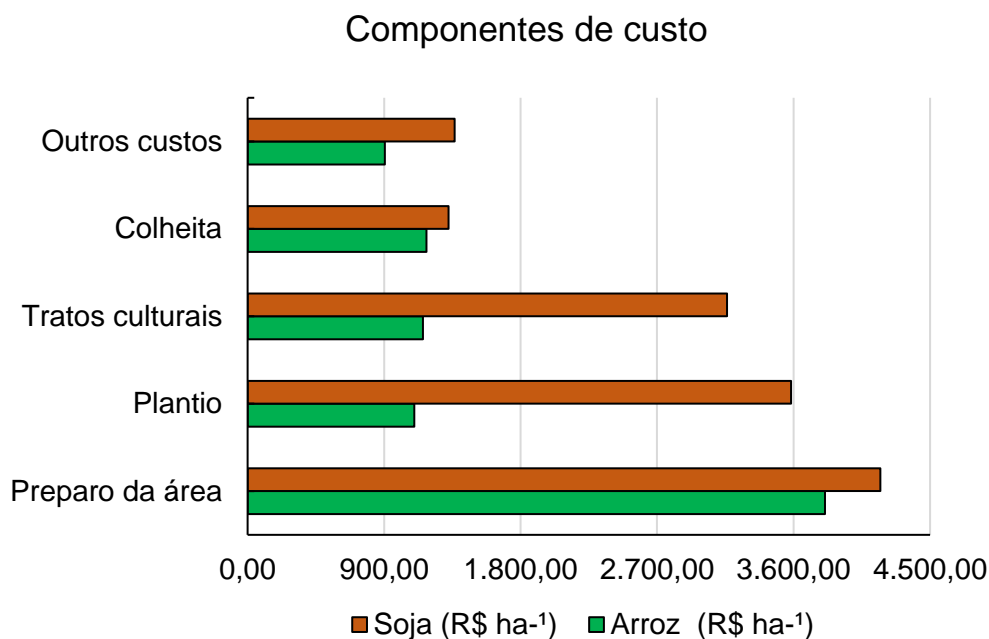


Figura 2. Distribuição da estimativa dos custos de produção em áreas de abertura, por etapa do processo produtivo do arroz e soja no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

O custo do plantio foi estimado em R\$ 1.099,06 e R\$ 3.582,92, representando 12,14% e 24,73% do CTP do arroz e da soja, respectivamente (Figura 2). Essa variação ocorreu devido ao manejo específico de cada cultura. No caso da soja, essa etapa abrange adubações de fundação, aplicação de micronutrientes, herbicidas pré-emergentes, tratamento de sementes com fungicidas, inseticidas e estimulantes, além da inoculação de biológicos no sulco de plantio. Por outro lado, o plantio do arroz, por ser uma cultura menos exigente, incluiu apenas adubação de fundação e tratamento de sementes com fungicidas e inseticidas.

Ao avaliar a viabilidade econômica da produção de arroz de terras altas como uma alternativa para custear os gastos com a abertura de área no Cerrado do Mato Grosso, Rocha et al. (2017) destacaram que os itens fertilizantes e operações agrícolas exercem o maior impacto na produção de arroz, representando 27,28% e 20,06% do custo total em condições de abertura de área, respectivamente.

Embora a cultura do arroz seja geralmente considerada pouco exigente em insumos, a adoção de técnicas capazes de garantir níveis produtivos consideráveis tem sido fundamental para o aumento da produtividade e, conseqüentemente, para uma maior rentabilidade (Dias *et al.*, 2010; Fageria *et al.*, 2001).

No cenário de consumo de fertilizantes por culturas em 2023, a soja assume a posição de liderança no Brasil, correspondendo a cerca de 50% do consumo total

de fertilizantes (ANDA, 2023). Isso reflete a expressiva demanda por nutrientes dessa cultura, necessários para uma nutrição adequada a fim de promover o desenvolvimento saudável das plantas e garantir a produção de grãos de qualidade.

No que diz respeito aos tratos culturais, os custos estimados para o arroz e a soja foram de R\$ 1.156,87 e R\$ 3.160,40, respectivamente (Figura 2). Esses valores incluem adubação foliar e de cobertura, aplicação de defensivos e operações agrícolas.

A colheita, em média, representa 11,09% dos custos totais para as duas culturas. E os outros custos são relacionados à mão de obra, transporte externo e combustível, representando, em média, 9,71% dos custos para as duas culturas.

Considerando o custo de produção por saca de 60 kg, o arroz apresentou um custo médio de R\$ 183,41 por saca (Figura 3). No entanto, o preço recebido pelo produtor foi de apenas R\$ 66,00, resultando em um déficit de R\$ 117,41 por saca, o que inviabiliza saldar o valor de COE, que totalizou R\$ 165,51.

Comparativamente, a produção de arroz na safra 2021/22 no Maranhão teve um custo de produção de R\$ 146,55 por saca, revelando uma situação semelhante, apesar de considerar a abertura de área.

Embora o preço recebido pela saca seja superior, alcançando R\$ 102,36, ainda existe um saldo negativo de R\$ 44,19 por saca (CONAB, 2023b). Esses resultados constituem os principais desafios econômicos enfrentados pelos produtores de arroz, sinalizando a necessidade de novas estratégias para equilibrar custos e receitas na atividade agrícola.

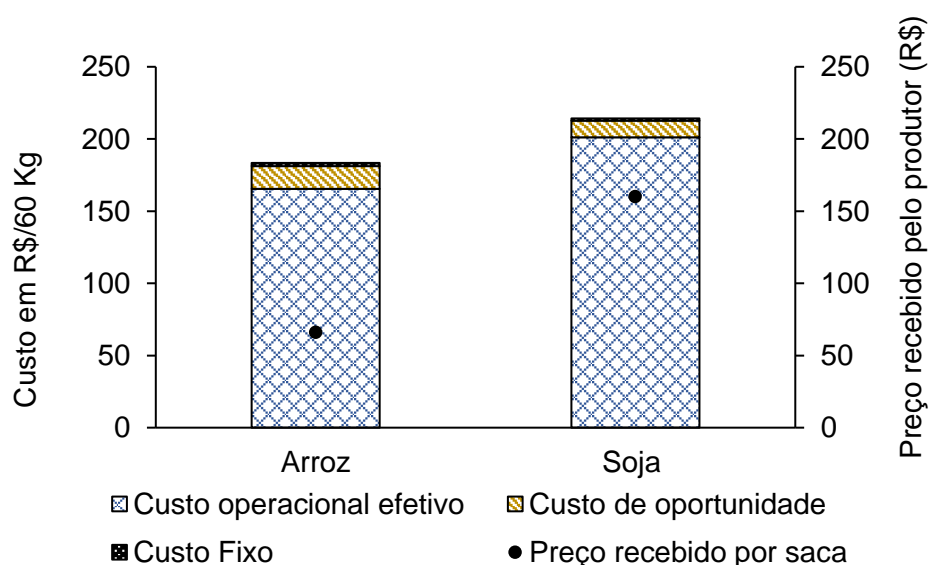


Figura 3. Custo de produção por saca versus preço comercializado do arroz e da soja no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

Vale destacar que a venda da saca de arroz nas condições da Fazenda Barbosa ocorreu abaixo do preço de mercado, atribuída à baixa qualidade dos grãos, com mais de 50% apresentando características quebradiças. Uma vez que o arroz não é a cultura principal da propriedade, não foram empregados os equipamentos adequados para a colheita, afetando negativamente a qualidade dos grãos.

No caso da soja, o custo de produção por saca foi de R\$ 214,32, enquanto o valor de comercialização do produto foi de R\$ 160,00. Assim, em ambas as culturas não foi obtido retorno econômico no primeiro ano agrícola. Nesta análise, observa-se a dificuldade em obter lucro diante dos altos custos de produção na safra 2021/22 e dos preços de mercado, o que representa um desafio para os produtores nessas atividades.

Na safra 2021/22 no Maranhão, o custo médio de produção por saca de soja foi registrado em R\$ 149,05. Por outro lado, o preço recebido pela saca pelo produtor atingiu R\$ 173,11, gerando um saldo positivo de R\$ 24,06 por saca comercializada (CONAB, 2023b). Isso resulta em uma margem de lucro favorável para os produtores de soja no estado, com uma rentabilidade positiva na comercialização dessa cultura durante o período mencionado.

Entretanto, é importante considerar que, neste estudo, os valores apresentam-se mais elevados devido a diversos fatores, sendo o principal deles o investimento realizado pelo produtor na abertura de área. Isso dificulta a obtenção do retorno do capital no primeiro ano, especialmente diante das adversidades do mercado agrícola, que enfrentou custos de produção elevados devido aos impactos da pandemia de covid-19 e à guerra entre Rússia e Ucrânia (ANDA, 2023).

A produção de arroz no presente estudo alcançou 2.960,40 kg ha⁻¹, equivalente a 49 sacas de 60 kg (Tabela 4). Esse desempenho supera a média registrada no Maranhão, que foi de 2.038 kg ha⁻¹ na safra 2021/22. Esse resultado representa um aumento de 45% na produtividade nas condições específicas do estudo. De maneira semelhante, observou-se um cenário positivo para a produção de soja, com uma produtividade de 4.056 kg ha⁻¹, equivalente a 67 sacas de 60 kg. Esse resultado supera em 34% a média do estado, que é de 3.029 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022a).

Tabela 4. Indicadores de rentabilidade econômica dos cultivos de arroz e soja em áreas de abertura no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

Descrição	Arroz	Soja
Produtividade - em sacas de 60 kg ha ⁻¹	49,34	67,60
Preço da saca de 60 kg - em R\$	66,00	160,00
Receita bruta - em R\$ ha ⁻¹	3.256,44	10.816,13
Margem bruta - em R\$/ha ⁻¹	-4.909,69	-2.788,36
Margem líquida - em R\$ ha ⁻¹	-5.018,45	-2.897,12
Índice de lucratividade - em %	-154,11	-26,79
Taxa de retorno - em %	-64,02	-25,34
Ponto de nivelamento - em sacas de 60 kg ha ⁻¹	137,12	90,55
Preço de nivelamento - em R\$/saca	183,42	214,32
Produtividade total dos fatores	0,36	0,75

Esses resultados destacam que as condições específicas do local de estudo, aliadas às práticas agrícolas adotadas, desempenharam um papel fundamental na obtenção de rendimentos superiores tanto na produção de arroz quanto na de soja. Esse desempenho é ainda mais notável considerando as condições específicas de abertura de área no cerrado. Devido à fertilidade do solo ainda em construção, as culturas tendem a apresentar baixa produtividade no primeiro ano de cultivo (Hirakuri *et al.*, 2020; Resende *et al.*, 2016).

A RB obtida após a comercialização do arroz foi R\$ 3.256,44, com um CTP de R\$ 9.049,73. Após os pagamentos de todos os COE, a MB do sistema de produção foi de R\$ -4.909,69, indicando que a produção de arroz não foi suficiente para cobrir os gastos da lavoura. Como resultado, o IL foi de -154,11%, gerando um prejuízo operacional de R\$ -5.018,45 por hectare e uma TR de -64,02% (Tabela 4).

Para reverter essa situação, seria necessário atingir um ponto de equilíbrio de 137,12 sacas por hectare. Ou seja, essa seria a produtividade mínima necessária para cobrir o custo total de produção, considerando o preço de venda local. Em relação ao PN, o valor mínimo a ser cobrado para que a atividade não seja economicamente inviável foi calculado em R\$ 183,42 saca por hectare.

Por outro lado, no cultivo da soja, observa-se que a cultura apresentou uma produtividade média superior à do arroz, em termos médios em relação ao estado do Maranhão. Um ponto a ser ressaltado é que as cotações de culturas agrícolas, como a soja, apresentaram grande elevação a partir de 2020, sobretudo em decorrência da elevação da taxa cambial, com o dólar superando o valor de R\$ 5,00. Diante desse cenário de valorização cambial, os produtores optaram pela exportação, reduzindo a

oferta interna de grãos de soja no mercado nacional, contribuindo para a elevação do preço do produto no país (MAPA, 2022; Oliveira, 2021).

Apesar da valorização da saca de soja, a RB obtida após a comercialização dos grãos foi R\$ 10.816,13 kg ha⁻¹. No entanto, o CTP foi de R\$ 14.488,10, demonstrando que os custos foram superiores à receita. Nesse cenário, a MB foi negativa, indicando que a produtividade alcançada não foi suficiente para cobrir os custos de produção. Como resultado, a ML foi de R\$ -2.897,12, com um IL de -26,79% e uma TR de -25,34% (Tabela 4).

Para atingir o equilíbrio na produção, seria necessário alcançar uma produtividade de 90,55 sacas por hectare, mantendo o valor de comercialização fixo em R\$ 160,00. Caso contrário, seria necessário elevar o valor de comercialização para R\$ 214,32 por saca, a fim de cobrir todos os custos de produção no primeiro ano de cultivo.

A PTF de todos os tratamentos foi inferior a um, o que significa que qualquer cultivo empregado resultará em prejuízos financeiros no primeiro ano agrícola. Para avaliar a viabilidade econômica dos sistemas de produção, foram desenvolvidos fluxos de caixa que simulam os valores das receitas anuais provenientes da venda dos grãos. As saídas de caixa incluem o investimento inicial no preparo da área e correção do solo no ano zero, bem como as despesas anuais relacionadas à produção de arroz e soja ao longo de um horizonte de 10 anos (APÊNDICE 3 e 4).

Tabela 5. Análise de viabilidade dos cultivos de arroz e soja no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

Descrição	Arroz	Soja
Valor presente líquido	R\$ -13.139,97	R\$ 4.821,83
Valor presente líquido anualizado	R\$ -1.785,30	R\$ 655,13
<i>Payback</i>	sem retorno	4,07 anos
Taxa interna de retorno	-	27,31 %
Índice de lucratividade	-2,45	2,15
Taxa de rentabilidade	-345,09 %	114,87 %

A análise de viabilidade econômica desempenha um papel crucial na avaliação do retorno do investimento e na busca por lucratividade. Essa abordagem permite avaliar o retorno do capital investido e determinar se as condições de investimento são favoráveis (Guiducci *et al.*, 2012).

Os resultados obtidos mostraram que os indicadores de viabilidade do investimento na produção de soja em área de abertura no município de Brejo,

Maranhão foram satisfatórios (Tabela 5). Tanto o VPL foi positivo como a TIR foi superior à taxa mínima de atratividade (TMA) de 6,0% ao ano, indicando a viabilidade financeira da produção de soja. A produção é considerada economicamente viável, pois seu VPL é maior que zero. Da mesma forma, o VPLA foi positivo, representando o lucro líquido médio anual durante o período analisado.

A determinação de custos e lucros na produção agrícola pode apresentar variações, já que cada propriedade opta por um sistema de produção, nível tecnológico e modelo de gestão específicos. Tais diferenças podem conduzir a retornos financeiros mais altos ou mais baixos (Hirakuri *et al.*, 2010).

Quanto à TIR, um valor mais elevado indica maior atratividade do investimento. O IL e a TRe foram de 2,15 e 114,87%, respectivamente, indicando um retorno econômico elevado. Contudo o *payback* indicou um período de quatro anos para a recuperação do capital investido para cultura da soja, caracterizando um período de médio prazo.

Com base na análise dos dados apresentados, a expansão da cultura da soja no município de Brejo e entorno, uma região de fronteira agrícola, ocorreu principalmente devido à capacidade de remuneração econômico-financeira da oleaginosa. A atratividade dos preços do grão na última década tem favorecido a obtenção de recursos tanto públicos quanto privados para a expansão dessa cultura no Brasil (Hirakuri *et al.*, 2020).

A expansão contínua da soja no Maranhão, evidenciada pelo aumento anual tanto em área plantada quanto na quantidade produzida, desempenha um papel fundamental ao posicionar o estado como um dos principais produtores dessa *commodity* no Nordeste (Almeida; Mattos Junior, 2016; IBGE, 2023).

No caso do arroz, os custos de produção foram elevados e o rendimento obtido não gerou lucro. Isso resultou em um VPL de R\$ -13.139,97 e um VPLA também negativo. Considerando a TMA de 6%, verificou-se que o sistema foi inviável, já que não foi possível calcular a TIR para uma projeção de 10 anos. Além disso, a análise de investimento indicou um IL de -2,45 e uma TRe negativa de -345,09% para a produção de arroz deste estudo. Isso mostra que o sistema não permitiu ao produtor recuperar o capital investido no horizonte analisado (Tabela 5).

Os fatores que influenciaram a obtenção desse resultado foram principalmente os custos elevados relacionados ao preparo inicial da área. Além disso, o baixo preço recebido pelo produtor, que comercializa o arroz a granel no mercado

local da região, contribuiu para esse cenário. Mesmo considerando que a qualidade dos grãos neste estudo foi inferior, a diminuição dos preços do cereal tem impactado até mesmo os produtores mais experientes, que demonstram preocupação com o cenário futuro da orizicultura maranhense (Garcia *et al.*, 2021).

O cultivo do arroz tem mantido sua presença entre os principais grãos alimentícios produzidos no Maranhão. Embora tenha perdido posição ao longo dos últimos anos em relação à produção nacional, o estado continua entre os cinco maiores produtores do Brasil (Garcia *et al.*, 2021). Esse cenário reforça a relevância do presente estudo, que tem como objetivo avaliar o custo de produção associado a essa cultura em condições de implantação em área de abertura no cerrado do Leste maranhense, um contexto que tem recebido pouca consideração científica.

Neste estudo, foram realizadas análises de sensibilidade dos sistemas de produção da soja e do arroz. Essas análises consideram condições adversas ao avaliar um empreendimento agrícola. Foram feitas alterações nos custos de produção, na produtividade e nos preços de comercialização das culturas com a finalidade de identificar como esses fatores impactaram a viabilidade econômica e os resultados financeiros (Tabela 6).

Tabela 6. Análise de sensibilidade dos cultivos de arroz e soja no município de Brejo, Maranhão, na safra 2021/22.

Análise de sensibilidade – Soja					
Cenários	VPL	VPLA	TIR	Payback	IL
I	R\$ 19.779,00	R\$ 2.687,33	96,30 %	1,09 anos	5,89
II	R\$ 20.743,37	R\$ 2.818,36	83,08 %	1,26 anos	4,94
III	R\$ -11.099,70	R\$ -1.508,09	-	Sem retorno	-2,64
IV	R\$ 24.511,39	R\$ 3.330,31	115,82 %	0,90 anos	7,30
Análise de sensibilidade – Arroz					
Cenários	VPL	VPLA	TIR	Payback	IL
I	R\$ -5.718,44	R\$ -776,95	-	Sem retorno	-1,88
II	R\$ -8.346,44	R\$ -1.134,01	-	Sem retorno	-2,19
III	R\$ -17.933,51	R\$ -2.436,59	-	Sem retorno	-4,71
IV	R\$ - 4.846,86	R\$ - 658,53	-	Sem retorno	-1,59

Nota: Cenário I: 20% de queda nos custos de produção; Cenário II: 20% de aumento na produtividade; Cenário III: 20% de queda no preço de comercialização; Cenário IV: 20% de queda nos custos de produção e 20% de queda no preço comercializado. VPL: Valor presente líquido; VPLA: Valor presente líquido anualizado; TIR: Taxa interna de retorno; IL: Índice de lucratividade.

Na análise de sensibilidade do sistema de produção de soja, observou-se que todos os cenários, com exceção do cenário III, apresentaram resultados favoráveis. Apesar disso, a soja demonstra sensibilidade às flutuações de mercado, uma vez que uma queda de 20% no preço de comercialização resultou em VPL, VPLA e IL

negativos, além de não gerar retorno do capital investido. Assim, o cultivo da soja demonstrou ser instável, mudando de acordo com as flutuações de mercado.

No cenário IV, no qual ocorreu uma queda de 20% nos custos de produção e no preço de comercialização, a soja apresentou os melhores resultados, com um VPL de R\$ 24.511,39. Além disso, apresentou um IL de 7,30 e TIR de 115,82%, indicando que o investimento é atrativo desde o primeiro ano de cultivo.

Por outro lado, o cultivo do arroz foi inviável nos quatro cenários. Mesmo em situações em que simulam reduções nos custos de produção e nos preços de comercialização, e com um aumento de 20% na produtividade, a atividade não permitiu recuperar o capital investido.

Essa confirmação ressalta a importância de os agricultores avaliarem cuidadosamente as condições de mercado e os riscos potenciais antes de decidirem investir no cultivo do arroz. É fundamental considerar as variações nos custos de produção e preços de comercialização ao tomar decisões relacionadas ao cultivo dessa cultura.

Nesse contexto, ao analisar ambas as culturas, observam-se resultados diferentes quanto à rentabilidade financeira e viabilidade do empreendimento na implantação de novas áreas de cultivo, uma vez que os valores apontados pelos indicadores mostram cenários opostos. Essa discrepância entre sistemas produtivos neste estudo pode estar relacionada a diversos fatores, como o nível tecnológico adotado, manejo, condução da lavoura e principalmente a conjuntura de mercado que as culturas se encontram.

4 CONCLUSÕES

No primeiro ano agrícola em áreas de abertura, tanto o cultivo de arroz quanto o de soja apresentam prejuízo econômico. Os custos mais elevados no cultivo de arroz decorrem do preparo da área, enquanto na cultura da soja, dos insumos.

O cultivo da soja em área de abertura no Leste maranhense é viável economicamente no médio prazo, enquanto o cultivo do arroz é inviável.

REFERÊNCIAS

ANDA- **Associação nacional para a difusão de adubos**. Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2022. Comitê de estatística, São Paulo, 2023.

ALMEIDA, J. G.; MATTOS JÚNIOR, J. S. DE. A dinâmica da produção de soja no município de Brejo (MA) e seus reflexos na produção agrícola camponesa. **Revista de geografia agrária**, v.11, n.24, p.374-399, 2016.

BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P. de; CASTRO, E. da M. de; PEREIRA, J. A.; UTUMI, M. M.; LOPES, A. de M.; CORDEIRO, A. C. C.; BASSINELLO, P. Z.; FONSECA, J. R.; PRABHU, A. S.; PETERS, V.; SOARES, A. A. BRS Sertaneja: cultivar precoce de arroz de terras altas. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, p.4, 2006.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 8ºoitavo levantamento, abril 2022a.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Portal de informação agropecuárias-custo de produção. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/custos-de-producao.html>. Acesso em:25 de outubro de 2022b.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Insumos agropecuários. Brasília, DF,2022. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoListarConsulta>. Acesso em:25 de novembro de 2023a.

CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Portal de informação agropecuárias-custo de produção. Brasília, DF,2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/custos-de-producao.html>. Acesso em:25 de outubro de 2023b.

DIAS, A. F.; SILVA, F. N.; MAIA, S. S. Resposta do arroz de sequeiro à adubação com NPK em solos do município de Ji-Paraná/Rondônia. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, n. 5, p. 120-124, 2010.

FAGERIA, N. K. A cultura do arroz no Brasil. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2006.

FAGÉRIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 416-424, 2001.

FARIAS FILHO, M. S.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. de L. A cultura do arroz em sistema de vazante na baixada maranhense, periferia do sudeste da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 82–91, 2009.

GARCIA, U. S.; WANDER, A. E.; MUNIZ, L. C.; CUNHA, C. A. da.; FERREIRA, C. M. O perfil socioeconômico e tecnológico dos rizicultores no município de São Mateus do Maranhão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 56264-56288, 2021.

GUIDUCCI, R. do C. N.; ALVES, E. R. A.; LIMA FILHO, J. R.; MOTA, M. M. Aspectos metodológicos da análise de viabilidade econômica de sistemas de produção. In: GUIDUCCI, R. do C. N.; LIMA FILHO, J. R.; MOTA, M. M. (Ed.). Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de caso. Brasília, DF: **Embrapa**, p. 451-476, 2012.

HIRAKURI, H. M. Viabilidade econômica da cultivar de soja BRS 232 na microrregião de Campo Mourão. In: GUIDUCCI, R. do C. N.; LIMA FILHO, J. R.; MOTA, M. M. (Ed.). Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de caso. Brasília, DF: **Embrapa**, p. 451-476, 2012.

HIRAKURI, M. H. Avaliação do desempenho econômico-financeiro da produção de soja no Estado do Paraná, para a safra 2010/11. Londrina, PR: **Embrapa soja**, n. 81, 2010.

HIRAKURI, M. H.; RICHETTI, A.; GARCIA, R. A.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CAMPOS, L. J. M. Análise econômico-financeira da produção de soja nas macrorregiões sojícolas 2 e 3. In: HIRAKURI, M. H.; CONTE, O.; PRANDO, A. M.; CASTRO, C. de; BALBINOT JUNIOR, A. A. Diagnóstico da produção de soja nas macrorregiões sojícolas 2 e 3. Londrina: **Embrapa Soja**, p. 67-101, n. 435, 2020.

IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção Agrícola Municipal, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso: outubro de 2023.

INMET- **Instituto Nacional de Meteorologia**. Banco de Dados Meteorológicos. <httphttps://bdmep.inmet.gov.br/> Acesso: 30 de novembro de 2023.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Projeções do Agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33- Projeções de Longo Prazo. Brasília - DF. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todaspublicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf/view> . Acesso outubro de 2023.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M.; ÂNGELO, J. A.; OKAWA, H. Sistema Integrado de custos agropecuários–CUSTAGRI. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 28, n. 1, 1998.

MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N. de; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, v. 23, n. 1, p. 123-139, 1976.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018.

OLIVEIRA, C. F. **Preço da soja e do milho durante a pandemia da covid-19 e seus impactos no mercado nacional da carne**. 2021. 32 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Ceres-GO, 2021.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; ALMEIDA, P. L. MACHADO, P. L.; ASSIS, R. L.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Produção e ciclagem de nutrientes

por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.1787-1799, 2011.

PIRES, M. F. M.; SOUZA, H. A.; MEDEIROS, J. C.; ROSA, J. D.; MARTINS, R. V. S.; SOBRAL, A. H. S.; CARVALHO, S. P.; VERA, G. S.; VIEIRA, P. F. M. J.; SAGRILLO, E. Nutrient Uptake by Soybean Plants in Succession of Cover Crops in Northeast of Brazil. **Communications In Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, p. 945-963, 2023.

PIEROZAN JUNIOR, C.; ALONSO, M. P.; CORTESE, D.; PIEROZAN, C. R. P.; WALTER, J. B., CORTESE, D. Viabilidade econômica da produção de *Khaya ivorensis* em pequena propriedade no Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 38, 2018.

RESENDE, A. V. de; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C. dos; KAPPES, C; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 156, p. 1-19, 2016.

REGO, C. A. R. de M.; REIS, V. R. R.; WANDER, A. E.; CANTANHÊDE, I. S. de L.; COSTA, J. B.; MUNIZ, L. C.; COSTA, B. P.; LÓPEZ de HERRERA, J. Cost analysis of corn cultivation in the setup of the crop-livestock-forest integration system to recover degraded pastures. **Journal of Agricultural Science**, V. 9, n. 6, p. 168-174, 2017.

RICHETTI, A.; GUIDUCCI, R. do C. N. Viabilidade econômica do sistema de produção soja-milho safrinha consorciado com braquiária. In: GUIDUCCI, R. do C. N.; LIMA FILHO, J. R.; MOTA, M. M. (Ed.). Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de caso. Brasília, DF: **Embrapa**, p. 451-476, 2012.

ROCHA, A.; LORENZON, J.; PAULA, R. D.; MAIA, R.; FELITO, R. A.; ROBOREDO, D. Viabilidade econômica da produção de arroz de Terras Altas na Região Médio Norte de Mato Grosso: Um estudo de caso. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n. 03, 2017.

SCHNEIDER, S.; CASSOL, A.; LEONARDI, A.; MARINHO, M. de M. Os efeitos da pandemia da Covid-19 sobre o agronegócio e a alimentação. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 100, p. 167-188, 2020.

Pampeana PP9510 IPRO. **Sementes Pampeana**, 2023. Disponível em: <https://sementespampeana.com.br/cultivares/pp9510-ipro/>. Acesso em: 11, novembro de 2023.

SILVA, I. F.; BARBOSA, A. M. B.; CARLOS, S.T.; CATUCHI, T. A. Adubação boratada na cultura do arroz em solos de cerrado de baixa fertilidade. **Colloquium Agrariae**, vol. 10, n. Especial, p. 01-08, 2014.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 416, 2004.

SOUZA, D. K. F. O impacto da pandemia de Covid-19 na volatilidade dos preços agrícolas brasileiros: um estudo para soja, milho e algodão. **Métodos e Pesquisa em Administração**, v. 6, n. 1, p. 39-52, 2021.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3.ed. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, p.575, 2017.

TOLEDO, M. M.; COSTA, J. B.; ARAUJO NETO, R. B. de; TEIXEIRA NETO, M. L. Desempenho socioambiental da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Maranhão: estudo de caso 1: Fazenda Barbosa-Brejo. São Luís, MA: **Embrapa Cocais**, p.37, 2017.

ZALLES, V.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; STEHMAN, S. V.; TYUKAVINA, A.; PICKENS, A.; SONG, X.P.; ADUSEI, B.; OKPA, C.; AGUILAR, R.; JOHN, N.; CHAVEZ, S. Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, p. 428–435, 2019.

CAPÍTULO II

ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E SILÍCIO EM ARROZ DE TERRAS ALTAS EM RESPOSTA A CALAGEM EM ÁREAS DE ABERTURA NO CERRADO MARANHENSE

O cultivo do arroz tem sido amplamente praticado em áreas de abertura no Cerrado maranhense, cujos solos apresentam elevada acidez, alta saturação de alumínio e baixa fertilidade natural. Nestas condições, entender a dinâmica de absorção de nutrientes e silício na ausência e presença da calagem é crucial. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar o acúmulo de silício e nutrientes do arroz de terras altas em resposta à calagem em áreas de abertura no Cerrado maranhense. O trabalho foi conduzido em campo em área de primeiro ano agrícola, na Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão, em delineamento em blocos casualizados em parcelas subdividas, sendo as parcelas as áreas do arroz com calagem (ACC) e sem calagem (ASC), e as subparcelas, os seis tempos de coleta das plantas: 30, 43, 55, 69, 83, e 99, em dias após a emergência (DAE), com três repetições. Em cada tempo foram realizadas as análises biométricas, particionamento da planta em folhas, colmo e panícula, para a determinação dos acúmulos de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e Si. Foi realizada a análise de variância e, procedido teste 't' para o fator calagem e análise de regressão para tempos de coleta. Os atributos biométricos do arroz, como altura de plantas, número de folhas e área foliar não foram influenciados pela calagem. Houve lento acúmulo de matéria seca e nutrientes na ACC e ASC até R0 (desenvolvimento da panícula). Após esse estágio, o acúmulo de macro e micronutrientes obedeceu a ordem decrescente: N>K>Mg>Ca>S>P e Mn>Fe>Zn>B>Cu. A calagem proporcionou um maior acúmulo de Si no colmo e na planta inteira, em comparação com a ASC. O índice de colheita (IC) na matéria seca para ambos os cultivos foi de (0,29). O maior IC nos dois cultivos foi observado para o N, enquanto o menor foi para o Fe. A exportação de macronutrientes pelos grãos em ordem decrescente foi para o ACC: N>P>Mg>K=S>Ca; e para o ASC: N>P>Mg>Ca>S>K. Ambos os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes para os micronutrientes: Cu>Zn>B>Mn>Fe. A calagem aumenta o acúmulo de fósforo e boro pelas plantas de arroz nas áreas de abertura no Cerrado maranhense, mas não afeta a ordem de acúmulo dos macros e micronutrientes.

Palavras-chave: acidez do solo, calcário, acúmulo de nutrientes, *Oriza sativa*

ABSORPTION OF NUTRIENTS AND SILICON IN UPLAND RICE IN RESPONSE TO LIMING IN OPENING AREAS THE CERRADO OF MARANHÃO

Rice cultivation has been widely practiced in open areas in the Cerrado of Maranhão, where soils usually have high acidity, high aluminum saturation and low natural fertility. Under these conditions, understanding the dynamics of nutrient and silicon absorption in the absence and presence of liming is crucial. The aim of this study was to evaluate the accumulation of silicon and nutrients in upland rice in response to liming newly opened areas in the Cerrado of Maranhão. The work was carried out in the field in a first-year area at Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão, in a randomized block design in subdivided plots, with the plots being the rice areas with liming (AWL) and without liming (WL), and the subplots, the six plant collection times: 30, 43, 55, 69, 83, and 99, in days after emergence (DAE), with three repetitions. Biometric analyses were carried out at each time, and the plant was partitioned into leaves, stalks and panicles to determine the accumulation of N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn and Si. Analysis of variance was carried out and a 't' test was performed for the liming factor and regression analysis for collection times. The biometric attributes of the rice, such as plant height, number of leaves and leaf area, were not influenced by liming. There was a slow accumulation of dry matter and nutrients in the AWL and WL until R0 (panicle development). After this stage, the accumulation of macro and micronutrients followed the decreasing order: N>K>Mg>Ca>S>P and Mn>Fe>Zn>B>Cu. Liming resulted in a greater accumulation of Si in the stalk and in the whole plant compared to WL. The harvest index (HI) in the dry matter for both crops was 0.29. The highest HI in both crops was observed for N, while the lowest was for Fe. The export of macronutrients by the grains in descending order was for AWL: N>P>Mg>K=S>Ca; and for WL: N>P>Mg>Ca>S>K. Both treatments showed similar behavior for micronutrients: Cu>Zn>B >Mn >Fe. Liming increases the accumulation of phosphorus and boron by rice plants in the open areas of the Maranhão Cerrado, but does not affect the order of accumulation of macro- and micronutrients.

Keywords: soil acidity, limestone, nutrient accumulation, *Oriza sativa*

1 INTRODUÇÃO

O Maranhão foi o quinto maior produtor de arroz do país e líder na região Nordeste na safra 2022/23 com uma produção de 165 mil toneladas (IBGE, 2023). A rizicultura tem sido amplamente praticada em áreas de abertura no Cerrado maranhense, onde normalmente os solos apresentam elevada acidez, alta saturação de alumínio e baixa fertilidade natural (Sousa; Lobato, 2004).

O uso do arroz nesse contexto apresenta produtividade satisfatória e tem sido uma alternativa ao uso de culturas mais exigentes, como a soja e o milho (Nascente; Stone, 2018). Assim, o uso do arroz de terras altas em áreas de abertura é uma estratégia adotada por produtores no Maranhão devido à menor demanda por correção do solo e uso de insumos, uma vez que a cultura apresenta tolerância à acidez (Nascente; Stone, 2018; Fageria *et al.*, 2015).

O uso adequado de corretivos e fertilizantes tornam-se fundamental para viabilizar uma agricultura sustentável em áreas de abertura. Nesse contexto, a calagem e a adubação emergem como as práticas mais difundidas para melhorar a fertilidade do solo, corrigir acidez do solo e aumentar a produtividade das culturas (Sousa; Lobato, 2004; Lopes; Guilherme, 2016). No entanto, a prática de correção do solo e uso de insumos são muitas vezes negligenciados pela maioria dos rizicultores maranhenses (Garcia *et al.*, 2022).

Qual é o impacto da ausência de calagem na absorção de nutrientes pelas plantas de arroz no Cerrado maranhense? Essa questão ainda não foi completamente esclarecida. Estudos anteriores demonstram que a calagem melhora significativamente as condições do solo, favorecendo o desenvolvimento da cultura. Além de mitigar a acidificação do solo, a calagem potencializa a absorção dos nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre (Sousa; Lobato, 2004; Lopes; Guilherme, 2016; Crusciol *et al.*, 2022).

Neste contexto, as plantas de arroz são exigentes em silício e nutrientes e, para evitar a limitação da produtividade de grãos, esses nutrientes e elemento benéfico precisam estar prontamente disponíveis nas épocas de maior demanda (Crusciol *et al.*, 2016). Dessa forma, entender as curvas da marcha de absorção de nutrientes otimiza a identificação das necessidades da cultura nos diferentes estádios

fenológicos, definindo o momento e as quantidades mais adequadas para aplicação de corretivos e fertilizantes (Tamagno *et al.*, 2017).

Da mesma forma, entender as taxas de absorção e exportação de silício e nutrientes do cultivo de arroz é essencial para garantir o fornecimento adequado de nutrientes. Esse conhecimento pode contribuir para manter a fertilidade do solo em níveis adequados para o estabelecimento de recomendações de adubação mais racionais (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2019).

Dessa forma, há uma clara necessidade de investigações adicionais sobre o manejo nutricional do cultivo de arroz em condições de áreas de abertura no Cerrado maranhense. Este estudo visa preencher essa lacuna, fornecendo informações valiosas que poderão aprimorar as práticas agrícolas locais, otimizar a eficiência no uso de insumos e promover a sustentabilidade do cultivo de arroz na região. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi determinar o acúmulo e a exportação de silício e nutrientes por estágio fenológico do arroz em áreas de aberturas com e sem calagem no Cerrado maranhense.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Barbosa, situada no município de Brejo, microrregião de Chapadinha, no Leste do estado do Maranhão, Brasil (3°42'01.4"S; 42°56'25.3"W; 104 metros de altitude). A área experimental estava coberta por vegetação nativa do bioma Cerrado. De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima tropical (tipo Aw') com duas estações bem definidas: a estação chuvosa, de dezembro a junho, e a seca, de julho a novembro. A precipitação pluviométrica média nos últimos três anos foi de 1.748 mm e a temperatura média anual de 27°C, com máxima de 33°C e mínima de 24°C (INMET, 2023).

Os dados de temperatura do ar foram mensurados utilizando a estação meteorológica de Chapadinha, Maranhão (INMET, 2023), enquanto os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos através de um pluviômetro de campo instalado na fazenda durante o ano de 2022. A precipitação total no período de fevereiro a maio de 2022 foi de 1.439 mm (Figura 1).

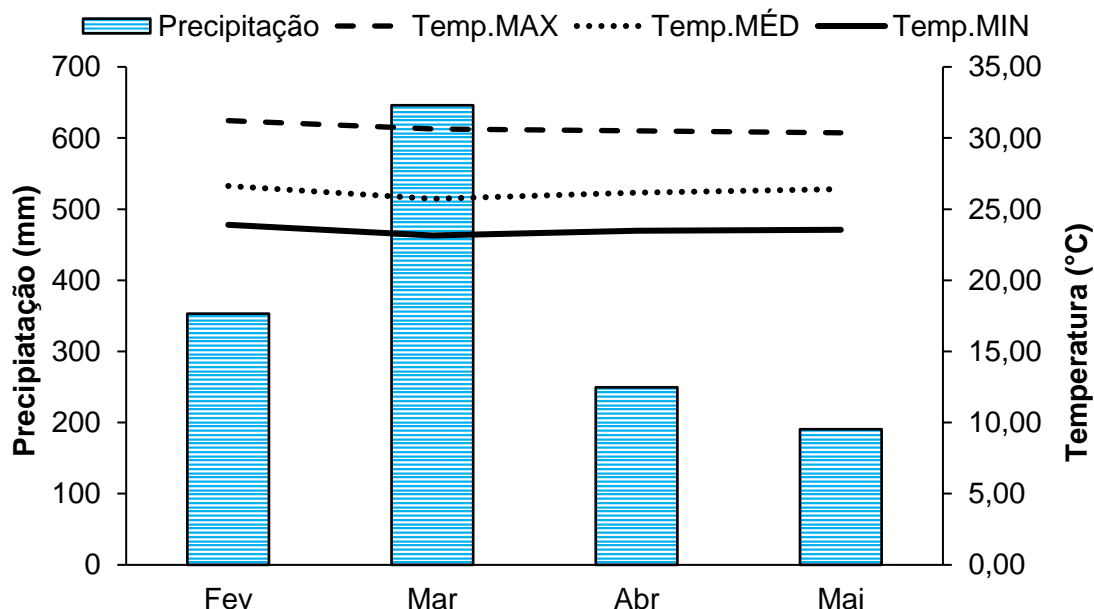


Figura 1. Precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima durante o período experimental na Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão.

Ao longo do desenvolvimento da cultura do arroz, foram registradas temperaturas médias de 26°C, mínimas de 23°C e máximas de 31°C (Figura 1). De acordo com Streck et al. (2020), a temperatura adequada para o desenvolvimento do

arroz está entre 20°C e 35°C. Temperaturas superiores a 35°C prejudicam a fase de germinação e aumentam o risco de se obter estande com baixo número de plantas e desuniforme. No geral, para a cultura do arroz as temperaturas ótimas variam em função da fase de desenvolvimento (Streck *et al.*, 2020).

Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-20 cm para caracterização química antes da instalação do experimento, cujo resultado foi apresentado na tabela 2-A, no primeiro capítulo (página 45). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico típico, com classe textural franco-arenosa na camada de 0-20 cm e franco-argilo-arenosa de 20-40 cm (APÊNDICE 1 e 5).

2.2 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido entre fevereiro e maio de 2022, durante a estação chuvosa, o que proporcionou condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura. A cultivar de arroz utilizada foi a BRS Sertaneja. A semeadura foi realizada no início de fevereiro, com as sementes sendo lançadas e incorporadas por meio de uma única passagem de correntão leve, a uma profundidade de 5 cm.

As informações referentes ao preparo inicial da área e ao manejo da cultura encontram-se no primeiro capítulo (Página 44 a 46). As seis parcelas tinham dimensões de 20 x 20 m (Figura 2), sendo em que apenas três delas houve aplicação de três toneladas por hectare de calcário dolomítico com PRNT de 88%, com 29,6% de óxido de cálcio (CaO) e 16,6% de óxido de magnésio (MgO), e uma tonelada de gesso com concentração de cálcio de 21,2% e enxofre de 15,5%. Nas demais parcelas, embora não tenha havido aplicação do corretivo, houve aplicação de uma tonelada por hectare de gesso agrícola. A diferença entre as áreas com e sem calagem ocorreu exclusivamente pela aplicação ou não do calcário, sendo os demais manejos iguais ao longo do ciclo da cultura e realizados de acordo com as operações padrão de plantio e manejo da Fazenda Barbosa (Página 44 a 46).

Após a colheita do arroz, foram coletadas amostras compostas de solo, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, para a caracterização química e granulométrica do solo nas áreas com e sem calagem (APÊNDICE 1 e 5).

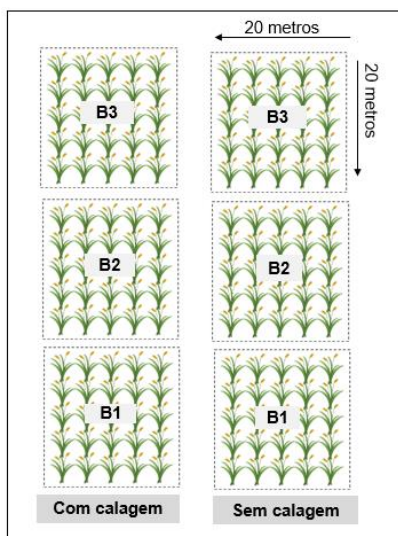


Figura 2. Croqui da área experimental do arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

2.3 Delineamento experimental

O experimento seguiu um delineamento em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, no qual as parcelas foram as áreas do arroz com e sem calagem, e as subparcelas foram os seis tempos de coleta das plantas: 30, 43, 55, 69, 83, e 99 dias após a emergência (DAE), com três repetições (Blocos). Os tempos de coletas corresponderam aos estádios fenológicos (V5, V6, R1, R3, R7 e R9) descritos por Counce et al. (2000) (Figura 3).

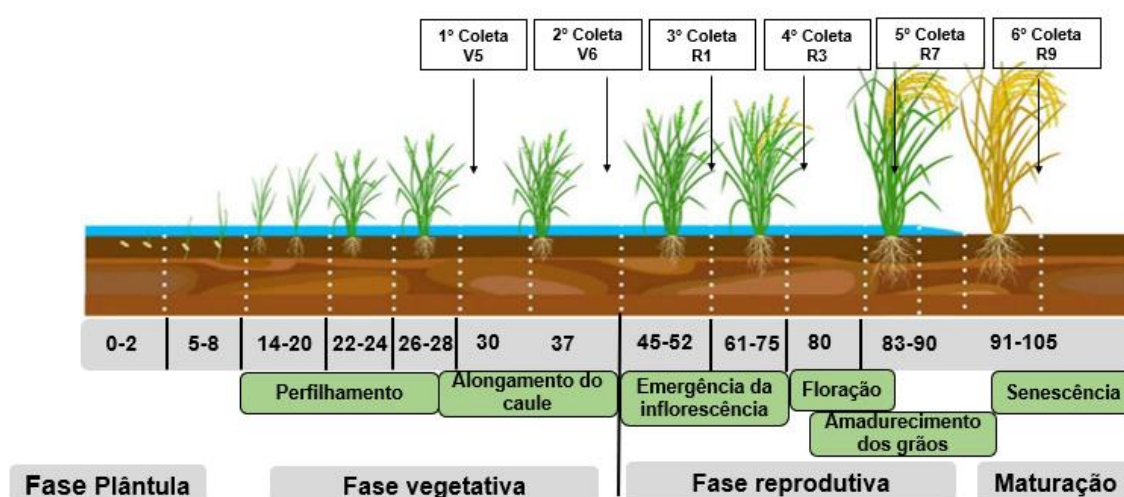


Figura 3. Estádios fenológicos da cultura do arroz de ciclo curto e os tempos correspondentes às coletas.

Fonte: Autor.

A partir do estágio V5, cinco plantas de cada repetição foram coletadas através de arranque manual, para a mensuração das variáveis de crescimento, quantificação do acúmulo de massa seca e análise nutricional, sendo um total de seis coletas, as quais foram efetuadas aos 30; 43; 55; 69; 83, e 99 DAE.

2.4 Variáveis respostas

2.4.1 Acúmulo de graus-dias

As datas de coletas representadas em DAE foram transformadas em graus-dias acumulados (GDA) através da metodologia proposta por Ometto (1981). Neste método, a soma térmica apresenta cinco condicionantes, e no presente estudo as temperaturas atenderam às equações $TB > TM > Tm > Tb$ e $TM > TB > Tm > Tb$.

$$TB > TM > Tm > Tb \quad GD = \frac{TM - Tm}{2} + TM - Tb \quad (1)$$

$$TM > TB > Tm > Tb \quad GD = \frac{2(TM - Tm) \times (Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)}{2(TM - Tm)} \quad (2)$$

em que:

GD: Graus-dia;

TB: temperatura basal superior (30°C);

Tb: temperatura basal inferior (10°C);

TM: temperatura máxima;

Tm: temperatura mínima.

O acúmulo de graus-dia (°C) durante o ciclo da cultura foi calculado utilizando os dados de temperatura máxima e mínima do estágio V5 até a colheita (99 DAE), obtidos pelo INMET. O valor da temperatura basal inferior (Tb) e da temperatura basal superior (TB) do arroz foi de 10°C e 30°C, respectivamente (Vieira; Lunardi, 1997).

2.4.2 Variáveis biométricas

Em cada coleta a altura das plantas (cm) foi mensurada da base até o ápice das folhas com uma fita métrica. O número de folhas foi mensurado através da contagem de folhas vivas e mortas. A área foliar (cm²) foi determinada através do integrador de área foliar Li-Cor (modelo LI-3100).

2.4.3 Acúmulo de massa seca, rendimento de grãos e taxa de crescimento relativo

A cada coleta, as plantas foram particionadas em colmos, folhas e panículas. As plantas colhidas foram lavadas em água corrente, água destilada e detergente neutro (0,1%), e em seguida com ácido clorídrico (0,3%) e, novamente, com água destilada (Boaretto *et al.*, 2009). Em seguida, as plantas foram inseridas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas, e posteriormente pesadas, para a quantificação do teor de massa seca (MS) de cada órgão.

Os valores totais de MS de cada órgão vegetal da planta foram convertidos para kg ha⁻¹, e a MS total da planta foi obtida com o somatório dos valores de MS dos diferentes órgãos (folha, colmo e panícula). O rendimento de grãos foi obtido com o uso de uma moldura de 0,5 m² que foi lançada uma vez em cada parcela. As plantas contidas dentro da moldura foram coletadas e, as panículas foram debulhadas para avaliação da produtividade de grãos.

Após obtido o teor de MS, determinou-se a taxa de crescimento relativo (TCR), conforme Benicasa (2003), através da seguinte equação:

$$\text{TCR (g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}) = \frac{\ln MS_2 - \ln MS_1}{(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

em que:

TCR: Taxa de crescimento relativo;

ln: Logaritmo neperiano;

MS₁ e MS₂: As massas seca nos tempos inicial (t₁) e final (t₂) da avaliação.

2.4.4 Acúmulo e particionamento de macro, micronutrientes e de silício

As amostras de tecido vegetal foram moídas em moinho tipo Wiley a 2 mm e submetidas a análises químicas para a determinação dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) e silício (Si) contidos na parte aérea das plantas e em seus respectivos órgãos, conforme Bataglia *et al.* (1983).

O teor de N foi determinado pelo método Kjeldahl, com a digestão em ácido sulfúrico em presença de catalisadores; os nutrientes: P, K, Ca, Mg, S foram mineralizadas por digestão nitroperclórica. O teor de P foi determinado por colorimetria, K por fotometria de chama, S por turbidimetria e Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica (Bataglia *et al.*, 1983). Os micronutrientes Cu,

Fe, Mn e Zn foram mineralizados por digestão nitroperclórica, sendo o teor determinado por espectrofotometria de absorção atômica. O teor de B no tecido vegetal, determinado utilizando o método da azometina-H (Bataglia *et al.*,1983).

A determinação do teor de Si seguiu o método de digestão úmida proposto por Kraska e Breitenbeck (2010), com adaptações. Inicialmente, foram pesadas 0,1000 g de amostras de tecido vegetal moído e acondicionadas em tubos de polipropileno de 50 ml, previamente lavados com hidróxido de sódio 0,1 M (NaOH), enxaguados com água destilada e secos em ambiente. Para diminuir a formação de espuma, cinco gotas de álcool octílico foram adicionadas às amostras, seguido por 3 ml de peróxido de hidrogênio a 50% (H₂O₂), as quais foram agitadas manualmente por alguns segundos.

Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa de secagem a 120°C por 30 minutos iniciando o tempo de contagem após a estufa atingir a temperatura desejada. Após esse período, os tubos foram retirados, cinco gotas de álcool octílico e 3 ml de hidróxido de sódio (NaOH a 50%) foram adicionados às amostras ainda quentes, com agitação suave. Em seguida, as amostras retornaram à estufa a 120°C por 4 horas.

Após esse tempo, devido à incompleta digestão, foram realizados vários testes até se encontrar a quantidade ideal de reagentes e o tempo necessário para alcançar a completa digestão do material. Nesta etapa, foram realizadas as seguintes adaptações: foram acrescentado 2 ml de peróxido de hidrogênio a 50% (H₂O₂), seguido por mais uma hora na estufa a 120°C. Em sequência, as amostras foram diluídas nos próprios tubos com água destilada até atingir a marca de 50 ml, seguido por agitação suave. Os tubos permaneceram em repouso durante a noite até que os resíduos estivessem depositados no fundo dos tubos.

A leitura foi realizada por colorimetria, utilizando o método amarelo proposto por Korndörfer *et al.* (2004). Para isso, 19 ml de água destilada foram adicionados a copos de plástico de 50 ml, seguido por uma alíquota de 1 ml da amostra diluída em cada copo (a soma do extrato mais a água totalizou 20 ml). Foi acrescentado 1 ml de ácido clorídrico (HCl) a 500 g l, mais 2 ml de molibdato de amônio 0,3M, com posterior agitação. Após 5 minutos, a cor amarela desenvolveu nas amostras com maiores concentrações de silício.

Posteriormente, 2 ml de ácido oxálico foram adicionados, seguido por agitação leve. Após 2 minutos, a leitura foi realizada no espectrofotômetro a 410 nm.

Cabe destacar que a cor amarela é pouco estável, mantendo-se por apenas 15 minutos.

O acúmulo de nutrientes nos diferentes estádios fenológicos foi calculado através da multiplicação do teor de nutrientes pela biomassa de cada parte da planta. O índice de colheita (IC) foi calculado a partir do valor total de nutrientes absorvido pelas plantas e o total contido nos grãos.

2.5 Análise estatística

Os dados apresentaram distribuição normal e foram submetidos à análise de variância por meio do software de análise estatística Sisvar®, versão 5.8 (Ferreira, 2019). Quando significativo, procedeu-se o teste t ($p < 0,05$) para os tratamentos (com e sem calagem), e análise de regressão para os tempos de coleta.

A escolha do modelo matemático mais adequado para cada variável teve com critérios a ocorrência de significância dos parâmetros e um maior coeficiente de determinação (R^2). Os tempos de coleta foram ajustados usando regressão não linear (modelo gaussiano e Lorentiziano), com parâmetros do modelo estimados usando a função de ajuste de curva dinâmica no software SigmaPlot (versão 15.0).

Os modelos gaussiano e Lorentiziano, ambos para a curva de pico, estão descritos nas equações 4 e 5, respectivamente.

$$y = ae \left[-0,5 \left(\frac{x-x_0}{b} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$y = \frac{a}{1 + \left(\frac{x-x_0}{b} \right)^2} \quad (5)$$

em que:

y: variável de crescimento ou acúmulo;

a: valor máximo da variável (independente do modelo escolhido);

X_0 : valor de X no DAE que fornece o máximo valor para as equações de pico ou ponto de inflexão da curva em DAE para a equação sigmoideal;

b: amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo para as equações de pico ou taxa de crescimento ou acúmulo (média) para a equação sigmoideal.

A partir do modelo ajustado, foi possível determinar o valor do ponto de inflexão (PI) na curva, obtido da seguinte equação:

$$PI = x_0 - b \quad (6)$$

Em termos matemáticos, o ponto de inflexão é definido como o valor de X no qual a segunda derivada do modelo ajustado muda de sinal. Esse ponto indica uma mudança na concavidade da curva de acumulação de nutrientes. No contexto deste estudo, ele corresponde ao valor de X para um dado dia após a emergência (DAE), no qual, apesar de a taxa de acúmulo diário ainda ser positiva, observa-se o início de uma diminuição nessa taxa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Acúmulo de graus-dia

O acúmulo de graus-dia é uma ferramenta que auxilia na caracterização do desenvolvimento da cultura do arroz, sendo calculado através das temperaturas críticas exigidas pelas plantas. Neste estudo, a cultivar BRS Sertaneja apresentou a emissão da panícula (R3) com um acúmulo de 1.372 GD e, ao atingir a maturação total (R9), registrou um total acumulado de 1.658 GD (Tabela 1). Vale destacar que o padrão de crescimento do arroz é variável em função da cultivar, do sistema de cultivo e das condições edafoclimáticas (Streck *et al.*, 2022). Entre os fatores climáticos, a temperatura exerce a maior influência no crescimento e, conseqüentemente, no rendimento do arroz (Streck *et al.*, 2022; Heinemann *et al.*, 2024).

Tabela 1. Acúmulo de graus-dia durante o ciclo do arroz em área com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Estádio fenológico	Acúmulo GD	Descrição
30	V5	490	Formação do colar da 5ª folha do colmo principal
43	V6	713	Formação do colar da 6ª folha do colmo principal
55	R1	1.134	Diferenciação da panícula
69	R3	1.372	Emissão da panícula na bainha, ponto acima do colar
83	R7	1.388	Secagem inicial dos grãos
99	R9	1.658	Completa maturidade da panícula

DAE: dias após emergência; GD: graus-dias acumulados

As plantas de arroz atingiram o estágio V6, com a sexta folha completamente desenvolvida, aos 713 GD. O período reprodutivo, compreendido entre os estádios R0 a R9, totalizou 524 GD acumulados. Destaca-se que o início da diferenciação da panícula (R1) ocorreu aos 1.134 GD, enquanto a maturação fisiológica dos grãos foi aos 1.658 GD (Tabela 1).

Plantas de arroz de ciclo curto, cultivadas em sistema irrigado no município de Capão do Leão, Rio Grande do Sul, iniciaram a emissão de panículas (R1) aos 625 GD, com a maturidade fisiológica (R9) ocorrendo aos 1.341 (Steinmetz *et al.*, 2022). Vale destacar, que este trabalho foi conduzido em ambiente com clima e sistema de cultivo diferente do presente estudo e, em virtude disso, apresenta menor soma térmica ao final do ciclo.

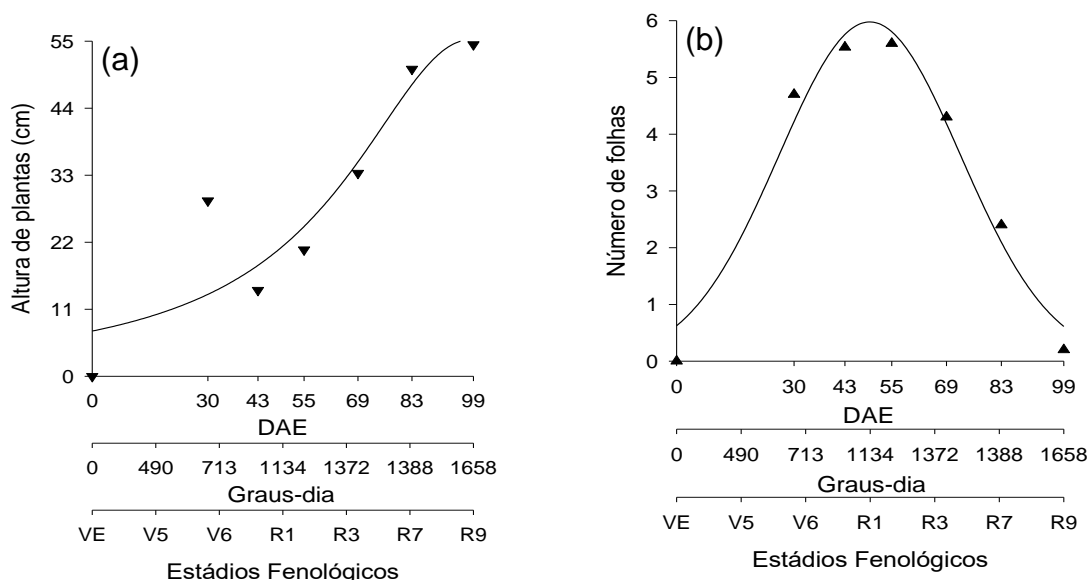
A elevação da temperatura máxima do ar e o aumento do acúmulo de GD ao longo de todo o ciclo do arroz de terras altas tendem a reduzir a produtividade do arroz (Heinemann *et al.*, 2024). Embora as temperaturas possam variar ao longo do ciclo

de cultivo, é importante ressaltar que a temperatura basal superior (TB) do arroz é estipulada em 30°C (Vieira; Lunardi, 1997). Neste contexto, observa-se que as temperaturas máximas ao longo do desenvolvimento das plantas nesse estudo se mantiveram constantes nessa faixa, sem variação significativa no ciclo que pudessem resultar em perdas de produtividade (Figura 1; pag: 75).

3.2 Variáveis biométricas

Os atributos biométricos do arroz, como altura de plantas, número de folhas e área foliar, não apresentaram diferenças significativas para a interação calagem x DAE e para o fator calagem (presença x ausência) isoladamente. Entretanto, verificou-se alteração dos atributos biométricos em função dos DAE (APÊNDICE 6).

As plantas de arroz atingiram altura máxima de 55,24 cm aos 98 DAE (Figura 4a; Tabela 2). Dentre as características da cultivar BRS Sertaneja está o ciclo curto, de aproximadamente 100 dias, e porte intermediário (Breseghello et al., 2006). Essa característica é altamente favorável à cultura, uma vez que plantas menores têm menor possibilidade de acamamento (Jordão et al., 2020). Além disso, colmos mais curtos facilitam no equilíbrio fotossíntese-respiração, proporcionando maior captação de radiação solar e, conseqüentemente, ampliando a produção de compostos orgânicos (Fageria, 1984).



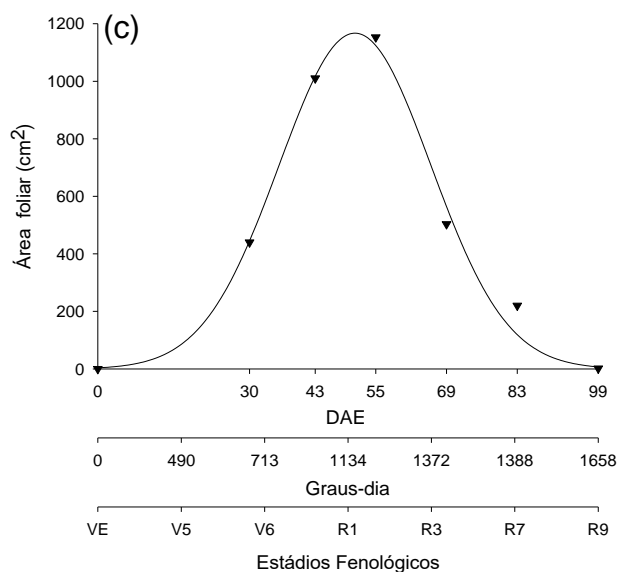


Figura 4. Altura de plantas (a), número de folhas (b) e área foliar (c) de plantas de arroz, em função do acúmulo de graus-dia ao longo ciclo produtivo. Brejo, Maranhão, 2022.

Outro aspecto observado na altura de plantas é que esta cultivar continuou a se desenvolver ao longo de todo ciclo da cultura (Figura 4a). Devido à maturação precoce, esta cultivar apresentou um estágio vegetativo curto, sendo perceptível que as plantas apresentaram um crescimento lento até o estágio V6. Posteriormente, na fase reprodutiva, além de utilizar suas reservas energéticas para formação das panículas (R1), a planta estava realizando alongamento do colmo até o estágio R7. A fase reprodutiva da cultura do arroz é caracterizada pelo alongamento do colmo, redução do número de perfilhos, emergência da folha bandeira (última folha), espigamento e floração (Yoshida, 1981).

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para altura de plantas, número de folhas e área foliar, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz ao longo do seu ciclo. Brejo, Maranhão, 2022.

Variáveis	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾			PI	R^2	Modelo
	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	X_0 ⁽⁴⁾			
Altura de Plantas (cm)	55,24*	38,63 ^{ns}	98*	60	0,85	Lorentziana
Número de folhas	5,98**	23,23*	49**	26	0,97	Gaussiana
Área foliar (cm ²)	1167,26**	15,03**	51**	36	0,99	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significante 1%, 5% e não significante pelo teste t ($p < 0,05$) respectivamente.

As variáveis número de folhas e área foliar apresentaram comportamento semelhante, tendo uma redução a partir do estágio R1. Este é o momento em que a planta deixa de utilizar seus fotoassimilados para a produção de novas folhas, direcionando esses recursos como fonte de nutrientes para a produção de grãos, considerados drenos. Além disso, essa redução está relacionada com a senescência das folhas, seguida pela morte e queda das mesmas (Campos *et al.*, 2008).

O pico estimado para o número de folhas foi de seis por planta, ocorrido aos 49 DAE (Figura 4b; Tabela 2). De maneira similar, os maiores valores de área foliar foram estimados em 1.167,26 cm² aos 51 DAE (Figura 4c; Tabela 2).

3.2 Produtividade de grãos, acúmulo de massa seca e taxa de crescimento relativo

A produtividade do arroz não foi afetada pela calagem e alcançou uma média de 2.836 kg ha⁻¹ (Figura 5), resultado superior à média de 2.040 kg ha⁻¹ do estado do Maranhão na safra 2021/22 (CONAB, 2022)

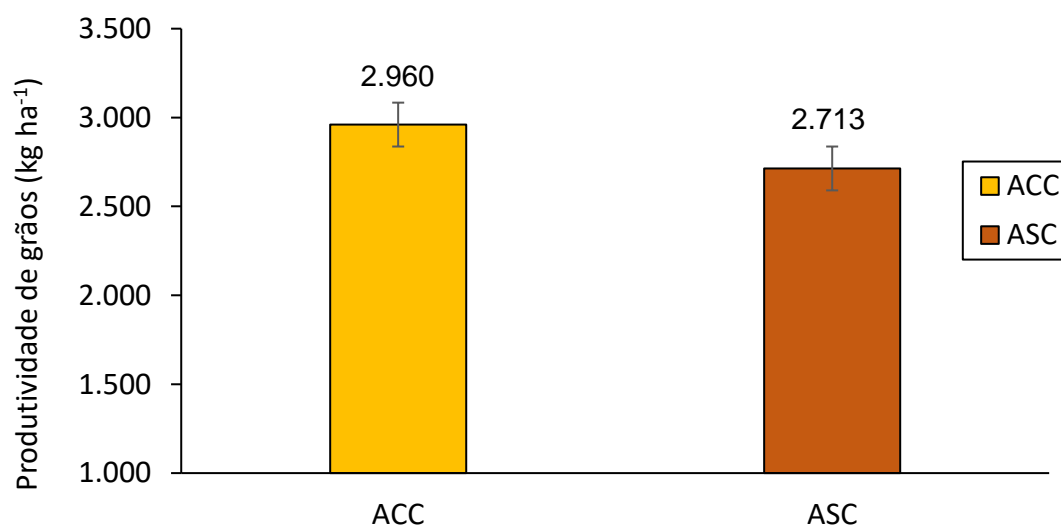


Figura 5. Produtividade de arroz em área com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Mesmo na ausência da correção do solo (ASC), o arroz respondeu de maneira positiva, alcançando uma produtividade considerável. Isto está relacionado à capacidade dessa cultura de se adaptar a diferentes ambientes, incluindo solos de baixa fertilidade e com concentrações tóxicas de alumínio (Al) (Mendonça *et al.*, 2003). Existe entre as cultivares de arroz, ampla variação quanto à tolerância ao Al (Fageria *et al.*, 2015).

Nas condições deste estudo, realizado em área de abertura no Cerrado maranhense, o solo inicialmente apresentava uma elevada saturação de Al, em torno de 53%, baixo pH, baixos níveis de fósforo, além de baixas concentrações dos demais nutrientes essenciais (Tabela 1A, pg:42). Na ASC, embora não tenha sido utilizado calcário para correção, foi aplicado gesso, um condicionador de solo capaz de movimentar os cátions, especialmente o cálcio, em profundidade (Caires *et al.*, 2003). Esse processo contribuiu para a redução do teor de Al tóxico (APÊNDICE 5, pg:125), melhorando a solução do solo e, conseqüentemente, a planta teve uma maior área de exploração do solo, crescimento de raízes em subsuperfície, aumentando a eficiência na utilização dos nutrientes (Brasil *et al.*, 2020), e favorecendo a produtividade dos grãos. Portanto, o uso do gesso pode ter contribuído para amenizar a não aplicação do calcário, conforme o resultado verificado na produção de grãos na ausência da calagem.

Acúmulo de massa seca

Houve efeito de DAE para todas as partições da planta que foram analisadas quanto ao acúmulo de massa seca (MS), mas não houve efeito da calagem e nem da interação (APÊNDICE 7).

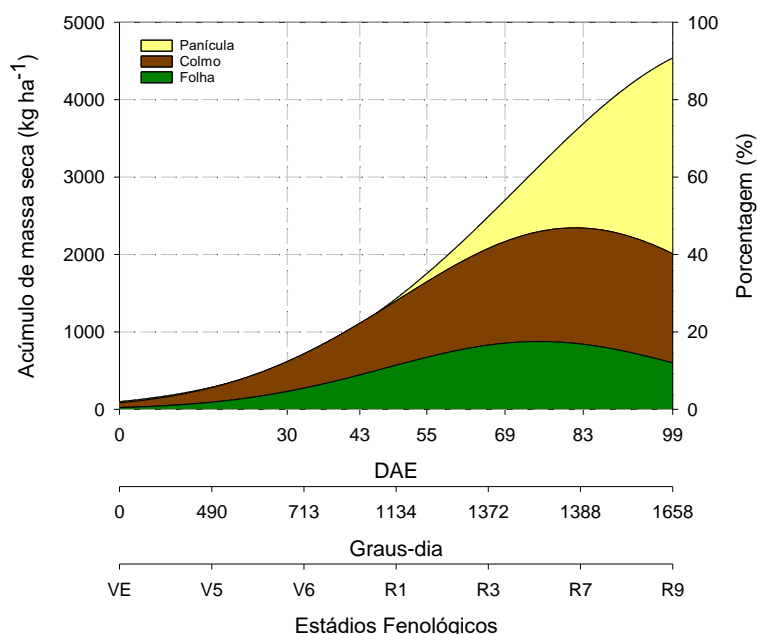


Figura 6. Acúmulo e particionamento da massa seca na cultura do arroz em função da soma térmica e estágio fenológico. Brejo, Maranhão, 2022.

Houve um lento acúmulo de MS total até os 43 DAE, intensificando-se entre os dias 55 a 83 DAE. Colmos e folhas foram as partes da planta com maior aumento no acúmulo de MS até os 55 DAE (Figura 6). A partir da diferenciação da panícula (R1), observou-se a translocação dos fotoassimilados do colmo e da folha para a formação da panícula. No final do ciclo, a panícula teve maior participação no acúmulo de MS entre os órgãos vegetais avaliados (Tabela 3).

Esses resultados são coerentes com o que é descrito na literatura por Crusciol et al. (2016), que indicam que cultivares de arroz, como BRS Primavera, são mais eficientes na partição de fotoassimilados para o crescimento de panículas e que o acúmulo de MS das panículas durante o período reprodutivo final foi muito maior que o das partes vegetativas. Sánchez-Reinoso et al. (2019) também observaram que as cultivares de arroz apresentam maior acúmulo de MS nas panículas e nos caules durante o final do período reprodutivo.

Tabela 3. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para massa seca da folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz, ao longo de seu ciclo. Brejo, Maranhão, 2022.

Partições	Massa Seca			PI	R^2	Modelo
	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾					
	a ⁽²⁾ kg ha ⁻¹	b ⁽³⁾ -----DAE-----	X ₀ ⁽⁴⁾			
Folha	874,51**	27,54*	75,07**	48	0,97	Gaussiana
Colmo	2.343,88*	31,52*	81,50**	50	0,94	Gaussiana
Panícula	4.540,28*	32,40*	102,71*	70	0,97	Gaussiana
Total	4.774,66*	40,11*	111,79*	72	0,99	Gaussiana

Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em kg ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t ($p < 0,05$), respectivamente.

A curva gaussiana foi a que melhor explicou os dados de acúmulo de MS total e as partições da planta de arroz (Tabela 3). Os picos de máximo acúmulo de MS nas folhas, colmos e panículas ocorreram, respectivamente, aos 75, 81 e 102 DAE. No estágio R6, os colmos atingiram o maior acúmulo (2.344 kg ha⁻¹), enquanto nas panículas, o ponto máximo foi alcançado no final do ciclo da cultura, aos 102 DAE, totalizando 4.540 kg ha⁻¹. A MS total foi de 4.744 kg ha⁻¹ ao final do ciclo (Tabela 3).

Taxa de crescimento relativo

A taxa de crescimento relativo (TCR) é um indicador que representa o acúmulo de matéria seca da planta ou de suas partições durante um intervalo de tempo, relacionado ao peso inicial (Lemes *et al.*, 2018).

Tabela 4. Taxa de crescimento relativo da folha, colmo, panícula e total de arroz com e sem calagem, em função do acúmulo de graus-dia ao longo do ciclo produtivo. Brejo, Maranhão, 2022.

Arroz com calagem					
Estádio Fenológico	Período	Folhas	Colmo	Panícula	Total
	Graus-dia	----- g g ⁻¹ graus-dia ⁻¹ -----			
V5-V6	490-713	0,0542	0,0047	-	0,0040
V6-R1	713-1134	0,0462	0,0016	-	0,0015
R1-R3	1134-1372	0,0198	0,0011	-	0,0089
R3-R7	1372-1388	-0,0235	-0,0122	0,0606	0,0468
R7-R9	1388-1658	-0,0005	0,0002	0,0271	0,0015
Arroz sem calagem					
Estádio Fenológico	Período	Folhas	Colmo	Panícula	Total
	Graus-dia	----- g g ⁻¹ graus-dia ⁻¹ -----			
V5-V6	490-713	0,0459	0,0037	-	0,0032
V6-R1	713-1134	0,0264	0,0015	-	0,0012
R1-R3	1134-1372	0,0279	0,0004	-	0,0089
R3-R7	1372-1388	-0,0077	-0,0079	0,0585	0,0460
R7-R9	1388-1658	-0,0178	0,0017	0,0404	0,0023

A TCR do ACC apresentou maiores valores para as folhas e o colmo entre os estádios V5 e V6, apresentando 0,0542 e 0,0047 g g⁻¹ graus-dia⁻¹, respectivamente (Tabela 4). No caso da panícula, a fase de maior crescimento foi observada entre R3 e R7. Esse período coincide com a translocação dos fotoassimilados das folhas e colmos para a produção de grãos, por isso estas partições apresentaram valores negativos. De maneira semelhante, a maior TCR da planta inteira foi de 0,0468 g g⁻¹ graus-dia⁻¹, ocorrendo neste mesmo período da panícula devido a maior produção de grãos.

Desta forma, observou-se que houve redução da TCR das folhas e colmos do ACC e do ASC à medida que os estágios fenológicos avançaram (Tabela 4). Essa redução está relacionada com o processo de senescência das folhas e de outras partições da planta, além de ser influenciada pelo aumento de tecidos não assimilatórios (Taiz; Zeiger, 2010; Alvarez *et al.*, 2012).

Embora não tenha sido realizada análise estatística entre a TCR do ACC e do ASC, observou-se que o comportamento dessas variáveis foi consistente com a resposta biológica esperada. Na ACC, por conta da correção do solo e da adubação, as plantas apresentaram condições favoráveis para a assimilação dos nutrientes, contribuindo para o incremento da produção de MS.

Na ASC, folhas e colmos apresentaram as maiores TCR no mesmo período, compreendido entre os estádios fenológicos V5 e V6 (Tabela 4). A TCR da panícula foi máxima no período entre os estádios R3 e R7, coincidindo com o maior incremento de MS nessa partição, quando a planta está no estágio reprodutivo.

3.3 Acúmulo de nutrientes em plantas de arroz

3.3.1 Acúmulo de macronutrientes

Houve interação significativa entre calagem e DAE no acúmulo de nitrogênio (N) nas folhas de arroz. Além disso, houve efeito de DAE para todas as partições da planta que foram analisadas quanto ao acúmulo de N (APÊNDICES 8, 9, 10 e 11).

A calagem proporcionou um aumento no acúmulo de N nas folhas das plantas de arroz, em comparação com o ASC (APÊNDICE 8). Além disso, verifica-se um pico de acúmulo de N nas folhas da ACC aos 69 e 83 DAE (Tabela 5). É importante ressaltar que a absorção de nutrientes é influenciada pelas formas iônicas presentes na solução do solo, sendo esse processo dependente da acidez do solo e das concentrações gerais de nutrientes disponíveis (Mansingh *et al.*, 2019).

Em solos com valores baixos de pH, caracterizados por altas concentrações de íons H⁺, ocorre competição pelo N na forma de amônio, resultando na inibição de sua absorção pelas plantas (Prado, 2020). No caso do ACC, a correção do solo elevou o pH, aumentando a disponibilidade de N e, por conseguinte, promovendo uma maior absorção desse nutriente pelas plantas. Assim, é importante manter um equilíbrio na faixa de pH para não prejudicar a taxa de absorção de N pelas plantas (Prado, 2020).

Na fase inicial de desenvolvimento da cultura, as quantidades acumuladas na folha e colmo até os 43 DAE foram de apenas 10 e 19 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 7a). Esse cenário é atribuído à absorção limitada de nutrientes devido ao crescimento inicial lento da cultura, resultando em baixo acúmulo de MS. Contudo, a partir dos 55 DAE, observa-se um aumento no acúmulo do nutriente. À medida que a cultura se desenvolve, especialmente nos estádios fenológicos de R1 e R3, ocorre uma maior demanda de N (Fageria, 1984).

Tabela 5. Acúmulo de nitrogênio no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Nitrogênio (kg ha ⁻¹)							
	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	8,1 a	8,9 a	4,5	4,4	-	-	12,6	13,4
43	10,5 a	11,3 a	6,5	6,0	-	-	17,0	17,3
55	13,5 a	9,5 a	8,9	7,0	-	-	22,5	16,5
69	21,1 a	10,0 b	7,3	5,9	7,0	6,0	35,5	21,9
83	14,5 a	8,7 b	5,2	4,4	14,7	12,8	34,4	25,9
99	4,2 a	3,6 a	5,8	7,4	28,6	30,6	38,7	41,6

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

O ponto de máxima absorção de N nas folhas da ACC ocorreu aos 66 DAE, atingindo 19 kg ha⁻¹, enquanto nos colmos foi aos 65 DAE, com 26 kg ha⁻¹. A partir desses pontos de máximo acúmulo nessas partições da planta, observou-se uma redução contínua desse nutriente até o final do ciclo, devido à translocação do N para as panículas. O máximo acúmulo nas panículas ocorreu aos 89 DAE, totalizando 39 kg ha⁻¹ (Tabela 6). No estágio R7, 76% do N absorvido estava presente nos grãos.

Tabela 6. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de nitrogênio nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	c ⁽⁵⁾	X ₀ ⁽⁴⁾			
	kg ha ⁻¹	-----DAE-----					
Arroz com calagem							
Folha	18,80*	22,13*	-	66**	44	0,90	Gaussiana
Colmo	26,31**	25,33*	-	65**	39	0,96	Gaussiana
Panícula	39,06**	31,87*	-	89**	58	0,97	Gaussiana
Total	38,30**	39,09*	-	92*	53	0,97	Gaussiana
Arroz sem calagem							
Folha	11,39*	34,97*	-	55*	20	0,79	Lorentziana
Colmo	18,00*	38,95*	-	59*	20	0,79	Lorentziana
Panícula	49,72 ^{ns}	39,50*	-	117*	78	0,96	Lorentziana
Total	40,67 ^{ns}	25,27 ^{ns}	1,00 ^{ns}	100 ^{ns}	74	0,93	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em kg ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

No caso do ASC, o ponto de máximo acúmulo de N nas folhas ocorreu aos 55 DAE, atingindo 11 kg ha^{-1} , enquanto nos colmos foi aos 59 DAE, com 18 kg ha^{-1} (Tabela 6). Ocorreu um menor acúmulo de N nas diferentes partições da planta de arroz na área sem correção (Figura 7b). Aos 60 DAE, as folhas e colmos acumularam em torno de 22% e 36%, respectivamente, de N. No mesmo período, na ACC, observou-se um acúmulo mais expressivo, com as folhas atingindo 38% e os colmos 56% de N.

Entre os fatores que podem ter influenciado para o menor acúmulo de N no ASC, destaca-se o nível de acidez. No solo antes do cultivo, o pH em água dessa área estava em 5,10, e após o plantio, ficou em torno de 4,48 (Tabela 1-pg:45; APÊNDICE 5). Essa condição impacta a dinâmica do N no solo ao influenciar a população de microrganismos responsáveis pelas transformações desse nutriente (Rosolem; Cordeiro, 2022). A faixa adequada de pH para a produção agrícola está entre 5,5 e 6,5 na superfície, o que favorece a mineralização da matéria orgânica e a atividade microbiana, contribuindo para aumentar a disponibilidade de N para as plantas (Rosolem; Cordeiro, 2022).

A ausência de calagem reduz o potencial de resposta do arroz de terras altas à adubação nitrogenada, além de reduzir a eficiência no uso do N (Crusciol *et al.*, 2022).

Ao contrário do N, o acúmulo do fósforo (P) apresentou interação entre calagem e DAE para todas as partições da planta de arroz. Além disso, houve efeito de DAE para todas as partições da planta que foram analisadas sobre o acúmulo de P, mas não houve efeito de calagem isoladamente (APÊNDICES 8, 9, 10 e 11).

A disponibilidade de P é um dos principais fatores limitantes para a produção de arroz de terras altas (Crusciol *et al.*, 2013). A aplicação de calcário e a adubação resultaram em aumento na disponibilidade de P no solo. Antes da correção, o teor desse nutriente na camada até 20 cm estava em torno de $1,54 \text{ mg dm}^{-3}$, e após a correção e a adubação, foi para $7,92 \text{ mg dm}^{-3}$, o que representa um aumento de 414% (Tabela 1-pg:45; APÊNDICE 1), conseqüentemente aumentando o acúmulo de P pelas plantas do ACC (Tabela 7).

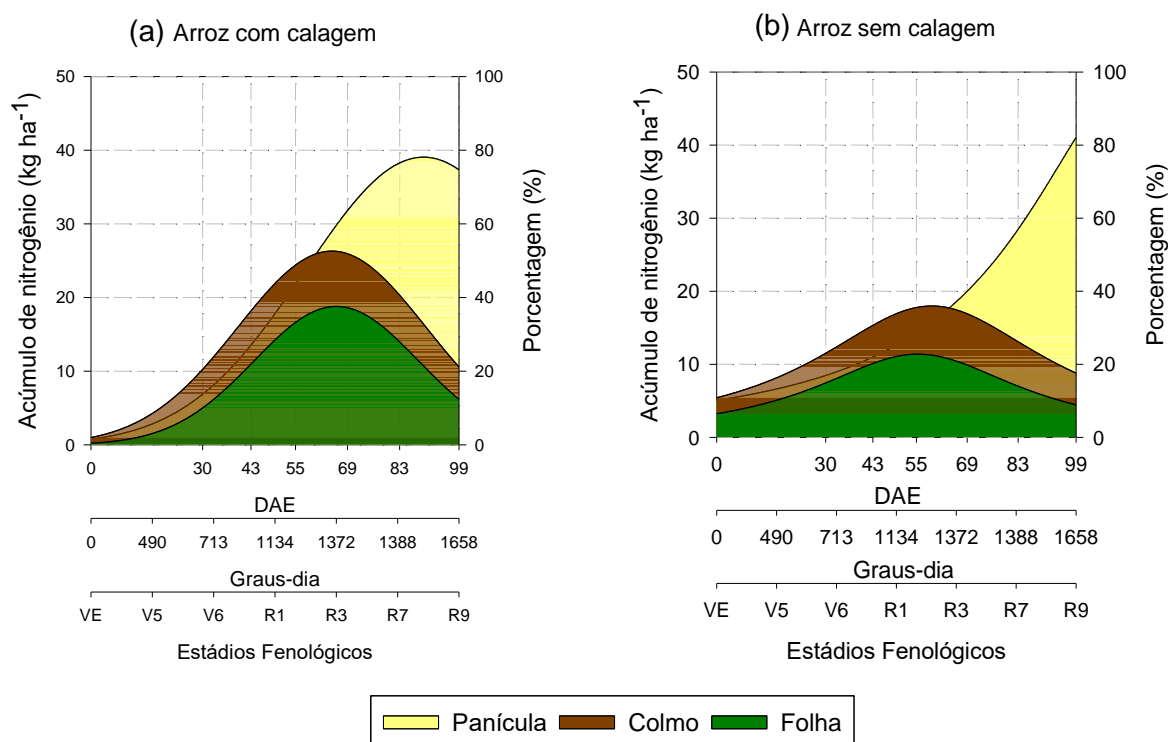


Figura 7. Acúmulo e particionamento do nitrogênio em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

O pH do solo desempenha um papel fundamental na disponibilidade de P (Prado, 2022). Nesse contexto, a prática da calagem, ao elevar o pH do solo e reduzir a concentração de óxidos de Fe e Al, íons responsáveis pela fixação do P na forma de fosfato insolúvel (Lepsch *et al.*, 2011), contribuiu para o aumento da concentração de P no solo do ACC, favorecendo a absorção pelas plantas.

Tabela 7. Acúmulo de fósforo no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Fósforo (kg ha ⁻¹)							
	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	0,27 a	0,39 a	0,34 a	0,33 a	-	-	0,62 a	0,72 a
43	0,52 a	0,49 a	0,78 a	0,64 a	-	-	1,30 a	1,13 a
55	0,22 a	0,22 a	0,38 a	0,39 a	-	-	0,61 a	0,61 a
69	1,10 a	0,63 b	1,37 a	0,54 b	1,06 a	0,68 a	3,54 a	1,85 b
83	0,83 a	0,69 a	0,33 a	0,40 a	1,76 a	1,84 a	2,92 a	2,93 a
99	0,16 a	0,18 a	1,48 a	1,69 a	4,30 a	2,64 b	5,94 a	4,52 b

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste "t" ao nível de 5% de significância.

O acúmulo de P nas plantas de arroz do ACC foi mais expressivo nos colmos em todos os estádios vegetativos, indicando que esse órgão é o principal local de armazenamento de P (Tabela 7; Figura 8a). Aos 43 DAE, as folhas e os colmos apresentavam aproximadamente 13% e 8,6% de P, respectivamente. O pico de acúmulo desse nutriente nas folhas ocorreu aos 73 DAE, totalizando 1,36 kg ha⁻¹, o que representa 22,7% de P, enquanto no colmo, o ponto de máximo acúmulo foi aos 71 DAE, atingindo um total de 2,26 kg ha⁻¹, correspondendo a 37,7% de P (Tabela 8).

Tabela 8. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de fósforo nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Fósforo							
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾ kg ha ⁻¹	b ⁽³⁾	c ⁽⁵⁾ -----DAE-----	X ₀ ⁽⁴⁾			
Arroz com calagem							
Folha	1,36 ^{ns}	8,68 ^{ns}	1,00 ^{ns}	73*	64	0,79	Gaussiana
Colmo	2,26 ^{ns}	16,15 ^{ns}	1,00 ^{ns}	71*	55	0,61	Gaussiana
Panícula	6,09 ^{ns}	23,51 ^{ns}	-	103*	80	0,87	Lorentziana
Total	7,22 ^{ns}	29,04*	-	113*	84	0,88	Lorentziana
Arroz sem calagem							
Folha	0,72 ^{ns}	18,29 ^{ns}	1,00 ^{ns}	74*	56	0,56	Gaussiana
Colmo	1,80 ^{ns}	29,91 ^{ns}	1,00 ^{ns}	100 ^{ns}	70	0,77	Gaussiana
Panícula	5,00*	28,48*	-	112*	83	0,87	Gaussiana
Total	4,74 ^{ns}	14,79 ^{ns}	1,00 ^{ns}	98*	83	0,98	Gaussiana

Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em kg ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

**, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

A partir dos 69 DAE, com o desenvolvimento das panículas, observou-se uma translocação significativa desse nutriente para os grãos, atingindo o pico máximo de acúmulo aos 103 DAE, totalizando 6 kg ha⁻¹ (Tabela 8). No final do ciclo, 95% do P estava alocado nos grãos, o que evidencia a importância desse nutriente no desenvolvimento e composição dos grãos de arroz.

Em solos do cerrado, o P é identificado como o nutriente determinante do número de panículas em plantas de arroz. Isto ocorre pelas suas funções no metabolismo da planta, concentrando-se nas áreas mais ativas de crescimento da

planta, sendo que sua falta retarda o crescimento e a planta não se recupera, limitando a produção de grãos (Fageria; Barbosa Filho, 1994).

No tratamento ASC, observa-se um acúmulo gradual de P nas folhas e colmos até os 74 DAE, atingindo aproximadamente 10,5% e 9,0%, respectivamente (Figura 8). O ponto de máximo acúmulo nas folhas ocorre aos 74 DAE, alcançando cerca de 0,72 kg ha⁻¹. Após esse ponto, há uma queda devido à translocação para os grãos. No caso do colmo, o acúmulo é crescente ao longo de todo o período analisado, atingindo o pico máximo aos 100 DAE, com um total de 1,80 kg ha⁻¹ de P (Tabela 8; Figura 8b). As panículas atingem o máximo acúmulo aos 112 DAE, com um total de 5 kg ha⁻¹ de P, apresentando comportamento semelhante ao tratamento da ACC. Entretanto, ao final do ciclo, apenas 78% do P estava alocado nos grãos.

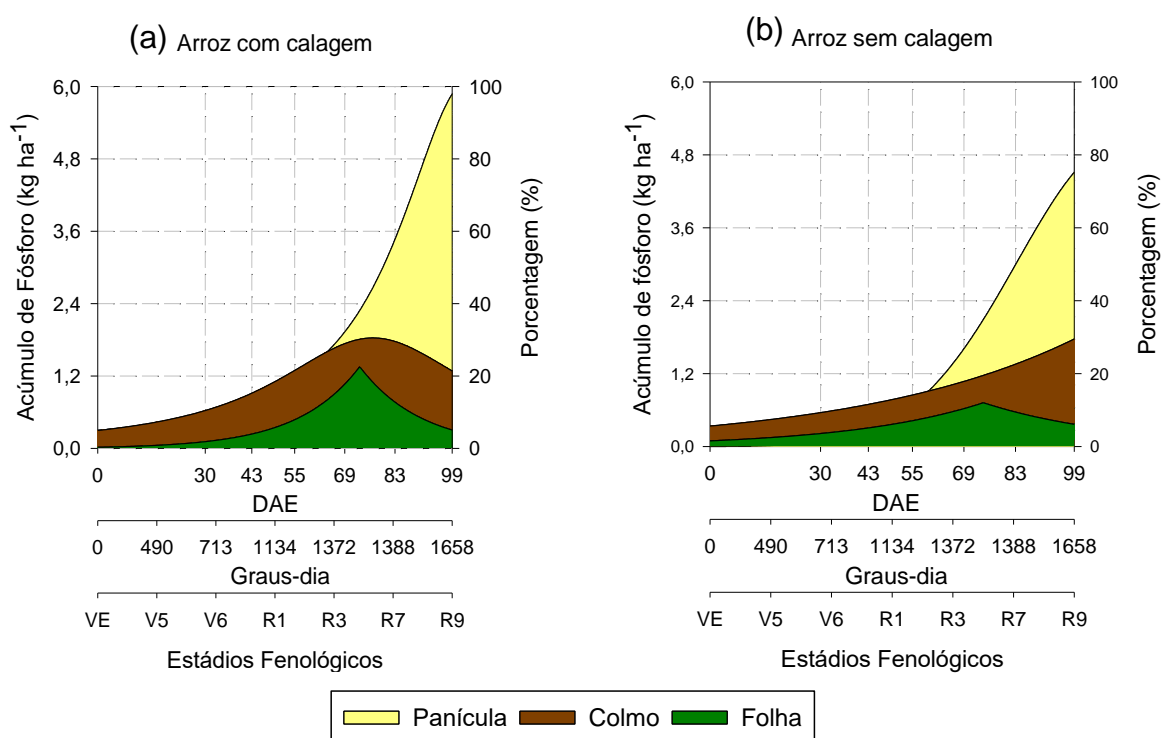


Figure 8. Acúmulo e particionamento do fósforo em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Não houve interação entre calagem e DAE para o acúmulo de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em todas as partições da planta. Entretanto, ocorreu diferença de DAE para todas as partições da planta analisadas, enquanto não houve efeito de calagem para todas as plantas (APÊNDICES 8, 9, 10 e 11).

O K é o segundo nutriente mais utilizado na produção agrícola, após o fósforo. Geralmente, nos solos tropicais, esse nutriente apresenta baixas concentrações, o que limita a produção das culturas (Prado, 2020).

O ponto de máxima absorção de K nas folhas ocorreu aos 55 DAE, totalizando 9 kg ha⁻¹. O colmo foi o órgão vegetal com o maior acúmulo de K, sendo que o pico ocorreu aos 54 DAE, atingindo 21 kg ha⁻¹, representando 96% do nutriente. Nas panículas, o máximo acúmulo foi ao 75 DAE, alcançando 12 kg ha⁻¹. O acúmulo desse nutriente na planta total ocorreu aos 58 DAE, com 17 kg ha⁻¹ (Tabela 9; figura 9a). A folha foi a partição com menor acúmulo, representando apenas 40% do K aos 55 DAE.

Resultado divergente do encontrado neste trabalho foi relatado por Crusciol et al. (2012), ao avaliarem a eficiência de absorção de nutrientes pelas cultivares de arroz Caiapó e Maravilha, em resposta à calagem, observaram que a calagem influenciou a absorção dos nutrientes K, Ca, Mg e S. No caso do acúmulo de K, para ambos os genótipos, as maiores concentrações ocorreram na dose de 3,8 tonelada por hectare de calcário. Em nosso estudo foi utilizado apenas a dose de 3 toneladas por hectare no tratamento do ACC, e apesar da aplicação do calcário e da adubação potássica, não foi encontrada diferença entre os tratamentos.

Além disso, seguindo os manuais de exigências nutricionais do arroz, verifica-se que a concentração acumulada ao longo do ciclo foi baixa para o arroz de terras alta, totalizando apenas 17 kg ha⁻¹ (Fageria et al., 1995). Isso pode estar relacionado às condições locais do experimento, no plantio foi realizado apenas uma adubação com 30 kg de cloreto de potássio. Em solos do cerrado e áreas de abertura, a recomendação para baixa e média disponibilidade de K disponível no solo é de 50 a 100 kg ha⁻¹ de K₂O (Sousa; Lobato, 2004). Neste caso, a quantidade aplicada na área foi inferior à recomendação. Isso ocorre pois os produtores não priorizam a fertilização específica da cultura do arroz, devido ao elevado investimento necessário (Garcia et al., 2022).

Tabela 9. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de macronutrientes nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	c ⁽⁵⁾	X ₀ ⁽⁴⁾			

	kg ha ⁻¹		-----DAE-----				
Potássio							
Folha	8,96*	13,72*	1,21*	55*	41	0,95	Gaussiana
Colmo	20,96*	14,62 ^{ns}	1,00 ^{ns}	54*	39	0,88	Gaussiana
Panícula	12,12**	27,36**	-	75**	48	0,98	Gaussiana
Total	17,15*	28,18*	-	58**	30	0,85	Gaussiana
Cálcio							
Folha	9,54*	13,67*	-	51**	38	0,81	Gaussiana
Colmo	10,44*	14,36*	-	52**	37	0,78	Gaussiana
Panícula	9,89*	15,23*	-	53**	38	0,71	Gaussiana
Total	10,12*	15,66*	-	52**	36	0,74	Gaussiana
Magnésio							
Folha	7,13*	18,44*	-	72**	53	0,94	Gaussiana
Colmo	11,21**	21,86*	-	73**	51	0,97	Gaussiana
Panícula	13,18**	19,98**	-	77**	57	0,99	Gaussiana
Total	12,74**	22,27**	-	76**	54	0,99	Gaussiana
Enxofre							
Folha	1,47**	14,21**	-	76**	62	0,95	Lorentziana
Colmo	6,22 ^{ns}	10,91 ^{ns}	-	99 ^{ns}	88	0,97	Gaussiana
Panícula	8,10**	17,65**	-	103**	85	0,97	Lorentziana
Total	7,20*	20,96*	-	104*	83	0,98	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em kg ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

**, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t ($p < 0,05$), respectivamente.

Apesar da baixa absorção desse nutriente pelas plantas de arroz, o K é essencial, pois participa de diversas funções, incluindo a ativação enzimática. Além disso, desempenha um papel fundamental na regulação da abertura e fechamento dos estômatos das plantas (Prado, 2020).

A calagem, além de neutralizar a acidez, é uma fonte de Ca e Mg, promovendo melhoria na fertilidade do solo e, conseqüentemente na nutrição das plantas (Sousa; Lobato, 2004). No entanto, apesar da aplicação de calcário e gesso, não houve diferença nos tratamentos do ACC e ASC para Ca e Mg. O resultado esperado seria a existência de diferenças, conforme reportado por alguns autores que estudaram a influência da calagem na absorção de nutrientes pelo arroz (Wielewicki *et al.*, 1998; Fageria, 2000; Crusciol *et al.*, 2012; Mansingh *et al.*, 2019).

Os trabalhos citados acima foram conduzidos em casa de vegetação, com exceção do último autor. Esses estudos utilizaram solos provenientes da camada arável, realizando os procedimentos de incubação para a reação da calagem e fertilizantes antes da instalação dos experimentos, o que é considerado ideal. Nas condições deste estudo, o cenário é distinto, pois foi conduzido em campo, em solo

de cerrado, e a aplicação do calcário ocorreu apenas um mês antes do cultivo da cultura, período que coincide com o início das chuvas.

O calcário deve ser aplicado dois a três meses antes do plantio, pois apresenta baixa solubilidade e reação lenta. Além disso, é necessário umidade no solo, para que as reações ocorram (Ribeiro *et al.*, 1999; Sousa; Lobato, 2006).

O acúmulo de Ca nas plantas de arroz foi mais expressivo nas folhas em todos os estádios vegetativos, indicando que esse órgão é o principal local de armazenamento de Ca (Figura 9b). Esse comportamento pode estar associado à maior taxa de transpiração nas folhas, favorecendo uma maior absorção de Ca (Prado, 2020). Aos 43 DAE, as folhas apresentavam aproximadamente 38% de Ca. O pico de acúmulo desse nutriente nas folhas ocorreu aos 51 DAE, totalizando 9,54 kg ha⁻¹, o que representa 80% de Ca. No colmo, o ponto de máximo acúmulo ocorreu aos 52 DAE, atingindo um total de 10,44 kg ha⁻¹. A partir dos 55 DAE, com o desenvolvimento das panículas, observou-se o máximo acúmulo de Ca, atingindo um total de 9,89 kg ha⁻¹. No final do ciclo, verificou-se uma distribuição uniforme em cada órgão vegetal das plantas de arroz ao acúmulo de Ca (Figura 9b).

Essa distribuição uniforme entre os órgãos da planta relaciona-se a uma das principais funções desse nutriente, que consiste na contribuição para a estrutura da planta como integrante da parede celular. Essa função aumenta a resistência mecânica dos tecidos, auxiliando as plantas na prevenção de acamamento (Prado, 2020).

No caso do Mg, observa-se um acúmulo lento nas folhas e no colmo até os 43 DAE, alcançando 12,5% e 20% de Mg, respectivamente (Figura 9c). A partir da diferenciação da panícula (R1), foram verificados picos acelerados de absorção. Na folha, esse pico ocorreu aos 72 DAE, totalizando 7 kg ha⁻¹, enquanto no colmo, apesar do pico de absorção ser próximo, foi aos 73 DAE, com um total de 11 kg ha⁻¹. Ao final do ciclo, as panículas apresentaram o maior acúmulo de Mg, com 98% desse nutriente alocado nos grãos.

As folhas de arroz tiveram o menor acúmulo de S ao longo de todo o desenvolvimento da cultura, apresentando no final do ciclo apenas 5,8% desse nutriente. No colmo, observou-se um crescimento contínuo na absorção de S, atingindo o pico aos 99 DAE, com um total de 6,22 kg ha⁻¹. As panículas destacaram-se como o órgão com maior acúmulo de S, apresentando absorção até o final do ciclo e acumulando 92% de todo o S (Figura 9d).

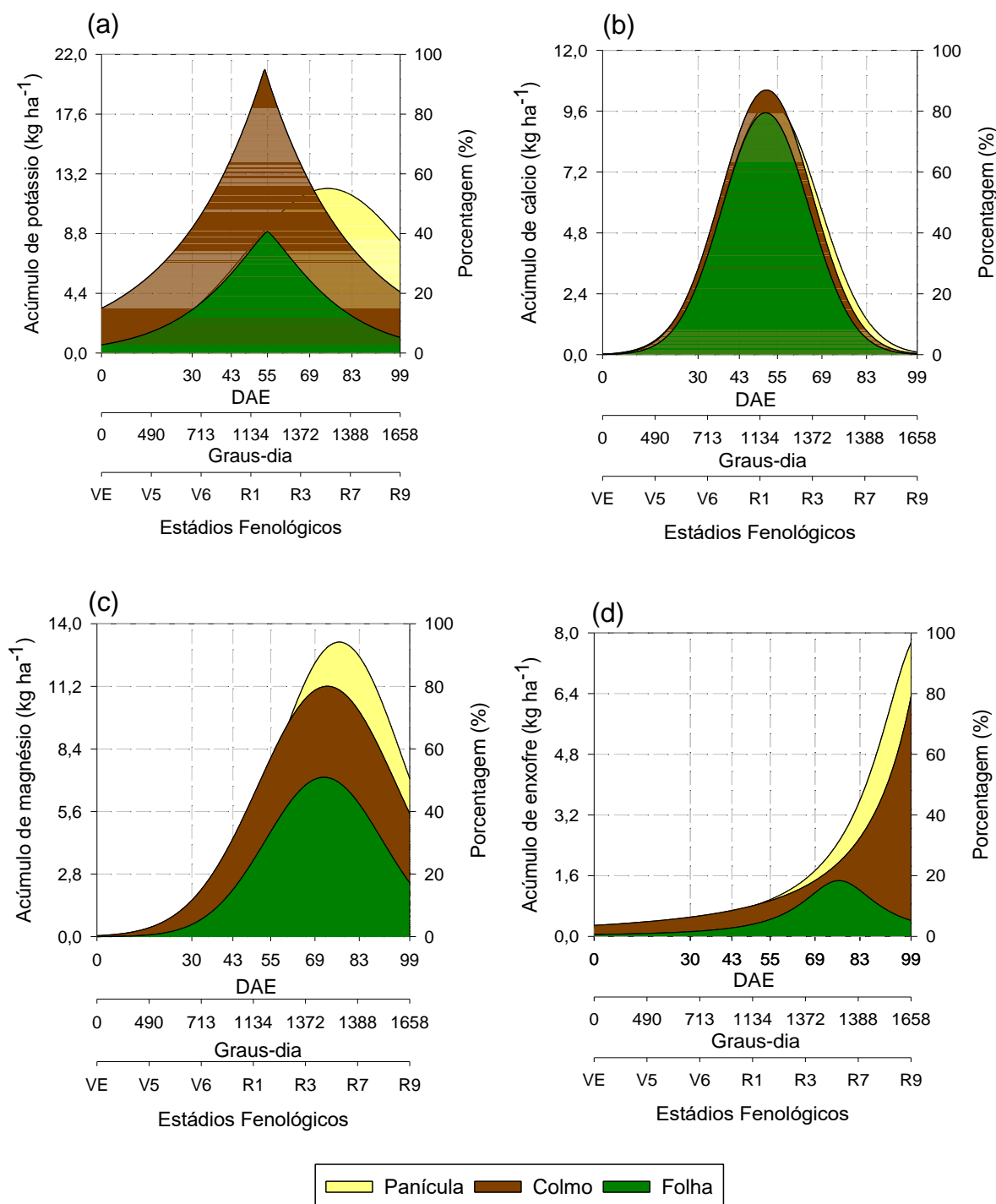


Figura 9. Acúmulo e particionamento do potássio (a), cálcio (b), magnésio (c) e enxofre (d) (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Considerando os resultados obtidos, o acúmulo de macronutrientes em plantas de arroz seguiu a ordem decrescente: N>K>Mg>Ca>S>P.

3.3.2 Acúmulo de micronutrientes

O acúmulo de boro (B) no colmo e na planta inteira foi influenciado pela interação entre calagem e DAE. Além disso, ocorreu diferença de DAE para todas as partições da planta analisada, enquanto não houve efeito de calagem (APÊNDICES 12, 13, 14 e 15).

Em geral, a disponibilidade dos micronutrientes tende a diminuir à medida que o pH do solo aumenta, com exceção do molibdênio e do cloro (Lopes, 1998). No caso específico do B, a sua disponibilidade no solo é adequada em faixas de pH entre 5,0 e 7,0. Analisando as características químicas dos solos do ACC e ASC, percebe-se que a área sem correção apresenta um solo ácido, o que pode limitar a absorção desse nutriente (APÊNDICES 1 e 5). Outro fator relevante a ser considerado é a matéria orgânica do solo (MO), pois ela é a principal fonte de B para as plantas (Prado, 2020). Em ambas as áreas, a concentração de MO estava em torno de 25 g kg, quantidade considerada adequada para as condições de cerrado (Sousa; Lobato, 2004).

No presente estudo, as aplicações de B foram realizadas por meio de adubações foliares. A mobilidade desse nutriente está relacionada ao método de fornecimento e a cultura considerada. Em aplicações via solo, após absorção e acumulação, o B permanece imóvel nas folhas devido à sua imobilidade no floema. Por outro lado, em aplicações foliares, o nutriente apresenta maior mobilidade (Malavolta, 2006).

O acúmulo de B nas plantas de arroz da ACC houve diferença no colmo e na planta inteira, entre os 55 e 69 DAE (Tabela 10). Nos primeiros 30 DAE, o acúmulo de B no colmo foi lento, atingindo cerca de 8,5%, enquanto que nas folhas esse acúmulo começou a ocorrer a partir dos 43 DAE, apresentando 3,5% de B (Figura 10a).

Tabela 10. Acúmulo de boro no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Boro (g ha ⁻¹)							
	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	2,9	5,2	4,9 a	3,9 a	-	-	7,9 a	9,1 a
43	7,6	12,5	6,5 a	5,2 a	-	-	14,1 a	17,7 a
55	6,5	5,8	16,7 a	12,7 b	-	-	23,2 a	18,3 a
69	27,4	23,6	16,4 a	7,7 b	4,8	2,3	48,6 a	33,5 b
83	21,4	19,2	7,8 a	7,3 a	7,9	7,8	36,7 a	34,3 a
99	5,7	4,4	8,3 a	9,4 a	7,8	6,6	21,8 a	20,5 b

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

O pico de acúmulo desse nutriente nas folhas ocorreu aos 74 DAE, totalizando 28 g ha⁻¹, o que representa 56% de B (Tabela 11; Figura 10a). No colmo, o ponto de máximo acúmulo foi aos 71 DAE, atingindo um total de 39 g ha⁻¹, correspondendo a 78% de B. O maior acúmulo de B nos colmos pode estar relacionado a esse nutriente atuar como constituinte da parede celular, auxiliando o Ca na deposição e formação de pectatos que fazem parte dessa estrutura (Prado, 2020).

A partir dos 60 DAE, com o desenvolvimento das panículas, observou-se uma translocação desse nutriente para os grãos, atingindo o pico máximo de acúmulo aos 75 DAE, totalizando 46 g ha⁻¹. No final do ciclo, 92% do B estava alocado nos grãos (Figura 10a). No caso do ASC, observa-se um comportamento semelhante ao do ACC em relação à absorção de B no colmo e planta inteira (Tabela 10). Todavia, no colmo, os menores acúmulos de B ocorreram aos 55 e 69 DAE, enquanto na planta inteira isso ocorreu aos 69 e 99 DAE (Tabela 10).

Tabela 11. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de boro nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Boro							
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾ g ha ⁻¹	b ⁽³⁾ -----DAE-----	c	X ₀ ⁽⁴⁾			
Arroz com calagem							
Folha	27,83*	13,36*	-	74**	61	0,91	Gaussiana
Colmo	39,33*	18,87*	-	71**	52	0,95	Gaussiana
Panícula	46,38*	17,76*	-	75**	57	0,97	Gaussiana
Total	44,57*	19,95*	-	74**	54	0,95	Gaussiana
Arroz sem calagem							
Folha	21,10*	18,43*	-	72**	54	0,70	Gaussiana
Colmo	28,74*	25,05*	-	71**	46	0,93	Gaussiana
Panícula	34,86**	22,10**	-	75**	13	0,98	Gaussiana
Total	33,22*	25,94*	-	76**	50	0,94	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em g ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

No tratamento ASC, observou-se um acúmulo gradual de B nas folhas e nos colmos até os 69 DAE, atingindo aproximadamente 42% e 56%, respectivamente. O ponto de máximo acúmulo nas folhas ocorreu aos 72 DAE, alcançando cerca de 21 g ha⁻¹. Após esse ponto, há uma queda devido à translocação para os grãos. No caso do colmo, o pico máximo acontece aos 71 DAE, com um total de 29 g ha⁻¹ de B (Tabela 11; Figura 10b). As panículas atingem o máximo acúmulo aos 75 DAE, com um total de 35 g ha⁻¹ de B, apresentando comportamento semelhante ao tratamento da ACC. Entretanto, ao final do ciclo, apenas 69% do B estava acumulado nos grãos.

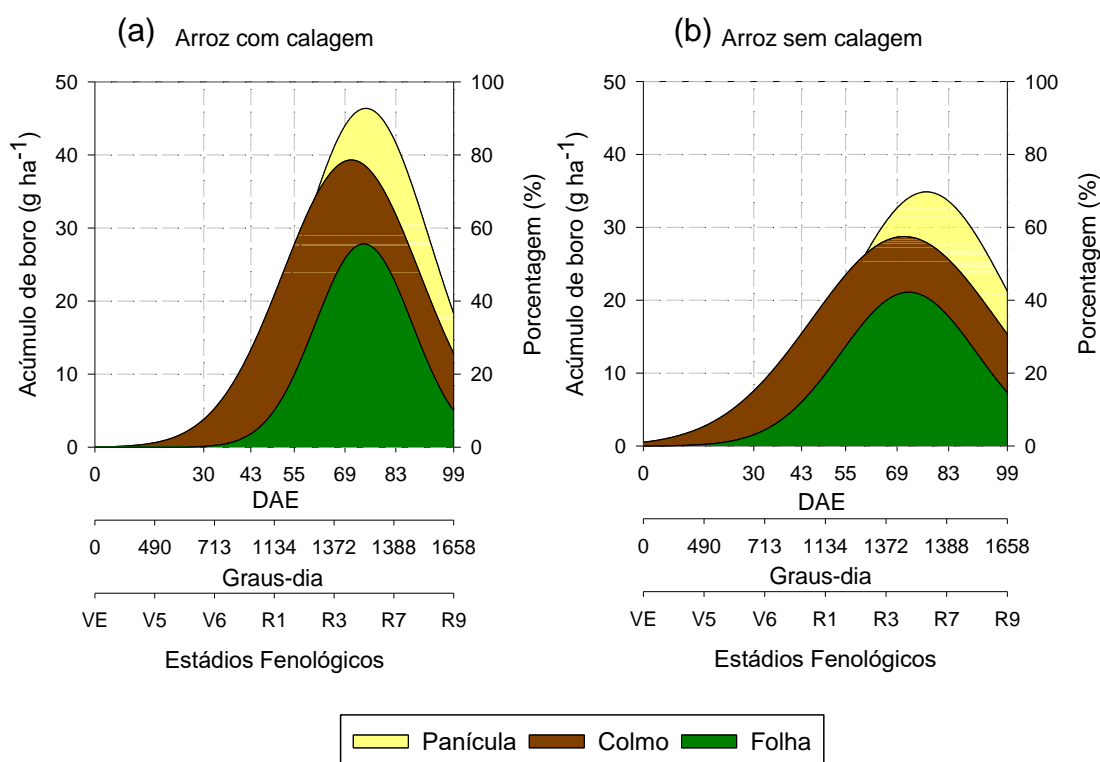


Figura 10. Acúmulo e particionamento do boro em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

O acúmulo de manganês (Mn) foi influenciado pela interação entre calagem e DAE para todas as partições da planta, com exceção do colmo. Além disso, ocorreu diferença de DAE para todas as partições da planta analisada, enquanto não houve efeito de calagem para todas as plantas (APÊNDICES 12, 13, 14 e 15).

Na ASC, o acúmulo de Mn foi diferente nas folhas, panícula e na planta inteira em comparação com a ACC (Tabela 12). Nas folhas e planta inteira, o maior acúmulo de Mn ocorreu aos 83 DAE, enquanto que nas panículas foi observado aos 99 DAE.

Tabela 12. Acúmulo de manganês no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Manganês (g ha ⁻¹)							
	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	336,7 a	670,0 a	228,2	379,0	-	-	564,9 a	1.049,0 a
43	617,0 a	1.172,9a	542,0	786,3	-	-	1.159,0 a	1.959,2 a
55	5.097,6 a	975,0 a	1.498,8	1.613,6	-	-	6.596,4 a	2.588,6 b
69	3.881,8 a	4.424,9 a	1.546,1	1.582,5	372,1 a	336,0a	5.800,1 a	6.343,3 a
83	2.499,9 b	3.948,2 a	1.640,8	1.500,5	221,2 a	196,7 a	4.362,0 b	5.645,4 a
99	1.572,2 a	1.873,6 a	81,1	114,0	289,1 b	371,2 a	1.942,4 a	2.358,8 a

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

No geral, o acúmulo de Mn nos dois tratamentos foi elevado, com as plantas inteiras acumulando em média 6.437 g ha⁻¹(Tabela 13). Diversos fatores podem ter influenciado esse resultado, incluindo as características do solo. O Mn é o segundo micronutriente mais abundante em solos tropicais, ficando atrás apenas do ferro. Além disso, o pH do solo e potencial de oxirredução influenciam na disponibilidade do Mn (Alejandro *et al.*, 2020).

Durante o processo de intemperismo das rochas, o Mn é liberado, sendo em sua maioria convertido nos óxidos Mn³⁺ e Mn⁴⁺, formas que são indisponíveis para as plantas. Apenas uma pequena fração permanece na solução do solo, na forma do íon Mn²⁺, sendo essa a única forma acessível às plantas (Millaleo *et al.*, 2010). Como os solos nas duas áreas (ACC e ASC) apresentam pH < 5,5 (ácidos) e considerando a alta capacidade redox do Mn, os óxidos de Mn podem ter sido reduzidos a Mn²⁺, aumentando a concentração de Mn disponível para as plantas (Alejandro *et al.*, 2020). Isso pode ter contribuído para os valores elevados observados nos órgãos da planta de arroz (Tabela 13).

Tabela 13. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de manganês nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Manganês					
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾		PI	R ²	Modelo

	a ⁽²⁾ g ha ⁻¹	b ⁽³⁾	c	X ₀ ⁽⁴⁾	-----DAE-----		
Arroz com calagem							
Folha	4.708,86*	15,96*	-	65**	49	0,80	Gaussiana
Colmo	6.389,28*	17,03*	-	66**	49	0,87	Gaussiana
Panícula	6.647,21*	16,64*	-	68**	51	0,86	Gaussiana
Total	6.592,81*	17,37*	-	67**	50	0,88	Gaussiana
Arroz sem calagem							
Folha	4.504,72*	15,97*	-	77**	61	0,90	Gaussiana
Colmo	6.006,07*	17,80*	-	74**	56	0,94	Gaussiana
Panícula	6.512,64**	16,32**	-	75**	59	0,98	Gaussiana
Total	6.280,80*	17,94*	-	75**	57	0,94	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em g ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

As folhas de arroz na ACC e ASC foram os órgãos com menor acúmulo de Mn, sendo que o ponto de máxima absorção ocorreu aos 65 e 77 DAE, atingindo aproximadamente 67% e 64%, respectivamente (Tabela 13; figura 11a, b). No caso do colmo, o acúmulo nos dois tratamentos ocorreu desde a fase vegetativa da cultura, aumentando seu acúmulo no ponto máximo aos 66 e 74 DAE, representando 91% e 86% do Mn no ACC e ASC, respectivamente. Vale destacar que os pontos de máximo acúmulo do ACC foram mais precoces, todos na faixa de 65 a 68 DAE (Tabela 13). Enquanto que no outro tratamento, esse processo ocorreu mais tardiamente, entre os 74 e 77 DAE. O ponto de máximo acúmulo nas panículas da ACC ocorreu aos 68 DAE, alcançando cerca de 6.647 g ha⁻¹ de Mn. No ASC, observou-se o máximo acúmulo aos 75 DAE, atingindo cerca de 6.512 g ha⁻¹ de Mn.

Resultados diferentes foram encontrados por outros autores, que identificaram que o máximo acúmulo de Mn nas panículas foi de 3.247 g ha⁻¹ para a cultivar Benja 1 e 4.881 g ha⁻¹ para a OR-228, em condições de campo na Colômbia (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2019).

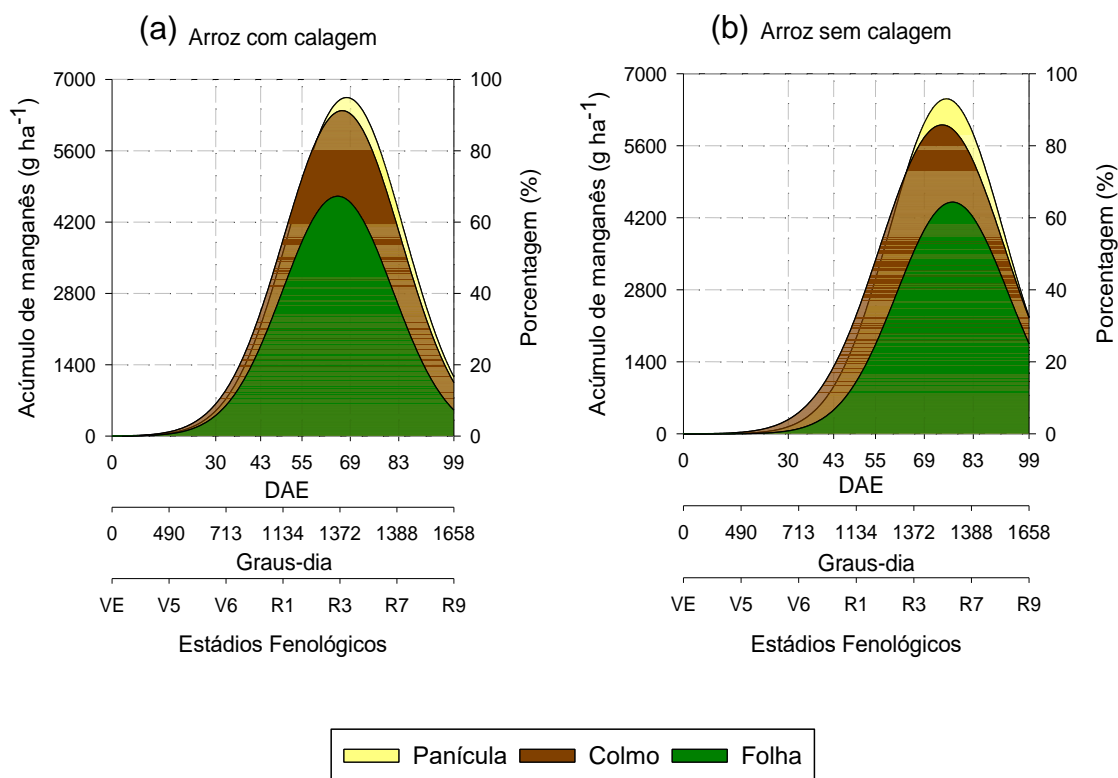


Figura 11. Acúmulo e particionamento do manganês em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

O acúmulo de ferro (Fe) no colmo e panícula foi influenciado pela interação entre calagem e DAE. Além disso, ocorreu efeito de DAE para todas as partições da planta analisada, enquanto não houve efeito de calagem para todas as plantas (APÊNDICES 12, 13, 14 e 15).

O pH do solo desempenha um papel importante na disponibilidade de micronutrientes para as plantas. O solo da ACC estava adequado para as condições exigidas de desenvolvimento da cultura. No entanto, no solo da ASC, devido o pH ácido, observa-se uma maior concentração de Fe, com cerca de 99 mg dm³ na camada de 0 a 20 cm (APÊNDICES 5).

O acúmulo de Fe nas plantas de arroz da ACC apresentou uma redução aos 55 DAE, enquanto as panículas mostraram o maior acúmulo no final do ciclo (Tabela 14). O oposto foi observado nesses mesmos DAE para o ASC.

Tabela 14. Acúmulo de ferro no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Ferro (g ha ⁻¹)								
DAE	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	72,8	66,1	75,7 a	82,6 a	-	-	148,5	148,7
43	64,7	69,1	57,7 a	76,6 a	-	-	122,4	145,7
55	497,1	326,7	229,0 b	488,8 a	-	-	726,2	815,5
69	376,4	479,4	119,3 a	112,1 a	35,5 a	36,4 a	531,1	627,8
83	502,3	558,4	194,7 a	146,3 a	33,6 a	31,9 a	730,6	736,6
99	104,6	101,8	108,3 a	137,6 a	32,8 a	12,9 b	245,8	252,3

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste "t" ao nível de 5% de significância.

As folhas e os colmos do arroz na ACC apresentaram um acúmulo lento de Fe até os 43 DAE, concentrando 18% e 20%, respectivamente. A partir do início da fase reprodutiva, observa-se uma absorção mais acelerada desse nutriente ao longo dos DAE, sendo o colmo o órgão que mais acumulou Fe (Tabela 15; Figura 12a). As folhas atingiram seu máximo acúmulo aos 71 DAE, totalizando 506 g ha⁻¹. No caso do colmo, o pico de máxima absorção foi igual ao das folhas, porém com um total superior, alcançando 684 g ha⁻¹. As panículas atingiram seu pico de acúmulo aos 74 DAE, absorvendo 630 g ha⁻¹. Após essa máxima, ocorre uma queda no acúmulo de Fe nesse órgão. No final do ciclo, a panícula concentrou apenas 39% de Fe (Figura 12a).

Tabela 15. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de ferro nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Ferro							
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾ g ha ⁻¹	b ⁽³⁾ -----DAE-----	c	X ₀ ⁽⁴⁾			
Arroz com calagem							
Folha	506,53*	18,60*	-	71**	52	0,80	Gaussiana
Colmo	683,93*	20,68*	-	71**	50	0,76	Gaussiana
Panícula	630,14*	22,18*	4,82 ^{ns}	74**	52	0,96	Gaussiana
Total	714,13*	20,74*	-	71**	50	0,78	Gaussiana
Arroz sem calagem							
Folha	573,36*	15,86*	-	74**	58	0,94	Gaussiana
Colmo	764,36*	20,16*	-	70**	50	0,80	Gaussiana
Panícula	807,13*	18,72*	-	71**	52	0,81	Gaussiana
Total	794,45*	20,01*	-	70**	50	0,82	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em g ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

No caso da ASC, observa-se um comportamento diferente ao longo dos DAE, com as plantas absorvendo mais Fe, sendo que o órgão que mais acumulou esse nutriente foram as panículas (Tabela 15). Na fase vegetativa, até os 43 DAE, o acúmulo de Fe estava predominantemente no colmo, atingindo 20%, enquanto nas folhas, nesse mesmo período, tinha apenas 9% de Fe. A partir dos 55 DAE, verifica-se uma absorção acelerada nas folhas, atingindo seu pico de acúmulo aos 74 DAE, com um total de 573 g ha⁻¹. No caso do colmo, esse máximo acúmulo aconteceu mais precocemente, aos 70 DAE, com um total de 764 g ha⁻¹. As panículas tiveram seu máximo acúmulo aos 71 DAE, absorvendo 807 g ha⁻¹, e ao final do ciclo, esse órgão acumulou 46% de Fe do total (Tabela 15; Figura 12b).

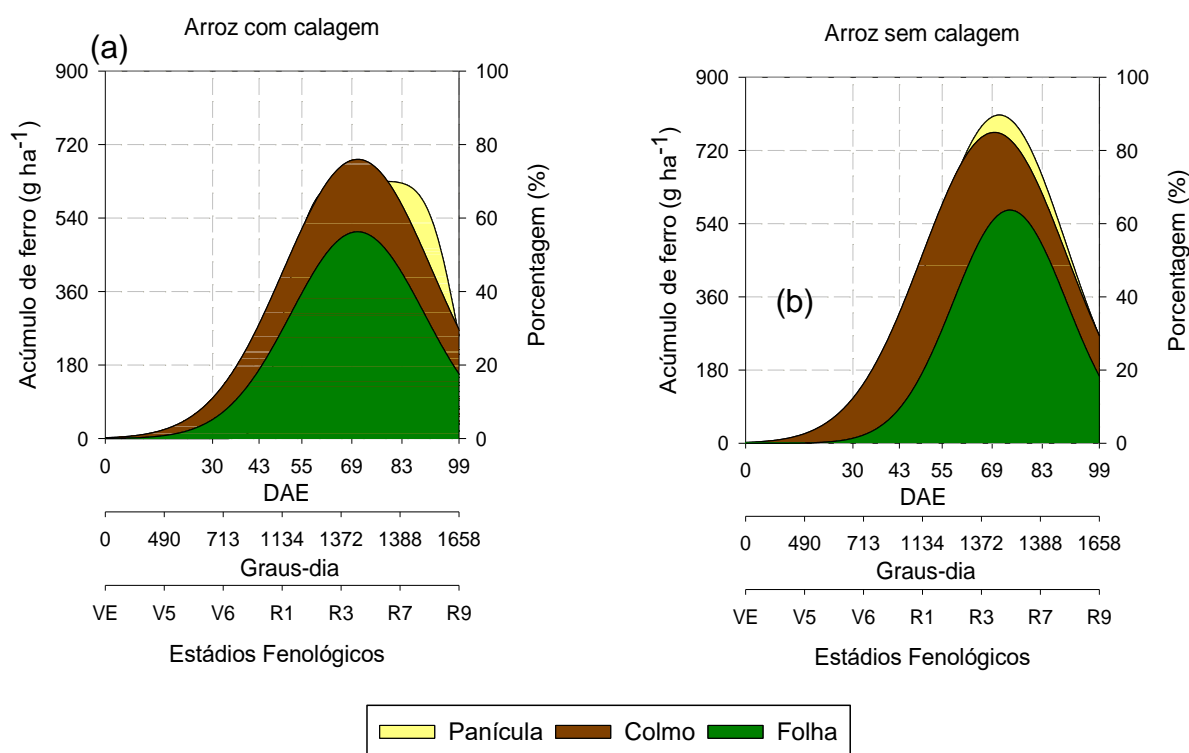


Figura 12. Acúmulo e particionamento do ferro em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

O acúmulo de zinco (Zn) nas folhas foi influenciado pela interação entre calagem e DAE. Além disso, ocorreu efeito de DAE para todas as partições da planta analisada, enquanto não houve efeito de calagem para todas as plantas (APÊNDICES 12, 13, 14 e 15).

O Zn presente no solo dos dois tratamentos foi considerado baixo, conforme o manual de interpretação de solos do cerrado (Sousa; Lobato, 2004). Devido à sua

baixa concentração no solo, especialmente nos solos mais arenosos, o Zn é o micronutriente que mais limita a produção das culturas (Prado, 2020). Entretanto, nos dois tratamentos, as plantas de arroz receberam adubação foliar com esse micronutriente, o que favoreceu o acúmulo nas folhas. Aos 83 DAE, as folhas de arroz no ACC apresentaram uma menor absorção de Zn, enquanto no ASC observou-se o contrário (Tabela 16).

Observa-se lento acúmulo inicial de Zn no ACC, sendo que até o V6, o máximo acumulado nas folhas e colmo foi de 13% e 20%, respectivamente (Figura 13a), o que também foi observado por Crusciol et al. (2016). No geral, as folhas do ACC apresentaram menor acúmulo de Zn, atingindo seu pico máximo aos 74 DAE, com um total de 157 g ha⁻¹.

Tabela 16. Acúmulo de zinco no arroz com e sem calagem ao longo do seu ciclo em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

DAE	Zinco (g ha ⁻¹)							
	Folha		Colmo		Panícula		Planta inteira	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
30	38,5 a	56,3 a	29,5	53,3	-	-	68,0	109,6
43	49,4 a	61,3 a	69,3	88,8	-	-	118,6	150,1
55	27,1 a	35,0 a	55,5	63,7	-	-	82,5	98,7
69	185,4 a	181,5 a	114,3	100,9	53,0	42,1	352,7	324,5
83	104,9 b	202,8 a	162,5	145,4	70,1	88,3	337,5	436,4
99	65,4 a	52,1 a	25,1	35,2	138,0	146,0	228,6	233,4

ACC- arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; DAE: dias após emergência. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

O colmo teve seu máximo acúmulo aos 75 DAE (Tabela 17; figura 13a). As panículas, por sua vez, apresentaram o maior acúmulo de Zn, com pico de máxima absorção aos 80 DAE, atingindo um total de 375 g ha⁻¹, representando 75% desse nutriente nos grãos de arroz. Entretanto, no final do ciclo, houve redução do Zn nas panículas, permanecendo apenas 44% do total.

Tabela 17. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de zinco nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Partições	Zinco				PI	R ²	Modelo
	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾						
	a ⁽²⁾ g ha ⁻¹	b ⁽³⁾ -----DAE-----	c	X ₀ ⁽⁴⁾			
Arroz com calagem							
Folha	157,50*	15,37*	-	74**	59	0,70	Gaussiana

Colmo	294,32*	16,96*	-	75**	58	0,82	Gaussiana
Panícula	375,44*	17,47*	-	80**	63	0,95	Gaussiana
Total	355,15*	20,23*	-	80**	60	0,87	Gaussiana
Arroz sem calagem							
Folha	220,55*	13,09*	-	77**	64	0,82	Gaussiana
Colmo	307,73*	19,40*	-	75**	56	0,69	Gaussiana
Panícula	433,67**	16,18*	-	81**	65	0,97	Gaussiana
Total	393,90*	20,35*	-	81**	61	0,82	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em g ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

**, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t ($p < 0,05$), respectivamente.

No caso do ASC, verifica-se que até os 43 DAE, o acúmulo de Zn é observado apenas no colmo, tendo em torno de 17% (Figura 13b). As folhas demonstraram uma absorção tardia, sendo considerado mais acentuada o acúmulo de Zn a partir do R1. O ponto de máximo acúmulo das folhas foi aos 77 DAE, atingindo um total de 220 g ha⁻¹. No colmo, o acúmulo foi crescente até os 75 DAE, com um total de 308 g ha⁻¹. Assim como aconteceu no tratamento do ACC, observa-se que o maior acúmulo de Zn do ASC foi nos grãos aos 81 DAE, com um total superior de 434 g ha⁻¹. É notório que o acúmulo de Zn em todos os órgãos das plantas do ASC foi maior que o ACC (Tabela 17). No final do ciclo, as panículas acumularam em torno de 50% do Zn total.

A cultura do arroz apresenta uma alta exigência nutricional de Zn para um desenvolvimento adequado (Fageria, 2000). Para o arroz, a dosagem adequada de Zn é de 10 mg kg⁻¹, enquanto a concentração tóxica é de 70 mg kg⁻¹ no solo (Fageria, 2000).

O efeito positivo do Zn no crescimento do arroz é atribuído à sua função nas plantas. Esse nutriente é precursor do triptofano, que por sua vez é precursor das auxinas, responsáveis pela alongação celular (Prado, 2020). Isso explica o acúmulo mais precoce nos colmos.

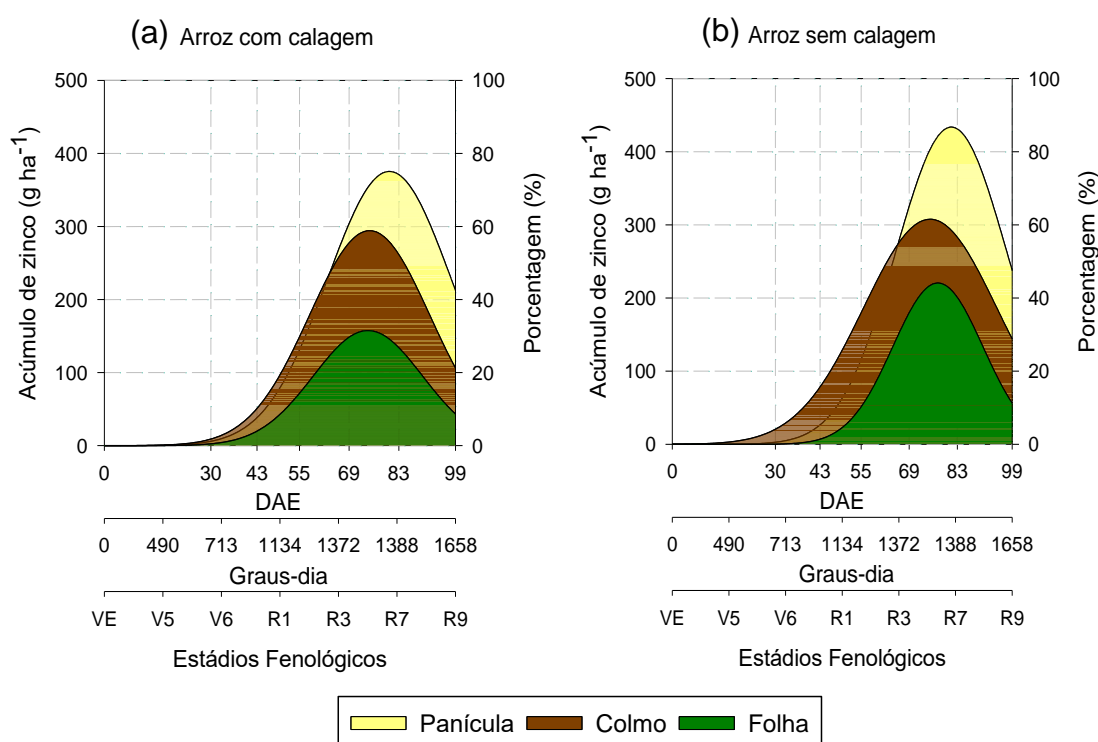


Figura 13. Acúmulo e particionamento do zinco em arroz com (a) e sem calagem (b) em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Não houve interação entre calagem e DAE para o acúmulo de cobre (Cu) em nenhuma das partições da planta. Entretanto, ocorreu diferença de DAE para todas as partições da planta analisadas, enquanto não houve efeito de calagem (APÊNDICES 12, 13, 14 e 15).

Tabela 18. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de cobre nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R²) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Cobre							
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R ²	Modelo
	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	c ⁽⁵⁾	X ₀ ⁽⁴⁾			
	g ha ⁻¹ -----DAE-----						
Folha	3,45*	25,04*	-	65**	40	0,86	Gaussiana
Colmo	7,03**	25,00*	-	63**	38	0,95	Gaussiana
Panícula	8,62**	27,78*	-	81**	53	0,98	Gaussiana
Total	8,28**	36,11*	-	80**	44	0,98	Gaussiana

(1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.

(2) Valor máximo observado em g ha⁻¹.

(3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.

(4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.

** , * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t (p<0,05), respectivamente.

O acúmulo de Cu nas plantas de arroz foi mais expressivo nas panículas, indicando que esse órgão é o principal local de armazenamento deste nutriente (Tabela 18; figura 14). As folhas e os colmos apresentaram um acúmulo crescente de Cu ao longo da fase vegetativa, com maior intensidade na fase reprodutiva. Aos 55 DAE, as folhas e os colmos apresentavam aproximadamente 30% e 66% de Cu. O pico de acúmulo desse nutriente nas folhas ocorreu aos 65 DAE, totalizando 3,45 g ha⁻¹, o que representa 31% do Cu. No colmo, o ponto de máximo acúmulo foi aos 63 DAE, atingindo um total de 7,0 g ha⁻¹. A partir dos 81 DAE, com o desenvolvimento das panículas, observou-se o máximo acúmulo de Cu, atingindo um total de 8,62 g ha⁻¹. No final do ciclo, verificou-se que os grãos permaneceram com a maior quantidade desse nutriente, representando 66% de Cu, o que constitui um dos nutrientes mais exportados pelos grãos de arroz.

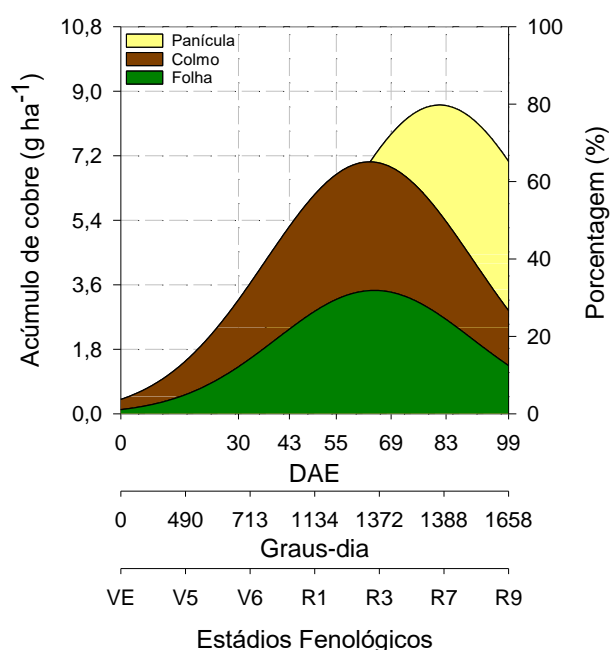


Figura 14. Acúmulo e particionamento de cobre (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Essa observação sugere que as quantidades aplicadas através das adubações foliares foram suficientes para a absorção pelas plantas. É importante destacar que a deficiência de Cu em cereais pode prejudicar a formação dos grãos (Lopes, 1998), embora este efeito não tenha sido observado neste estudo.

Considerando os resultados obtidos, o acúmulo de micronutrientes em plantas de arroz seguiu a ordem decrescente: Mn>Fe>Zn>B>Cu.

Silício

Não houve interação entre calagem e DAE para o acúmulo de silício (Si) em nenhuma das partições da planta (APÊNDICE 16). A calagem proporcionou um maior acúmulo de Si nos colmos e na planta inteira, em comparação com a área do ASC (APÊNDICE 16). Esse resultado pode ser atribuído ao uso do calcário na área, que possui uma concentração de aproximadamente 4% de óxido de silício (SiO_2) em sua composição. Embora a concentração seja relativamente baixa, essa presença pode ter influenciado o acúmulo de Si, especialmente considerando as características específicas do calcário na correção do solo.

A adição de calcário contribui para o aumento do pH do solo e a eliminação das concentrações de Al. Nesse contexto, a disponibilidade do Si no solo e sua subsequente absorção pelas plantas estão diretamente relacionadas ao pH do solo. Com o aumento do pH, a disponibilidade do elemento no solo também aumenta, o que, resulta em uma maior absorção pelo arroz (Crusciol *et al.*, 2013).

Apesar da pequena contribuição do calcário na liberação de Si no solo, é importante considerar que outras fontes desse nutriente podem estar presentes na solução do solo. Essas fontes incluem a decomposição de resíduos vegetais, a dissociação do ácido silícico polimérico e a liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Jones; Handreck, 1967).

Embora o Si não seja considerado essencial, é um dos elementos mais absorvidos pela planta do arroz (Prado, 2020). Neste estudo, observou-se que o colmo e as panículas foram os órgãos vegetais com maior extração Si (Tabela 19; figura 15). Estudos de Sánchez-Reinoso *et al.* (2019) também identificaram esses órgãos como os principais acumuladores de Si.

Tabela 19. Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado para o acúmulo de silício nos particionamentos folha, colmo, panícula e total, ponto de inflexão (PI) e coeficiente de determinação (R^2) no arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Silício							
Partições	Parâmetros do modelo ⁽¹⁾				PI	R^2	Modelo
	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	c ⁽⁵⁾	X ₀ ⁽⁴⁾			
	kg ha ⁻¹ -----DAE-----						
Folha	16,90*	14,16*	-	73**	59	0,92	Gaussiana
Colmo	24,31**	21,33*	-	76**	55	0,97	Gaussiana
Panícula	28,49*	20,53*	-	80**	59	0,96	Gaussiana
Total	27,67**	22,59*	-	80**	57	0,97	Gaussiana

- (1) Valores representam a média das avaliações biométricas da cultivar.
 (2) Valor máximo observado em kg ha^{-1} .
 (3) Amplitude no valor de X em DAE entre o ponto de inflexão e o ponto máximo.
 (4) Dias após a emergência (DAE) que forneceu os maiores valores.
 **, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste t ($p < 0,05$), respectivamente.

O acúmulo desse nutriente ocorreu ao longo de toda a fase vegetativa e metade da fase reprodutiva (Figura 15). As folhas apresentaram o pico de máximo acúmulo aos 73 DAE, totalizando 17 kg ha^{-1} , o que representa 56% do Si. No caso dos colmos, o máximo acúmulo foi aos 76 DAE, atingindo um total de 24 kg ha^{-1} (Tabela 19). Esse acúmulo nos colmos e folhas é resultado da deposição do Si nas paredes das células da epiderme, contribuindo para fortalecer a estrutura da planta (Ma; Yamaji, 2006).

As panículas foram o órgão vegetal com maior acúmulo de Si, sendo que o ponto de máximo acúmulo aconteceu aos 80 DAE, com um total de 29 kg ha^{-1} (Tabela 19; Figura 15). No final do ciclo, observou-se uma redução no acúmulo de Si, apresentando 62%.

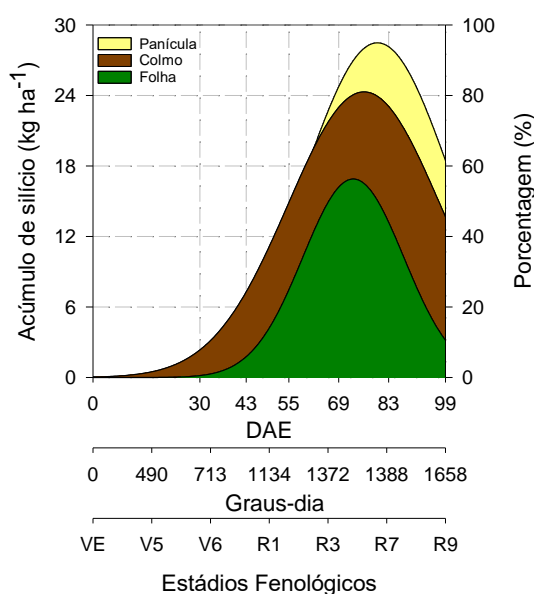


Figura 15. Acúmulo e particionamento de silício (média do arroz com e sem calagem), durante o seu ciclo de cultivo em áreas de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

3.4 Extração e exportação de nutrientes e Silício

Houve maior acúmulo de nutrientes nas plantas em relação aos grãos (Tabela 20). As quantidades de nutrientes extraídas para cada tonelada de grãos produzidos no geral foram semelhantes nos dois tratamentos. Na ACC, as plantas de arroz

demandaram menos N e K para produzir uma tonelada de grãos, com valores de 13,21 e 5,91 kg ha⁻¹, respectivamente. Já na ASC, as plantas de arroz necessitaram de maiores quantidades Fe, Mn e Zn, com valores de 294,24; 2.326 e 145,89 g ha⁻¹, respectivamente, para a produção de uma tonelada (Tabela 20).

No Brasil, em condições de campo, um estudo demonstrou que, para produzir uma tonelada de grãos, as exigências da cultura do arroz em relação ao N, P, K, Ca, Mg e S foram, em média 33, 4, 48, 28, 10 e 10 kg, respectivamente (Crusciol *et al.*, 2016). Estes valores são superiores aos observados neste estudo (Tabela 20). Essa diferença pode ser atribuída às condições específicas do local da pesquisa, uma vez que se trata de uma área de abertura com características de cerrado e o solo está no seu primeiro ano de cultivo, ainda em processo de construção de fertilidade.

Com relação ao índice de colheita, observou-se que no ACC, 74% do total de N absorvido durante o ciclo foi retirado com os grãos, enquanto que para o total de P, Cu e Zn, foram removidos 72%, 68% e 60%, respectivamente. No caso do ASC, observa-se um comportamento semelhante, com 74%, 59%, 69% e 63% do total de N, P, Cu e Zn retirados pelos grãos, respectivamente. Para os demais nutrientes nos dois tratamentos, as quantidades removidas pelo grão representaram menos de 36% do total absorvido pela planta durante o ciclo da cultura. Isso mostra que a maior parte do K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn e Si acumulados durante o ciclo da cultura retornam ao solo com os restos culturais (Crusciol *et al.*, 2016). No entanto, é importante estar atento aos nutrientes removidos em maiores concentrações, os quais precisam ser repostos no solo para evitar desequilíbrios nutricionais.

A exportação de nutrientes pelos grãos, em ordem decrescente, foi a seguinte para macronutrientes no ACC: N>P>Mg>K=S>Ca, enquanto para o ASC foi: N>P>Mg>Ca>S>K. Quanto aos micronutrientes, ambos os tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes: Cu>Zn>B>Mn>Fe.

No caso da absorção até o R1, no ACC, observa-se que os nutrientes e Si mais demandados pela cultura na fase de diferenciação da panícula foram: N (58%), Mg (74%), B (94%), Cu (84%) e Si (82%). Esses resultados reforçam a importância da adubação nitrogenada em cobertura, pois na fase de iniciação da panícula (R0), é recomendado aplicar nitrogênio, uma vez que a cultura demanda mais nutrientes para a produção e distribuição de fotoassimilados, essenciais para o crescimento da panícula e o enchimento de grãos (Fageria, 1984). Nas condições deste estudo, foram

realizadas adubação nitrogenada e duas aplicações de foliares com mix de nutrientes para atender às exigências da cultura.

Na ASC, a absorção de nutrientes até o estágio R1 apresentou comportamentos distintos, sendo os mais demandados, Mg (93%), B (90%), Cu (88%) e Si (51%). Os demais macro e micronutrientes nos dois tratamentos tiveram uma absorção mais lenta no estágio R1, indicando que sua demanda provavelmente ocorrerá nos estágios reprodutivos subsequentes (Tabela 20). Vale destacar que, em ambos os tratamentos, mesmo sem a aplicação de fontes de Si na área, foi observado um acúmulo elevado desse nutriente pelas plantas. Em um estudo conduzido por Crusciol et al. (2016), em condições de campo sem a aplicação de fontes de Si, identificou-se que a cultura do arroz absorveu aproximadamente 24% de Si. Essa observação pode ser atribuída à característica das plantas de arroz de serem acumuladoras desse nutriente benéfico.

Diante do exposto, as diferenças na extração e exportação de nutrientes entre os tratamentos podem estar relacionadas com as condições químicas do solo, que impactaram a disponibilidade e absorção de determinados nutrientes. No solo do ASC, embora não tenha havido aplicação de calcário, o mesmo foi tratado com uma tonelada de gesso. Mesmo tendo neutralizado o alumínio em superfície e, conseqüentemente, reduzido a saturação de alumínio, a acidez do solo permaneceu, o que provavelmente limitou a disponibilidade de alguns nutrientes e aumentou a absorção de outros (APÊNDICE 5).

Esses resultados proporcionam uma base para aprimorar os programas de adubação utilizados pelos produtores. Além de auxiliar na implementação de práticas de manejo que assegurem um equilíbrio nutricional e a manutenção adequada da fertilidade do solo ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 20. Acúmulo de nutrientes associado à produção de matéria seca na cultura do arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Parâmetros	Total acumulado		Acúmulo no grão		Índice de Colheita ⁽¹⁾		Coeficiente de remoção ⁽³⁾		Absorção até R1		EF de máximo acúmulo	
	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC	ACC	ASC
	----- kg ha ⁻¹ -----				----%----		----- kg/t-----		---%---			
MS ⁽²⁾	51,5	55,4	118,0	126,0	29	28	-	-	-	-	-	-
N	38,7	41,6	28,6	30,6	74	74	13,2	15,1	58	40	R7-R9	R9
P	5,9	4,5	4,3	2,6	72	59	2,5	1,8	10	14	R9	R9
K	7,2	9,4	1,5	1,8	21	19	5,9	6,4	34	47	R1-R3	R1-R3
Ca	2,9	2,9	0,5	0,6	17	21	3,5	3,8	23	31	R1	R1
Mg	6,7	7,0	1,9	2,3	30	33	4,4	4,7	74	93	R3-R7	R3-R7
S	6,8	6,9	1,5	1,4	21	20	2,5	2,7	15	11	R9	R9
Si	20,1	20,3	5,4	5,9	27	29	9,5	10,3	82	51	R7	R7
	-----g ha ⁻¹ -----				----%----		-----g ha ⁻¹ -----		----%----			
B	21,8	20,5	7,79	6,63	36	32	15,4	12,3	94	90	R3-R7	R3-R7
Cu	7,30	7,24	5,00	5,00	68	69	2,86	3,07	84	88	R7	R7
Fe	245,8	252,3	32,87	12,92	13	05	246,3	294,3	34	31	R3	R3
Mn	1.942,4	2.358,8	289,11	371,17	15	16	2.273,4	2.326,2	29	41	R3	R7
Zn	228,6	233,4	138,03	146,03	60	63	122,5	145,9	36	42	R7	R7

ACC: arroz com calagem; ASC: arroz sem calagem; R1: Diferenciação da panícula; EF – estágio fenológico.

(1) Índice de colheita: porcentagem do total de nutrientes acumulado que está presente no grão.

(2) Matéria seca.

(3) Quantidade de nutrientes necessários para a produção de uma tonelada de grãos (máximo absorvido planta/produtividade).

4. CONCLUSÕES

A calagem aumenta o acúmulo de fósforo e boro pelas plantas de arroz nas áreas de abertura no Cerrado maranhense, mas não afeta a ordem de acúmulo dos macro e micronutrientes.

Com a calagem, a exportação de nutrientes pelo arroz segue a ordem decrescente $N > P > Mg > K = S > Ca$; enquanto, nas plantas sem calagem, a ordem é $N > P > Mg > Ca > S > K$. Para os micronutrientes, tanto nas plantas com calagem quanto nas sem calagem, a ordem de acumulação é $Cu > Zn > B > Mn > Fe$.

Os resultados deste trabalho auxiliam no estabelecimento de recomendações de adubação mais eficientes para o cultivo do arroz no Cerrado maranhense.

REFERÊNCIAS

- ALEJANDRO, S.; HÖLLER, S.; MEIER, B. PEITER, E. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 300, 2020.
- ALVAREZ, R.C.F.; CRUSCIOL, C.A.C.; NASCENTE, A.S. Análise de crescimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas dos tipos tradicional, intermediário e moderno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 397-406, 2012.
- BATAGLIA, O. C., FURLANI, A. M. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, p. 48, 1983.
- BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento em plantas: noções básicas**. Jaboticabal. FUNEP, p. 42, 2003
- BRASIL, E. C.; LIMA, E. V.; CRAVO, M.S. Uso de gesso na agricultura. IN: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. Brasília, DF: Embrapa, 2. ed., p. 145, 2020.
- BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P. de; CASTRO, E. da M. de; PEREIRA, J. A.; UTUMI, M. M.; LOPES, A. de M.; CORDEIRO, A. C. C.; BASSINELLO, P. Z.; FONSECA, J. R.; PRABHU, A. S.; PETERS, V.; SOARES, A. A. BRS Sertaneja: cultivar precoce de arroz de terras altas. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, p.4, 2006.
- BOARETTO, A.E., VAN RAIJ, B., SILVA, F.C., CHITOLINA, J.C., TEDESCO, M.J., CARMO, C.A.F.S. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. In: SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, p.59-85, 2009.
- CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.
- CAMPOS, M.F.; ONO, E.O.; SÍLVIA, C.; BOARO, F.; RODRIGUES, J.D. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. **Revista Biotemas**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 53-63, 2008.
- CONAB. **Companhia nacional de abastecimento**. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 8ºoitavo levantamento, abril 2022.
- COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. L. A uniform and adaptive system for expressing rice development, **Crop Science**, Madison, v. 40, p.436-443, 2000.
- CRUSCIOL, C. A. C.; MANCUSO, M. A. C.; GARCIA, R. A.; CASTRO, G. S. A. Crescimento radicular e aéreo de cultivares de arroz de terras altas em função da calagem. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 2, p.256-263, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A.S.; MAUAD, M.; SILVA, A.C.L. Desenvolvimento radicular e aéreo, nutrição e eficiência de absorção de macronutrientes e zinco por cultivares de arroz de terras altas afetadas pela adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2061-2076, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.404-410, 2013.

CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; ALVAREZ, R. C. F. Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. **Revista brasileira de ciência do solo**, V. 40, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; ALVAREZ, R. C. F. Micronutrient and Silicon Uptake and Removal by Upland Rice Cultivars with Different Plant Architecture. **Revista brasileira de ciência do solo**, V. 40, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; PORTUGAL, J. R.; MORETTI, L. G.; MOMESSO, L.; CAMPOS, M. de; COSTA, N. R.; VOLF, M. R.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Exploring the synergism between surface liming and nitrogen fertilization in no-till system. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1415–1430, 2022.

DUART, V. M.; GARBUIO, F. J.; CAIRES, E. F. Does direct-seeded rice performance improve upon lime and phosphogypsum use?. **Soil & Tillage Research**, v.212, p.105055, 2021.

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus, p.341,1984.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M. P. **Deficiências nutricionais na cultura de arroz: identificação e correção**. Brasília: Embrapa, p.36, 1994.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; FERREIRA, E.; FILIPPI, M. C.; PRABHU, A. S. Seja o doutor do seu arroz. Piracicaba: **POTAFOS**, p.20, 1995.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2303-2307, 2000.

FAGERIA, N. K. **Nutrição mineral**. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. A cultura do arroz no Brasil. 2ª. ed. rev. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão; 2006.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P.; CARVALHO, M. C. S.; COLOMBARI FILHO, J. M. Upland Rice Genotype Evaluations for Acidity Tolerance. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 9, p. 1076-1096, 2015.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A Computer Analysis System To Fixed Effects Split Plot Type Designs: Sisvar. **Brazilian Journal of Biometrics**, v.37(4), p. 529–535, 2019.

GARCIA, U. S.; RIBEIRO, L. A.; ALVES, L. R. A especialização da produção de arroz nas mesorregiões do estado do Maranhão, Brasil. In: **Anais do 60º Congresso da**

Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER). Natal (RN) UFRN, 2022.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, G. C. C.; MATTA, D. H.; JUSTINO, L. F.; SILVA, S. C. Fatores climáticos que afetam a produtividade do arroz de terras altas na região central do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 54, p.77222, 2024.

IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Produção Agrícola Municipal, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso: outubro de 2023.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos. <httphttps://bdmep.inmet.gov.br/> Acesso: 30 de novembro de 2023.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v.19, p.107-149, 1967.

JORDÃO, H. W. C.; RADMANN, V.; SILVA, D. M. P.; RAMOS, R. J. L.; LEONARDI, T. B.; SILVA, T. B. L. Atributos agronômicos de cultivares de arroz de terras altas na região sul do Amazonas. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.9, n.3, p.69-82, 2020.

KRASKA J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.41, p. 2075–2085, 2010.

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante.** Boletim Técnico nº 02. Uberlândia, p.50, 2004.

LEMES, E. S.; OLIVEIRA, S.; NEVES, E. H.; RITTER, R.; MENDONÇA, A. O.; MENEGHELLO, G. E. Crescimento inicial e acúmulo de sódio em plantas de arroz submetidas à salinidade. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 61, 2018.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia.** São Paulo: Oficina de textos, p.1-793, 2011.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A Career Perspective On Soil Management In The Cerrado Region Of Brazil. **Advances In Agronomy**, v.137, p.1-72, 2016.

LOPES, S. **Manual internacional de fertilidade do solo.** Piracicaba: Potafos, 2 ed., p.177, 1998.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, p.392-397, 2006.

MALAVOLTA, E. Informações agronômicas sobre nutrientes para as culturas, nutrientes. Piracicaba: **Potafos**, p.12, 1996.

MALAVOLTA, E.; LEÃO, H. C.; OLIVEIRA, S. C.; LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P. MALAVOLTA, M. Repartição de nutrientes nas flores, folhas e ramos da laranjeira cultivar natal. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 28, n. 3, p. 506-511, 2006.

MANSINGH, M. D. I.; SURESH, S.; RAJ, M. A.; VIGNESH, S. Effect of liming on yield and nutrient uptake of rice in acidic soils. **International Journal of Chemical Studies**, v. 7, n.3, p. 2540-2543, 2019.

MENDONÇA, R. J.; CAMBRAIA, J.; OLIVEIRA, J. A.; OLIVA, M. A. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 38, n. 7, p. 843-848, 2003.

MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018.

PRADO, R. M., 2020. **Nutrição de Plantas**. São Paulo, Editora Unesp, 414 p, 2020.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Agronômica Ceres, p. 440, 1981.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

ROSELOM, C. A.; Cordeiro, C. F. S. Eficiência da adubação nitrogenada combinada à calagem em sistemas com semeadura direta. **Formações agrônomicas-NPCT**, n. 15, p.13, 2022.

SÁNCHEZ-REINOSO, A. D., NIETO, M. F., DOSSMANN, J., CAMACHO-TAMAYO, J. H., RESTREPO-DÍAZ, H. Nutrient uptake, partitioning, and removal in two modern high-yielding Colombian rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 18, p. 2373-238, 2019.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 416, 2004.

STEINMETZ, S.; MAGALHAES JUNIOR, A. M. de; FAGUNDES, P. R. R.; CUADRA, S. V.; ALMEIDA, I. R. Accumulated degree-days to reach the main plant developmental stages of irrigated rice cultivars. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.30, p. e027129, 2022.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; MICHELON, S.; WALTER, L. C.; MARCOLIN, E. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, p.1086-1093, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, p.719, 2010.

TAMAGNO, S., BALBOA, G. R., ASSEFA, Y., KOVÁCS, P., CASTEEL, S. N., SALVAGIOTTI, F., CIAMPITTI, I. A. Nutrient partitioning and stoichiometry in soybean: A synthesis-analysis. **Field Crops Research**, v. 200, p. 18-27, 2017.

VIEIRA, V. C. B., LUNARDI, D. M. C. Graus-dia na cultura do arroz. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 1997, Piracicaba, SP. **Anais Piracicaba: FEALQ**, 1997. p. 47-49.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, p. 269, 1981.

APÊNDICES

Apêndice 1. Características químicas e granulométricas do solo da área experimental do arroz com calagem, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.

Camada	pH	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	H ₂ O	CaCl ₂	g kg	mg dm ³	cmol _c dm ⁻³				%				
0 - 20	5,2	4,5	26	7,9	0,03	0,9	0,3	0,0	4,5	1,3	5,8	21,9	0,0
20 - 40	4,7	4,1	25	2,7	0,02	0,4	0,1	0,4	4,9	0,5	5,3	8,8	42,7

Camada	Cu	Fe	Mn	Zn	S-SO ₄ ²⁻	B	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
	mg dm ³						%			
0 - 20	0,02	78,2	0,10	0,5	3,6	0,2	55,7	18,4	25,8	Franco arenosa
20 - 40	0,02	51,4	0,03	0,2	3,9	0,2	66,8	21,9	11,2	Franco argilo arenoso

M.O (matéria orgânica): Walkey e Black (oxidação via úmida); P, K, Cu, Fe, Mn, Zn: Melich1 ou duplo ácido; Ca, Mg e Al: cloreto de cálcio; B- água quente. H+Al: Acetato de cálcio, S-SO₄²⁻: sulfato de enxofre. Areia, silte, argila – método da pipeta; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V (%): saturação de bases; m (%): saturação por alumínio.

Apêndice 2. Características químicas e granulométricas do solo da área experimental da soja, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.

Camada	pH	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	H ₂ O	CaCl ₂	g kg	mg dm ³	cmol _c dm ⁻³				%				
0 - 20	5,3	4,5	39	15,7	0,06	1,6	0,9	0,2	2,2	2,6	4,8	55,8	6,9
20 - 40	4,7	3,9	25	2,7	0,02	0,3	0,3	1,1	7,7	0,6	8,3	7,3	65,9
Camada	Cu	Fe	Mn	Zn	S-SO ₄ ²⁻	B	Areia	Silte	Argila	Classe Textural			
	mg dm ³						%						
0 - 20	0,01	90,9	0,38	0,7	4,3	0,2	67,3	16,8	15,9	Franco arenosa			
20 - 40	0,08	76,8	0,08	0,3	6,4	0,2	65,7	21,5	12,8	Franco argilo arenosa			

M.O (matéria orgânica): Walkey e Black (oxidação via úmida); P, K, Cu, Fe, Mn, Zn: Melich1 ou duplo ácido; Ca, Mg e Al: cloreto de cálcio; B- água quente. H+Al: Acetato de cálcio, S-SO₄²⁻: sulfato de enxofre. Areia, silte, argila – método da pipeta; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V (%): saturação de bases; m (%): saturação por alumínio.

Apêndice 3. Fluxo de caixa da cultura da soja em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Investimento Inicial		Soja										
Preparo da área		3.244,64										
Correção do solo		953,02										
Total do investimento		R\$ 4.197,66										
Receita	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	
Soja		10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	10816,13	
Total de entrada	0	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	10.816,13	
Custeio												
Correção do solo		*	*	*	953,02	*	*	*	953,02	*	*	
Plantio		3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	3.616,52	
Tratos culturais		3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	3.202,40	
Colheita		1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	1.324,43	
Outros custos		1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	1.263,52	
Total de saída	-4.197,66	9.406,87	9.406,87	9.406,87	10.359,89	9.406,87	9.406,87	9.406,87	10.359,89	9.406,87	9.406,87	
Saldo	-4.197,66	1.409,26	1.409,26	1.409,26	456,24	1.409,26	1.409,26	1.409,26	456,24	1.409,26	1.409,26	

Outros custos incluem: Combustível, mão de obra, transporte externo.

Apêndice 4. Fluxo de caixa da cultura do arroz em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Investimento Inicial												
Preparo da área	Arroz											
Correção do solo	2.854,64											
Total do investimento	953,02											
	R\$ 3.807,66											
Receita	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	
Arroz		3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	
Total de entrada	0	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	3.256,44	
Custeio												
Correção do solo		*	*	*	953,02	*	*	*	953,02	*	*	
Plantio		1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	1.099,06	
Tratos culturais		1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	1.156,87	
Colheita		1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	1.180,10	
Outros custos		904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	904,56	
Total de saída	-3.807,66	4.340,60	4.340,60	4.340,60	5.293,62	4.340,60	4.340,60	4.340,60	5.293,62	4.340,60	4.340,60	
Saldo	-3.807,66	-1.084,16	-1.084,16	-1.084,16	-2.037,18	-1.084,16	-1.084,16	-1.084,16	-2.037,18	-1.084,16	-1.084,16	

Outros custos incluem: Combustível, mão de obra, transporte externo.

Apêndice 5. Características químicas e granulométricas do solo da área experimental do arroz sem calagem, na camada de 0-20 e 20-40 cm. Brejo, Maranhão, 2022.

Camada	pH	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	H ₂ O	CaCl ₂	g kg	mg dm ³	cmol _c dm ⁻³					%			
0 - 20	4,5	3,9	26	5,7	0,04	0,6	0,23	0,0	5,2	0,8	6,4	13,1	0,0
20 - 40	4,6	3,9	1	2,1	0,02	0,3	0,09	0,2	4,7	0,4	5,1	7,8	37,5
Camada	Cu	Fe	Mn	Zn	S-SO ₄ ²⁻	B	Areia	Silte	Argila	Classe Textural			
	mg dm ³						%						
0 - 20	0,02	98,7	0,08	0,4	9,4	0,2	61,8	19,5	18,7	Franco arenosa			
20 - 40	0,02	92,7	0,02	0,2	10,4	0,2	68,8	21,5	9,7	Franco argilo arenoso			

M.O (matéria orgânica): Walkey e Black (oxidação via úmida); P, K, Cu, Fe, Mn, Zn: Melich1 ou duplo ácido; Ca, Mg e Al: cloreto de cálcio; B- água quente. H+Al: Acetato de cálcio, S-SO₄²⁻: sulfato de enxofre. Areia, silte, argila – método da pipeta; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V (%): saturação de bases; m (%): saturação por alumínio.

Apêndice 6. Resumo da análise de variância para as variáveis biométricas de plantas de arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	AP (cm)	FV	AF (cm ²)
Com	33,6	4,0	524,7
Sem	33,7	4,0	584,4
Teste F	ns	ns	ns
DAE			
30	28,83	4,70	439,57
43	14,12	5,53	1010,19
55	20,77	5,60	1152,89
69	33,35	4,30	503,02
83	50,45	2,40	219,83
99	54,45	0,20	1,62
Teste F	**	**	**
Calagem X DAE	0.1744	0.9033	0.7832
CV1(%)	13,43	15,64	42,44
CV2(%)	9,68	14,50	47,52

AP: Altura de plantas (cm), FV: folhas verdes, AF: área foliar, DAE: dias após a emergência, Calagem x DAE: interação entre cultivado com e sem calagem e dias após a emergência, CV1: coeficiente de variação da parcela, CV2: coeficiente de variação da subparcelas. **, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste 't' (p <0,05), respectivamente.

Apêndice 7. Resumo da análise de variância para o acúmulo de matéria seca (kg ha⁻¹) em plantas de arroz com e sem calagem. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	MSF	MSC	MSPN	MST
	Kg ha ⁻¹			
Com	619	1.064	1.511	2.438
Sem	593	1.006	1.477	2.338
Teste F	ns	ns	ns	ns
DAE				
30	224	242	-	467
43	429	613	-	1042
55	666	1180	-	1847
69	927	1417	618	2962
83	746	1205	1425	3375
99	644	1553	2439	4636
Teste F	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.5658	0.1588	0.5599	0.4212
CV ₁ (%)	31,87	12,77	24,04	23,57
CV ₂ (%)	20,24	21,54	19,77	16,76

MSF: acúmulo de matéria seca das folhas; MSC: acúmulo de matéria seca dos colmos; MSPN: acúmulo de matéria seca das panículas; MST: acúmulo de matéria seca da planta total; DAE: dias após a emergência; CV₁: coeficiente de variação da parcela; CV₂: coeficiente de variação da subparcela. **, * e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste 't' (p <0,05), respectivamente.

Apêndice 8. Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas folhas de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	N	P	K	Ca	Mg	S
	Kg ha ⁻¹					
Com	11,98 a	0,52	4,23	5,22	4,32	0,59
Sem	8,68 b	0,43	4,88	4,25	3,46	0,63
Teste F	*	ns	ns	ns	ns	ns
DAE						
30	8,53	0,33	4,06	3,12	1,44	0,21
43	10,88	0,50	5,31	7,36	2,65	0,24
55	11,50	0,22	9,15	10,07	3,85	0,27
69	15,57	0,87	4,99	2,68	7,23	1,22
83	11,56	0,76	3,48	3,13	6,33	1,16
99	3,92	0,17	0,33	2,03	1,85	0,55
Teste F	**	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.0032	0.0030	0.2329	0.1555	0.4671	0.1054
CV ₁ (%)	19,34	38,64	30,68	37,27	39,74	24,95
CV ₂ (%)	24,37	23,09	28,65	27,64	36,95	33,97

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

Apêndice 9. Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nos colmos de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	N	P	K	Ca	Mg	S
	Kg ha ⁻¹					
Com	6,38	0,78	7,71	0,60	3,22	1,38
Sem	5,84	0,66	7,07	0,68	2,62	1,58
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DAE						
30	4,46	0,33	6,54	0,42	0,79	0,21
43	6,28	0,71	8,93	0,77	1,89	0,16
55	7,97	0,39	11,81	1,20	3,96	0,60
69	6,60	0,96	4,55	0,41	3,12	0,98
83	4,80	0,37	6,20	0,67	4,91	1,13
99	6,59	1,59	6,31	0,36	2,86	5,79
Teste F	**	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.2320	0.0001	0.1122	0.1338	0.2036	0.7999
CV ₁ (%)	15,47	14,88	20,00	18,10	26,02	67,7
CV ₂ (%)	20,23	20,79	16,86	30,09	28,12	51,59

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de significância.

Apêndice 10. Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas panículas das plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	N	P	K	Ca	Mg	S
	Kg ha ⁻¹					
Com	16,81	2,38	2,04	0,33	1,78	1,12
Sem	16,49	1,72	2,05	0,37	1,73	0,84
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DAE						
69	6,53	0,87	2,86	0,26	1,41	0,46
83	13,78	1,80	1,63	0,23	1,69	1,06
99	29,63	3,47	1,65	0,56	2,16	1,42
Teste F	**	**	**	**	*	*
Calagem X DAE	0.7874	0.0523	0.5143	0.4772	0.1103	0.5988
CV ₁ (%)	37,44	24,98	14,16	6,61	14,72	27,43
CV ₂ (%)	30,47	25,85	19,82	27,85	15,78	37,17

Apêndice 11. Resumo da análise de variância para acúmulo dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na planta inteira de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	N	P	K	Ca	Mg	S
	Kg ha ⁻¹					
Com	26,77	2,49	12,96	5,98	8,43	2,42
Sem	22,76	1,96	12,79	5,11	6,95	2,43
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DAE						
30	12,99	0,67	10,60	3,53	2,23	0,42
43	17,16	1,21	14,24	8,13	4,54	0,40
55	19,47	0,61	20,41	11,28	7,80	0,87
69	28,70	2,69	12,39	3,35	11,76	2,66
83	30,14	2,92	11,32	4,03	12,93	3,36
99	40,15	5,23	8,29	2,95	6,86	6,85
Teste F	**	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.0955	0.0022	0.1090	0.2195	0.4023	0.8599
CV ₁ (%)	26,84	22,24	18,32	32,36	30,81	18,93
CV ₂ (%)	21,55	18,71	14,10	24,21	27,80	17,48

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.

Apêndice 12. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas folhas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g ha ⁻¹				
Com	11,92	2,37	269,65	2.334,19	78,43
Sem	11,79	2,39	266,91	2.177,43	98,19
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns
DAE					
30	4,06	1,68	69,45	503,34	47,39
43	10,07	2,53	66,90	894,97	55,36
55	6,13	2,34	411,93	3.036,26	31,04
69	25,49	4,01	427,87	4.153,35	183,45
83	20,33	2,74	530,32	3.224,04	153,86
99	5,05	0,99	103,20	1.722,89	58,76
Teste F	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.1612	0.2033	0.3794	0.0001	0.0018
CV ₁ (%)	45,56	45,52	39,72	41,91	39,7
CV ₂ (%)	24,68	25,62	39,84	21,10	22,96

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.

Apêndice 13. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nos colmos de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g ha ⁻¹				
Com	10,04	2,52	130,78	922,85	76,04
Sem	7,66	2,80	173,98	995,98	81,20
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns
DAE					
30	4,42	1,63	79,14	303,59	41,40
43	5,82	3,08	67,17	664,14	79,03
55	14,65	3,93	358,89	1.556,21	59,59
69	12,04	2,49	115,69	1.564,30	107,60
83	7,33	3,55	170,49	1.570,68	153,91
99	8,85	1,28	122,92	97,57	30,18
Teste F	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.0125	0.2306	0.0001	0.9421	0.2534
CV ₁ (%)	20,63	11,89	23,56	11,36	10,45
CV ₂ (%)	25,14	34,69	20,85	34,40	21,95

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.

Apêndice 14. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas panículas de plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g ha ⁻¹		g ha ⁻¹		
Com	6,81	2,66	33,98 a	294,16	87,05
Sem	5,57	2,83	27,07 b	301,27	92,14
Teste F	ns	ns	*	ns	ns
DAE					
69	3,54	1,35	35,90	354,05	47,57
83	7,84	1,88	32,77	208,96	79,18
99	7,21	5,00	22,89	330,14	142,03
Teste F	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.2922	0.7204	0.0018	0.0355	0.5484
CV ₁ (%)	13,57	23,69	0,94	30,04	26,66
CV ₂ (%)	20,29	32,96	11,63	11,74	25,00

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.

Apêndice 15. Resumo da análise de variância para acúmulo dos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na planta inteira de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	B	Cu	Fe	Mn	Zn
			g ha ⁻¹		
Com	25,37	6,22	417,42	3.404,12	198,00
Sem	22,24	6,60	454,43	3.324,04	225,46
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns
DAE					
30	8,48	3,30	148,59	806,93	88,79
43	15,89	5,60	134,08	1.559,11	134,39
55	20,78	6,27	770,83	4.592,46	90,63
69	41,06	7,85	579,46	6.071,69	338,62
83	35,50	8,17	733,58	5.003,68	386,96
99	21,11	7,27	249,01	2.150,60	230,97
Teste F	**	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.0111	0.9340	0.9561	0.0000	0.1564
CV ₁ (%)	32,45	28,00	32,61	32,31	27,6
CV ₂ (%)	16,86	21,78	27,32	18,90	18,30

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.

Apêndice 16. Resumo da análise de variância para acúmulo do silício (Si) em plantas de arroz com e sem calagem em área de abertura no cerrado maranhense. Brejo, Maranhão, 2022.

Calagem	Folha	Colmo	Panícula	Planta Inteira
	kg ha ⁻¹			
Com	7,84	7,40 a	3,90	17,19 a
Sem	7,13	5,93 b	4,09	15,10 b
Teste F	ns	*	ns	*
DAE				
30	1,75	1,79	-	3,55
43	3,04	3,80	-	6,85
55	5,43	8,05	-	13,48
69	18,08	7,27	2,81	28,16
83	11,40	9,74	3,47	24,61
99	5,19	9,35	5,69	20,23
Teste F	**	**	**	**
Calagem X DAE	0.0929	0.0659	0.4577	0.3191
CV ₁ (%)	27,20	10,64	14,74	16,21
CV ₂ (%)	19,09	24,24	18,70	17,38

DAE – dias após a emergência, CV₁ - coeficiente de variação da parcela, CV₂ – coeficiente de variação da subparcela. **, *: significativo a 1%, 5% pelo teste t (p <0,05), ns: não significativo.