UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RODRIGO DE SOUZA FERREIRA

SILICATO, CALCÁRIO E GESSO NA CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE UM SOLO ARENOSO EM INÍCIO DE SISTEMA AGROPECUÁRIO: efeitos na nutrição, fisiologia e produtividade do milho consorciado com capim-braquiária

Ilha Solteira - SP
2026
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RODRIGO DE SOUZA FERREIRA

SILICATO, CALCÁRIO E GESSO NA CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE UM SOLO ARENOSO EM INÍCIO DE SISTEMA AGROPECUÁRIO: efeitos na nutrição, fisiologia e produtividade do milho consorciado com capim-braquiária

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, Unesp- Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Agronomia

Especialidade: Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Shintate Galindo

Co-orientador: Prof. Dr. Vagner do Nascimento

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Ferreira, Rodrigo de Souza.
F383s Silicato, calcário e gesso na construção do perfil de um solo arenoso em início de sistema agropecuário: efeitos na nutrição, fisiologia e produtividade do milho consorciado com capim-braquiária / Rodrigo de Souza Ferreira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
90 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Agronomia - Sistemas de Produção, 2026

Orientador: Fernando Shintate Galindo
Coorientador: Vagner do Nascimento
Inclui bibliografia

1. Manejo de corretivos em solos tropicais. 2. Aplicação de silício em solo arenoso. 3. Agricultura sustentável. 4. Zea mays.

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa apresenta potencial de impacto científico, técnico, econômico, social e ambiental ao ampliar o conhecimento sobre o manejo da fertilidade de solos arenosos tropicais em sistemas integrados de produção. Os resultados demonstram que a associação de calcário ou silicato com gesso agrícola pode melhorar as condições químicas do solo, a nutrição, a eficiência fisiológica, o crescimento e a produtividade do milho consorciado com forrageiras, além de proporcionar efeitos residuais positivos na pastagem subsequente. As informações geradas podem subsidiar estratégias mais eficientes de correção e construção da fertilidade do solo, contribuindo para sistemas agrícolas mais produtivos, resilientes e sustentáveis, especialmente em regiões sujeitas a déficit hídrico e elevadas temperaturas. A pesquisa também possui relevância educacional e inovadora ao integrar aspectos de solo, nutrição, fisiologia e produtividade, contribuindo para a formação de recursos humanos e para a geração e difusão de conhecimento aplicável às condições agrícolas regionais e nacionais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research has the potential for scientific, technical, economic, social, and environmental impact by expanding knowledge on soil fertility management in tropical sandy soils under integrated production systems. The results demonstrate that the association of lime or silicate with agricultural gypsum can improve soil chemical conditions, plant nutrition, physiological efficiency, growth, and yield of maize intercropped with forage plants, in addition to providing positive residual effects on the subsequent pasture. The information generated may support more efficient strategies for soil correction and fertility building, contributing to more productive, resilient, and sustainable agricultural systems, especially in regions subject to water deficit and high temperatures. The research also has educational and innovative relevance by integrating aspects of soil, nutrition, physiology, and productivity, contributing to human resource training and to the generation and dissemination of knowledge applicable to regional and national agricultural conditions.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILICATO, CALCÁRIO E GESSO NA CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE UM SOLO ARENOSO EM INÍCIO DE SISTEMA AGROPECUÁRIO: EFEITOS NA NUTRIÇÃO, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DO MILHO CONSORCIADO COM CAPIM-BRAQUIÁRIA

AUTOR: RODRIGO DE SOUZA FERREIRA
ORIENTADOR: FERNANDO SHINTATE GALINDO
COORIENTADOR: FERNANDO SHINTATE GALINDO
COORIENTADOR: VAGNER DO NASCIMENTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FERNANDO SHINTATE GALINDO
Data: 07/08/2026 08:17:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. FERNANDO SHINTATE GALINDO (Participaçao Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Dracena - FCAT

gov.br Documento assinado digitalmente
MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 07/08/2026 16:37:06-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

gov.br Documento assinado digitalmente
JOAO PAULO FERREIRA
Data: 07/08/2026 12:57:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. JOÃO PAULO FERREIRA (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia / Centro Universitário Padre Albino - UNIFIPA

Ilha Solteira, 07 de agosto de 2026.

Dedico este trabalho aos meus pais Vanilza Garcia de Souza e Rubens Ferreira da Silva e a minha esposa Inaraí Vitória de Oliveira Ferreira, que sempre me apoiaram no meu processo de formação acadêmica e pessoal, independentemente dos desafios enfrentados. Sou eternamente grato por todo esforço, empenho e cada sacrifício realizado para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por nunca ter me desamparado, seja nos momentos de dificuldade ou de alegria. Sem a Sua presença em minha vida, certamente eu não teria conseguido chegar até aqui. Foi por meio da fé que encontrei clareza para definir meus objetivos e forças para seguir em frente, mesmo diante dos desafios.

Aos meus pais, Rubens e Vanilza, minha eterna gratidão por todos os ensinamentos e por me mostrarem, com sabedoria, como a vida realmente é. Vocês nunca permitiram que eu desistisse e sempre se dedicaram para que eu pudesse trilhar o melhor caminho possível. A força, o caráter e a determinação de vocês são minha maior inspiração.

À esposa, Inaraí Vitória, por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e sendo um verdadeiro exemplo de companheirismo. Sua presença foi essencial em toda essa caminhada.

Ao meu professor e orientador, Prof. Dr. Fernando Shintate Galindo, deixo meu profundo agradecimento por toda a dedicação, pelos ensinamentos, conselhos e apoio ao longo da minha trajetória. Sou imensamente grato por sua contribuição na minha formação acadêmica e pessoal, e, sobretudo, pela amizade construída ao longo desse período.

Ao Grupo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Sistemas Agrícolas Sustentáveis (GEPESAS), por me proporcionar a honra de fazer parte de uma equipe tão especial. Foi nesse ambiente que pude crescer, corrigir falhas e aprimorar minhas qualidades. Cada aprendizado, cada desafio e cada momento de convivência foram fundamentais para a minha formação.

Ao grupo Agronelli, em nome de Maurício Komori por todo apoio com produtos e suporte técnico ao longo da condução da presente pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando momentos de alegria e me apoiando nas dificuldades. Levarei cada um de vocês comigo por toda a vida, com enorme carinho e gratidão.

TRECHO DA MÚSICA: IRMÃO DA LUA, AMIGO DAS ESTRELAS (Zezé de Camargo e Luciano)

“(...) Cansei de me perder no caminho dessa madrugada,
Ser irmão da lua chorar na calçada
Amigo das estrelas buscando carinho,
Também preciso ser feliz e tem que ser agora
Se não a vida passa no romper da aurora
E num piscar de olhos a gente está sozinho (...)”

RESUMO

Embora os benefícios da aplicação de corretivos de solo (calcário, silicato e gesso agrícola) sejam amplamente reconhecidos, seus efeitos sobre a fisiologia, nutrição e crescimento de culturas em sistemas agropecuários integrados ainda são pouco estudados, especialmente em solos arenosos, de baixa fertilidade e matéria orgânica, sob condições de déficit hídrico e altas temperaturas. Objetivou-se avaliar as alterações fisiológicas, nutricionais e a influência no crescimento e produtividade da cultura do milho consorciado com mix de capim-braquiária (*Urochloa brizantha*), em função da aplicação isolada ou em conjunto de calcário, gesso e silicato, bem como o efeito residual dos tratamentos na formação e nutrição da pastagem subsequente. Em complemento, em ocasião da dessecação do capim-braquiária antecedendo o cultivo de milho no 2º ano, a fertilidade do solo foi avaliada em cada tratamento proposto nas profundidades 0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40 m a fim de se verificar a real avaliação da correção do solo nestes primeiros anos de instalação do sistema. O estudo foi desenvolvido em condições de campo, no município de Dracena-SP, uma região típica tropical, em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura arenosa. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com quatro repetições e 6 tratamentos: 1) controle (sem aplicação de corretivos); 2) aplicação de calcário dolomítico (28% de CaO, 20% MgO e PRNT de 80%); 3) aplicação de silicato de Calcio (Ca) e Magnésio (Mg) (10% de Si, 36% de CaO, 9% MgO e PRNT de 80%); 4) aplicação de gesso agrícola (17% de Ca e 14% de S – 22% de CaO e 35% de SO_4^{-2}); 5) aplicação de calcário dolomítico + gesso; 6) aplicação de silicato de Ca e Mg + gesso. Os resultados apontam que a aplicação conjunta dos corretivos de acidez de solo (calcário ou silicato) associado ao gesso agrícola beneficiaram os parâmetros de trocas gasosas, nutrição e a fotossíntese do milho. A otimização dos processos relacionados à fotossíntese, maior crescimento vegetativo (raiz e parte aérea), acúmulo de nutrientes em parte aérea e grãos, diâmetro do colmo, com maior translocação de fotoassimilados e enchimento de grãos favoreceu a produção total de biomassa de milho, conforme verificado pelo aumento na massa seca de parte aérea e grãos (25,1; 39,5% com silicato + gesso e 24,3; 36,6% com calcário + gesso, respectivamente). O mix pastagens consorciadas com milho também foi beneficiado pela aplicação conjunta de calcário + gesso e silicato + gesso, conforme verificado pelo maior acúmulo de nutrientes em parte aérea e maior aporte de massa seca de parte aérea do primeiro ao terceiro corte após formação da pastagem. Além disso, a aplicação de silicato + gesso e calcário + gesso, apresentaram maior capacidade de mobilidade ao longo do perfil do solo, o que é evidenciado pela maior uniformidade dos teores de nutrientes, CTC, SB, V% e correção do pH ao longo das camadas de solo, analisadas. Dessa forma, apesar de se tratar do início da construção de um perfil de solo arenoso, os resultados apontam benefícios na fisiologia do milho consorciado com forrageiras, com reflexo nos principais parâmetros e avaliações de componentes produtivos, quer seja do milho quanto da pastagem formada em sucessão à cultura. Por se tratar de um estudo de longa duração, novas informações relevantes acerca dos efeitos das combinações entre corretivos e gesso na dinâmica solo/planta, envolvendo aspectos químicos, físicos e biológicos serão gerados à longo prazo.

Palavras-chave: manejo de corretivos em solos tropicais; aplicação de silício em solo arenoso; agricultura sustentável; *Zea mays*.

ABSTRACT

Although the benefits of applying soil amendments (lime, silicate, and agricultural gypsum) have been widely recognized, their effects on the physiology, nutrition, and growth of crops grown in integrated crop–livestock systems remain poorly understood, particularly in sandy soils with low fertility and organic matter content under conditions of water deficit and high temperatures. The objective of this study was to evaluate the physiological and nutritional changes, as well as their influence on the growth and productivity of maize intercropped with palisade grass (*Urochloa brizantha*), in response to the isolated or combined application of lime, silicate, and agricultural gypsum. In addition, the residual effects of these treatments on the establishment and nutritional status of the subsequent pasture were assessed. Furthermore, at the time of palisade grass desiccation prior to maize cultivation in the second year, soil fertility was evaluated under each treatment at depths of 0–0.10, 0.10–0.20, and 0.20–0.40 m to verify the effectiveness of soil amendment practices during the initial years of system establishment. The experiment was conducted under field conditions in the municipality of Dracena, São Paulo State, Brazil, a typical tropical region, on a dystrophic Red–Yellow Ultisol with sandy texture. The experimental design consisted of randomized complete blocks with four replications and six treatments: (1) control (no soil amendments); (2) dolomitic lime (28% CaO, 20% MgO, and 80% ECC); (3) calcium and magnesium silicate (10% Si, 36% CaO, 9% MgO, and 80% ECC); (4) agricultural gypsum (17% Ca and 14% S; equivalent to 22% CaO and 35% SO_4^{-2}); (5) dolomitic lime + gypsum; and (6) calcium and magnesium silicate + gypsum. The combined application of soil acidity amendments (lime or silicate) with agricultural gypsum improved maize gas exchange, nutritional status, and photosynthetic performance. The optimization of photosynthesis-related processes, enhanced vegetative growth (shoot and root biomass), greater nutrient accumulation in shoots and grains, increased stem diameter, and improved photoassimilate translocation and grain filling resulted in greater total maize biomass production, as evidenced by increases in shoot and grain dry matter (25.1 and 39.5% with silicate + gypsum, and 24.3 and 36.6% with lime + gypsum, respectively). The pasture mixture intercropped with maize also benefited from the combined application of lime + gypsum and silicate + gypsum, as demonstrated by greater nutrient accumulation in the shoot and higher shoot dry matter production from the first to the third harvest following pasture establishment. In addition, the combined application of silicate + gypsum and lime + gypsum promoted greater downward movement of nutrients throughout the soil profile, resulting in a more uniform distribution of nutrient contents, cation exchange capacity (CEC), sum of bases (SB), base saturation (V%), and soil pH across the evaluated soil layers. Therefore, although this study represents the initial stage of sandy soil profile development, the results demonstrate that the combined use of soil amendments positively affects the physiology of maize intercropped with forage grasses, improving the main physiological traits and productive components of both maize and the subsequent pasture. As this is a long-term experiment, further important information regarding the effects of combinations of soil amendments and gypsum on soil–plant interactions, including chemical, physical, and biological processes, will be generated over the coming decades.

Keywords: management of correctives in tropical soils; application of silicon in sandy soil; sustainable agriculture; *Zea mays*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto aérea retirada do Google Earth com a área experimental (localizada junto à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da UNESP de Dracena - SP) em evidência. 38

Figura 2 – Temperaturas mínima (Tmin) e máxima (Tmax), evapotranspiração (ETo PN-M) e chuva ao longo da safra de pesquisa 2024/25. Dracena, SP. 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos do solo nas camadas de 0-0,20m e 0,20-0,40m antes do início do experimento. Dracena, SP. 49

Tabela 2 – Índice de clorofila foliar (ICF), massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSRAIZ), fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*Gs*), concentração interna de CO_2 na câmara subestomática (*Ci*), transpiração foliar (*E*) em ocasião de florescimento (R1) do milho em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 47

Tabela 3 – Altura de plantas (ALT), diâmetro do colmo (DIAMCOL), número de fileiras (NFIL), grãos por fileiras (GRFIL) e grãos por espiga (GRESP), massa de 100 grãos (CEMGR), massa seca de palhada (MSPALHA), produtividade de grãos de milho em ocasião de colheita (R6) em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.....48
8

Tabela 4 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 50

Tabela 5 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) no grãos de milho em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 52

Tabela 6 – Massa seca do mix de braquiária ao longo do ciclo, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 53

Tabela 7 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea do primeiro corte de mix de braquiária em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 54

Tabela 8 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea do quarto corte de mix de braquiária em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 56

Tabela 9 – Análise química na camada de 0-10 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 58

Tabela 10 – Análise química na camada de 0-10 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.....59
Tabela 11 – Análise química na camada de 0-10 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 60
Tabela 12 – Análise química na camada de 10-20 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 61
Tabela 13 – Análise química na camada de 10-20 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.....62
Tabela 14 – Análise química na camada de 10-20 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 63
Tabela 15. Análise química na camada de 20-40 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 65
Tabela 16 – Análise química na camada de 20-40 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.....66

Tabela 17 – Análise química na camada de 20-40 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25. 67

Sumário

1. INTRODUÇÃO 14
2. REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1. A CULTURA DO MILHO: IMPORTÂNCIA SOCIAL E ECONÔMICA 19
2.2. UTILIZAÇÃO DE PLANTAS EM CONSÓRCIO, COM ENFOQUE NO SISTEMA MILHO-BRAQUIÁRIA 21
2.3. SISTEMA PLANTIO DIRETO E CONSTRUÇÃO DE PERFIL DE SOLO 25
2.4. CORRETIVOS DE ACIDEZ DO SOLO 29
2.5. SILÍCIO NA AGRICULTURA 32
3. OBJETIVOS 37
4. MATERIAL E MÉTODOS 38
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL 38
4.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS 40
4.3. MANEJO E TRATOS CULTURAIS 42
4.4. AVALIAÇÕES 43
4.4.1. Avaliações no milho 43
4.4.2. Avaliação no capim-braquiária 45
4.4.3. Análises de solo 46
4.5. FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS 46
5. RESULTADOS 47
5.1. AVALIAÇÕES NO FLORESCIMENTO DO MILHO (R1) 47
5.2. AVALIAÇÕES EM OCASIÃO DE COLHEITA (R6) 48
5.3. ACÚMULO DE SILÍCIO E NUTRIENTES NA PARTE AÉREA E GRÃOS DE MILHO 49
5.4. MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE SILÍCIO E NUTRIENTES NO MIX DE BRAQUIÁRIA 53
5.5. ANÁLISE DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO 57
5.5.1. Camada 0-10 cm 57
5.5.2. Camada 10-20 cm 60
5.5.3. Camada 20-40 cm 64
6. DISCUSSÃO 68
7. CONCLUSÕES 76
REFERENCIAS 78

1. INTRODUÇÃO

Alimentar uma população crescente frente às mudanças climáticas e a necessidade de desenvolvimento de uma agricultura sustentável, de baixo carbono, resiliente e regenerativa balizará a sociedade mundial nas próximas décadas (Galindo *et al*., 2022, 2024). Dessa forma, expandir a agricultura baseada nos pilares modernos conservacionistas é mandatório para a manutenção da vida humana e do planeta. Nesse contexto, o Brasil tem potencial de assumir cada vez mais um papel central como protagonista na produção sustentável de alimentos. No entanto, além dos desafios climáticos, outras demandas são impostas na agricultura brasileira, como a falta de áreas agricultáveis passíveis de expansão, como ocorreu na região Central e Norte do país entre as décadas de 1960 a 1990. A agricultura brasileira terá de se reinventar em áreas antes consideradas marginais em função da baixa fertilidade natural dos solos, textura arenosa, temperaturas elevadas e déficit hídrico ao longo dos ciclos de cultivos agrícolas, a exemplo de muitas regiões da América do Sul, África, Ásia e Oceania.

No cenário apresentado do histórico da expansão do cerrado brasileiro um dos principais riscos à otimização dos sistemas de produção agrícola e à segurança alimentar refere-se à degradação do solo (Gibbs e Salmon, 2015). Os principais fatores globais da degradação do solo incluem os processos de erosão, uso intensivo incorreto, contaminação por metais pesados e outras substâncias tóxicas, e acidificação do solo (FAO, 2015). Estimativas apontam que cerca de 2,0 bilhões de ha de solo agricultável são afetados pela elevada acidez (Bian *et al*., 2013), a qual consiste em um dos fatores químicos mais limitantes ao desenvolvimento das culturas e a capacidade de produção de alimentos em sistemas agrícolas tropicais (da Costa e Crusciol, 2016). Nesse contexto, a expressão dessa acidez reflete-se diretamente no pH do solo, o qual é usualmente influenciado pelo uso do solo, geologia e clima (Djodjic *et al*., 2021). No entanto, a acidificação do solo (ou seja, baixo pH do solo) é um processo natural que reduz a produtividade das culturas agrícolas, diminuindo a saturação por bases e a disponibilidade de nutrientes, e aumentando a solubilidade de metais como alumínio (Al), ferro (Fe) e manganês (Mn), que podem ser tóxicos para as plantas (Holland *et al*., 2018). Esse processo tem sido acelerado pela maior

deposição de nitrogênio (N) e enxofre (S) relacionada às atividades humanas (Kunhikrishnan *et al*., 2016).

Solos ácidos e intemperizados são naturalmente menos férteis devido à disponibilidade limitada de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), fósforo (P) e alta disponibilidade de alumínio (Al^{3+}) (Da Costa *et al*., 2018; Nora *et al*., 2017). A acidificação do solo afeta tanto a superfície quanto subsuperfície dos solos, com influência negativa na produção de biomassa e produtividade das culturas (Bossolani *et al*., 2021a, 2022, 2023; Galindo *et al*., 2021). Além disso, estudos têm evidenciado que a acidificação do solo impacta negativamente o potencial das culturas em mitigar as emissões de gases de efeito estufa (e.g. N_2O, CH_4 e CO_2). A baixa disponibilidade de nutrientes associada aos altos teores de Al^{3+} leva à inibição do crescimento das raízes e, consequentemente, à redução na absorção de água e nutrientes, resultando em distúrbios fisiológicos, menor fixação de carbono (C) e produtividade (Eekhout *et al*., 2017). Ainda, regiões tropicais e que apresentam solos arenosos e de baixa fertilidade, estão sujeitas a períodos de estresse hídrico em praticamente grande parte do ano. A combinação de textura arenosa, baixa fertilidade do solo, matéria orgânica e desenvolvimento limitado das raízes associado a períodos prolongados de limitação hídrica contribui fortemente para a redução no crescimento e produtividade das culturas, especialmente porque a vasta maioria da área cultivada está em condições de sequeiro e sem possibilidade de manejo de irrigação (Carmeis Filho *et al*., 2017). Em casos extremos, essa combinação pode ocasionar o processo de desertificação, tornando os solos improdutivos e criando verdadeiras áreas desérticas, sendo um processo praticamente irreversível.

Embora diversos avanços tecnológicos tenham auxiliado no desenvolvimento de plantas mais resistentes a estresses abióticos (Gupta *et al*., 2020), práticas de manejo do solo que possibilitem o desenvolvimento das culturas, principalmente em condições edafoclimáticas desfavoráveis, típicas das condições tropicais, são crucias para o aumento na produção de alimentos de maneira integrada e sustentável (Holland *et al*., 2018). Nesse sentido, diversas tecnologias de manejo visando mitigar os efeitos prejudiciais da acidificação do solo, melhorar e sustentar a qualidade do solo e produtividade agrícola vem sendo desenvolvidas. Em particular, a calagem tornou-se uma prática chave para aumentar os níveis de fertilidade e restaurar a qualidade do solo (Holland *et al*., 2018;(Bossolani *et al*., 2021a, 2022, 2023). A

calagem tem como um dos principais objetivos aumentar o pH do solo, o que por sua vez melhora a capacidade efetiva de troca de cátions a saturação por bases, além de reduz as concentrações de Al^{3+} e Mn tóxicos (Bossolani *et al*., 2021a; Crusciol *et al*., 2019).

Entre as principais fontes de corretivos de acidez utilizados na agricultura, podem ser citadas o calcário dolomítico [$CaMg(CO_3)_2$], carbonato de cálcio ($CaCO_3$), óxido de cálcio (CaO), hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] e silicato de Ca e Mg [$CaMg(SiCO_3)_2$]. Embora o calcário dolomítico seja a fonte de corretivo mais utilizado devido à sua capacidade de corrigir a acidez do solo e fornecer Mg^{2+} além de Ca^{2+} (Bossolani *et al*., 2022; Li *et al*., 2019), o silicato de Ca e Mg é cerca de 6 a 7 vezes mais solúvel do que os carbonatos, permitindo reações químicas com maior velocidade de correção, além de fornecer silício (Si) as culturas (Alcarde; Rodella, 2003; Ramos *et al*., 2006).

O silicato de Ca e Mg como fonte de corretivo pode corrigir a acidez do solo; aumentar o pH do solo, a disponibilidade de Si, Ca, Mg e P; e diminuir os efeitos tóxicos de metais pesados como Al, Fe e cádmio (Cd) (Antonangelo *et al*., 2017; Castro *et al*., 2016; Crusciol *et al*., 2016). O Si é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre após o oxigênio (Neu *et al*., 2017; Tubana *et al*., 2016). No entanto, sua disponibilidade em solos tropicais é limitada principalmente pelos altos níveis de intemperismo e dessilicatização de minerais primários (Haynes, 2017; Vander Linden and Delvaux, 2019; Walsh *et al*., 2018). Nos últimos anos, o uso de fontes de Si na agricultura tem sido relatado propiciando o crescimento e desenvolvimento das plantas, com maior absorção e eficiência de uso de nutrientes, principalmente em culturas de cereais (Conceição *et al*., 2019; Ramírez-Olvera *et al*., 2019; Xu DangHui *et al*., 2018). Considerando que o teor de Si em solos tropicais é baixo, podendo apresentar teores inferiores à 1% devido ao já mencionado processo de intemperismo e dessilicatização (Fujii *et al*., 2018) e que algumas culturas (principalmente gramíneas, como cana-de-açúcar, arroz, trigo e milho) podem remover/acumular Si rapidamente e em grande quantidade (Tubana *et al*., 2016), estudos com aplicação de Si na forma de corretivo de acidez do solo em condições tropicais e solos arenosos devem ser realizados.

Apesar dos diversos benefícios supramecionados da calagem e silicatagem, devido à baixa solubilidade das fontes, os efeitos dessas práticas agrícolas ocorrem

principalmente nas camadas superficiais, principalmente após aplicações superficiais sob plantio direto, e mais lentamente nas camadas mais profundas (Caires *et al*., 2011). Nesse contexto, a aplicação superficial de gesso agrícola é uma estratégia complementar importante para superar as limitações de calagem e silicatagem, principalmente em sistema plantio direto, com aplicação de corretivos em superfície (Bossolani *et al*., 2022; Crusciol *et al*., 2019). A aplicação de gesso agrícola também pode beneficiar a fertilidade do solo, no entanto não corrige a acidez do solo (Caires *et al*., 2011; Zoca and Penn, 2017). A aplicação de gesso aumenta os teores de Ca^{2+} e sulfato (SO_4^{2-}) ao longo do perfil do solo, o que reduz a toxicidade de Al^{3+} devido à formação do par iônico $AlSO_{4+}$ e à diminuição da saturação de Al^{3+} (Caires *et al*., 2011; Zoca and Penn, 2017). Essas mudanças melhoram o desenvolvimento das raízes em camadas mais profundas do solo (Da Costa *et al*., 2018), aumentando a tolerância da cultura ao déficit hídrico (da Costa e Crusciol, 2016; Nora *et al*., 2017). Assim como o déficit hídrico, diversos outros tipos de estresse abiótico podem afetar negativamente os processos fotossintéticos das plantas e gerar estresse oxidativo, com efeitos prejudiciais nas principais funções e componentes celulares (Gómez *et al*., 2019). Culturas estabelecidas em solos mais férteis tendem a ter uma maior capacidade de crescimento frente à maior disponibilidade de nutrientes, condutância estomática, fotossíntese e metabolismo antioxidante sob estresses ambientais (por exemplo, seca e temperaturas elevadas) e maior fixação de C (Bossolani *et al*., 2022). Além disso, plantas menos estressadas apresentam senescência retardada, o que aumenta ainda mais a capacidade fotossintética e possibilita altos rendimentos pelo maior período vegetativo (Gómez *et al*., 2019).

Novos estudos relacionados ao manejo de corretivos aplicados de forma integrada na construção de perfil do solo em condições tropicais, com textura arenosa são necessários para sustentar o aumento na produção de alimentos, em áreas marginais, que apresentam riscos inerentes às condições edafoclimáticas. Apesar de diversos estudos terem sido realizados nos últimos anos acerca da aplicação de calcário, fontes de Si e gesso agrícola, a maioria dos estudos não foca na interação dos benefícios oriundos da correção do solo em superfície e subsuperfície associado ou não à aplicação de Si visando a otimização do sistema produtivo consorciado milho-braquiária. Ainda, embora os benefícios da aplicação de corretivos de solo tenham sido amplamente descritos, o impacto na fisiologia, nutrição, crescimento e

desenvolvimento das culturas nem sempre foi o alvo dos estudos, especialmente em experimentos de campo em condições de baixa fertilidade, baixa matéria orgânica, textura arenosa, com acentuado déficit hídrico e temperaturas elevadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A CULTURA DO MILHO: IMPORTÂNCIA SOCIAL E ECONÔMICA

O milho (*Zea mays* L.) ocupa posição de destaque entre as espécies cultivadas, tanto pelo volume produzido quanto pela sua importância alimentar, energética e industrial. Sua origem está associada à domesticação de teosintos, processo que resultou em alterações na arquitetura da planta, no tamanho da espiga, na exposição dos grãos e na seleção de características agronômicas desejáveis. Essas transformações contribuíram para a formação do milho moderno, marcado por ampla diversidade morfológica, fisiológica e adaptativa, permitindo seu cultivo em diferentes regiões agrícolas do mundo (Yang *et al*., 2023).

Durante a domesticação e expansão geográfica da cultura, características como a adaptação do sistema radicular e a capacidade de resposta a diferentes condições ambientais favoreceram sua consolidação em áreas sujeitas a déficit hídrico, solos de fertilidade variável e distintos ciclos de cultivo. Além disso, o milho pertence à família Poaceae e apresenta metabolismo fotossintético C4, o que lhe confere elevada eficiência no uso da radiação solar, especialmente em condições de alta luminosidade e temperatura (Yu *et al*., 2024).

A versatilidade agronômica do milho está relacionada ao ciclo relativamente curto, à diversidade genética, à ampla oferta de híbridos e às diferentes finalidades de uso. A cultura pode ser destinada à produção de grãos, silagem, milho verde, sementes, etanol, amido, óleo e coprodutos utilizados na alimentação animal. Essa flexibilidade permite sua presença tanto em sistemas agrícolas intensivos quanto em pequenas e médias propriedades, com importância produtiva, econômica e social (Yu *et al*., 2024; IBGE, 2026; CONAB, 2026).

No Brasil, a segunda safra modificou significativamente a dinâmica produtiva do milho, especialmente pela sua inserção após a colheita da soja em várias regiões, como o Centro-Oeste. Esse arranjo ampliou a oferta nacional, reduziu parte da sazonalidade dos preços e fortaleceu a participação do país no mercado externo. Entretanto, a produção permanece dependente da data de semeadura, do regime de chuvas, do risco de veranicos, de geadas localizadas e da disponibilidade de crédito, logística e insumos (Souza, Silveira e Ballini, 2023).

Nesse contexto, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) exerce papel importante ao indicar datas de semeadura, municípios aptos e níveis de risco para a cultura, considerando solo, clima e ciclo das cultivares. Essa ferramenta contribui para reduzir perdas por seca, excesso de chuva ou baixas temperaturas em fases sensíveis do desenvolvimento, além de orientar políticas de crédito rural e seguro agrícola (Brasil, 2026a).

No plano mundial, o milho está entre os cereais de maior produção e circulação comercial, ao lado do trigo e do arroz. Segundo dados da FAOSTAT, a cultura está presente em mais de 150 países, com produção concentrada em grandes produtores, como Estados Unidos, China, Brasil e Argentina. Essa concentração influencia preços internacionais, estoques, segurança alimentar, uso energético e disponibilidade de grãos para a pecuária intensiva (FAOSTAT, 2026).

O Brasil ocupa posição estratégica nesse mercado por combinar grande área agrícola, possibilidade de duas safras anuais e crescente capacidade exportadora. Para a safra 2025/2026, a CONAB estima consumo interno próximo de 94,6 milhões de toneladas e exportações em torno de 46,5 milhões de toneladas, impulsionadas pela demanda alimentar, pela produção animal e pelo avanço do etanol de milho. Levando em consideração, a projeção de safra com área de produção estimada em 22,6 milhões de hectares, com produtividade média de 6.220 kg ha^{-1} e produção total de 140,5 milhões de toneladas (CONAB, 2026). Esses números demonstram a relevância do cereal para o abastecimento interno e para a geração de divisas.

A importância econômica do milho também se relaciona à sua integração com diferentes cadeias produtivas. O grão é amplamente utilizado na formulação de rações para aves, suínos, bovinos de leite e bovinos de corte, além de servir como matéria-prima para agroindústrias. Em regiões dependentes da proteína animal, oscilações na produção ou no preço do milho afetam diretamente os custos de produção, a renda dos produtores e os preços dos alimentos ao consumidor (Camargo, Battisti e Dalchiavon, 2022).

Além da alimentação animal, o milho ganhou relevância na produção de etanol, especialmente quando associado à segunda safra. Essa rota industrial amplia a agregação de valor ao grão e gera coprodutos destinados à alimentação animal, como os grãos secos de destilaria. No Brasil, o avanço do etanol de milho tem se destacado no Centro-Oeste, integrando produção agrícola, biocombustíveis, confinamento

bovino e infraestrutura logística. Contudo, sua expansão exige análise sobre transporte, disponibilidade de grãos, demanda regional por ração, uso de água e eficiência agroindustrial (Gurgel *et al*., 2024).

A leitura econômica da cultura exige atenção à formação de preços. Embora a expansão da safra de inverno tenha reduzido parte da sazonalidade tradicional, ainda persistem variações associadas ao clima, câmbio, estoques, frete, demanda externa e custos de insumos. Assim, a produtividade elevada nem sempre se converte em maior margem ao produtor, especialmente em regiões distantes de portos ou centros consumidores (Souza, Silveira e Ballini, 2023).

Do ponto de vista técnico, a produtividade do milho depende da interação entre potencial genético, qualidade da semeadura, fertilidade do solo, disponibilidade hídrica, manejo fitossanitário e regularidade climática. A cultura apresenta elevada exigência nutricional, principalmente em nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, sendo sensível a solos mal corrigidos ou de baixa fertilidade. Dessa forma, seu desempenho produtivo está diretamente associado ao planejamento técnico e ao manejo adequado do sistema de produção (Yu *et al*., 2024; CONAB, 2026).

2.2. UTILIZAÇÃO DE PLANTAS EM CONSÓRCIO, COM ENFOQUE NO SISTEMA MILHO-BRAQUIÁRIA

A utilização de plantas em consórcio representa uma forma de intensificação agrícola baseada no cultivo simultâneo de duas ou mais espécies na mesma área, durante parte ou todo o ciclo produtivo. Essa estratégia busca explorar diferenças entre plantas quanto à arquitetura, velocidade de crescimento, exigência por luz, uso de água e absorção de nutrientes. No caso do milho consorciado com braquiária, a lógica agronômica concentra-se na produção de grãos associada à formação de biomassa forrageira ou palhada residual (Souza *et al*., 2025).

O consórcio pode assumir diferentes arranjos, definidos pelo momento de implantação, pela posição das linhas, pela densidade de semeadura e pelo objetivo produtivo. A braquiária pode ser semeada simultaneamente ao milho, após a emergência da cultura principal, na linha, na entrelinha ou em sobressemeadura.

Cada alternativa altera a intensidade de competição, o estabelecimento da forrageira e o acúmulo final de biomassa (Lima *et al*., 2020).

No sistema milho-braquiária, o milho geralmente ocupa a posição de cultura comercial principal, enquanto a forrageira permanece subordinada ao manejo destinado à produção de grãos. Ainda assim, a braquiária apresenta grande relevância técnica, pois pode formar cobertura vegetal após a colheita, fornecer forragem no período seco e contribuir para maior permanência de resíduos na superfície do solo. O sucesso do arranjo depende do equilíbrio entre a supressão inicial da forrageira e sua retomada de crescimento após a maturação do milho (Mingotte *et al*., 2020).

A braquiária, atualmente classificada em muitos estudos como *Urochloa* (syn. Brachiaria), apresenta características favoráveis ao consórcio, como tolerância a ambientes tropicais, elevada produção de raízes, capacidade de rebrota e bom potencial de formação de biomassa. Espécies como *Urochloa ruziziensis* e *Urochloa brizantha* são utilizadas com diferentes finalidades, sendo que a escolha do material interfere na velocidade de estabelecimento, na competição com o milho e na quantidade de resíduos produzidos após a colheita (Souza *et al*., 2025).

A semeadura simultânea do milho e da braquiária tende a aumentar a formação de biomassa, mas também pode elevar a competição por luz, água e nutrientes nos estádios iniciais do milho. Quando a forrageira é implantada mais tardiamente, a cultura principal ganha vantagem competitiva, embora a produção de palhada ou forragem possa ser menor ao final do ciclo. Essa decisão deve considerar época de cultivo, fertilidade do solo, regime hídrico, híbrido utilizado e finalidade do sistema (Coelho *et al*., 2023).

A disposição espacial e a densidade de plantas também modificam a interação entre as espécies. A semeadura da braquiária na entrelinha reduz a proximidade imediata com o milho, enquanto a semeadura na linha pode facilitar operações mecanizadas, mas aumentar a competição local. Da mesma forma, populações mais elevadas de milho aumentam a interceptação de luz e podem limitar o crescimento inicial da forrageira, exigindo ajuste do arranjo produtivo conforme o objetivo do sistema (Lima *et al*., 2020; Coelho *et al*., 2023).

A adubação nitrogenada interfere diretamente na relação entre milho e braquiária. O nitrogênio favorece o crescimento do milho, mas também pode estimular

a forrageira quando há luz disponível, intensificando a competição em determinados estádios. Por outro lado, a presença da braquiária pode alterar a dinâmica do nitrogênio no sistema, retendo parte do nutriente na biomassa e reduzindo perdas após a colheita. Assim, a recomendação de adubação deve considerar a cultura principal e a espécie consorciada, e não apenas o milho isolado (Souza *et al*., 2022).

A ciclagem de nutrientes constitui uma das vantagens mais discutidas no consórcio milho-braquiária. A forrageira explora camadas do solo com sistema radicular denso, absorve nutrientes residuais e os devolve gradualmente pela decomposição da biomassa. Além disso, a permanência de raízes e resíduos vegetais pode alterar a atividade biológica do solo, a mineralização de compostos orgânicos e os fluxos de nitrogênio no sistema, indicando que os efeitos do consórcio vão além do rendimento de grãos no ano de implantação (Canisares *et al*., 2021a; Canisares *et al*., 2021b).

A produção de palhada é outro atributo relevante no sistema milho-braquiária. Após a colheita do milho, a forrageira retoma o crescimento com maior entrada de luz e pode formar cobertura vegetal persistente. Essa biomassa reduz a exposição do solo, limita a emergência de plantas daninhas e favorece a continuidade de sistemas conservacionistas, especialmente em regiões onde o período seco dificulta a manutenção de cobertura vegetal (Mingotte *et al*., 2020).

O consórcio também oferece alternativa para formação de pastagem após a colheita do milho. Nessa condição, a braquiária deixa de atuar apenas como planta de cobertura e passa a integrar o componente pecuário, permitindo pastejo em períodos de menor oferta forrageira. A qualidade e a quantidade da forragem dependem da espécie utilizada, da adubação, do sombreamento durante o ciclo do milho e do intervalo entre a colheita e a entrada dos animais (Coelho *et al*., 2023).

Apesar dos benefícios potenciais, o consórcio milho-braquiária exige manejo cuidadoso para evitar perdas de produtividade. A braquiária pode competir com o milho principalmente quando emerge vigorosamente no início do ciclo ou quando há restrição hídrica. O uso de subdoses de herbicidas, como glyphosate, foi avaliado como alternativa para reduzir temporariamente o crescimento da forrageira, preservando a cultura principal e permitindo posterior recuperação da braquiária. Essa prática, contudo, requer precisão técnica e adequação ao sistema de produção (Lima *et al*., 2020).

A competição entre milho e braquiária varia ao longo do ciclo. Nos estádios iniciais, o milho precisa estabelecer rapidamente área foliar e sistema radicular; por isso, interferências intensas podem reduzir acúmulo de matéria seca e componentes de rendimento. Após o fechamento do dossel, o sombreamento limita o crescimento da forrageira. No final do ciclo, com a senescência do milho, a braquiária encontra condições para retomada de crescimento, desde que tenha sobrevivido ao período de menor luminosidade (Souza *et al*., 2025).

A presença da braquiária também modifica as interações com insetos, inimigos naturais e plantas espontâneas. Em milho consorciado com braquiária, verificou-se maior complexidade biológica no agroecossistema, com efeitos positivos e negativos conforme o organismo avaliado. A estratégia pode favorecer inimigos naturais e reduzir alguns insetos-praga, mas também pode alterar a ocorrência de cigarrinhas e outros agentes associados à cultura. Por isso, o consórcio não deve ser tratado como solução automática, mas como arranjo que demanda monitoramento fitossanitário mais atento (Flausino *et al*., 2022).

A escolha entre milho solteiro e milho consorciado depende do objetivo produtivo e das condições de manejo. Quando o foco é apenas rendimento de grãos no curto prazo, o consórcio precisa demonstrar que não compromete a produtividade econômica. Quando se considera produção de palhada, forragem, ciclagem de nutrientes e uso posterior da área, a análise torna-se mais favorável ao sistema consorciado. Em avaliações recentes, fontes de nitrogênio alteraram a composição química e a produtividade do milho solteiro e consorciado, indicando respostas dependentes do manejo nutricional (Oliveira *et al*., 2026).

Em áreas de pastagem degradada ou em transição para sistemas agrícolas, o consórcio com braquiária pode contribuir para reorganizar o uso da área, combinando produção de grãos e recuperação gradual da cobertura vegetal. O milho oferece retorno econômico inicial, enquanto a forrageira permanece como componente de cobertura, pasto ou resíduo para a cultura seguinte. Assim, o consórcio milho-braquiária apresenta maior consistência quando integrado a um planejamento que considera época de semeadura, espécie forrageira, população de milho, adubação, controle inicial da braquiária e destino da biomassa (Batista *et al*., 2026; Souza *et al*., 2025).

2.3. SISTEMA PLANTIO DIRETO E CONSTRUÇÃO DE PERFIL DE SOLO

O Sistema Plantio Direto (SPD) configura-se como um modelo de manejo conservacionista baseado na ausência de revolvimento intensivo, na manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície e na diversificação de espécies ao longo do tempo. Sua concepção ultrapassa a simples semeadura sem preparo, pois depende da continuidade da cobertura, da proteção contra erosão, da atividade radicular e da reorganização gradual dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Em ambientes tropicais, esse sistema exige planejamento para formar um perfil produtivo estável em profundidade (Becker *et al*., 2024).

A construção de perfil de solo corresponde ao processo de melhoria progressiva das condições de crescimento radicular nas camadas exploradas pelas culturas. Esse processo envolve distribuição de poros, agregação, disponibilidade de água, acúmulo de carbono, ciclagem de nutrientes e redução de impedimentos químicos ou físicos. Portanto, não se limita à melhoria da camada superficial, mas busca ampliar a funcionalidade do volume de solo acessível às raízes, principalmente em sistemas intensivos de produção (Silva *et al*., 2024).

A ausência de revolvimento preserva a continuidade dos agregados e favorece a formação de poros biológicos, resultantes da decomposição de raízes e da atividade de organismos do solo. Com o tempo, os canais deixados por raízes anteriores facilitam a infiltração de água e o crescimento de novas raízes, reduzindo a dependência de preparo mecânico. Contudo, essa organização estrutural depende da quantidade e da qualidade dos resíduos vegetais, da diversidade de espécies e da regularidade do manejo adotado (Paschoal *et al*., 2020).

A cobertura permanente constitui uma das bases do SPD, pois regula a temperatura do solo, reduz o impacto direto das gotas de chuva, diminui perdas por escoamento superficial e conserva a umidade por mais tempo. Em sistemas com milho e gramíneas forrageiras, a produção de palhada é especialmente relevante, pois a elevada relação carbono/nitrogênio prolonga a permanência dos resíduos na superfície. Essa persistência protege o solo entre safras e sustenta a dinâmica biológica necessária à reorganização do perfil produtivo (Mingotte *et al*., 2020).

A diversificação de culturas contribui para distribuir raízes em diferentes profundidades, explorar nichos distintos e modificar a entrada de carbono no solo. Espécies com arquitetura radicular contrastante depositam resíduos em posições

variadas do perfil, criando gradientes de atividade biológica e favorecendo a estabilidade dos agregados. Em sucessões sob plantio direto, a presença de gramíneas aumentou o estoque e a estabilidade de carbono na camada superficial, reforçando a importância de rotações mais diversificadas (Souza *et al*., 2024).

A qualidade estrutural do solo sob SPD pode ser avaliada por métodos visuais e indicadores físicos. A observação de agregados, raízes, porosidade e compactação permite reconhecer limitações que análises químicas isoladas não captam. Em áreas com milho e forrageiras em plantio direto, a avaliação visual da estrutura indicou melhoria associada à presença de gramíneas, principalmente pela contribuição radicular e pela cobertura residual (Paschoal *et al*., 2020).

A compactação superficial ou subsuperficial permanece como um dos entraves do SPD mal conduzido. A ausência de preparo não impede a formação de camadas adensadas quando há tráfego excessivo, baixa cobertura ou pouca diversidade radicular. Por isso, a construção do perfil depende de raízes agressivas, alta produção de resíduos e manejo que evite operações em solo úmido. Em milho segunda safra consorciado com gramíneas, a qualidade estrutural esteve relacionada ao crescimento das plantas e à condição física criada pela cobertura forrageira (Cagna *et al*., 2023).

Em solos arenosos, o SPD apresenta desafios próprios, pois a baixa capacidade de retenção de água e nutrientes limita a persistência de melhorias quando não há aporte contínuo de biomassa. A construção do perfil nesses solos requer espécies de cobertura com bom desenvolvimento radicular e elevada produção de resíduos, capazes de aumentar a atividade microbiológica e melhorar a fertilidade ao longo dos ciclos. Em solo arenoso, plantas de cobertura elevaram a atividade microbiana e influenciaram o rendimento das culturas, demonstrando a importância da continuidade do sistema (Cordeiro, Echer e Araujo, 2021).

A qualidade físico-hídrica do solo é componente central da construção do perfil, pois determina a quantidade de água armazenada e disponível às plantas. Em solos tropicais arenosos sob plantio direto, plantas de cobertura alteraram atributos como densidade, resistência à penetração, porosidade e disponibilidade hídrica. Esses efeitos são relevantes porque a água disponível define parte da estabilidade produtiva em regiões sujeitas a períodos secos. Assim, a escolha das espécies de cobertura

deve considerar não apenas a produção de biomassa, mas também seus efeitos sobre armazenamento e fluxo de água no solo (Silva *et al*., 2024).

A matéria orgânica funciona como elo entre os componentes físicos, químicos e biológicos do SPD. Seu acúmulo favorece agregação, retenção de cátions, infiltração, atividade microbiana e ciclagem de nutrientes. Entretanto, em ambiente tropical, a decomposição acelerada exige entrada frequente de resíduos para evitar perdas de carbono. Em sucessões de culturas sob plantio direto, sistemas com gramíneas e consórcios alteraram o estoque e a estabilidade do carbono, mostrando que o perfil produtivo depende da permanência de fontes vegetais diversificadas (Souza *et al*., 2024).

A atividade microbiológica responde rapidamente ao manejo conservacionista e pode antecipar alterações que só aparecem posteriormente nos atributos químicos ou físicos. Em solo arenoso, a adoção de plantas de cobertura sob plantio direto aumentou indicadores microbiológicos e contribuiu para maior produtividade de culturas em sucessão. Essa resposta sugere que a construção do perfil começa pela intensificação dos fluxos biológicos, com participação da biota do solo na decomposição, mineralização e formação de agregados estáveis (Cordeiro, Echer e Araujo, 2021).

O SPD consolidado tende a apresentar estratificação de nutrientes, com maior acúmulo na superfície em razão da deposição de resíduos e da aplicação superficial de fertilizantes e corretivos. Essa estratificação pode ser positiva quando sustenta alta atividade biológica na camada superior, mas pode limitar o sistema se as camadas subsuperficiais permanecerem ácidas, compactadas ou pobres em bases. Dessa forma, a construção de perfil exige que a fertilidade acompanhe o crescimento radicular em profundidade, evitando concentração da funcionalidade apenas nos primeiros centímetros (Souza *et al*., 2025).

A utilização de condicionadores e corretivos em SPD deve ser interpretada dentro dessa lógica de perfil. O gesso agrícola, por apresentar maior mobilidade que o calcário, pode contribuir para o aumento de cálcio em subsuperfície e favorecer a exploração radicular. Em sistema de plantio direto consolidado, a aplicação residual de gesso associada a plantas de cobertura influenciou a fertilidade e a produtividade, indicando que a construção do perfil também depende de práticas químicas ajustadas à dinâmica do sistema (Souza *et al*., 2025).

As gramíneas tropicais têm grande importância na construção do perfil por produzirem elevada massa radicular e resíduos com decomposição mais lenta. A presença de *Urochloa brizantha* em rotação com feijão, trigo e milho resultou em efeito residual sobre fertilidade, matéria orgânica e distribuição radicular em sistema de plantio direto de médio prazo. Esse comportamento evidencia que raízes vivas e resíduos persistentes funcionam como agentes de reorganização do solo, contribuindo para melhoria gradual da camada explorada pelas culturas (Crusciol *et al*., 2023).

A produtividade das culturas em SPD depende da coerência entre cobertura, sucessão, estrutura e fertilidade. Em milho, a produção de grãos e palhada responde ao manejo adotado, sobretudo quando o sistema inclui forrageiras capazes de manter resíduos na superfície. A palhada não deve ser vista apenas como subproduto, pois interfere na proteção do solo, na conservação da umidade e na ciclagem de nutrientes. Em avaliações de manejo, a combinação entre milho, forrageira e plantio direto favoreceu a produção de resíduos e a sustentação do sistema (Mingotte *et al*., 2020).

A avaliação da saúde do solo em sistemas de longo prazo permite integrar atributos físicos, químicos e biológicos. Indicadores como densidade, carbono orgânico, pH, disponibilidade de nutrientes, estrutura e produtividade ajudam a interpretar se o plantio direto está apenas conservando a superfície ou realmente construindo ambiente radicular. Em Latossolo subtropical brasileiro, sistemas de uso da terra e preparo de longa duração alteraram a saúde do solo, demonstrando que a ausência de revolvimento precisa estar associada a práticas que mantenham a funcionalidade produtiva (Becker *et al*., 2024).

A construção de perfil não ocorre em uma única safra. Trata-se de uma mudança gradual, marcada pela repetição de entradas de biomassa, crescimento radicular, deposição de carbono, correção de limitações e redução de perdas superficiais. Em sistemas tropicais, resultados consistentes dependem da continuidade do manejo, pois intervalos sem cobertura ou sucessões pouco diversificadas interrompem os processos biológicos que sustentam a melhoria do solo. Assim, o uso de espécies de cobertura e gramíneas associado a construção do perfil do solo, aumenta a probabilidade de ganhos estruturais e funcionais ao longo dos anos (Crusciol *et al*., 2023; Souza *et al*., 2024).

2.4. CORRETIVOS DE ACIDEZ DO SOLO

A acidez do solo representa uma das limitações químicas mais recorrentes em ambientes tropicais cultivados, pois altera a disponibilidade de nutrientes, aumenta a atividade de alumínio tóxico e restringe o crescimento radicular. A correção dessa condição envolve a aplicação de materiais capazes de neutralizar íons hidrogênio e alumínio, elevar o pH e aumentar a saturação por bases. Em sistemas agrícolas recém-implantados, essa prática define o ponto de partida da fertilidade, principalmente quando o solo apresenta baixa reserva de cálcio e magnésio (Brum *et al*., 2026).

O calcário é o corretivo mais utilizado para reduzir a acidez, por conter carbonatos de cálcio e magnésio em proporções variáveis. Sua reação depende da dissolução das partículas, da umidade, da granulometria, do poder relativo de neutralização total e do contato com a massa de solo. Como a neutralização não ocorre de modo imediato, a antecedência da aplicação é um aspecto técnico importante para que os carbonatos reajam e modifiquem o equilíbrio químico do solo (Alves *et al*., 2025).

A elevação do pH após a calagem reduz a atividade de alumínio tóxico (Al^{+3}), aumenta a disponibilidade de cálcio e magnésio, eleva a saturação por bases e melhora o ambiente químico para as raízes. Esses efeitos favorecem maior exploração do perfil, absorção de nutrientes e estabilidade produtiva. Assim, a correção da acidez não se limita ao ajuste do pH, pois também recompõe bases trocáveis e melhora o equilíbrio nutricional do sistema (Alves *et al*., 2025; Bossolani *et al*., 2021).

A incorporação do calcário no início de sistemas agrícolas apresenta vantagem técnica quando o objetivo é corrigir camadas mais profundas desde a implantação. Como o calcário possui baixa mobilidade, sua ação tende a concentrar-se na região de aplicação, especialmente em sistemas sem revolvimento. Quando incorporado antes da consolidação do plantio direto, o corretivo entra em maior contato com as partículas do solo, favorecendo reação mais uniforme e reduzindo gradientes de acidez na camada preparada (Brum *et al*., 2026).

A aplicação superficial de calcário, comum em áreas já estabelecidas sob manejo conservacionista, apresenta resposta mais lenta em profundidade. Ainda assim, sua eficiência pode ocorrer de forma gradual, pela movimentação de produtos

da reação, atividade biológica e fluxos de água. Em milho, a calagem superficial foi associada à melhoria da fertilidade subsuperficial, redistribuição radicular, respostas fisiológicas e maior retorno econômico, evidenciando que efeitos em profundidade podem ocorrer quando há continuidade do manejo (Bossolani *et al*., 2022a).

O tempo de reação dos corretivos depende da fonte utilizada, do tamanho das partículas, da dose, da umidade e da capacidade tampão do solo. Materiais mais finos reagem com maior rapidez, enquanto partículas maiores prolongam o efeito residual. Solos argilosos e com maior teor de matéria orgânica exigem doses superiores para modificar o pH, ao passo que solos arenosos respondem mais rapidamente, mas possuem menor capacidade de manter bases no complexo sortivo. Essa diferença exige ajuste criterioso da dose e do intervalo de reaplicação (Pimentel *et al*., 2025).

O silicato de cálcio e magnésio apresenta comportamento semelhante ao calcário na neutralização da acidez, mas adiciona silício à solução do solo, principalmente na forma de ácido monossilícico, que pode ser absorvido pelas plantas e contribuir para maior resistência estrutural dos tecidos, melhor equilíbrio nutricional e maior tolerância a estresses bióticos e abióticos (Castro; Crusciol, 2013; Verma *et al*., 2024). Sua ação decorre da presença de ânions capazes de consumir acidez, além do fornecimento de Ca e Mg.

Embora o calcário dolomítico seja a fonte de corretivo mais utilizado devido à sua capacidade de corrigir a acidez do solo e fornecer Mg além e Ca (Li *et al*., 2019; Bossolani *et al*., 2022), o silicato é cerca de 6 a 7 vezes mais solúvel do que os carbonatos, permitindo reações químicas com maior velocidade de correção (Alcarde; Rodella, 2003). Além do efeito direto, o intemperismo de silicatos ricos em Ca e Mg tem sido discutido como uma rota potencial de sequestro de carbono, pela formação de bicarbonatos e carbonatos e pela possível estabilização do carbono orgânico em associações organominerais. Contudo, esse processo depende da mineralogia do material, tamanho de partícula, clima, drenagem e monitoramento adequado (te Pas; Hagens; Comans, 2023). A comparação entre estes deve considerar não apenas o poder neutralizante, mas também a composição química e o interesse agronômico do sistema, especialmente quando se busca associar correção da acidez, fornecimento de bases e aporte de silício para culturas submetidas a estresses (Antonangelo *et al*., 2022).

A gessagem apresenta natureza distinta da calagem. O gesso agrícola, composto principalmente por sulfato de cálcio, não é classificado como corretivo de acidez no sentido estrito, pois não neutraliza diretamente o pH como carbonatos ou silicatos. Sua contribuição ocorre pelo fornecimento de cálcio e enxofre, além da maior mobilidade do sulfato no perfil, favorecendo o deslocamento de Ca para camadas subsuperficiais e podendo reduzir a atividade tóxica do Al por complexação (Souza *et al*., 2025).

A associação entre calcário e gesso pode ser estratégica quando a camada superficial apresenta acidez corrigida, mas o subsolo mantém baixa disponibilidade de Ca e elevada saturação por Al. Nessa condição, o calcário atua de forma mais intensa na neutralização superficial, enquanto o gesso melhora a fertilidade em profundidade. Essa complementaridade favorece o crescimento radicular e pode aumentar a tolerância das culturas a períodos de restrição hídrica, pois raízes mais profundas acessam maior volume de solo (Bossolani *et al*., 2022b).

Em sistemas consolidados, o efeito residual do gesso pode permanecer por vários ciclos, alterando a distribuição de Ca, soma de bases e produtividade das culturas. A aplicação residual associada a plantas de cobertura modificou a fertilidade e o desempenho produtivo, indicando que o condicionamento subsuperficial depende não apenas da dose inicial, mas também da permanência de raízes e da ciclagem promovida pela biomassa. Esse comportamento reforça a necessidade de avaliar o perfil do solo, e não somente a camada superficial (Souza *et al*., 2025).

A aplicação superficial de diferentes materiais de correção e condicionamento pode produzir respostas contrastantes. Corretivos mais reativos, como cal hidratada e cal virgem, tendem a agir rapidamente, enquanto calcário e gesso apresentam dinâmica mais gradual e dependente da umidade. Além disso, o posicionamento do corretivo na implantação do sistema merece atenção, pois a aplicação localizada ou associada ao preparo profundo pode acelerar a correção de camadas específicas e aproximar o material da zona de maior crescimento radicular (Pimentel *et al*., 2025; Campos *et al*., 2022).

A correção da acidez também influencia processos biológicos do solo. A redução de limitações químicas, associada à disponibilidade de nutrientes, interfere na eficiência de uso do carbono pelos microrganismos ao longo do perfil. Em solos ácidos, a atividade microbiana pode ser limitada por toxidez, deficiência nutricional ou

baixa qualidade do ambiente químico. Quando a acidez é atenuada, a decomposição de resíduos e a transformação de nutrientes tendem a ocorrer sob condições mais favoráveis ao funcionamento biológico (Bertolino, Souza, Jones e Rosolem, 2025).

A resposta fisiológica das plantas à correção da acidez decorre da melhoria integrada do solo e da nutrição. Com maior disponibilidade de Ca e Mg e menor toxicidade por Al, as raízes exploram maior volume de solo, aumentando a absorção de água e nutrientes. Em culturas anuais, esse efeito pode refletir em trocas gasosas, eficiência fotossintética e produtividade. No milho, a correção da acidez é especialmente importante, pois a cultura apresenta elevada exigência nutricional e forte dependência de sistema radicular ativo (Bossolani *et al*., 2021; Bossolani *et al*., 2022a).

A construção química inicial de um solo agrícola exige interpretar calcário, silicato e gesso como insumos com funções complementares, mas não equivalentes. O calcário neutraliza a acidez e fornece Ca e Mg; o silicato também corrige a acidez e fornece Ca e Mg, além de acrescentar silício; e o gesso desloca Ca e sulfato para camadas mais profundas, sem elevar substancialmente o pH. Quando utilizados de forma planejada, esses materiais podem reduzir limitações químicas, favorecer raízes e criar ambiente mais adequado à intensificação produtiva (Brum *et al*., 2026; Antonangelo *et al*., 2022; Souza *et al*., 2025).

A definição de dose, fonte e forma de aplicação deve partir da análise química do solo em camadas, da capacidade tampão, do teor de argila, da saturação por bases, da saturação por Al e da exigência da cultura. Em início de sistema, a incorporação pode acelerar a uniformização química; em áreas consolidadas, aplicações superficiais e gessagem residual exigem acompanhamento temporal. Portanto, a efetividade dos corretivos depende da coerência entre diagnóstico, tempo de reação, mobilidade do material e profundidade que se pretende corrigir e o que se busca fornecer, como Ca, Mg e Si (Alves *et al*., 2025; Campos *et al*., 2022).

2.5. SILÍCIO NA AGRICULTURA

O silício (Si) é considerado elemento benéfico para diversas espécies vegetais, especialmente gramíneas, embora não seja classificado como essencial para completar o ciclo de vida da maioria das plantas. Na agricultura, seu interesse decorre

da capacidade de influenciar processos fisiológicos, nutricionais e estruturais, com reflexos sobre a tolerância a estresses e o desempenho produtivo. Sua absorção ocorre predominantemente na forma de ácido monossilícico, cuja disponibilidade depende da mineralogia, do pH, da umidade do solo e da fonte aplicada (Silva *et al*., 2023).

As fontes de Si utilizadas na agricultura incluem silicatos de cálcio e magnésio, silicatos de potássio, escórias silicatadas, fertilizantes solúveis, produtos foliares e nanopartículas de dióxido de silício. Cada fonte apresenta dinâmica própria de solubilidade, reatividade e efeito sobre o solo ou a planta. A aplicação pode ocorrer no solo, via foliar, em solução nutritiva ou por tecnologias mais recentes, sendo que a escolha deve considerar objetivo, cultura, solo, dose, modo de aplicação e fase fenológica (Fernandes *et al*., 2022; Liang *et al*., 2026).

A relevância agronômica do Si torna-se mais evidente em culturas acumuladoras, capazes de absorver e depositar quantidades expressivas do elemento nos tecidos. Gramíneas como arroz, cana-de-açúcar, milho, trigo e algumas forrageiras apresentam maior capacidade de acúmulo em relação a muitas dicotiledôneas. Após absorvido, o Si pode ser transportado pelo xilema e depositado como sílica amorfa em paredes celulares, cutícula, epiderme e tecidos de sustentação, modificando propriedades físicas e respostas das plantas ao ambiente (Dutra *et al*., 2023).

A classificação das plantas quanto ao acúmulo de Si ajuda a compreender por que determinadas culturas respondem mais intensamente à adubação silicatada. Espécies acumuladoras possuem mecanismos de absorção e transporte mais eficientes, o que permite maior concentração foliar e maior deposição em tecidos sujeitos à transpiração. De modo geral, os teores de Si nos tecidos vegetais podem variar de aproximadamente 0,1 a 10% da matéria seca, ou seja, de 1 a 100 g kg^{-1}. Para fins de classificação, plantas com concentração de Si na parte aérea ou nas folhas inferior a 0,5% da matéria seca (<5 g kg^{-1}) são consideradas não acumuladoras, aquelas com teores entre 0,5 e 1,0% (5 a 10 g kg^{-1}) são classificadas como intermediárias e espécies com teores superiores a 1,0% de Si na matéria seca (>10 g kg^{-1}) são consideradas acumuladoras (Epstein, 1999; Cornelis *et al*., 2011; Marafon; Endres, 2013). Essa classificação é importante porque culturas acumuladoras, especialmente gramíneas, tendem a apresentar maior resposta ao fornecimento de

Si, com reflexos na resistência mecânica dos tecidos, menor transpiração e maior tolerância a estresses bióticos e abióticos. Por isso, milho e cana-de-açúcar têm sido frequentemente usados para avaliar efeitos do Si sobre nutrição, fisiologia e produtividade (Dutra *et al*., 2023; Silva *et al*., 2023).

Entre os benefícios atribuídos ao Si, destaca-se sua contribuição à integridade estrutural dos tecidos vegetais. A deposição de sílica pode aumentar a rigidez de folhas e colmos, reduzir a transpiração excessiva e criar barreira física contra injúrias. Além do efeito mecânico, o Si também interfere em vias bioquímicas, equilíbrio oxidativo e expressão gênica, o que amplia sua importância em condições de estresse ambiental (Ning *et al*., 2026).

O déficit hídrico é uma das condições em que os efeitos do Si têm recebido maior atenção. Em ambientes com restrição de água, o elemento pode contribuir para manutenção do teor relativo de água, estabilidade de membranas, funcionamento estomático, preservação da fotossíntese e crescimento radicular. Em milho, sua aplicação sob seca favoreceu absorção de água, atividade antioxidante e rendimento, indicando atuação sobre processos coordenados de tolerância ao estresse (Ning *et al*., 2026). A relação entre Si e disponibilidade de água também foi observada em milho verde submetido a lâminas de irrigação e fertilização silicatada. Nessa condição, a resposta da cultura depende do equilíbrio entre oferta hídrica, absorção de nutrientes e eficiência fisiológica. O fornecimento de silicato pode auxiliar na manutenção do desenvolvimento quando a irrigação é limitada, embora os resultados variem conforme dose, ambiente de cultivo e condição hídrica (Fernandes *et al*., 2022).

O uso de nanopartículas de dióxido de silício ampliou a discussão sobre novas formas de fornecimento do elemento. Em plântulas de milho sob seca, as nanopartículas favoreceram crescimento, teor de clorofila, prolina, integridade de membranas, teor relativo de água e atividade de enzimas antioxidantes. Em déficit hídrico moderado, também foram associadas ao aumento da produtividade do milho e da produtividade da água, embora sua aplicação agrícola ainda exija cautela quanto à dose, custo, segurança ambiental e padronização de recomendações para campo (Sharf-Eldin *et al*., 2023; Liang *et al*., 2026).

A mitigação de estresses por Si está frequentemente associada à redução de danos oxidativos. Situações adversas elevam a produção de espécies reativas de

oxigênio, capazes de prejudicar membranas, proteínas e pigmentos. O Si pode estimular enzimas antioxidantes, preservar clorofilas e reduzir peroxidação lipídica, contribuindo para manutenção da atividade metabólica durante períodos de restrição hídrica (Sharf-Eldin *et al*., 2023; Ning *et al*., 2026).

A nutrição mineral também pode ser influenciada pelo Si. Em milho cultivado em solo tropical, diferentes métodos de aplicação alteraram a absorção de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre e o próprio silício. Essa interação sugere que o elemento benéfico pode modificar o ambiente rizosférico, a integridade das raízes ou a eficiência de absorção, embora a resposta dependa do tipo de solo, da disponibilidade inicial de nutrientes e da via de aplicação utilizada (Silva *et al*., 2023).

A relação entre Si e nitrogênio merece atenção em sistemas intensivos. Em plântulas de milho sob estresse moderado por amônio, o fornecimento de Si contribuiu para melhorar crescimento inicial, área foliar, raízes, índice SPAD e eficiência de absorção de nitrogênio. Esse efeito indica que o elemento pode auxiliar no ajuste metabólico quando há excesso relativo de amônio, favorecendo o crescimento e o equilíbrio fisiológico da planta (Almeida *et al*., 2025).

Além dos estresses abióticos, o Si pode interferir na interação entre plantas e insetos-praga. Em milho, o aumento do teor foliar de Si reduziu a desfolha causada por *Spodoptera frugiperda*, espécie de grande importância na cultura. A deposição de sílica nos tecidos pode dificultar a alimentação do inseto, embora mecanismos fisiológicos e bioquímicos também possam estar envolvidos. Essa resposta reforça o interesse do Si como componente complementar no manejo de estresses bióticos (Perdomo *et al*., 2022).

A produtividade das culturas acumuladoras pode responder ao Si quando há coincidência entre demanda fisiológica, ambiente restritivo e disponibilidade do elemento. Em cana-de-açúcar, a fertilização com Si via solo e foliar alterou a estequiometria elementar e aumentou a produtividade. No milho, o elemento tem sido associado à melhora do desempenho fisiológico e da produtividade de grãos sob clima tropical, especialmente quando a cultura enfrenta estresses durante fases sensíveis (Dutra *et al*., 2023; Lima *et al*., 2025).

A aplicação de Si deve ser interpretada como prática de manejo complementar, e não como solução isolada para limitações produtivas. Em solos tropicais, sua

disponibilidade pode ser baixa em áreas muito intemperizadas ou submetidas a extrações sucessivas por culturas acumuladoras. Nessas condições, fontes silicatadas podem repor Si e, dependendo da composição, também fornecer cálcio e magnésio. Para milho e outras gramíneas, o fornecimento planejado do elemento amplia a discussão sobre nutrição funcional e tolerância a estresses, sem substituir práticas básicas de correção, fertilização e manejo hídrico (Silva *et al*., 2023; Fernandes *et al*., 2022).

Apesar de o Si ser abundante nos solos, seu teor total não representa, necessariamente, sua disponibilidade às plantas. Em geral, o solo pode conter aproximadamente 50 a 400 g kg^{-1} de Si total, porém a maior parte encontra-se em formas pouco solúveis (Sahebi *et al*., 2015; Haynes, 2014). A fração disponível está relacionada, principalmente, ao ácido monossilícico (H_4SiO_4), cujas concentrações normalmente variam de 2,8 a 16,8 mg dm^{-3}, embora possam oscilar conforme mineralogia, pH, umidade, textura, teor de óxidos de Fe e Al, matéria orgânica e histórico de cultivo (Marafon; Endres, 2013; Schaller *et al*., 2021). Em solos tropicais muito intemperizados, ácidos, arenosos ou submetidos à extração contínua por culturas acumuladoras, a disponibilidade de Si pode ser reduzida por processos de dessilicatização, lixiviação, adsorção em óxidos de Fe e Al, polimerização/precipitação de formas solúveis e remoção pela colheita, especialmente quando resíduos culturais ricos em Si não retornam ao sistema (Haynes, 2014; Schaller *et al*., 2021).

Neste contexto, acredita-se que a construção do perfil do solo com diferentes condicionadores que forneçam Ca, Mg e Si, associada ao sistema plantio direto, pode trazer benefícios ao consórcio milho–braquiária.

3. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi avaliar, em condições de campo, as alterações fisiológicas, nutricionais e a influência no crescimento e produtividade da cultura do milho consorciado com capim-braquiária em função da calagem, gessagem e silicatagem, bem como o efeito residual dos tratamentos na formação e nutrição da pastagem subsequente. Em complemento, em ocasião da dessecação do capim-braquiária, antecedendo o cultivo de milho no 2º ano, a fertilidade do solo foi avaliada em cada tratamento proposto nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 m a fim de se verificar a real avaliação da correção do solo nestes primeiros anos de instalação do sistema.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi realizado em condições de campo, no município de Dracena, estado de São Paulo, Brasil (coordenadas geográficas 21º 27´16´´ S e 51º 33´29´´ O, 421 m acima do nível do mar), em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura arenosa, entre 2024 e 2025 (novembro a maio) (Figura 1). A classificação climática do local do estudo é caracterizada como Aw (clima tropical com inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. A área experimental apresentava histórico de cultivo com capim-braquiária (*Urochloa decumbens*) em estágio de degradação, não pastejado e roçado mecanicamente há mais de 5 anos, sendo a área experimental considerada como área de abertura agrícola. A caracterização dos atributos químicos do solo foi realizada antes da implantação do experimento de acordo com Van Raij *et al*. (2001) e Teixeira (2017) (Tabela 1).

Figura 1 – Foto aérea retirada do Google Earth com a área experimental (localizada junto à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da UNESP de Dracena - SP) em evidência.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2026)

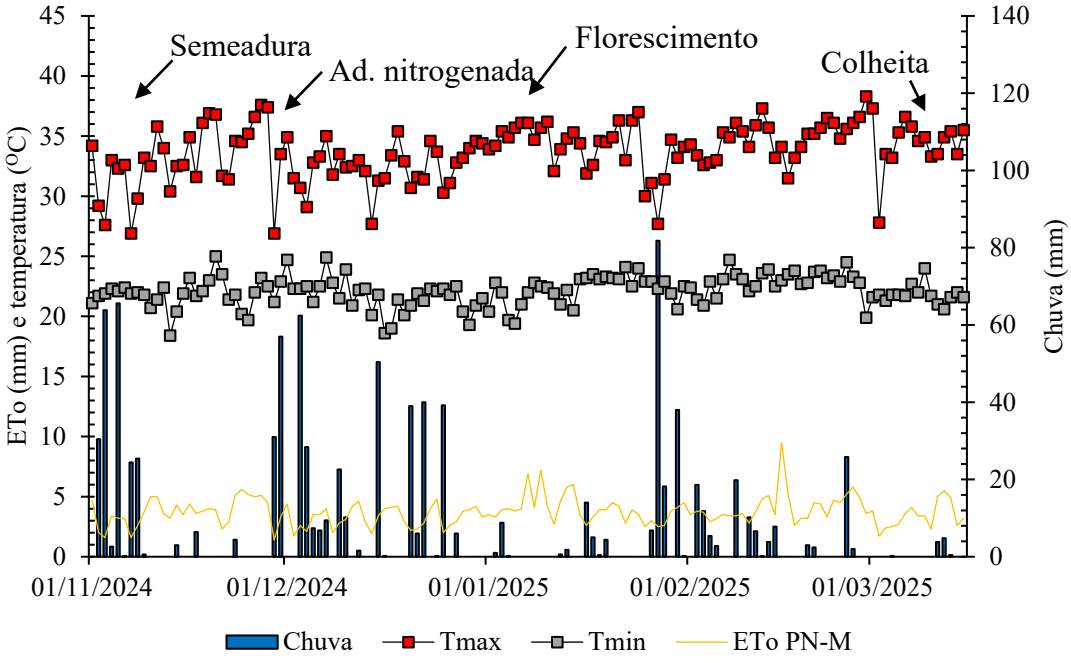
Tabela 1 – Atributos químicos do solo nas camadas de 0-0,20m e 0,20-0,40m antes do início do experimento. Dracena, SP.

Atributos químicos do solo	**Unidade**	**0-0,20m**	**0,20-0,40m**
P (resina)	mg dm^{-3}	5,0	2,0
S (SO_4)	mg dm^{-3}	8,0	10,0
Matéria orgânica	g dm^{-3}	12,0	10,0
pH ($CaCl_2$)		5,0	4,3
K (resina)	$mmol_c$ dm^{-3}	3,2	2,4
Ca (resina)	$mmol_c$ dm^{-3}	10,0	6
Mg (resina)	$mmol_c$ dm^{-3}	7	4
H+Al	$mmol_c$ dm^{-3}	15	18
Al	$mmol_c$ dm^{-3}	2	15
B (água quente)	mg dm^{-3}	0,20	0,18
Cu (DTPA)	mg dm^{-3}	0,6	0,6
Fe (DTPA)	mg dm^{-3}	28	31
Mn (DTPA)	mg dm^{-3}	15,3	14,6
Zn (DTPA)	mg dm^{-3}	0,7	0,4
Capacidade de troca catiônica (pH 7,0)	$mmol_c$ dm^{-3}	35,2	30,4
Saturação por bases	%	57	41
Granulometria			
Areia	g kg^{-1}	871	849
Silte	g kg^{-1}	39	46
Argila	g kg^{-1}	90	105

Fonte: Autoria própria.

Os dados das variáveis climáticas durante a condução do experimento foram obtidos por meio da Estação Meteorológica Automática da Marca Campbell Scientific, Modelo Datalogger CR10X, instalada no Campus da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT), pertencente à Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada a 250 m da área experimental, com as seguintes variáveis: temperatura mínima e máxima (ºC), evapotranspiração (mm) e precipitação (mm). (Figura 2).

Figura 2 – Temperaturas mínima (Tmin) e máxima (Tmax), evapotranspiração (ETo PN-M) e chuva ao longo da safra de pesquisa 2024/25 com milho consorciado com braquiária. Dracena, SP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com quatro repetições e 6 tratamentos: 1) controle (sem aplicação de corretivos); 2) aplicação de calcário dolomítico (28% de CaO, 20% MgO e PRNT de 80%); 3) aplicação de silicato de Ca e Mg (10% de Si, 36% de CaO, 9% MgO e PRNT de 80%); 4) aplicação de gesso agrícola (17% de Ca e 14% de S – 22% de CaO e 35% de SO_4^{-2}); 5) aplicação de calcário dolomítico + gesso; 6) aplicação de silicato de Ca e Mg + gesso. As parcelas experimentais apresentaram 10 m de comprimento e 3,15 m de largura (7 linhas da semeadora-adubadora). Foram considerados como área útil as 4 linhas centrais, com um espaço entre parcelas de 1,0 m.

As doses de calcário e silicato foram calculadas pelo método de saturação por bases (V%), buscando-se elevar a V% para 70 (Cantarella *et al*., 2022):

$$\mathrm{NC} = \mathrm{CTC} \times (\mathrm{V2} - \mathrm{V1}) \div 10 \times \mathrm{PRNT}$$ **Equação 1**

Onde, NC = Necessidade de calagem, em Mg ha^{-1}; CTC = capacidade de troca catiônica; V2 = saturação por bases à ser atingida (70%); V1 = saturação por bases atual na análise de solo; PRNT = poder relativo de neutralização total dos corretivos.

Baseado na fórmula utilizada, as doses aplicadas de calcário e silicato de Ca e Mg foram de 1,012 t ha^{-1}.

As doses de gesso agrícola foram calculadas pelo método proposto por Caires e Guimarães, 2018:

$$\mathrm{NG} = (0{,}6 \times \mathrm{CTCef} - \mathrm{teor\ de\ Ca}) \times 6{,}4$$ **Equação 2**

Onde, NG = Necessidade de gesso agrícola, em Mg ha^{-1}; CTCef = capacidade de troca catiônica efetiva (Ca + Mg + K + Al) na camada 0.20-0.40m, em cmolc dm^{-3}; teor de Ca em cmolc dm^{-3}.

Baseado na fórmula utilizada, a dose aplicada de gesso agrícola foi de 6,7 t ha^{-1}. Em tempo, a escolha da metodologia proposta por Caires e Guimarães (2018) ocorreu em função de ser relativamente nova, ainda não consolidada e adotada pela maioria dos produtores. Ainda existem questões a serem respondidas, como exemplo, será que a dose elevada de S que será aplicada não poderá afetar negativamente o crescimento do milho? Será que as doses de gesso elevadas (premissa da metodologia supramencionada) não podem promover a lixiviação do K^+ no solo, principalmente em se tratando de um ambiente com solo arenoso (granulometria usualmente apresentando teor de argila < 10%). Ainda, pensando em início de sistema e experimento de longa duração com foco na construção do perfil, será que doses elevadas de gesso não podem favorecer o aprofundamento radicular e a consolidação/implantação de um sistema altamente produtivo de maneira otimizada? Entendemos que muitos estudos foram realizados com a metodologia proposta para o Estado de São Paulo (baseado no teor de argila), sendo necessários novos estudos para preencher lacunas que foram/são levantadas com novas metodologias/tecnologias.

4.3. MANEJO E TRATOS CULTURAIS

Pretende-se conduzir o experimento por longa duração, pelo menos 30 anos, com diversas rotações de culturas. Portanto, o presente estudo é o início do sistema de construção de perfil do solo, bem como plantio direto. O manejo da área experimental foi iniciado no dia 06 de setembro de 2024, com a roçada do capim-braquiária (*Urochloa decumbens*), aplicação dos tratamentos com calcário e silicato de Ca e Mg seguido da incorporação com grade-aradora (60 dias antes da semeadura). Em função do baixo teor de P na análise inicial de solo, no dia 23 de outubro de 2024 foi realizada uma adubação fosfatada com fosfato monoamônico (MAP), aplicando-se 120 kg P_2O_5 ha^{-1} em todos os tratamentos (15 dias antes da semeadura). Em complemento, visando minimizar as diferenças de Mg e S dos tratamentos, foi realizada uma aplicação de 200 kg ha^{-1} de kieserita (sulfato de magnésio monohidratado, equivalente à 40 kg S ha^{-1} e 30 kg Mg ha^{-1}, respectivamente) à lanço, em todos os tratamentos. No dia seguinte, 24 de outubro de 2024 foi realizado a dessecação da área experimental com glifosato (2,5 kg ha^{-1}) e 2,4-D (2,0 L ha^{-1}), juntamente com a aplicação de 2 kg B ha^{-1} (na forma de ácido bórico) (14 dias antes da semeadura). A aplicação de gesso agrícola foi realizada à lanço, sem incorporação, no dia 28 de outubro de 2024 (10 dias antes da semeadura).

No dia 06 de novembro de 2024, foi realizada uma gradagem de nivelamento, e em sequência ocorreu a semeadura do milho, híbrido simples FS695 PWU (Forseed), cultivado em espaçamento simples entrelinhas de 0,45 m, com profundidade de distribuição de 3 cm e população final de plantas em 66.667 plantas ha^{-1} (3 sementes por m^{-1}). Foi aplicado nas sementes de milho 100 mL ha^{-1} de CoMo Platinum (Stoller, 2,8% P_2O_5, 1,5% Co e 15% Mo). Ainda, foi realizada a inoculação com 200 mL ha^{-1} de *Azospirillum brasilense* (estirpes Ab-V5 e Ab-V6, garantia de 2 × 10^8 unidade formadora de colônia – UFC mL^{-1}), para todos os tratamentos.

O mix de capim-braquiária (40% capim-ruziziensis + 60% capim-piatã, mistura industrial Facholi Sementes®) foi semeado na entrelinha do milho, também em espaçamento 0,45 m e profundidade de distribuição de 8 cm, utilizando-se uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão). A utilização do mix justifica-se pela combinação de características favoráveis à construção do perfil do solo. A ruziziensis apresenta rápido estabelecimento, elevado perfilhamento e expressiva produção radicular, contribuindo para a cobertura inicial, o aporte de

carbono e a formação de bioporos. O capim-piatã, por sua vez, apresenta crescimento inicial mais moderado, boa produção de biomassa e maior persistência após a colheita do milho. Dessa forma, o mix pode ampliar a cobertura do solo, a ciclagem de nutrientes e os benefícios físicos e biológicos associados à aplicação dos corretivos, além de favorecer a manutenção do sistema plantio direto. Dessa forma, a implantação do consórcio foi realizada mediante duas operações de semeadura (milho e capim, separadamente), no mesmo dia, com profundidades de distribuição diferentes, visando atrasar a emergência e estabelecimento do capim. A densidade de sementes do mix de capim utilizado foi de 8 kg ha^{-1}. A adubação de semeadura constou da aplicação de 350 kg ha^{-1} do formulado 08-28-16 + 0,5% de Zn, apenas no milho, seguindo recomendação de Cantarella *et al*., (2022). A emergência do milho ocorreu 4 dias após semeadura (DAS), enquanto a emergência do mix de braquiárias ocorreu 10 dias após semeadura.

No dia 30 de novembro de 2024, 20 DAE (dias após emergência), foi realizado a adubação de cobertura no milho, com aplicação de 90 kg N ha^{-1} e 50 kg K_2O ha^{-1} (com as fontes ureia e KCl), à lanço, na entrelinha do milho, em uma única aplicação. Todo manejo de pragas, plantas daninhas e doenças seguiram recomendações técnicas para a cultura do milho para a região do Oeste Paulista.

O experimento foi realizado em área de sequeiro, no entanto, foram realizadas duas irrigações suplementares: logo após a semeadura (07/11), visando uniformidade na germinação e emergência e 62 DAE (12/01), em ocasião de início de enchimento de grãos (R2), momento de elevada demanda hídrica, e déficit hídrico acentuado. Cada irrigação suplementar foi realizada por meio de sistema de carretel enrolador, com lâmina de água média estimada em 30 mm.

4.4. AVALIAÇÕES

4.4.1. Avaliações no milho

No florescimento da cultura do milho (R1), foram coletadas 5 plantas por parcela para avaliação da biomassa de parte aérea e raízes. Foram abertas trincheiras de cerca de 0,50 m de profundidade, tomando-se o máximo cuidado para retirada de raízes das plantas. Após a coleta, as amostras (separadamente, parte aérea e raízes) foram acondicionadas em sacos de papel. As amostras de raízes foram lavadas em

água corrente e por fim imersas em água deionizada, e então armazenadas em novos sacos de papel após retirada do excesso de umidade. As amostras foram então mantidas em estufa de ventilação forçada na temperatura de 65 ºC até massa constante, posteriormente foram pesadas em balança analítica para obtenção da biomassa de parte aérea e raízes.

Ainda no florescimento, o índice de clorofila foliar (ICF) foi determinado de maneira indireta e não destrutiva, utilizando-se um clorofilômetro portátil ClorofiLOG 1030 (Falker®, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil). Foram realizadas dez leituras aleatórias no período da manhã (9 às 11h), na folha da inserção da espiga principal (folha diagnose nutricional da cultura), de cada parcela experimental, seguindo recomendação de Cantarella *et al*. (2022).

As trocas gasosas foram avaliadas com o IRGA - analisador de gases a infravermelho (LI- 6400XT; LI-COR Inc.®, Lincoln, NE, EUA). As leituras foram realizadas no período da manhã (9 às 11h), na mesma folha diagnose supramencionada, em cada parcela experimental, utilizando-se radiação constante (1400 μmol m^{-2} s^{-1}), concentração de CO_2 do ar em 380 μmol mol^{-1} e temperatura da folha em 25ºC (adaptado de Jiang and Xu, 2001; Joshi-Paneri *et al*., 2023; Lisboa *et al*., 2019). Foram quantificadas a taxa fotossintética líquida (*A*), a transpiração (*E*), a concentração interna de CO_2 na câmara subestomática (*Ci*) e a condutância estomática (*Gs*).

Em ocasião de colheita, as seguintes avaliações de componentes produtivos foram realizadas: i) altura de plantas e diâmetro de colmo, a altura de plantas foi definida como sendo à distância (m) do nível do solo ao ápice do pendão, utilizando-se uma régua graduada; e o diâmetro do colmo (mm) no segundo internódio basal, utilizando-se paquímetro manual, em cinco plantas por parcela; ii) número de grãos por espiga, pela multiplicação do número de fileiras e grãos por fileiras de 5 espigas por parcela; iii) massa de 100 grãos, determinada em balança de precisão 0,01 g, à 13% (base úmida) em 3 lotes por tratamento; iv) biomassa de parte aérea (palhada produzida), utilizando-se os mesmos procedimentos realizados para determinação de biomassa de parte aérea no florescimento e v) produtividade de grãos determinada pela coleta da área útil da parcela (4 linhas centrais). Após a trilha mecânica, os grãos foram quantificados e os dados transformados em kg ha^{-1} e seus valores corrigidos à 13% de umidade (base úmida). Após finalizadas as coletas à campo, as amostras de

parte aérea (palhada) e grãos foram então mantidas em estufa de ventilação forçada na temperatura de 65 ºC até massa constante, moídas em moinho tipo Wiley equipado com peneira com crivos de 1 mm, e armazenadas, para análises químicas.

As concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn em parte aérea e nos grãos foram determinadas conforme metodologia proposta por Malavolta *et al*., (1997). A concentração de Si foi determinada conforme metodologia de da Silva, (2009). O acúmulo dos nutrientes e Si foi calculado conforme a massa seca produzida de parte aérea e grãos, apresentando os acúmulos para macronutrientes e Si em kg ha^{-1}, e micronutrientes em g ha^{-1}.

4.4.2. Avaliação no capim-braquiária

A coleta inicial no mix de capim-braquiária (primeiro corte – formação da pastagem) foi realizada em 11/04/2025, 31 dias após a colheita do milho. O segundo, terceiro e quarto corte ocorreram nos dias 13/06; 04/09 e 08/10/2025, respectivamente. As amostras do mix de forrageiras foram coletadas manualmente a 15 cm acima do solo, no centro da parcela. As parcelas de 0,5 m² foram delimitadas usando um quadrado metálico (1,0 x 0,5 m), e um cutelo de ferro, que foi utilizado para cortar manualmente o capim. A forragem colhida foi embalada em sacos de papel e posteriormente seca em estufa de ventilação forçada na temperatura de 65 ºC até massa constante. O restante da área experimental foi manejado com roçadeira, também à 15 cm de altura, e o resíduo de palhada foi removido das parcelas, simulando um pastejo animal. As amostras foram então pesadas para quantificar a massa seca produzida na área, extrapoladas para kg ha^{-1}. Após esse primeiro corte, foi realizado uma adubação nitrogenada de cobertura com 40 kg ha^{-1} de N e K_2O (fontes ureia e KCl).

As concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn em parte aérea do capim foram determinadas no primeiro e quarto corte (último corte) conforme metodologia proposta por Malavolta *et al*., (1997). A concentração de Si foi determinada conforme metodologia de da Silva, (2009). O acúmulo dos nutrientes e Si foi calculado conforme a massa seca produzida de parte aérea, apresentando os acúmulos para macronutrientes e Si em kg ha^{-1}, e micronutrientes em g ha^{-1}.

4.4.3. Análises de solo

As coletas de solos foram realizadas em ocasião da dessecação do capim-braquiária e antes da implantação do milho safra 2º ciclo (outubro de 2025); A coleta do solo foi estratificada por profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 m a fim de se verificar a real avaliação da correção do solo nestes primeiros anos de instalação do sistema.

Foram coletados 10 pontos aleatórios por parcela, nas entrelinhas da cultura principal (milho) e no meio da parcela (capim-braquiária), formando uma amostra composta por parcela. Após a coleta de solo para análises químicas, as amostras de solo foram secas à sombra (terra final seca ao ar), destorroadas e peneiradas em peneira 2 mm. As análises químicas de pH, matéria orgânica, teores de P-resina, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Al, acidez potencial (H+Al), saturação por bases (V%) e capacidade de troca catiônica (CTC) foram determinados conforme van Raij *et al*. (2001). O teor de Si no solo foi determinado pela extração $CaCl_2$ (0,01 mol L^{-1}) de acordo com metodologia de Korndörfer *et al*. (2004).

4.5. FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, todos os dados foram avaliados quanto à homocedasticidade usando o teste de Levene ($p \leq 0,05$). Em seguida, os dados foram examinados quanto à normalidade usando o teste de Shapiro-Wilk, que demonstrou uma distribuição normal dos dados ($W \geq 0,90$). Os resultados então foram submetidos à análise de variância (ANOVA, teste F), para avaliação dos efeitos dos fatores nas variáveis respostas estudadas. O efeito das fontes de corretivo, quando significativos ($p \leq 0,05$), foram analisados pelo teste de médias (teste de Scott-Knott) utilizando o pacote ExpDes do software R (R Development Core Team, 2015).

5. RESULTADOS

5.1. AVALIAÇÕES NO FLORESCIMENTO DO MILHO (R1)

A aplicação combinada de calcário + gesso e silicato + gesso propiciou maior ICF, massa seca de parte aérea (MSPA), raiz (MSRAIZ), fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*Gs*) e transpiração foliar (*E*) (Tabela 2). A concentração interna na câmara subestomática (*Ci)* foi superior no tratamento controle e com aplicação isolada de gesso agrícola (Tabela 2).

Tabela 2 – Índice de clorofila foliar (ICF), massa seca de parte aérea (MSPA) e raiz (MSRAIZ), fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*Gs*), concentração interna de CO_2 na câmara subestomática (*Ci*), transpiração foliar (*E*) em ocasião de florescimento (R1) do milho em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamentos	**ICF**	**MSPA (kg ha^{-1})**	**MSRAIZ (kg ha^{-1})**	**A (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1})**
Controle	42,0 c	6374 c	980 d	14,16 d
Calcário	45,9 b	7180 b	1205 b	17,69 b
Silicato	46,0 b	7306 b	1241 b	18,06 b
Gesso	45,7 b	7026 b	1141 c	16,91 c
Calcário + Gesso	46,7 a	7739 a	1330 a	19,32 a
Silicato + Gesso	47,2 a	7813 a	1405 a	20,12 a
Erro Padrão (5%)	0,20	95,9	43,2	0,27
Média Geral	45,6	7240	1217	17,71
Teste F – Valor *P*	0,001**	0,001**	0,003**	0,002**
Tratamentos	**Gs (mol H_2O m^{-2} s^{-1})**	**Ci (µmol CO_2 mol air^{-1})**	**E (mmol H_2O m^{-2} s^{-1})**	
Controle	0,26 b	284 a	1,80 d	
Calcário	0,29 a	259 b	2,19 b	
Silicato	0,31 a	250 b	2,21 b	
Gesso	0,27 b	275 a	2,08 c	
Calcário + Gesso	0,30 a	247 b	2,38 a	
Silicato + Gesso	0,31 a	242 b	2,51 a	
Erro Padrão (5%)	0,01	4,47	0,05	
Média Geral	0,29	260	2,19	
Teste F – Valor *P*	0,001**	0,003**	0,001**	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).

Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.

**, * e ^{ns} = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4).

5.2. AVALIAÇÕES EM OCASIÃO DE COLHEITA (R6)

A aplicação de calcário, silicato e gesso, isoladamente ou em conjunto aumentou o diâmetro do colmo (DIAMCOL) (Tabela 3). De maneira similar, a aplicação de calcário, silicato e calcário + gesso e silicato + gesso propiciou maior número de grãos por fileira (GRFIL) e grãos por espiga (GRESP) (Tabela 3). Para a massa de 100 grãos (CEMGR), a aplicação de calcário e calcário + gesso e silicato + gesso propiciou melhores resultados (Tabela 3). No entanto, a aplicação conjunta de calcário + gesso e silicato + gesso propiciou maior massa seca de palhada (MSPALHA), produtividade de grãos de milho (PROD) (Tabela 3). Em contrapartida, a aplicação dos tratamentos não influenciou significativamente na altura de plantas (ALT) e número de fileiras (NFIL) (Tabela 3).

Tabela 3 – Altura de plantas (ALT), diâmetro do colmo (DIAMCOL), número de fileiras (NFIL), grãos por fileiras (GRFIL) e grãos por espiga (GRESP), massa de 100 grãos (CEMGR), massa seca de palhada (MSPALHA), produtividade de grãos de milho em ocasião de colheita (R6) em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamentos	**ALT (m)**	**DIAMCOL (mm)**	**NFIL**	**GRFIL**	**GRESP**
Controle	2,43 a	20,17 b	20,00 a	34,6 b	692 b
Calcário	2,46 a	21,50 a	20,66 a	36,2 a	748 a
Silicato	2,43 a	21,67 a	20,33 a	36,2 a	737 a
Gesso	2,48 a	21,17 a	20,66 a	34,4 b	711 b
Calcário + Gesso	2,46 a	22,00 a	20,00 a	37,4 a	748 a
Silicato + Gesso	2,49 a	22,50 a	21,00 a	36,5 a	768 a
Erro Padrão (5%)	0,03	0,32	0,25	0,45	12,89
Média Geral	2,46	21,50	20,44	35,9	734
Teste F – Valor *P*	$0,604^{ns}$	$0,004^{**}$	$0,076^{ns}$	$0,002^{**}$	$0,009^{**}$
Tratamentos	**CEMGR (g)**	**MSPALHA (kg ha^{-1})**		**PROD (kg ha^{-1})**	
Controle	24,56 c	6225 d		6079 d	
Calcário	27,85 a	7234 b		7420 b	
Silicato	27,35 b	7345 b		7639 b	
Gesso	26,57 b	6990 c		7017 c	
Calcário + Gesso	27,83 a	7735 a		8304 a	
Silicato + Gesso	28,41 a	7790 a		8482 a	
Erro Padrão (5%)	0,25	76,6		118	
Média Geral	27,09	7220		7490	
Teste F – Valor *P*	$0,001^{**}$	$0,001^{**}$		$0,001^{**}$	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ^{ns} = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.
± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4).

5.3. ACÚMULO DE SILÍCIO E NUTRIENTES NA PARTE AÉREA E GRÃOS DE MILHO

Como esperado, o acúmulo de Si em parte aérea foi superior nos tratamentos que receberam aplicação do elemento benéfico (silicato e silicato + gesso) (Tabela 4). O acúmulo de N foi superior com aplicação de silicato + gesso (Tabela 4). Para o acúmulo de P e B, a aplicação de calcário e silicato, associado ou não à aplicação de gesso propiciou maiores valores (Tabela 4). Entretanto, a aplicação de calcário + gesso e silicato + gesso propiciou maiores acúmulos de K, Ca, Mg, S, Fe e Mn em parte aérea (Tabela 4). O acúmulo de Ca foi superior com aplicação isolada de silicato de Ca e Mg, gesso e calcário + gesso (Tabela 4). Para o acúmulo de Zn, a aplicação de silicato isoladamente ou associado à aplicação de gesso e calcário + gesso propiciou maiores valores (Tabela 4).

Tabela 4 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Acúmulo de Si e nutrientes em parte aérea				
Tratamentos	**Si**	**N**	**P**	**K**
Controle	4,34 b	67,6 c	5,25 b	82,1 d
Calcário	4,84 b	79,0 b	7,18 a	118 b
Silicato	19,98 a	89,7 b	7,27 a	129 b
Gesso	4,83 b	74,9 c	6,35 b	109 c
Calcário + Gesso	5,61 b	80,7 b	7,90 a	143 a
Silicato + Gesso	22,81 a	111 a	8,07 a	144 a
Erro Padrão (5%)	1,55	3,37	0,43	5,22
Média Geral	10,40	83,9	7,00	121
Teste F – Valor *P*	0,001**	0,001**	0,003**	0,001**
Tratamentos	**Ca**	**Mg**	**S**	**B**
Controle	13,75 c	7,96 d	10,16 c	55,5 c
Calcário	23,21 b	10,20 b	12,37 c	65,6 a
Silicato	23,31 b	10,49 b	14,09 c	66,3 a
Gesso	23,72 b	9,08 c	22,42 b	62,6 b
Calcário + Gesso	28,32 a	11,53 a	26,67 a	71,0 a
Silicato + Gesso	28,45 a	11,66 a	26,83 a	71,7 a
Erro Padrão (5%)	1,05	0,31	1,01	2,10
Média Geral	23,46	10,15	18,76	65,5
Teste F – Valor *P*	0,001**	0,001**	0,001**	0,008**
Tratamentos	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**
Controle	78,8 c	680 d	597 c	70,5 c
Calcário	86,8 b	798 b	694 b	84,4 b
Silicato	90,6 a	828 b	695 b	90,6 a
Gesso	95,5 a	761 c	675 b	76,7 c
Calcário + Gesso	92,8 a	872 a	750 a	92,7 a
Silicato + Gesso	85,6 b	872 a	732 a	96,1 a
Erro Padrão (5%)	1,89	17,24	11,56	2,32
Média Geral	88,4	802	690	85,2
Teste F – Valor *P*	0,002**	0,001**	0,001**	0,001**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ns = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4).

A aplicação de silicato + gesso propiciou maior acúmulo de Si nos grãos de milho (Tabela 5). De maneira geral, houve maiores acúmulos de N, K, Ca, S, Cu, Fe, Mn e Zn com as aplicações de calcário e silicato associadas ao gesso (Tabela 5). Semelhantemente ao acúmulo de Mg, onde a aplicação de silicato + gesso demonstrou-se superior (Tabela 5). Para o acúmulo de P, a aplicação isolada de silicato, bem como calcário + gesso e silicato + gesso, proporcionou maiores valores (Tabela 5). Diferentemente do acúmulo de B, que não obteve diferença mínima significativa entre os tratamentos (Tabela 5).

Tabela 5 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) nos grãos de milho em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Acúmulo de Si e nutrientes nos grãos				
Tratamentos	**Si**	**N**	**P**	**K**
Controle	1,23 e	114 d	21,56 b	49,1 d
Calcário	1,77 c	142 b	26,81 b	63,2 b
Silicato	2,85 b	147 b	28,05 a	61,1 b
Gesso	1,54 d	133 c	26,12 b	57,1 c
Calcário + Gesso	1,85 c	159 a	30,7 a	68,1 a
Silicato + Gesso	3,37 a	164 a	31,6 a	69,5 a
Erro Padrão (5%)	0,09	2,57	1,63	1,60
Média Geral	2,10	143	27,50	61,3
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**
Tratamentos	**Ca**	**Mg**	**S**	**B**
Controle	1,06 d	7,10 d	11,33 d	16,97 a
Calcário	1,61 b	10,62 b	14,08 b	20,58 a
Silicato	1,51 c	10,64 b	14,23 b	21,30 a
Gesso	1,42 c	8,35 c	13,16 c	19,31 a
Calcário + Gesso	1,92 a	11,51 b	15,59 a	23,09 a
Silicato + Gesso	1,80 a	12,69 a	15,87 a	23,60 a
Erro Padrão (5%)	0,07	0,33	0,33	1,95
Média Geral	1,55	10,15	14,04	20,81
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**
Tratamentos	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**
Controle	76,8 d	316 d	70,8 c	170 c
Calcário	96,5 b	385 b	94,1 b	237 b
Silicato	94,2 b	405 b	86,6 b	234 b
Gesso	86,5 c	362 c	86,4 b	238 b
Calcário + Gesso	105 a	434 a	107 a	285 a
Silicato + Gesso	107 a	441 a	110 a	291 a
Erro Padrão (5%)	3,14	10,54	4,58	6,43
Média Geral	94,4	390	92,7	242
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ^{ns} = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4).

5.4. MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE SILÍCIO E NUTRIENTES NO MIX DE BRAQUIÁRIA

A aplicação combinada de calcário + gesso e silicato + gesso proporcionou maior produtividade de massa seca de capim no primeiro e segundo corte (Tabela 6). Para o terceiro corte, de maneira similar, a aplicação de calcário, silicato, calcário + gesso e silicato + gesso proporcionou uma maior produtividade (Tabela 6). Não houve diferença significativa entre os tratamentos no último corte (Tabela 6).

Tabela 6 – Massa seca do mix de braquiária ao longo do ciclo, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamentos	**1º MSCAPIM (kg ha^{-1})**	**2º MSCAPIM (kg ha^{-1})**	**3º MSCAPIM (kg ha^{-1})**	**4º MSCAPIM (kg ha^{-1})**
Controle	733 d	2603 c	1387 b	1568 a
Calcário	1229 b	3012 b	1710 a	1764 a
Silicato	1296 b	2955 b	1761 a	1772 a
Gesso	859 c	2869 b	1568 b	1728 a
Calcário + Gesso	1352 a	3228 a	1839 a	1824 a
Silicato + Gesso	1437 a	3335 a	1855 a	1847 a
Erro Padrão (5%)	41,1	77,0	60,5	68,0
Média Geral	1151	3000	1687	1751
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,11^{ns}

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ^{ns} = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4).

O acúmulo de Si na parte aérea no primeiro corte da pastagem foi superior nos tratamentos silicato e silicato + gesso (Tabela 7). Para os acúmulos de N, K, Mg e Cu a aplicação das combinações calcário + gesso e silicato + gesso proporcionaram maiores valores (Tabela 7). Entretanto, a aplicação de calcário, silicato e as combinações calcário + gesso e silicato + gesso proporcionaram maiores acúmulos para P, Fe, Mn e Zn (Tabela 7). A aplicação de silicato + gesso ocasionou maior acúmulo para Ca, B e S (Tabela 7).

Tabela 7 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea do primeiro corte de mix de braquiária em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Acúmulo de Si e nutrientes em parte aérea				
Tratamentos	**Si**	**N**	**P**	**K**
Controle	1,44 c	11,9 d	1,62 b	13,9 d
Calcário	2,43 b	23,9 b	3,50 a	23,9 b
Silicato	3,27 a	23,3 b	2,90 a	25,8 b
Gesso	1,68 c	16,3 c	2,04 b	16,4 c
Calcário + Gesso	2,67 b	28,7 a	3,24 a	27,8 a
Silicato + Gesso	3,62 a	31,0 a	3,50 a	28,9 a
Erro Padrão (5%)	0,12	1,01	0,21	0,79
Média Geral	2,52	22,5	2,80	6,9
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**
Tratamentos	**Ca**	**Mg**	**S**	**B**
Controle	2,57 e	2,27 c	1,54 e	5,5 c
Calcário	4,46 c	4,03 b	2,98 c	9,4 b
Silicato	4,91 c	4,04 b	2,70 d	10,2 b
Gesso	3,25 d	2,65 c	2,71 d	6,5 c
Calcário + Gesso	5,9 b	5,1 a	4,61 b	10,5 b
Silicato + Gesso	6,5 a	5,0 a	5,2 a	11,6 a
Erro Padrão (5%)	0,17	0,20	0,09	0,33
Média Geral	4,61	3,86	3,29	8,9
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**
Tratamentos	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**
Controle	5,9 d	86,6 b	117,3 b	28,0 b
Calcário	10,7 b	150 a	190,7 a	53,0 a
Silicato	10,7 b	146 a	207,8 a	55,4 a
Gesso	8,3 c	99,8 b	135,7 b	34,9 b
Calcário + Gesso	11,6 a	157,1 a	217,8 a	56,8 a
Silicato + Gesso	12,4 a	168,7 a	232,8 a	61,3 a
Erro Padrão (5%)	0,45	5,6	9,1	2,54
Média Geral	9,9	134	183	48,2
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ^{ns} = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

No quarto corte da parte aérea do capim braquiária, o acúmulo de Si manteve o mesmo padrão verificado na cultura do milho e no primeiro corte de capim, onde os tratamentos contendo o elemento Si promoveram maiores valores (silicato e silicato + gesso) (Tabela 8). Para o acúmulo de N, K e Zn, a aplicação de calcário, silicato e gesso, isoladamente ou em conjunto proporcionou maiores valores (Tabela 8). A aplicação de calcário, silicato e a combinação de calcário + gesso e silicato + gesso proporcionou maiores acúmulos de P e B na parte aérea do capim (Tabela 8). As combinações de calcário + gesso e silicato mais gesso proporcionaram um maior acúmulo de Ca, Mg e Fe (Tabela 8). Para o acúmulo de S, Cu e Mn não houve diferença entre os tratamentos no quarto corte da parte aérea do capim braquiária (Tabela 8).

Tabela 8 – Acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg e S (em kg ha^{-1}), e B, Cu, Fe, Mn e Zn (em g ha^{-1}) em parte aérea do quarto corte de mix de braquiária em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Acúmulo de Si e nutrientes em parte aérea				
Tratamentos	**Si**	**N**	**P**	**K**
Controle	3,67 c	25,9 b	1,14 b	21,1 b
Calcário	4,31 b	29,7 a	1,37 a	24,3 a
Silicato	6,6 a	30,0 a	1,41 a	24,4 a
Gesso	4,27 b	29,3 a	1,29 b	23,5 a
Calcário + Gesso	4,47 b	30,9 a	1,52 a	25,3 a
Silicato + Gesso	7,1 a	31,7 a	1,59 a	25,8 a
Erro Padrão (5%)	0,19	0,87	0,06	0,88
Média Geral	5,08	29,6	1,39	24,1
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,00**	0,02*
Tratamentos	**Ca**	**Mg**	**S**	**B**
Controle	4,93 c	4,68 b	2,62 a	21,3 b
Calcário	6,0 b	5,8 b	3,04 a	24,6 a
Silicato	6,0 b	5,7 b	3,06 a	24,7 a
Gesso	5,8 b	5,6 b	3,04 a	23,7 b
Calcário + Gesso	7,2 a	6,9 a	3,31 a	26,3 a
Silicato + Gesso	7,4 a	6,9 a	3,37 a	26,8 a
Erro Padrão (5%)	0,26	0,35	0,14	0,87
Média Geral	6,2	5,9	3,07	24,6
Teste F – Valor *P*	0,00**	0,00**	0,02*	0,00**
Tratamentos	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**
Controle	15,2 a	530 c	419 a	24,a b
Calcário	17,0 a	595 b	466 a	30,5 a
Silicato	17,7 a	621 b	478 a	29,5 a
Gesso	17,7 a	631 b	456 a	28,8 a
Calcário + Gesso	18,2 a	692 a	476 a	31,5 a
Silicato + Gesso	18,4 a	716 a	489 a	31,9 a
Erro Padrão (5%)	1,19	25,7	20,9	0,99
Média Geral	17,5	631	464	29,4
Teste F – Valor *P*	0,46ns	0,00**	0,28ns	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Médias seguidas de letra diferente, na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (P<0,05).
Critérios para casa depois da vírgula: valores até 30 – 2 casas da vírgula; valores entre 30 e 100 – 1 casa da vírgula; valores acima de 100 – nenhuma casa da vírgula.
**, * e ns = significativo à 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

5.5. ANÁLISE DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

5.5.1. Camada 0-10 cm

Para os atributos do solo na camada 0-10 cm, a aplicação das combinações calcário + gesso e silicato + gesso proporcionou maiores valores para P-resina e cálcio no solo (Tabela 9). Os tratamentos silicato isolado ou combinado (silicato + gesso) e calcário + gesso elevaram os valores de pH, propiciando as maiores médias (Tabela 9). A aplicação de calcário, silicato, e as combinações calcário + gesso e silicato + gesso elevaram os teores de K do solo (Tabela 9). Entretanto, o Mg do solo apresentou maior teor com a aplicação de silicato + gesso (Tabela 9). O tratamento controle e a aplicação de gesso apresentaram as maiores médias para o H + Al e Al, como esperado (Tabela 9).

Tabela 9 – Análise química na camada 0-10 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	**P-resina (mg dm^{-3})**	**MO (g dm^{-3})**	**pH ($CaCl_2$)**	**K ($mmol_c$ dm^{-3})**
Controle	13,7 b	12,0 a	5,1 c	3,57 b
Calcário	17,0 a	12,0 a	5,8 b	3,87 a
Silicato	17,0 a	12,0 a	5,9 a	3,87 a
Gesso	14,3 b	11,7 a	5,1 c	3,57 b
Calcário + Gesso	16,3 a	12,3 a	5,9 a	3,83 a
Silicato + Gesso	17,3 a	12,0 a	5,9 a	3,90 a
Erro Padrão (5%)	0,44	0,22	0,02	0,06
Média Geral	15,9	12,0	5,6	3,77
Teste F - Valor P	0,00**	0,51^{ns}	0,00**	0,00**
Tratamento	**Ca ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Mg ($mmol_c$ dm^{-3})**	**H + Al ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Al ($mmol_c$ dm^{-3})**
Controle	11,0 d	5,7 c	15,3 a	1,5 a
Calcário	13,7 c	7,7 b	11,3 b	0,0 b
Silicato	13,7 c	7,7 b	10,7 b	0,0 b
Gesso	20,3 b	6,0 c	15,0 a	1,3 a
Calcário + Gesso	22,7 a	7,7 b	11,0 b	0,0 b
Silicato + Gesso	22,3 a	8,7 a	10,7 b	0,0 b
Erro Padrão	0,41	0,23	0,19	0,13
Média Geral	17,3	7,2	12,3	0,47
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

A SB e o teor de Ca% foram beneficiados pela aplicação das combinações, calcário + gesso e silicato + gesso (Tabela 10). A aplicação de gesso, calcário + gesso e silicato + gesso propiciaram maiores médias para o teor de S-SO_4^- e CTC (Tabela 10). A V% e Mg% foram maiores para as aplicações isoladas de silicato + gesso e calcário respectivamente (Tabela 10). O controle apresentou maior média para o m% (Tabela 10).

Tabela 10 – Análise química na camada 0-10 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	SB (mmolc dm^{-3})	$S\text{-}SO_4^-$ (mg dm^{-3})	CTC (mmolc dm^{-3})	V%
Controle	20,2 d	5,3 b	35,6 b	56,9 f
Calcário	25,2 c	6,6 b	36,5 b	69,0 d
Silicato	25,2 c	6,3 b	35,9 b	70,3 c
Gesso	29,9 b	27,7 a	44,9 a	66,6 e
Calcário + Gesso	34,2 a	28,0 a	45,2 a	75,6 b
Silicato + Gesso	34,9 a	28,0 a	45,6 a	76,6 a
Erro Padrão (5%)	0,50	0,50	0,63	0,30
Média Geral	28,3	17,0	40,6	69,2
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Tratamento	Ca%/CTC	Mg%/CTC	m%
Controle	30,9 d	15,9 c	4,23 a
Calcário	37,4 c	21,0 a	0,00 c
Silicato	38,1 c	21,4 a	0,00 c
Gesso	45,3 b	13,4 d	2,98 b
Calcário + Gesso	50,2 a	17,0 c	0,00 c
Silicato + Gesso	49,0 a	19,0 b	0,00 c
Erro Padrão (5%)	0,58	0,48	0,37
Média Geral	41,8	17,9	1,20
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (n = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

O teor de Si no solo apresentou maiores médias para os tratamentos contendo o elemento, como a aplicação isolada de silício e a combinação de silício + gesso (Tabela 11) Não houve efeito significativo entre os tratamentos para o teor de B, Cu, Mn e Zn na camada de 0-10 cm do solo (Tabela 11).

Tabela 11 – Análise química na camada 0-10 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	B (mg dm^{-3})	Cu (mg dm^{-3})	Fe (mg dm^{-3})
Controle	0,20 a	0,50 a	27,3 a
Calcário	0,21 a	0,50 a	27,3 a
Silicato	0,21 a	0,53 a	27,0 a
Gesso	0,20 a	0,53 a	27,3 a
Calcário + Gesso	0,21 a	0,53 a	27,3 a
Silicato + Gesso	0,21 a	0,53 a	27,0 a
Erro Padrão (5%)	0,00	0,01	0,41
Média Geral	0,21	0,52	27,2
Teste F - Valor P	$0,04^{*}$	$0,59^{ns}$	$0,97^{ns}$
Tratamento	**Mn (mg dm^{-3})**	**Zn (mg dm^{-3})**	**Si (mg dm^{-3})**
Controle	16,5 a	0,80 a	3,3 c
Calcário	16,3 a	0,87 a	4,0 b
Silicato	16,7 a	0,80 a	8,3 a
Gesso	16,8 a	0,87 a	3,7 c
Calcário + Gesso	16,6 a	0,80 a	4,3 b
Silicato + Gesso	16,5 a	0,83 a	8,7 a
Erro Padrão (5%)	0,16	0,02	0,21
Média Geral	16,6	0,83	5,4
Teste F - Valor P	$0,40^{ns}$	$0,20^{ns}$	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
C.V. = Coeficiente de variação; ANOVA = Análise de variância.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

5.5.2. Camada 10-20 cm

Na camada de 10-20 cm o P-resina, pH e Mg apresentaram maiores médias na aplicação das combinações, calcário + gesso e silicato + gesso (Tabela 12). A aplicação de silicato e calcário + gesso e silicato + gesso proporcionou maior teor de MO do solo, enquanto a aplicação de gesso e as combinações obtiveram maiores médias de Ca (Tabela 12). Como esperado, o H + Al e Al apresentaram maiores médias para o tratamento controle (sem aplicação de corretivos) (Tabela 12).

Tabela 12 – Análise química na camada de 10-20 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	**P-resina (mg dm^{-3})**	**MO (g dm^{-3})**	**pH ($CaCl_2$)**	**K ($mmol_c$ dm^{-3})**
Controle	6,7 d	11,0 b	5,0 d	2,37 a
Calcário	9,3 b	11,0 b	5,4 c	2,47 a
Silicato	10,7 a	11,7 a	5,5 b	2,43 a
Gesso	8,0 c	11,0 b	5,0 d	2,37 a
Calcário + Gesso	11,3 a	11,7 a	5,6 a	2,47 a
Silicato + Gesso	12,0 a	12,0 a	5,6 a	2,50 a
Erro Padrão (5%)	0,34	0,12	0,01	0,03
Média Geral	9,7	11,4	5,3	2,43
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	$0,08^{ns}$
Tratamento	**Ca ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Mg ($mmol_c$ dm^{-3})**	**H + Al ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Al ($mmol_c$ dm^{-3})**
Controle	10,0 c	5,0 b	15,0 a	2,00 a
Calcário	12,3 b	5,3 b	12,7 c	0,00 c
Silicato	12,0 b	5,7 b	12,0 d	0,00 c
Gesso	16,7 a	5,3 b	14,3 b	1,67 b
Calcário + Gesso	17,7 a	6,3 a	11,3 d	0,00 c
Silicato + Gesso	18,0 a	6,0 a	11,7 d	0,00 c
Erro Padrão (5%)	0,43	0,21	0,19	0,09
Média Geral	14,4	5,6	12,8	0,61
Teste F - Valor P	0,00**	0,01*	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (n = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

A aplicação das combinações calcário + gesso e silicato + gesso proporcionaram maiores médias para as variáveis SB e pH seguindo o padrão da camada 0-10, e para V% (Tabela 13). A aplicação do gesso isolado ou combinado com silicato proporcionou maior teor de $S\text{-}SO_4^-$ no solo (Tabela 13). A CTC do solo foi elevada, com maior valor para os tratamentos de gesso isolado ou combinado com calcário ou silicato, enquanto o ter de Mg foi influenciado apenas pela aplicação

isolada de gesso (Tabela 13). O maior valor obtido para o m% foi no tratamento controle (Tabela 13).

Tabela 13 – Análise química na camada de 10-20 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	SB ($mmol_c\ dm^{-3}$)	$S\text{-}SO_4^-$ ($mg\ dm^{-3}$)	CTC ($mmol_c\ dm^{-3}$)	V%
Controle	17,4 d	6,3 c	32,4 b	53,6 c
Calcário	20,1 c	7,3 c	32,8 b	61,4 b
Silicato	20,1 c	7,0 c	32,1 b	62,6 b
Gesso	24,4 b	24,0 a	38,7 a	62,9 b
Calcário + Gesso	26,5 a	22,7 b	37,8 a	70,0 a
Silicato + Gesso	26,5 a	24,0 a	38,2 a	69,4 a
Erro Padrão (5%)	0,47	0,31	0,56	0,51
Média Geral	22,5	15,2	35,3	63,3
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Tratamento	Ca%/CTC	Mg%/CTC	m%
Controle	30,9 d	15,5 a	6,2 a
Calcário	37,6 c	16,2 a	0,00 c
Silicato	37,4 c	17,6 a	0,00 c
Gesso	43,1 b	13,8 b	4,36 b
Calcário + Gesso	46,7 a	16,8 a	0,00 c
Silicato + Gesso	47,2 a	15,7 a	0,00 c
Erro Padrão	0,76	0,56	0,29
Média Geral	40,5	15,9	1,76
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (n = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

O teor de Si na camada de 10-20 cm seguiu o mesmo padrão da camada de 0-10 cm, apresentando maiores valores para a aplicação de silicato e silicato + gesso (Tabela 14). A aplicação de calcário e as combinações (calcário + gesso e silicato + gesso) proporcionaram maiores médias para os teores de B e Mn no solo (Tabela 14). O teor de Fe foi superior com a aplicação de calcário + gesso e silicato + gesso,

enquanto o Zn foi beneficiado pela aplicação de calcário e silicato de forma isolada ou combinada com gesso (Tabela 14).

Tabela 14 – Análise química na camada de 10-20 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	**B (mg dm^{-3})**	**Cu (mg dm^{-3})**	**Fe (mg dm^{-3})**
Controle	0,18 b	0,53 a	21,7 b
Calcário	0,21 a	0,53 a	21,7 b
Silicato	0,19 b	0,53 a	22,0 b
Gesso	0,18 b	0,50 a	21,3 b
Calcário + Gesso	0,20 a	0,53 a	22,7 a
Silicato + Gesso	0,20 a	0,53 a	23,3 a
Erro Padrão (5%)	0,00	0,01	0,27
Média Geral	0,19	0,53	22,1
Teste F - Valor P	0,00**	0,73^{ns}	0,00**
Tratamento	**Mn (mg dm^{-3})**	**Zn (mg dm^{-3})**	**Si (mg dm^{-3})**
Controle	15,1 b	0,60 b	4,00 b
Calcário	15,7 a	0,73 a	4,67 b
Silicato	15,5 b	0,70 a	7,0 a
Gesso	15,3 b	0,63 b	4,67 b
Calcário + Gesso	16,0 a	0,73 a	4,67 b
Silicato + Gesso	16,0 a	0,77 a	7,3 a
Erro Padrão (5%)	0,18	0,01	0,26
Média Geral	15,6	0,69	5,4
Teste F - Valor P	0,02*	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

5.5.3. Camada 20-40 cm

A aplicação de calcário isolado ou combinado com gesso e silicato + gesso proporcionou maiores teores de P-resina na camada de 20-40 cm (Tabela 15). A aplicação dos corretivos de solo proporcionou um resultado superior estatisticamente ao tratamento controle (Tabela 15). O pH foi elevado na aplicação de calcário + gesso e silicato + gesso, sendo superiores aos demais tratamentos (Tabela 15). Para os teores de K e Mg ambos foram superiores para a aplicação de calcário no solo, enquanto o teor de Ca foi afetado positivamente para aplicação de gesso, calcário + gesso e silicato + gesso (Tabela 15). A aplicação de calcário isolado ou combinado com gesso proporcionou um menor resultado para o H + Al, enquanto para o Al a aplicação das combinações, calcário + gesso e silicato + gesso obtiveram os menores resultados (Tabela 15).

Tabela 15 – Análise química na camada de 20-40 cm do teor de fósforo (P-resina), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H + Al) e alumínio (Al) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	P-resina (mg dm^{-3})	MO (g dm^{-3})	pH ($CaCl_2$)	K ($mmol_c$ dm^{-3})
Controle	4,67 b	9,3 b	4,00 c	1,67 a
Calcário	5,7 a	10,0 a	4,77 b	1,67 a
Silicato	5,0 b	10,0 a	4,73 b	1,37 b
Gesso	5,0 b	10,0 a	4,57 c	1,17 c
Calcário + Gesso	5,3 a	10,0 a	4,90 a	0,93 d
Silicato + Gesso	5,7 a	10,0 a	4,90 a	1,23 c
Erro Padrão (5%)	0,20	0,17	0,03	0,04
Média Geral	5,2	9,9	4,73	1,34
Teste F - Valor P	0,02*	$0,09^{ns}$	0,00**	0,00**
Tratamento	**Ca ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Mg ($mmol_c$ dm^{-3})**	**H + Al ($mmol_c$ dm^{-3})**	**Al ($mmol_c$ dm^{-3})**
Controle	8,0 c	3,00 b	16,0 a	13,0 a
Calcário	9,0 b	3,67 a	13,7 b	11,0 b
Silicato	7,0 d	3,00 b	16,0 a	10,3 b
Gesso	11,3 a	2,00 c	16,0 a	13,0 a
Calcário + Gesso	11,7 a	1,00 d	14,3 b	7,3 c
Silicato + Gesso	12,3 a	3,00 b	16,7 a	7,2 c
Erro Padrão (5%)	0,27	0,09	0,28	0,79
Média Geral	9,9	2,61	15,4	10,3
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

A aplicação de silicato + gesso proporcionou maior valor para a SB e CTC do solo na camada 20-40 cm (Tabela 16). O teor de $S\text{-}SO_4^-$ foi beneficiado na aplicação de calcário + gesso e silicato + gesso, sendo superiores aos demais tratamentos (Tabela 16). O V% obteve maiores valores os tratamentos com calcário e gesso isolados e na combinação de calcário + gesso e silicato + gesso (Tabela 16). O teor de Ca foi maior para aplicação de calcário + gesso, enquanto o teor de Mg foi maior apenas na aplicação isolada de calcário (Tabela 16). O m% obteve médias superiores nas aplicações isoladas de calcário, silicato e gesso (Tabela 16).

Tabela 5 – Análise química na camada de 20-40 cm de soma de bases (SB), enxofre ($S\text{-}SO_4^-$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação de K, Ca, Mg e Al na CTC do solo (K%/CTC, Ca%/CTC, Mg%/CTC e m%) após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	SB ($mmol_c\ dm^{-3}$)	$S\text{-}SO_4^-$ ($mg\ dm^{-3}$)	CTC ($mmol_c\ dm^{-3}$)	V%
Controle	12,7 c	11,0 c	28,7 c	44,2 b
Calcário	14,3 b	11,3 c	28,0 c	51,1 a
Silicato	11,4 d	11,3 c	27,4 c	41,5 b
Gesso	14,5 b	34,0 b	30,5 b	47,5 a
Calcário + Gesso	13,6 c	34,7 a	27,9 c	48,7 a
Silicato + Gesso	16,6 a	35,3 a	33,2 a	49,9 a
Erro Padrão (5%)	0,35	0,23	0,35	0,93
Média Geral	13,8	22,9	29,3	47,2
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**	0,00**

Tratamento	Ca%/CTC	Mg%/CTC	m%
Controle	27,9 d	10,5 b	45,3 a
Calcário	32,1 c	13,1 a	39,3 a
Silicato	25,6 e	11,0 b	37,8 a
Gesso	37,1 b	6,6 d	42,7 a
Calcário + Gesso	41,8 a	3,58 e	36,1 b
Silicato + Gesso	37,1 b	9,0 c	21,8 b
Erro Padrão (5%)	0,73	0,32	2,43
Média Geral	33,6	8,9	35,5
Teste F - Valor P	0,00**	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula.

A aplicação de corretivos com a presença de silício (silicato e silicato + gesso) proporcionaram maior teor de Si no solo na camada de 20-40 cm, corroborado com os resultados das camadas de 0-10 e 10-20 cm (Tabela 17). A aplicação de gesso isolado ou combinado com calcário ou silicato, proporcionou maior no teor de Cu (Tabela 17). O teor de Mn foi maior nas aplicações isoladas de calcário, silicato e gesso, além da combinação de silicato + gesso, sendo superior as demais aplicações, enquanto para o Zn no solo, a aplicação isolada de calcário e silicato e as combinações foram superiores aos demais tratamentos (Tabela 17).

Tabela 6 – Análise química na camada de 20-40 cm de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e silício (Si) do solo após o quarto corte de capim braquiária, em função de corretivos de acidez do solo. Dracena, SP. 2024/25.

Tratamento	**B (mg dm^{-3})**	**Cu (mg dm^{-3})**	**Fe (mg dm^{-3})**
Controle	0,16 a	0,57 a	18,7 a
Calcário	0,16 a	0,50 b	20,3 a
Silicato	0,17 a	0,50 b	19,3 a
Gesso	0,16 a	0,60 a	19,0 a
Calcário + Gesso	0,16 a	0,57 a	19,7 a
Silicato + Gesso	0,16 a	0,60 a	19,7 a
Erro Padrão (5%)	0,00	0,01	0,49
Média Geral	0,16	0,56	19,4
Teste F - Valor P	0,66^{ns}	0,00**	0,28^{ns}
Tratamento	**Mn (mg dm^{-3})**	**Zn (mg dm^{-3})**	**Si (mg dm^{-3})**
Controle	13,3 b	0,30 b	3,00 c
Calcário	13,9 a	0,40 a	4,33 b
Silicato	13,7 a	0,43 a	6,0 a
Gesso	13,8 a	0,33 b	3,33 c
Calcário + Gesso	13,2 b	0,40 a	3,33 c
Silicato + Gesso	13,7 a	0,40 a	6,3 a
Erro Padrão (5%)	0,12	0,01	0,17
Média Geral	13,6	0,38	4,39
Teste F - Valor P	0,01*	0,00**	0,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: Letras diferentes nas colunas diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade; ± refere-se ao desvio padrão da média (*n* = 4); **, * e ^{ns} referem-se à significativo à 1%, 5% e não significativo, respectivamente.
Critérios para casa da vírgula: Valores até 5: duas casas depois da vírgula; Valores >5 até 100: uma casa depois da vírgula; Valores >100: sem casa depois da vírgula

6. DISCUSSÃO

Os resultados sugerem que a aplicação conjunta dos corretivos de acidez de solo (calcário ou silicato) associado ao gesso agrícola beneficiaram os parâmetros de trocas gasosas e a fotossíntese do milho. Por exemplo, a aplicação de silicato + gesso aumentou de 42,1; 12,4; 19,2; 39,4% nos parâmetros *A*, ICF, *Gs* e *E*, comparativamente ao tratamento controle (Tabela 2). De maneira similar, a aplicação de calcário + gesso propiciou aumento de 36,4; 11,2; 15,4; 32.2% nos mesmos parâmetros supramencionados, também comparativamente ao controle (Tabela 2). Os benefícios verificados nos parâmetros relacionados à fotossíntese refletiram em maior crescimento das plantas de milho, com maior MSPA (+22,6% e +21,4% para silicato e calcário, respectivamente) e MSRAIZ (+43,4 e +35,7% para silicato e calcário, respectivamente), comparativamente ao tratamento controle (Tabela 2).

A fotossíntese é um processo vital ao crescimento das plantas, uma vez que é responsável pela produção de esqueletos de carbono utilizados para manutenção e crescimento das estruturas vegetativas e reprodutivas (Flexas e Carriquí, 2020). Considerando o aumento taxa de fotossíntese liquida e condutância estomática, possivelmente houve efeito positivo dos corretivos sobre a eficiência de uso da água, especialmente nos tratamentos contendo silicato. Tal efeito é obtido através do aumento na condutância estomática e através da redução da transpiração da planta mediada pela deposição de Si nas células guardas dos estômatos (Johnson *et al*., 2022).

A utilização de gesso agrícola é uma prática que visa melhorar os atributos químicos do solo através da redução de Al^{3+} e fornecimento de Ca^{2+} e S em profundidade (Vicensi *et al*., 2020). A calagem por sua vez, é uma forma de elevar o pH do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} em camadas superficiais (Bossolani *et al*., 2021b). O uso de silicatos visa atuar na elevação do pH, aumento na disponibilidade de nutrientes, fornecimento de Si, redução de estresses abióticos e bióticos, além de apresentar maior solubilidade (cerca de sete vezes) que o calcário facilitando sua movimentação no solo e tornando o período de reação no solo mais curto (Crusciol *et al*., 2016; Galindo, *et al*., 2021). Outro ponto de destaque do silicato em comparação ao calcário, está relacionado à emissão de CO_2 à atmosfera no processo de reação química dessas fontes. A cada tonelada de calcário aplicado, são gerados aproximadamente 440 kg de CO_2 no

processo de reação do $CaCO_3$ H_2O. No entanto, a reação do silicato de Ca e Mg - $CaSiO_3 + H_2O$ gera $Ca(OH)_2 + H_2SiO_3$, sem gerar CO_2. O aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE), a exemplo do CO_2, decorrente das atividades humanas intensifica o efeito estufa, resultando no aquecimento global. Esse processo influencia o clima, provocando alterações nos padrões meteorológicos, no nível do mar e em diversos outros aspectos ambientais, como temperatura, distribuição e intensidade de chuvas e desertificação, afetando diretamente a atividade agrícola e vida na terra (Filonchyk *et al*., 2024). O enfrentamento das mudanças climáticas envolve a redução das emissões de GEE, e nesse sentido, a agricultura é um dos setores no qual grande atenção mundial está voltada (Raghuraman *et al*., 2021). Buscar técnicas e estratégias de manejo visando reduzir os impactos da atividade agrícola é mandatório em busca de maior sustentabilidade nos diversos sistemas de produção. Nesse sentido, o silicato pode ser uma importante ferramenta sustentável de correção de solo.

Em complemento, o manejo de corretivos e condicionadores de solo pode beneficiar a distribuição, crescimento e desenvolvimento de raízes ao longo do perfil do solo e consequentemente proporcionar maior absorção de água e nutrientes, beneficiando os processos fisiológicos relacionados à fotossíntese das plantas. Portanto, o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular pode impactar diretamente sobre o crescimento e produtividade do milho (Mandlik *et al*., 2020; Walne and Reddy, 2022; Korndörfer, 2004), conforme verificado no presente estudo.

O maior crescimento radicular associado ao crescimento em parte aérea em desenvolvimento vegetativo do milho, propulsionado pela otimização dos processos relacionados à fotossíntese ocasionada pela aplicação dos corretivos de acidez e gesso agrícola refletiu em melhor utilização de água e nutrientes pelas raízes, com maior acúmulo de nutrientes em parte aérea e grãos. O Si foi absorvido pela planta de milho, conforme verificado pelo maior acúmulo do elemento benéfico em parte aérea (4,6 e 5,3 vezes maior que o controle para silicato e silicato + gesso, respectivamente) (Tabela 4). Analisando a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes em parte aérea, o Si foi o quarto elemento mais absorvido, seguindo a ordem: K (121) > N (83) > Ca (23) > Si (21) > S (19) > Mg (10) kg ha^{-1}, levando-se em consideração os tratamentos que receberam Si comparativamente às medias, respectivamente. No entanto, não houve diferença no acúmulo de Si nos grãos.

O silício pode ser encontrado em diversos órgãos da planta, desde a raiz até o ápice da planta, no entanto é comum que este elemento apresente maior acúmulo em órgãos relacionados a transpiração, a exemplo das folhas, sendo influenciado pelo fluxo ascendente de transpiração (Cibils-Stewart *et al*., 2020; Galindo *et al*., 2021). A absorção do Si pelas raízes acorre na forma de ácido monossilícico [$Si(OH)_4$] por fluxo de massa através de dois mecanismos, passivo (fluxo de transpiração) e ativo (transportadores de membrana) (Korndörfer, 2004; Mandlik *et al*., 2020). A deposição de Si ocorre no lúmen, parede celular e espaços intra e extracelulares (De Tombeur *et al*., 2020). Existem três classificações para plantas quanto a sua capacidade de acúmulo de Si nos tecidos (em massa seca):plantas acumuladoras baixas, médias e altas. As acumuladoras baixas apresentam menos de 0,1% de Si, as acumuladoras intermediárias 1 a 5% e acumuladoras altas, mais de 5% de Si acumulado na massa seca (Cibils-Stewart *et al*., 2020; Kaur and Greger, 2019). De modo geral, as plantas monocotiledôneas, principalmente das famílias Poaceae e Cyperaceae, apresentam maior capacidade de absorção e acúmulo de Si em seus tecidos, quando comparado à algumas plantas eudicotiledôneas (Kaur and Greger, 2019).

Apesar do Si ter sido acumulado em grande quantidade em parte aérea, a aplicação associada de silicato + gesso não foi, de maneira geral, superior à aplicação de calcário + gesso para a maioria das variáveis respostas estudadas. No entanto, especificamente para o acúmulo de N em parte aérea e Mg nos grãos, a combinação de silicato + gesso propiciou benefícios. O nitrogênio (N) é considerado elemento essencial ao crescimento de plantas, sendo requerido em diversos processos fisiológicos das plantas e constituinte de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas, clorofila e aminoácidos (Toor *et al*., 2021; Fathi, 2022). O magnésio (Mg) por sua vez, é componente central da clorofila, atuando diretamente na fotossíntese e está relacionado a ativação de enzimas, podendo apresentar atuação como facilitador da eficiência de uso de N (Tian *et al*., 2021; Toor *et al*., 2021). Deste modo, a absorção de N e Mg apresenta influência sobre a produção de biomassa e produtividade de grãos (Mu and Chen, 2021). Um maior teor de nitrogênio nos grãos pode ser alcançado através de uma maior eficiência de uso de fertilizantes ou através de um aumento na translocação deste nutriente da folha para os grãos durante o processo de enchimento de grãos (Mabagala *et al*., 2020; Mondal *et al*., 2023). Considerando a elevada produtividade de grãos da combinação silicato + gesso, o maior teor de N e

Mg nos grãos pode ser um indicativo de aproveitamento dos nutrientes presentes no solo. Estudos recentes demonstram que o Si pode aumentar a capacidade da planta de absorver N e Mg, consequentemente aumentando a translocação destes nutrientes nas folhas e grãos (Mabagala *et al*., 2020; Pavlovic *et al*., 2021).

Os benefícios dos corretivos na fisiologia e nutrição do milho refletiram em maior diâmetro de colmo, potencializando o enchimento de grãos do milho, em quantidade e qualidade, conforme verificado pelo maior número de grãos por fileira, grãos por espiga e massa de cem grãos. O diâmetro de colmo do milho apresenta influência direta sobre a translocação de fotoassimilados, contribuindo no processo de produção de biomassa e enchimento de grãos (Gifford *et al*., 1984; Shane *et al*., 2000; Zhou *et al*., 2023). O processo de translocação de fotoassimilados é essencial para o melhor crescimento e desenvolvimento da planta, sendo responsável por redirecionar o fluxo de compostos para as áreas de maior demanda nutricional, como exemplo, a fase de enchimento de grãos, na qual os carboidratos não estruturais, acumulados no colmo são transportados para a espiga (Xue *et al*., 2020). Uma planta com aumento nos parâmetros relacionados à fotossíntese está intimamente associada a uma maior capacidade de translocação de fotoassimilados, refletindo diretamente em maior produção de biomassa e produtividade de grãos (Gifford *et al*., 1984; Galindo *et al*., 2022).

A otimização dos processos relacionados à fotossíntese, maior crescimento vegetativo, nutrição, diâmetro do colmo, com maior translocação de fotoassimilados e enchimento de grãos favoreceu a produção total de biomassa de milho, conforme verificado pelo aumento na massa seca de parte aérea (palhada) e grãos. Por exemplo, a aplicação de silicato + gesso propiciou aumento de 25,1; 39,5% na massa seca de palhada e produtividade de grãos, comparativamente ao tratamento controle (Tabela 3). De maneira similar, a aplicação de calcário + gesso propiciou aumento de 24,3; 36,6% nos mesmos parâmetros supramencionados, também comparativamente ao controle (Tabela 3). Diversos estudos mostram que o uso de corretivos e condicionadores apresentam efeitos benéficos sobre a produtividade de grãos e biomassa (Amin *et al*., 2018; Ameyu e Asfaw, 2020; De Castro Pias *et al*., 2020). O incremento na produtividade de grãos e biomassa ocorre inicialmente devido ao incremento na distribuição e massa de raízes em profundidade e à elevação de pH, aumento dos teores de Ca, Mg, S e Si no solo, redução da toxicidade de metais

pesados e Al^{3+}(Zhang *et al*., 2021; Bijanzadeh *et al*., 2024; Shruthi *et al*., 2024), propiciando um efeito cascata com múltiplos benefícios na fisiologia e nutrição das plantas, com reflexo no crescimento e produtividade. Em solos arenosos, como do presente estudo, com baixo teor de matéria orgânica e fertilidade do solo, a presença de raízes em profundidade é uma forma de reduzir os efeitos prejudiciais causados por períodos de seca durante a safra, através do aumento de pelos absorventes e otimização na absorção e utilização de água e nutrientes. Em complemento, desenvolver raízes em profundidade é uma das principais estratégias para regiões agrícolas marginais passíveis de expansão de cultivos. Dessa forma, o manejo integrado de corretivos de acidez torna-se uma ferramenta mandatória para o sucesso de sistemas agrícolas sustentáveis frente às mudanças climáticas.

Os tratamentos com aplicação de silicato ou calcário associados ao gesso proporcionaram maior produtividade de massa seca do mix de braquiária ao longo do ciclo. Comparativamente ao controle, os tratamentos silicato + gesso e calcário + gesso apresentaram incrementos de 96,0% e 84,4% no primeiro corte, 28,1% e 24,0% no segundo, 33,7% e 32,6% no terceiro e 17,8% e 16,3% no quarto corte, respectivamente. Deste modo, os resultados encontrados se assemelham aos contatados por Aguiar (2021), onde a aplicação combinada de silício + gesso, influenciou positivamente a produção de biomassa. O uso de corretivos e condicionadores de solo, apresenta grande importância para a nutrição de pastagens, de modo que este pode promover o crescimento vegetal, principalmente radicular, através da maior disponibilidade nutrientes, remoção de impedimentos químicos e correção do pH do solo (Castro; Rezende, 2021). Além disso, a aplicação de silicato, associado ou não ao gesso pode favorecer o crescimento das plantas devido a sua capacidade de reduzir os efeitos negativos provenientes da absorção de alumínio pelas plantas (Aguiar, *et al*., 2025).

O acúmulo de nutrientes em parte aérea do capim sofreu influência dos tratamentos, de modo que analisando a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes em parte aérea, o Si foi o quinto elemento mais absorvido, seguindo a ordem: N (22,5) > K (6,7) > Ca (4,61) > Mg (3,86) > Si (3,4) > S (3,29) > P (2,8) kg ha^{-1}, levando-se em consideração os tratamentos que receberam Si comparativamente às medias, respectivamente. Além disso, os maiores incrementos observados nos tratamentos que associaram os corretivos ao gesso, com relação ao tratamento controle. Para o

silício (Si), os tratamentos silicato + gesso e silicato proporcionaram acréscimos de 151,4% e 127,1%, respectivamente. O acúmulo de N aumentou em até 160,5% com silicato + gesso, seguido por calcário + gesso, com incremento de 141,2%. Para o P, os maiores acréscimos foram verificados nos tratamentos calcário e silicato + gesso, ambos com aumento de 116,0% em relação ao controle. Em relação ao K, os tratamentos silicato + gesso e calcário + gesso elevaram o acúmulo em 107,9% e 100,0%, respectivamente. Os nutrientes Ca, Mg e S também responderam positivamente à aplicação dos corretivos. O tratamento silicato + gesso promoveu os maiores incrementos de Ca (152,9%) e S (237,7%), enquanto o maior acúmulo de Mg foi observado com calcário + gesso, representando aumento de 124,7% em relação ao controle. Para que o calcário e o gesso apresentem os diversos benefícios supramencionados é necessário que ocorra a sua dissociação e locomoção ao longo do solo (Minato *et al*., 2023). No entanto a dissociação dos corretivos depende de uma série de fatores como a umidade do solo, presença ou ausência de incorporação, tamanho das partículas e quantidade aplicada (Bossolani *et al*., 2021b; Santos *et al*., 2024). O calcário é pouco solúvel no solo e apresenta longo período de reação, podendo apresentar efeitos residuais, de modo que estudos relatam aumento nos teores de Ca e Mg em camadas superiores e elevação do pH dois anos após a aplicação superficial de calcário (Bossolani *et al*., 2021b). O maior acúmulo dos nutrientes no 1º e 4º pode ser explicado por dois mecanismos complementares, primeiro o aumento do pH e redução de Al pela calagem, melhorando condições radiculares e mineralização de N e mobilização de bases; segundo o aporte de Ca solúvel e de SO_4^{-2} pelo gesso, favorecendo trocas catiônicas e transporte vertical de bases e micronutrientes solúveis. A influência da composição mineral do silicato (potencial aporte de Ca e Mg) também explica aumentos observados desses nutrientes em tratamentos com silicato (Rodriguez Navarro; Beer *et al*., 2021).

O incremento de P, Fe, Mn e Zn em tratamentos com calcário, silicato e suas combinações pode ser decorrente da interação pH-P (elevação do pH reduz fixação por Al e óxidos, aumentando P-resina), além de alterações na sorção dos micronutrientes com substituição de Al por bases no complexo de troca; contudo, a direção do efeito sobre Fe, Mn e Zn depende do grau de elevação do pH e da química do solo, podendo tanto aumentar quanto reduzir disponibilidade segundo a magnitude do pH alterado (Mwendwa *et al*., 2023). A resposta positiva de Zn observada em

alguns cortes e tratamentos com calcário e silicato é compatível com mobilização por alteração da CTC e da competição iônica.

Os resultados ao longo do perfil do solo demonstram respostas consistentes aos mecanismos de ação do calcário, gesso e silicato sobre a química do solo, principalmente sobre o efeito de P-resina, pH e fornecimento de Ca e Mg ao longo do perfil do solo. Na camada superficial (0 – 10 cm) as combinações de calcário + gesso e silicato + gesso aumentaram o P-resina e Ca trocável, provavelmente pela maior oferta de Ca solúvel oriundo do gesso e pela elevação do pH, devido a reação do calcário e do silicato, que desloca o P pouco disponíveis e reduz a fixação por Al (Queiroz; Silva *et al*., 2020; Haynes; Williams 2020). O aumento de pH nos tratamentos com silicato de maneira isolada ou combinada e calcário + gesso corrobora esse efeito tamponante, explicando também a redução de H + Al e Al nos tratamentos com corretivos.

A elevação dos teores de K observada nas aplicações de calcário, silicato e suas combinações pode ocorrer pela maior retenção catiônica associada ao incremento da SB e do pH (Rodríguez Navarro; Beer *et al*, 2021). O Mg elevado no tratamento silicato + gesso sugere um aporte mineral maior devido a sua constituição e alterações químicas promovidas. O teor de Si elevou-se no perfil do solo, nos tratamentos que continham silício, confirmando a incorporação direta e o potencial benefício para as culturas. A ausência de efeito sobre B, Cu, Mn e Zn na superfície indique que no curto prazo, os corretivos não alteraram significativamente esses micronutrientes, embora a alteração de pH possa modula-los a médio prazo.

Na camada 10-20 cm, os aumentos de P-resina, pH e Mg nas combinações (calcário + gesso; silicato + gesso), apontam para uma maior mobilidade de Ca e efeito do gesso em transportar bases para a subsuperfície, quando ocorre a percolação, além de influenciar na química e disponibilidade de P. A maior M.O nos tratamentos com silicato e combinações pode refletir em efeitos indiretos do corretivo sore o processo de mineralização e estabilidade da matéria orgânica, sendo necessário um maior acompanhamento ao longo do tempo. O $S\text{-}SO_4^{-2}$ e CTC foram influenciados diretamente pela aplicação do gesso isolado ou combinado, como esperado devido a solubilidade e translocação vertical (Mackenzie *et al*., 2021). A maior presença de H+Al e Al no tratamento controle confirma que sem corretivos, a acidez do subsolo persiste.

Na camada 20–40 cm, a elevação de P-resina para aplicações de calcário isolado ou combinado e silicato + gesso indica que produtos solúveis (gesso) e interações químicas estimuladas pela correção podem promover mudanças em profundidade, especialmente quando combinados com fontes que aumentam pH e fornecem Ca (Queiroz; Silva *et al*., 2020). O aumento do pH e a redução de H+Al e Al nas combinações com gesso confirmam a capacidade do gesso em contribuir para correção em profundidade, via mobilização de Ca. Os teores de K e Mg superiores com calcário na camada profunda sugerem composição mineral e mobilidade específica de cátions no perfil, enquanto Ca maior em tratamentos com gesso evidencia transporte vertical do Ca solúvel (Haynes; Williams, 2020).

A SB e a CTC mais altas com silicato + gesso na camada 20–40 cm indicam sinergia para melhorar a base de troca em profundidade quando se usa fonte solúvel (gesso) associada a silicatos que fornecem bases e Si de liberação lenta (Rodriguez Navarro; Beer *et al*., 2021). Os aumentos de S-SO_4^{-2} e de micronutrientes específicos (Cu, Mn, Zn) em certas combinações refletem mobilidade distinta desses íons e interação com pH; por exemplo, o gesso favoreceu Cu em profundidade, enquanto calcário e silicato influenciaram Mn e Zn conforme mudanças de pH e troca iônica (Mackenzie *et al*., 2021; Corrêa; Zhang *et al*., 2022).

Considerando a necessidade de umidade e o tempo requerido para reação completa dos corretivos, associado aos possíveis efeitos residuais provenientes de sua utilização conforme relatado na literatura, era esperado um efeito positivo da aplicação de calcário, gesso e silicatos na formação da pastagem, conforme verificado no presente estudo. Dessa forma, é preciso considerar os múltiplos benefícios da aplicação de corretivos de solo avaliando-se de maneira integrada os sistemas de produção, relacionando o efeito imediato e residual das fontes de corretivo aplicadas.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo traz contribuições acerca do entendimento das alterações fisiológicas, nutricionais e a influência no crescimento e produtividade da cultura do milho consorciado com mix de capim-braquiária em função da calagem, gessagem e silicatagem, bem como o efeito residual dos tratamentos na formação da pastagem subsequente. A aplicação de calcário e silicato pode ser considerada uma importante ferramenta visando otimizar o sistema produtivo integrado milho consorciado com mix de capim-braquiária, mesmo em início de sistema, onde o efeito benéfico dos corretivos de acidez é aprimorado com a utilização conjunta do gesso agrícola.

A aplicação combinada de calcário + gesso e silicato + gesso aumentou o crescimento radicular do milho e influenciou positivamente na habilidade das plantas em utilizar água e nutrientes, com maior acúmulo de nutrientes em parte aérea e grãos. O maior crescimento radicular associado ao crescimento em parte aérea em desenvolvimento vegetativo do milho, propulsionado pela otimização dos processos relacionados à fotossíntese e nutrição ocasionada pela aplicação dos corretivos de acidez e gesso agrícola refletiu maior translocação de fotoassimilados e enchimento de grãos, favorecendo a produtividade total de biomassa de milho, com maior produção de massa seca de parte aérea e produtividade de grãos.

De modo semelhante ao milho, a pastagem formada após a colheita também foi influenciada positivamente pela aplicação conjunta de calcário + gesso e silicato + gesso ao longo dos cortes, de modo que possibilitou maior absorção de nutrientes e consequentemente proporcionou maior produção de volumoso na forma de massa seca de parte aérea, durante os três primeiros cortes. No entanto, os tratamentos não apresentaram influência sobre o quarto corte do capim, elucidando uma eventual diluição do efeito residual com os cortes e estabelecimento da pastagem.

A aplicação de silicato + gesso e calcário + gesso, apresentaram maior capacidade de mobilidade ao longo do perfil do solo com o passar do tempo, o que é evidenciado pela maior uniformidade dos teores de nutrientes, CTC, SB, V% e correção do pH ao longo do perfil do solo.

Apesar de se tratar do início da construção de um perfil de solo arenoso, com um tempo relativamente baixo para reação completa dos corretivos, os resultados do presente estudo apontam os benefícios na fisiologia do milho consorciado com forrageiras, com reflexo nos principais parâmetros e avaliações de componentes

produtivos, quer seja do milho quanto da pastagem formada em sucessão à cultura. Por se tratar de um estudo de longa duração, novas informações relevantes acerca dos efeitos das combinações entre corretivos e gesso na dinâmica solo/planta, envolvendo aspectos químicos, físicos e biológicos serão gerados à longo prazo.

REFERENCIAS

AGUIAR, D. P. G. de *et al.* Response of Urochloa brizantha cv. BRS Piatã to different levels of aluminum and to silicon application. **Interference Journal**, v. 11, n. 2, p. 8453-8468, 2025. DOI: 10.36557/2009-3578.2025v11n2p8453-8468. Disponível em: https://doi.org/10.36557/2009-3578.2025v11n2p8453-8468. Acesso em: 25 ago. 2026.

AGUIAR, V. F.; SANTOS, L. L. dos; SILVA, E. D. B.; CALDEIRA, Z. V.; LAFETÁ, B. O. Comparison between limestone and silicate corrective associated gypsum in the growth of a forage grass. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 13, p. 1484-1492, 2021. DOI: 10.1080/00103624.2021.1885691. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885691.

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. de; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 291-334.

ALMEIDA, H. J. de *et al.* Silicon-mediated mitigation of moderate ammonium stress in maize seedlings. **Plants**, Basel, v. 14, n. 24, 3793, 2025. DOI: 10.3390/plants14243793. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants14243793.

ALVES, L. A. *et al.* Impacts of tillage and liming on crop yields and soil acidity correction: insights from a 32-year experiment in Southern Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 511, p. 1621-1640, 2025. DOI: 10.1007/s11104-024-07076-w. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11104-024-07076-w.

AMEYU, T.; ASFAW, E. Effect of lime and phosphorus fertilizer on soybean [Glycine max L. (Merrill)] grain yield and yield components at Mettu in South Western Ethiopia. **International Journal of Environmental Monitoring and Analysis**, v. 8, n. 5, p. 144-154, 2020. DOI: 10.11648/j.ijema.20200805.15. Disponível em: https://doi.org/10.11648/j.ijema.20200805.15.

AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; HUSSAIN, I.; MAHMOOD, R.; ASLAM, M.; LEE, D. J. Influence of Silicon Fertilization on Maize Performance Under Limited Water Supply. **Silicon**, v. 10, p. 177-183, 2018. DOI: 10.1007/s12633-015-9372-x. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x.

ANDERSON, G. C.; PATHAN, S.; HALL, D. J. M.; SHARMA, R.; EASTON, J. Short- and long-term effects of lime and gypsum applications on acid soils in a water-limited environment: 2. Soil chemical properties. **Agronomy**, v. 10, n. 12, 1987, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10121987. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy10121987.

ANTONANGELO, J. A. *et al.* Lime and calcium-magnesium silicate cause chemical attributes stratification in no-till fields. **Soil & Tillage Research**,

Amsterdam, v. 224, 105522, 2022. DOI: 10.1016/j.still.2022.105522. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105522.

ANTONANGELO, J. A.; FERRARI, J.; CRUSCIOL, C. A. C.; ALLEONI, L. R. F. Lime and calcium-magnesium silicate in the ionic speciation of an Oxisol. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 4, p. 317-333, 2017. DOI: 10.1590/1678-992X-2016-0372. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0372.

BATISTA, K. *et al.* Maize yield and nutrient cycling in degraded pasture via intercropping and nitrogen management during the dry season. **Nitrogen**, Basel, v. 7, n. 2, 36, 2026. DOI: 10.3390/nitrogen7020036. Disponível em: https://doi.org/10.3390/nitrogen7020036.

BECKER, R. K. *et al.* Soil health assessment in Brazilian subtropical Oxisol under land use and long-term tillage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 67, esp. 1, p. 1-11, 2024. DOI: 10.1590/1678-4324-PSSM-2024230789. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1678-4324-PSSM-2024230789.

BELLO, S. K.; ALAYAFI, A. H.; AL-SOLAIMANI, S. G.; ABO-ELYOUSR, K. A. M. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 9, 1735, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11091735.

BERTOLINO, K. M.; SOUZA, M. de; JONES, D. L.; ROSOLEM, C. A. Carbon use efficiency in the soil profile: the role of soil acidity alleviation, nitrogen, and phosphorus availability. **Agronomy**, Basel, v. 15, n. 6, 1299, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15061299.

BIAN, M.; ZHOU, M.; SUN, D.; LI, C. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. **The Crop Journal**, v. 1, n. 2, p. 91-104, 2013. DOI: 10.1016/j.cj.2013.08.002.

BIJANZADEH, E.; BOOSTANI, H. R.; HARDIE, A. G.; NAJAFI-GHIRI, M. Co-application of silicon and biochar affected anatomical and biochemical properties of corn leaf (Zea mays L.) under soil nickel toxicity. **Heliyon**, v. 10, n. 20, e39161, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39161. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39161.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARIANO, E.; MORETTI, L. G.; PORTUGAL, J. R.; FONSECA, M.; MOMESSO, L.; DALLA CÔRT, A. S.; COSTA, V. E.; CANTARELLA, H. Higher lime rates for greater nitrogen recovery: A long-term no-till experiment labeled with 15N. **Field Crops Research**, v. 299, 108971, 2023.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 2, 26, 2022a. DOI: 10.1007/s13593-022-00765-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-9.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* Long-term lime and phosphogypsum amended-soils alleviates the field drought effects on carbon and antioxidative metabolism of

maize by improving soil fertility and root growth. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 650296, 2021a. DOI: 10.3389/fpls.2021.650296.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, 126308, 2021b. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126308. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* Surface liming triggers improvements in subsoil fertility and root distribution to boost maize crop physiology, yield and revenue. **Plant and Soil**, v. 477, p. 319-341, 2022b. DOI: 10.1007/s11104-022-05432-2.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: ZARC**. Brasília, DF: MAPA, 2026. Disponível em: https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Zarc/Zarc.html. Acesso em: 7 fev. 2026.

BRUM, L. N. *et al.* Soil acidity correction and fertilization strategies: effects on acidity, nutrient availability, and crop yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 50, e0250058, 2026. DOI: 10.36783/18069657rbcs20250058.

CAGNA, C. P. *et al.* Soil structural quality and development of second-crop corn intercropping with forage grasses under no-tillage. **Bragantia**, Campinas, v. 82, e20230110, 2023. DOI: 10.1590/1678-4499.20230110.

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1987-1995, 2018. DOI: 10.2134/agronj2017.11.0642.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x.

CAMARGO, F. A. de O.; BATTISTI, R.; DALCHIAVON, F. C. Maize grain supply and demand for the animal protein chain in the Rio Grande do Sul State, Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 52, n. 11, e20210259, 2022. DOI: 10.1590/0103-8478cr20210259.

CAMPOS, M. de *et al.* Deep tilling and localized liming improve soil chemical fertility and sugarcane yield in clayey soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 222, 105425, 2022. DOI: 10.1016/j.still.2022.105425.

CANISARES, L. P. *et al.* Legacy effects of intercropping and nitrogen fertilization on soil N cycling, nitrous oxide emissions, and the soil microbial community in tropical maize production. **Frontiers in Soil Science**, Lausanne, v. 1, 746433, 2021a. DOI: 10.3389/fsoil.2021.746433.

CANISARES, L. P. *et al.* Maize-Brachiaria intercropping: a strategy to supply recycled N to maize and reduce soil N_2O emissions? **Agriculture, Ecosystems**

& Environment, Amsterdam, v. 319, 107491, 2021b. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107491.

CANTARELLA, H.; ZAMBROSI, F. C. B.; QUAGGIO, J. A.; DUARTE, A. P. Cereais. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; VAN RAIJ, B. Boletim 100: Recomendações técnicas de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: **Instituto Agronômico de Campinas**, 2022. p. 213-238. (Boletim Técnico 100).

CARMEIS FILHO, A. C.; PENN, C. J.; CRUSCIOL, C. A.; CALONEGO, J. C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 241, p. 11-23, 2017.

CASTRO, F. R.; REZENDE, C. F. A. Uso de corretivos do solo e a recuperação de pastagem degradada de Braquiária brizantha. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, e76101522617, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i15.22617.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M. da; FERRARI NETO, J.; MANCUSO, M. A. C. Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 16, n. 2, p. 362-379, 2016. DOI: 10.4067/S0718-95162016005000034.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 3, p. 311-321, 2015. DOI: 10.1590/1678-4499.0346.

CIBILS-STEWART, X.; POWELL, J. R.; POPAY, A. J.; LATTANZI, F. A.; HARTLEY, S. E.; JOHNSON, S. N. Reciprocal effects of silicon supply and endophytes on silicon accumulation and Epichloë colonization in grasses. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 593198, 2020.

COELHO, A. E. *et al.* Biomass and protein in ruzigrass intercropped with maize subjected to plant densities and nitrogen fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 58, e03296, 2023. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03296.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim da Safra de Grãos**. Brasília, DF: Conab, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoesagropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos. Acesso em: 10 jan. 2026.

CONCEIÇÃO, S. S.; OLIVEIRA NETO, C. F. D.; MARQUES, E. C.; BARBOSA, A. V. C.; GALVÃO, J. R.; OLIVEIRA, T. B. D.; OKUMURA, R. S.; MARTINS, J. T. D. S.; COSTA, T. C.; GOMES-FILHO, E. Silicon modulates the activity of antioxidant enzymes and nitrogen compounds in sunflower plants under salt

stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, p. 1237-1247, 2019. DOI: 10.1080/03650340.2018.1562272.

CORDEIRO, C. F. dos S.; ECHER, F. R.; ARAUJO, F. F. Cover crops impact crops yields by improving microbiological activity and fertility in sandy soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 1968-1977, 2021. DOI: 10.1007/s42729-021-00494-0. Acesso em: 17 jan. 2026.

CORNELIS, J.T.; DELVAUX, B.; GEORG, R. B.; LUCAS, Y.; RANGER, J.; OPFERGELT, S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, v. 8, p. 89-112, 2011. DOI: 10.5194/bg-8-89-2011.

CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, v. 137, p. 87-99, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Lasting effect of Urochloa brizantha on a common bean-wheat-maize rotation in a medium-term no-till system. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 940996, 2023. DOI: 10.3389/fsufs.2023.940996. Acesso em: 27 jan. 2026.

CRUSCIOL, C. A. C.; MARQUES, R. R.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A.; PARIZ, C. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 115, p. 347-372, 2019. DOI: 10.1007/s10705-019-10017-0.

DA COSTA, C. H.; CARMEIS FILHO, A. C.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; GUIMARÃES, T. M. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop & Pasture Science**, v. 69, p. 488-505, 2018.

DA COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean-oat-sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016.

DE CASTRO PIAS, O. H.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, A. G. B.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 675-692, 2020. DOI: 10.1002/agj2.20125.

DE TOMBEUR, F.; VANDER LINDEN, C.; CORNÉLIS, J.-T.; GODIN, B.; COMPÈRE, P.; DELVAUX, B. Soil and climate affect foliar silicification patterns and silica-cellulose balance in sugarcane (Saccharum officinarum). **Plant and Soil**, v. 452, p. 529-546, 2020. DOI: 10.1007/s11104-020-04588-z.

DJODJIC, F.; BIEROZA, M.; BERGSTRÖM, L. Land use, geology and soil properties control nutrient concentrations in headwater streams. **Science of the Total Environment**, v. 772, 145108, 2021.

DUTRA, A. F. L. *et al.* Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, London, v. 13, 16293, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-43351-z. Acesso em: 24 fev. 2026.

EEKHOUT, T.; LARSEN, P.; DE VEYLDER, L. Modification of DNA checkpoints to confer aluminum tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 22, p. 102-105, 2017.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999. DOI: 10.1146/annurev.arplant.50.1.641.

FATHI, A. Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency: a review. **Agrisost**, v. 28, p. 1-8, 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7143588.

FERNANDES, C. N. D. *et al.* Irrigation depth and silicate fertilisation in green maize. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 53, e20220043, 2022. DOI: 10.5935/1806-6690.20220043. Acesso em: 8 jan. 2026.

FILONCHYK, M.; PETERSON, M. P.; ZHANG, L.; HURYNOVICH, V.; HE, Y. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO2, CH4, and N2O. **Science of the Total Environment**, v. 935, 173359, 2024.

FLAUSINO, B. F. *et al.* Intercropping maize with brachiaria can be a double-edged sword strategy. **Pest Management Science**, Hoboken, v. 78, n. 12, p. 5243-5250, 2022. DOI: 10.1002/ps.7143. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ps.7143. Acesso em: 11 fev. 2026.

FLEXAS, J.; CARRIQUÍ, M. Photosynthesis and photosynthetic efficiencies along the terrestrial plant's phylogeny: lessons for improving crop photosynthesis. **The Plant Journal**, v. 101, p. 964-978, 2020. DOI: 10.1111/tpj.14651. Disponível em: https://doi.org/10.1111/tpj.14651. Acesso em: 25 mar. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAOSTAT). **FAOSTAT: crops and livestock products**. Rome: FAO, 2026. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/. Acesso em: 18 jan. 2026.

FUJII, K.; SHIBATA, M.; KITAJIMA, K.; ICHIE, T.; KITAYAMA, K.; TURNER, B. L. Plant-soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems. **Ecological Research**, v. 33, p. 149-160, 2018. DOI: 10.1007/s11284-017-1511-y.

GALINDO, F. S. *et al.* Corn shoot and grain nutrient uptake affected by silicon application combined with Azospirillum brasilense inoculation and nitrogen rates. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 2, p. 168-184, 2022a. DOI: 10.1080/01904167.2021.1943436. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1943436. Acesso em: 25 ago. 2026.

GALINDO, F. S. *et al.* Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with Azospirillum brasilense inoculation under Brazilian savannah conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 134, 126471, 2022b. DOI: 10.1016/j.eja.2022.126471.

GALINDO, F. S.; PAGLIARI, P. H.; DA SILVA, E. C.; DE LIMA, B. H.; FERNANDES, G. C.; THIENGO, C. C.; BERNARDES, J. V. S.; JALAL, A.; DA SILVA OLIVEIRA, C. E.; DOS SANTOS, G. D. Unveiling contribution and fate of nitrogen with 15N techniques affected by microbial co-inoculation on field-grown maize: A novel approach to optimize N-fertilizer use efficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 217, 109261, 2024.

GIBBS, H. K.; SALMON, J. M. Mapping the world's degraded lands. **Applied Geography**, v. 57, p. 12-21, 2015.

GIFFORD, R. M.; THORNE, J. H.; HITZ, W. D.; GIAQUINTA, R. T. Crop Productivity and Photoassimilate Partitioning. **Science**, v. 225, p. 801-808, 1984. DOI: 10.1126/science.225.4664.801.

GÓMEZ, R.; VICINO, P.; CARRILLO, N.; LODEYRO, A. F. Manipulation of oxidative stress responses as a strategy to generate stress-tolerant crops. From damage to signaling to tolerance. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 39, p. 693-708, 2019. DOI: 10.1080/07388551.2019.1597829.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Mountain View: Google, 2026. Disponível em: https://earth.google.com/. Acesso em: 25 ago. 2026.

GUPTA, A.; RICO-MEDINA, A.; CAÑO-DELGADO, A. I. The physiology of plant responses to drought. **Science**, v. 368, p. 266-269, 2020. DOI: 10.1126/science.aaz7614.

GURGEL, A. C.; SEABRA, J. E. A.; ARANTES, S. M.; MOREIRA, M. M. R.; LYND, L. R.; GALINDO, R. Contribution of double-cropped maize ethanol in Brazil to sustainable development. **Nature Sustainability**, London, v. 7, p. 1429-1440, 2024. DOI: 10.1038/s41893-024-01424-5.

HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 831-844, 2014. DOI: 10.1002/jpln.201400202.

HAYNES, R. J. The nature of biogenic Si and its potential role in Si supply in agricultural soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 245, p. 100-111, 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2017.04.021.

HOLLAND, J.; BENNETT, A.; NEWTON, A.; WHITE, P.; MCKENZIE, B.; GEORGE, T.; PAKEMAN, R.; BAILEY, J.; FORNARA, D.; HAYES, R. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review. **Science of the Total Environment**, v. 610, p. 316-332, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal: PAM**. Rio de Janeiro: IBGE, 2026.

JIANG, H.; XU, D.-Q. The Cause of the Difference in Leaf Net Photosynthetic Rate between Two Soybean Cultivars. **Photosynthetica**, v. 39, p. 453-459, 2001. DOI: 10.1023/A:1015150931227.

JOHNSON, S. N.; CHEN, Z.-H.; ROWE, R. C.; TISSUE, D. T. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 1030620, 2022.

JOSHI-PANERI, J.; SHARMA, S.; GURUPRASAD, K. N.; KATARIA, S. Enhancing the yield potential of soybean after magneto-priming: detailed study on its relation to underlying physiological processes. **Seeds**, v. 2, n. 1, p. 60-84, 2023. DOI: 10.3390/seeds2010006.

KAUR, H.; GREGER, M. A review on Si uptake and transport system. **Plants**, v. 8, 81, 2019.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. 2. ed. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; BOLAN, N. S.; XU, Y.; MANDAL, S.; GLEESON, D. B.; SESHADRI, B.; ZAMAN, M.; BARTON, L.; TANG, C. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in Agronomy**, v. 139, p. 1-71, 2016.

LI, Y.; CUI, S.; CHANG, S.; ZHANG, Q. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, p. 1393-1406, 2019. DOI: 10.1007/s11368-018-2120-2.

LIANG, X. *et al.* Silicon nanoparticles enhance maize yield and water productivity via regulating photosynthesis and canopy structure under mild regulated deficit irrigation. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 16, 1691443, 2026. DOI: 10.3389/fpls.2025.1691443.

LIMA, M. de L. *et al.* Silicon as a strategy to mitigate abiotic stresses and improve physiological performance and grain yield of maize grown under tropical climate conditions. **Plants**, Basel, v. 14, n. 17, 2755, 2025. DOI: 10.3390/plants14172755.

LIMA, S. F. *et al.* Maize and Urochloa spp. intercropping managed with or without glyphosate underdoses. **International Journal of Maize and Sorghum**, Sete Lagoas, v. 19, e1121, 2020. DOI: 10.18512/rbms2020v19e1121.

LISBOA, L. A. M. *et al.* Physiological parameters of soybean under different intensities of artificial light. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 8, p. 188-197, 2019. DOI: 10.5539/jas.v11n8p188.

MABAGALA, F. S. *et al.* Effect of silicon on crop yield and nitrogen use efficiency applied under straw return treatments. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 18, n. 4, p. 5577-5590, 2020. DOI: 10.15666/aeer/1804_55775590.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MANDLIK, R.; THAKRAL, V.; RATURI, G.; SHINDE, S.; NIKOLIĆ, M.; TRIPATHI, D. K.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, p. 6703-6718, 2020.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 4, p. 380-388, 2013. DOI: 10.4322/rca.2013.057.

MINATO, E. A.; BRIGNOLI, F. M.; NETO, M. E.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; LIMA, R. S.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. **Soil & Tillage Research**, v. 234, 105860, 2023.

MINGOTTE, F. L. C. *et al.* Impact of crop management and no-tillage system on grain and straw yield of maize crop. **Cereal Research Communications**, Budapest, v. 48, n. 3, p. 399-407, 2020. DOI: 10.1007/s42976-020-00051-y.

MONDAL, S. *et al.* Grain nitrogen content and productivity of rice and maize under variable doses of fertilizer nitrogen. **Heliyon**, v. 9, n. 6, e17321, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17321.

MU, X.; CHEN, Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 76-82, 2021.

MWENDWA, N. *et al.* Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability: a meta-analysis. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1-15, 2023. DOI: 10.3389/fagro.2023.1194896.

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (Triticum aestivum L.). **Scientific Reports**, v. 7, 40829, 2017.

NING, D. *et al.* Silicon-induced drought resilience in maize (Zea mays L.): uncovering the integrated physiochemical and transcriptomic insights into stress mitigation. **Plant Growth Regulation**, Dordrecht, v. 106, 15, 2026. DOI: 10.1007/s10725-025-01426-z.

NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. da S.; MAZUCO, A. C. B.; PICCIN, M. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic Oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0150541, 2017.

OCDE; FAO. **Perspectivas agrícolas OCDE-FAO 2015-2024**. Paris: OECD Publishing, 2015. DOI: 10.1787/agr_outlook-2015-pt.

OLIVEIRA, T. C. C. de *et al.* Nitrogen sources on the chemical composition and productivity of maize alone and intercropped with brachiaria. **Bragantia**, Campinas, v. 85, e20250125, 2026. DOI: 10.1590/1678-4499.20250125.

PASCHOAL, M. C. G. *et al.* Visual evaluation of soil structure in maize and forage grasses intercropping under no-tillage. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 63, esp., e20190498, 2020. DOI: 10.1590/1678-4324-solo-2020190498.

PAVLOVIC, J.; KOSTIC, L.; BOSNIC, P.; KIRKBY, E. A.; NIKOLIC, M. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 697592, 2021.

PERDOMO, D. N. *et al.* Increase in foliar silicon content reduces defoliation by Spodoptera frugiperda (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. **Bragantia**, Campinas, v. 81, e2522, 2022. DOI: 10.1590/1678-4499.20210147.

PIMENTEL, G. V. *et al.* Surface application of soil acidity amendments and agricultural gypsum alter soil fertility and sugarcane yield. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Cham, v. 25, p. 10288-10298, 2025. DOI: 10.1007/s42729-025-02793-2.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 25 ago. 2026.

RAGHURAMAN, S. P.; PAYNTER, D.; RAMASWAMY, V. Anthropogenic forcing and response yield observed positive trend in Earth's energy imbalance. **Nature Communications**, v. 12, 4577, 2021.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RAMÍREZ-OLVERA, S. M.; TREJO-TÉLLEZ, L. I.; PÉREZ-SATO, J. A.; GÓMEZ-MERINO, F. C. Silicon stimulates initial growth and chlorophyll a/b ratio in rice seedlings, and alters the concentrations of Ca, B, and Zn in plant tissues. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, p. 1928-1940, 2019. DOI: 10.1080/01904167.2019.1648678.

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

SAHEBI, M.; HANAFI, M. M.; SITI NOR AKMAR, A.; RAFII, M. Y.; AZIZI, P.; TENGOUA, F. F.; NURUL MAYZAITUL AZWA, J.; SHABANIMOFRAD, M. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. **BioMed Research International**, v. 2015, Article ID 396010, 2015. DOI: 10.1155/2015/396010.

SANTOS, F. C. D.; RESENDE, Á. V. D.; SOARES, J. R.; VIANA, J. H. M.; SANTANA, M. L. T.; MOREIRA, S. G.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. D. Limestone reaction in sandy soil: Rate effects, limestone type, moisture regime, and time. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, e70008, 2024. DOI: 10.1002/agg2.70008.

SCHALLER, J.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; ELLERBROCK, R.; SOMMER, M. Silicon cycling in soils revisited. **Plants**, v. 10, n. 2, 295, 2021. DOI: 10.3390/plants10020295.

SHANE, M. W.; MCCULLY, M. E.; CANNY, M. J. The vascular system of maize stems revisited: implications for water transport and xylem safety. **Annals of Botany**, v. 86, p. 245-258, 2000.

SHARF-ELDIN, A. A. *et al.* Response of maize seedlings to silicon dioxide nanoparticles (SiO2NPs) under drought stress. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2592, 2023. DOI: 10.3390/plants12142592.

SHRUTHI; PRAKASH, N. B.; DHUMGOND, P.; GOIBA, P. K.; LAXMANARAYANAN, M. The benefits of gypsum for sustainable management and utilization of acid soils. **Plant and Soil**, v. 504, p. 5-28, 2024. DOI: 10.1007/s11104-024-06907-0.

SILVA, A. P. R. da *et al.* Silicon application methods influence the nutrient uptake of maize plants in tropical soil. **Silicon**, Dordrecht, v. 15, p. 7327-7334, 2023. DOI: 10.1007/s12633-023-02592-3.

SILVA, F. C. da (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SILVA, P. L. F. da *et al.* Cover crops influence the physical hydric quality of a tropical sandy soil under no-tillage cotton cropping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 48, e0240026, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20240026.

SOUZA, D. K. F. de; SILVEIRA, R. L. F. da; BALLINI, R. Efeito da expansão da safra de inverno de milho no Brasil sobre a sazonalidade dos preços spot. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 61, n. 4, e262824, 2023. DOI: 10.1590/1806-9479.2022.262824.

SOUZA, I. N. de *et al.* Effects on soil fertility and crop productivity under residual agricultural gypsum and Azospirillum brasilense in cover crops in a consolidated no-tillage system. **Plants**, Basel, v. 14, n. 20, 3230, 2025. DOI: 10.3390/plants14203230.

SOUZA, P. P. de *et al.* The crop succession systems under no-tillage alters the surface layer soil carbon stock and stability. **Agriculture**, Basel, v. 14, n. 11, 2085, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14112085.

SOUZA, S. S. *et al.* Intercropping and cover crop effects on maize nitrogen requirement for optimal growth. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 160, n. 5, 2022. DOI: 10.1017/S0021859622000478.

SOUZA, V. S. *et al.* Maize-Urochloa grass intercropping: an option for improving sustainable agriculture in the Brazilian Savannah. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 61, p. 1-18, 2025. DOI: 10.1017/S0014479725100070.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: a review. **Science of the Total Environment**, v. 807, 150976, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150976.

TE PAS, E. E. E. M.; HAGENS, M.; COMANS, R. N. J. Assessment of the enhanced weathering potential of different silicate minerals to improve soil quality and sequester CO_2. **Frontiers in Climate**, v. 4, 954064, 2023. DOI: 10.3389/fclim.2022.954064.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

TIAN, X.-Y.; HE, D.-D.; BAI, S.; ZENG, W.-Z.; WANG, Z.; WANG, M.; WU, L.-Q.; CHEN, Z.-C. Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants. **Plant and Soil**, v. 468, p. 1-17, 2021. DOI: 10.1007/s11104-021-05139-w.

TOOR, M. D.; ADNAN, M.; REHMAN, F. U.; TAHIR, R.; SAEED, M. S.; KHAN, A. U.; PAREEK, V. Nutrients and their importance in agriculture crop production; A review. **International Journal of Pure & Applied Bioscience**, v. 9, p. 1-6, 2021.

TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. **Soil Science**, v. 181, p. 393-411, 2016.

VANDER LINDEN, C.; DELVAUX, B. The weathering stage of tropical soils affects the soil-plant cycle of silicon, but depending on land use. **Geoderma**, v. 351, p. 209-220, 2019.

VERMA, K. K. *et al.* Unlocking the role of silicon against biotic stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 1430804, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1430804.

VICENSI, M.; LOPES, C.; KOSZALKA, V.; UMBURANAS, R. C.; KAWAKAMI, J.; POTT, C. A.; MÜLLER, M. M. L. Gypsum Rates and Splitting Under No-Till: Soil Fertility, Corn Performance, Accumulated Yield and Profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 690-702, 2020. DOI: 10.1007/s42729-019-00157-1.

WALNE, C. H.; REDDY, K. R. Temperature effects on the shoot and root growth, development, and biomass accumulation of corn (Zea mays L.). **Agriculture**, v. 12, 443, 2022.

WALSH, O. S.; SHAFIAN, S.; MCCLINTICK-CHESS, J. R.; BELMONT, K. M.; BLANSCET, S. M. Potential of silicon amendment for improved wheat production. **Plants**, v. 7, 26, 2018.

XU, D.; GAO, X.; GAO, T.; MOU, J.; LI, J.; BU, H.; ZHANG, R.; LI, Q. Interactive effects of nitrogen and silicon addition on growth of five common plant species and structure of plant community in alpine meadow. **Catena**, v. 169, p. 80-89, 2018. DOI: 10.1016/j.catena.2018.05.017.

XUE, J.; GAO, S.; FAN, Y.; LI, L.; MING, B.; WANG, K.; XIE, R.; HOU, P.; LI, S. Traits of plant morphology, stalk mechanical strength, and biomass accumulation in the selection of lodging-resistant maize cultivars. **European Journal of Agronomy**, v. 117, 126073, 2020.

YANG, N. *et al.* Two teosintes made modern maize. **Science**, Washington, v. 382, n. 6674, eadg8940, 2023. DOI: 10.1126/science.adg8940.

YU, P. *et al.* Seedling root system adaptation to water availability during maize domestication and global expansion. **Nature Genetics**, London, v. 56, p. 1245-1256, 2024. DOI: 10.1038/s41588-024-01761-3.

ZHANG, S.; YANG, W.; MUNEER, M. A.; JI, Z.; TONG, L.; ZHANG, X.; LI, X.; WANG, W.; ZHANG, F.; WU, L. Integrated use of lime with Mg fertilizer significantly improves the pomelo yield, quality, economic returns and soil physicochemical properties under acidic soil of southern China. **Scientia Horticulturae**, v. 290, 110502, 2021.

ZHOU, J.; CUI, M.; WU, Y.; GAO, Y.; TANG, Y.; CHEN, Z.; TIAN, H. Maize (Zea mays L.) stem target region extraction and stem diameter measurement based on an internal gradient algorithm in field conditions. **Agronomy**, v. 13, 1185, 2023.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.