

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA
DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E CÁLCIO EM FORRAGEIRAS**

William Bruno Silva Araújo

Engenheiro Agrônomo

2021

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA
DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E CÁLCIO EM FORRAGEIRAS**

William Bruno Silva Araújo

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2021

A663s Araujo, William Bruno Silva
Silício na mitigação dos efeitos da deficiência de nitrogênio, fósforo e cálcio em forrageiras / William Bruno Silva Araújo. -- Jaboticabal, 2021
47 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado

1. Agronomia. 2. Gramíneas forrageiras. 3. Estresse vegetal. 4. Pastagens adubos e fertilizantes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



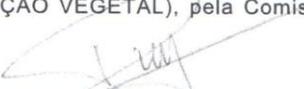
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

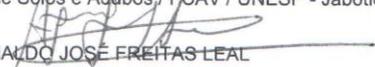
TÍTULO DA TESE: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E CÁLCIO EM FORRAGEIRAS

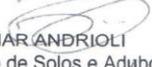
AUTOR: WILLIAM BRUNO SILVA ARAÚJO

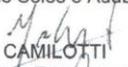
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

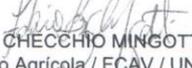
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. AGUINALDO JOSÉ FREITAS LEAL
Curso de Agronomia-UFTM / Iturama/MG


Prof. Dr. ITAMAR ANDRIOLI
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. FÁBIO CAMILOTTI
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza / FATEC - Jaboticabal/SP


Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE
CTA - Colégio Técnico Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 24 de janeiro de 2020

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

WILLIAM BRUNO SILVA ARAÚJO, nascido em São Domingos do Araguaia, Estado do Pará, Brasil, em 18 de dezembro de 1982. Graduiu-se em Tecnologia Agroindustrial em 2005, pela Universidade do Estado do Pará – UEPA e em Engenharia Agrônômica em 2010, pela Universidade Federal do Pará – UFPA. Em setembro de 2010 se tornou professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, Câmpus Rural de Marabá, localizado no sudeste do Estado do Pará, onde atua como docente até os dias atuais. Nessa Instituição participou de diversos projetos de pesquisa e extensão, nas áreas de compostagem, vermicompostagem, biogás, biofertilizantes e fixação biológica de nitrogênio. Além de coordenar cursos de nível técnico e superior de tecnologia. Em 2012 obteve título de especialista em Desenvolvimento Rural Sustentável e Agroecologia, pela UFPA. Nesse mesmo ano também se especializou em Educação do Campo, Agroecologia e Questões Pedagógicas, pela própria instituição em que atua na docência. Em 2018 se tornou mestre em Desenvolvimento Rural e Gestão de Empreendimentos Agroalimentares, pelo IFPA, Câmpus de Castanhal, desenvolvendo pesquisa na área de indicadores de sustentabilidade de agroecossistemas. Em 2018 ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia, Produção Vegetal, da Universidade Estadual Paulista – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, onde desenvolveu pesquisa na área de nutrição de plantas, no âmbito do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp – Genplant.

Muitos são os obstinados que se empenham no caminho que escolheram, poucos os que se empenham no objetivo.

Friedrich Nietzsche

À minha esposa, Ana Marcia, e minha filha, Elzy Cristina, pelo amor e apoio diário e incondicional.

Aos meus pais, Ronaldo Araújo e Jovecilda da Silva Araújo, exemplos que segui.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao IFPA, minha instituição de origem, pelo incentivo e garantia de qualificação profissional.

À Unesp, especialmente a Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade.

Ao meu orientador, prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelo compromisso com a pesquisa, orientações, ensinamentos, confiança e inspiração.

Ao prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, coordenador do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pelo compromisso com a qualidade da formação.

Aos professores Dr. Marcelo Ferreira da Silva, Unesp/FCAV Jaboticabal, Dr. Ricardo e Dr. Roberto, ambos do IFPA, Castanhal, por atuarem à frente do convênio de doutorado Interinstitucional (Dinter - IFPA/Unesp), pelo qual ingressei nesse doutorado.

A minha esposa e filha pelo amor, compreensão, doação e incentivo, principalmente, nos momentos mais difíceis durante a minha trajetória de estudos.

Aos meus pais, pelo exemplo de luta, pelo incentivo e apoio incondicional para meus estudos.

Aos meus familiares, irmãs, cunhadas, cunhados, sobrinhas, sobrinhos, sogro, sogra, tios, tias, primos e primas pelo incentivo e torcida.

A todos os professores com os quais tive aula durante a minha formação nesse doutorado, pelos conhecimentos oportunizados.

Aos colegas do Minter e Dinter – IFPA/Unesp, pelos conhecimentos partilhados, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas pesquisadores do Genplant, especialmente, Antônio Márcio, Gelza Carliene e Dalila Lopes, pelos conhecimentos compartilhados e por todo apoio durante a realização dessa pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, especialmente a Claudia Dela Marta, técnica de laboratório, pela paciência, disponibilidade e ensinamentos durante as minhas análises laboratoriais.

A todos (as) os (as) servidores (as) e funcionários (as) terceirizados (as) da Unesp, que muitas vezes de maneira anônima garantem com seu compromisso e dedicação o funcionamento dessa importante Instituição de Ensino e Pesquisa.

A todos e todas, agradeço.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Importância das forrageiras em estudo.....	2
2.2 Fertilidade dos solos cultivados com forrageiras.....	4
2.3 Considerações gerais sobre o Si na mitigação de deficiência mineral de plantas.....	6
2.4 Mecanismos de ação do Si nas plantas.....	8
2.5 Estudos com uso do silício na mitigação dos efeitos da deficiência de macronutrientes em plantas.....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4 RESULTADOS.....	15
4.1 Experimento 1 – <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu.....	15
4.2 Experimento 2 – <i>Megathyrus maximum</i> cv Massai.....	17
5 DISCUSSÃO.....	19
5.1 Solução nutritiva completa (controle).....	19
5.2 Deficiência de nitrogênio.....	19
5.3 Deficiência de fósforo.....	20
5.4 Deficiência de Cálcio.....	20
6 CONCLUSÃO.....	21
7 REFERÊNCIAS.....	22
8 IMPLICAÇÕES.....	29

SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E CÁLCIO EM FORRAGEIRAS

RESUMO - Em forrageiras tropicais é comum ocorrer deficiência de nitrogênio (N), fósforo (P) e cálcio (Ca). O Si pode ser uma opção para mitigar os efeitos dessas deficiências, mas os mecanismos de ação deste elemento benéfico ainda não são conhecidos para os genótipos *Urochloa brizantha* cultivar Marandu e *Megathyrus maximum* cultivar Massai. Objetivou-se avaliar se o fornecimento de Si pode mitigar a deficiência destes nutrientes em dois genótipos de forrageiras tropicais, cultivadas em solução nutritiva equilibrada e com deficiências isoladas de N, P e Ca. Os tratamentos foram construídos de solução nutritiva equilibrada e deficiências isoladas N, P e Ca, na ausência e na presença de Si. O delineamento foi inteiramente casualizado, com oito tratamentos e seis repetições em fatorial 4 x 2. A fonte de Si foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (94,2 g L⁻¹ de Si e 60 g L⁻¹ de Na). Os experimentos foram conduzidos em condições de casa de vegetação. Inicialmente com a semeadura em bandejas de poliestireno contendo substrato de vermiculita e fornecimento de água potável durante 20 dias. Depois desse período as plantas foram transplantadas para vasos de polietileno de 1,7 dm³ contendo areia lavada e passaram a receber solução nutritiva. Foi realizado corte de uniformização aos 45 após o transplante. Aos 45 dias depois do corte de uniformização foram obtidos os parâmetros extravasamento de eletrólitos, índice de cor verde e rendimento quântico da fluorescência. Aos 55 dias após o corte de uniformização foram obtidas as variáveis comprimento das plantas e número de perfilhos e realizado novo corte. O material vegetal foi lavado e seco em estufa até atingir massa constante para a obtenção da massa seca da parte aérea por vaso. Determinou-se o teor de compostos fenólicos, o teor de Si e os teores de N, P e Ca. Obteve-se a eficiência de uso do N, P, e Ca. Em ambos os genótipos a adição de Si na solução nutritiva diminuiu o extravasamento de eletrólitos celular e incrementou o teor de compostos fenólicos, o índice de cor verde, o rendimento quântico da fluorescência, a eficiência de utilização de N, P e Ca e a produção de massa seca da parte aérea, em comparação com os tratamentos que não receberam Si. Esses resultados indicam que o Si mitiga os efeitos da deficiência de N, P e Ca nos genótipos estudados, pelo seu papel antioxidante, que reflete na melhoria da eficiência da fotossíntese e de uso de N, P e Ca induzindo aumento na produção de massa seca. O acréscimo de Si também teve efeito benéfico nas forrageiras sem estresse nutricional.

Palavras-chave: Nutrição de plantas, forragem, silicato de sódio, solução nutritiva

SILICON IN MITIGATING THE EFFECTS OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND CALCIUM DEFICIENCY IN FORAGES

ABSTRACT - In tropical forages, nitrogen (N), phosphorus (P) and calcium (Ca) deficiencies are common. Si can be an option to mitigate the effects of these deficiencies, but the mechanisms of action of this beneficial element are not yet known for the genotypes *Urochloa brizantha* cultivar Marandu and *Megathyrsus maximum* cultivar Massai. The objective of this study was to evaluate whether the supply of Si can mitigate the deficiency of these nutrients in two genotypes of tropical forages, cultivated in balanced nutrient solution and with isolated N, P and Ca deficiencies. The treatments consisted of a balanced nutrient solution and isolated N deficiencies, P and Ca, in the absence and presence of Si. The design was completely randomized, with eight treatments and six replications in a 4 x 2 factorial. The source of Si was sodium silicate stabilized with sorbitol (94.2 g L⁻¹ of Si and 60 g L⁻¹ of Na). The experiments were carried out under greenhouse conditions. Initially with sowing in polystyrene trays containing vermiculite substrate and supply of drinking water for 20 days. After this period, the plants were transplanted to 1.7 dm³ polyethylene pots containing washed sand and began to receive a nutrient solution. A uniform cut was performed at 45 after transplanting. At 45 days after the standardization cut, the parameters of electrolyte leakage, green color index and fluorescence quantum yield were obtained. At 55 days after the standardization cut, the variables plant length and number of tillers were obtained and a new cut was performed. The plant material was washed and dried in an oven until reaching a constant mass to obtain the dry mass of the aerial part per pot. The content of phenolic compounds, the Si content and the N, P and Ca contents were determined. The efficiency of use of N, P, and Ca was obtained. In both genotypes the addition of Si to the nutrient solution decreased the extravasation of cellular electrolytes and increased the content of phenolic compounds, the green color index, the quantum yield of fluorescence, the efficiency of N, P and Ca utilization and the production of shoot dry mass, compared to the treatments that did not receive Si. These results indicate that Si mitigates the effects of N, P and Ca deficiency in the studied genotypes, due to its antioxidant role, which reflects in the improvement of photosynthesis efficiency and the use of N, P and Ca inducing increase in the production of dry mass. The addition of Si also had a beneficial effect on forages without nutritional stress.

Keywords: Plant nutrition, forage, sodium silicate, nutrient solution

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos efeitos benéficos do silício têm sido registrados em plantas sob estresse biótico e, quando abiótico, referem-se aos danos por salinidade, toxicidade de elementos químicos e estresse hídrico. Quanto aos distúrbios nutricionais os estudos são pontuais em algumas espécies e têm indicado os benefícios do Si no alívio da deficiência de potássio em plantas de sorgo (*Sorghum bicolor*) (CHEN et al., 2016) e em soja (*Glycine max*) (MIAO et al., 2010), nitrogênio em arroz (*Oryza sativa*) (WU et al., 2017; DEUS et al., 2019), magnésio em milho (*Zea mays*) (HOSSEINI et al., 2019) e enxofre em cevada (*Hordeum vulgare*) (MAILLARD et al., 2018).

O modo de ação do Si no alívio de estresses das plantas são variáveis. Existem indicações de que o Si pode se ligar de forma semelhante ao cálcio a compostos orgânicos da parede celular, assim, a presença de Si ocupa os locais de ligação do cálcio, minimizando os efeitos da deficiência desse nutriente (INANAGA et al., 1995). Outros estudos acrescentaram que o Si substitui parte do carbono de estruturas orgânicas da parede celular (COOKE; LEISHMAN, 2012), com baixo custo energético para ser incorporado (NEU et al., 2017), o que pode potencializar a assimilação de nutrientes e sua eficiência de uso. Além disso, o Si pode atuar na biossíntese de compostos fenólicos (RIBEIRA-FONSECA et al., 2018; VEGA et al., 2019) e diminuir o dano oxidativo, refletindo no incremento da taxa fotossintética e assimilação de nutrientes (COOKE; LEISHMAN, 2016).

Os efeitos benéficos do Si são mais evidentes em plantas acumuladoras, como as da família das *Poaceae* (DE MELO et al., 2010), que inclui as forrageiras dos gêneros *Urochloa* e *Megathyrus*, adaptadas às diversas condições ambientais, por isso amplamente cultivadas (MONTEIRO et al., 1995).

Essas forrageiras cultivadas em regiões tropicais apresentam baixa produtividade, especialmente, devido à deficiência de macronutrientes, como o N, P e Ca, dada à limitada fertilidade natural destes solos (PRADO, 2008). Nestas espécies, ainda não é conhecido se o Si poderia contribuir para alívio da deficiência nutricional, bem como seus mecanismos de ação. Neste contexto, surge a hipótese que o Si alivia a deficiência do N, P e Ca em plantas forrageiras por diminuir danos

oxidativos e aumentar a fotossíntese e eficiência de uso destes nutrientes. Essas informações seriam importantes para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de produção de forrageiras tropicais, cultivadas na maioria das áreas em solos de baixa fertilidade.

Assim, objetivou-se avaliar se o fornecimento de Si pode mitigar a deficiência de N, P e Ca em duas espécies forrageiras tropicais, cultivadas em solução nutritiva sob equilíbrio e deficiência de N, P e Ca, na ausência e na presença de Si.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância das forrageiras em estudo

O Brasil é o segundo maior produtor e o maior exportador mundial de carne bovina. Diferentemente de países como Estados Unidos da América e Austrália, onde o sistema de confinamento é a base para a produção de carne, o Brasil tem a maior parte do seu rebanho criado a pasto, que é a forma mais econômica e prática de produzir e oferecer alimentos para os bovinos. Isso se deve as condições climáticas e a disponibilidade de grandes extensões de área. Dessa forma, as pastagens desempenham importante papel na pecuária e economia brasileira (DIAS-FILHO, 2014).

De acordo com o Atlas das Pastagens Brasileiras da UFG, a área de pastagem em 2017 no Brasil era de 178.744.965 ha, o que corresponde a 21% do território nacional, dos quais 63.745.727 ha apresentam indícios de degradação (LAPIG, 2019).

No Brasil as espécies mais utilizadas como forrageiras pertencem à família *Poaceae* (gramíneas), destacando-se as introduzidas da África, que, em sua maioria, pertencem aos gêneros *Urochloa* (*Brachiaria*) e *Megathyrsus* (*Panicum*) (KARAM et al. 2009). Espécies desses gêneros têm sido recomendadas como forrageiras em pastagens em diversas regiões tropicais e subtropicais do mundo propiciando importante papel na produção de proteína animal.

As plantas do gênero *Urochloa* são caracterizadas pela sua robustez, pela agressividade, pela adaptação a regiões tropicais e pela baixa exigência em solos

férteis, possibilitando grande espectro de uso e manejo. A alta produção de matéria seca e crescimento bem distribuído também são características importantes (KARAM et al. 2009). O gênero *Urochloa* possui diversas espécies e cultivares em uso no Brasil, como a *Urochloa decumbens*, *Urochloa ruzizienses*, *Urochloa humidicola* e a *Urochloa brizantha* cv Marandu (CORRÊA; SANTOS, 2003). A cultivar *Urochloa brizantha* cv Marandu adquiriu importância no Brasil devido ao seu maior porte do gênero e a sua boa resistência a cigarrinha das pastagens, adicionado da alta produtividade potencial competitivo com invasoras e alta produção de sementes (CORRÊA; SANTOS, 2003).

Segundo Corrêa e Santos (2003) a *Urochloa brizantha* cv Marandu é uma das forrageiras mais cultivadas no Brasil desde metade da década de 1980 e destaca-se principalmente pelo seu maior porte em relação às outras espécies do gênero *Urochloa*. De acordo com Seiffert (1980) é uma planta cespitosa, com colmos iniciais prostados, mas produzindo perfilhos predominantemente eretos; apresenta pêlos na porção apical dos entrenós, bainhas pilosas e lâminas largas e longas com pubescência apenas na face inferior.

Segundo Monteiro et al. (1995) a *Urochloa brizantha* cv Marandu essa forrageira apresenta bom valor nutritivo, menor estacionalidade na produção, melhor relação folha/haste, e resistência a cigarrinha das pastagens, quando comparada a variedade do mesmo gênero. Ainda de acordo com os mesmo autores, apesar de bem adaptada às condições brasileiras e da crescente expansão, estudos sobre a nutrição mineral dessa cultivar ainda são escassos. O cultivar Marandu é recomendado para regiões com solos de média a alta fertilidade.

São atributos negativos dessa cultivar a baixa adaptação a solos ácidos e de baixa fertilidade, exigente em manejo mais cuidadoso, baixa adaptação a solos mal drenados e a susceptibilidade à cigarrinha da cana-de-açúcar (CORRÊA; SANTOS, 2003).

De forma semelhante ao gênero *Urochloa*, o interesse pelo gênero *Megathyrsus* para o cultivo de pastagens no Brasil também tem crescido, provavelmente pelo grande potencial de produção de matéria seca por área, ampla adaptabilidade, boa qualidade de forragem e facilidade de estabelecimento.

A cultivar Massai, liberada em 2001, é um híbrido espontâneo entre *Megathyrsus maximum* e *Megathyrsus infestum*, e foi coletada na Tanzânia, África, pelo “Institut de Recherchepourle Développement (IRD)”. Esta *Poaceae* é perene, possui hábito de crescimento cespitoso, com folhas finas (1 cm) e decumbentes, raízes profundas e altura que pode chegar a 65 cm. As laminas possuem densidade média de pelos curtos e duros na face superior, já as bainhas apresenta densidade alta de pelos curtos e duros. O verticilo é piloso. As inflorescências são panículas do tipo C. As espiguetas são pilosas, distribuídas de maneira uniforme (VALENTIN et al., 2001).

A planta tem como característica o crescimento formando touceiras com altura média de 60 cm. Possui excelente produção de forragem com grande velocidade de estabelecimento e de rebrota, com média tolerância ao frio e boa resistência ao fogo (CORRÊA; SANTOS, 2003). Quando comparado a cultivares de *Megathyrsus maximum*, o capim-massai se apresenta mais adaptado às condições de baixa fertilidade do solo, com boa resistência ao ataque da cigarrinha-das-pastagens.

2.2 Fertilidade dos solos cultivados com forrageiras

Em geral, os solos nas regiões de clima tropical e subtropical, são caracterizados por apresentarem baixo índice de saturação de bases (V%) e pH (HERLING et al., 2000; RONQUIM, 2010).

Um índice V% baixo indica que há pequenas quantidades de cátions, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , saturando as cargas negativas dos coloides e que a maioria delas está sendo neutralizada por H^+ e Al^{3+} . O solo nesse caso provavelmente será ácido, podendo até apresentar teores de alumínio tóxico às plantas. Essa situação pode ser comum para grandes áreas tropicais que é comum elevada precipitação pluviométrica podendo lixiviar bases como K^+ , Ca^{2+} e o Mg^{2+} e sendo substituídos nos coloides pelos íons H^+ e podendo aumentar teores de Al^{3+} (RONQUIM, 2010).

Ainda de acordo com Ronquim (2010) a acidez dos solos está ligada à sua fertilidade porque várias condições importantes, tais como estrutura, solubilidade de

minerais, disponibilidade de nutrientes, atividade de microrganismos e absorção de íons pela planta são influenciadas pela reação do solo.

Nos solos tropicais predomina a argila 1:1, argila do tipo duas camadas. Sua estrutura é em lâminas compostas de duas camadas de tetraedros de silício e uma central de octaedro de alumínio. Exemplos são a caolinita e haloisita. São argilas de carga superficial (capacidade de troca de cátions) baixa e dependente do pH (RONQUIM, 2010).

Nas regiões tropicais, como frequentemente ocorre na Amazônia brasileira, mas também em outras partes do mundo, a implantação de pastagens ocorre a partir da supressão e queima da vegetação original, modificando as condições químicas, físicas e biológicas dos solos. O manejo comum de pastagens pelo uso do fogo provoca perda de nutrientes por volatilização, como é o caso do nitrogênio, além de potencializarem a perda horizontal e lixiviação de outros nutrientes (DIAS-FILHO, 2014).

Segundo a FAO (2009), em termos globais, uma das principais causas de degradação de pastagens de influência antrópica direta é o manejo inadequado, em particular o uso sistemático de taxas de lotação que excedam a capacidade do pasto de se recuperar do pastejo e do pisoteio. Em regiões de clima tropical e subtropical, as práticas inadequadas de manejo do pastejo também são apontadas como uma das principais causas de degradação das pastagens. Nestas áreas é comum a ausência de adubações periódicas e as falhas no estabelecimento da pastagem entre outros problemas (DIAS-FILHO, 2014). Portanto, nas regiões tropicais um das principais dificuldades para a sustentabilidade do cultivo das forrageiras seria as deficiências de nutricionais, em especial de macronutrientes, como o nitrogênio e o fósforo que são os dois nutrientes que mais limita o crescimento da forrageira. E diante do subuso da prática da calagem, o cálcio é nutriente limitante diminuindo crescimento das raízes no perfil do solo prejudicando as forrageiras especialmente na ocorrência de veranicos.

Para aliviar os efeitos deste estresse nutricional das forrageiras tem-se a opção de uso do silício um elemento benéfico reconhecidamente importante para diminuir diferentes estresses.

2.3 Considerações gerais sobre o Si na mitigação de deficiência mineral de plantas

Depois do oxigênio (O), o silício é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre (EPSTEIN, 2009), os dois elementos juntos representam cerca de 50 a 70% da composição da crosta da terra (MA; YAMAJI, 2008). No entanto, apesar de abundante, os cultivos intensivos pode diminuir drasticamente a disponibilidade de Si, já que a forma prontamente disponível para as plantas se encontra em baixos teores nos solos e na água (EPSTEIN, 2009).

Nos solos, o Si é encontrado na forma de ácido monossilícico ou ácido ortossilício (OSA, H_4SiO_4), adsorvido com óxidos (Fe, Al e Mn), sílica oriunda da decomposição da matéria orgânica (formas amorfas), ou ainda, como Si estrutural em minerais de silicatados (KORNDÖRFER et al., 2002).

O Si pode comumente ser encontrado nos tecidos vegetais, sendo absorvido pelas plantas na forma de ácido ortossilícico, que pode ser absorvido de forma ativa ou passiva, dependendo de sua concentração nos solos e das espécies de plantas (LIANG et al., 2006; APAOLAZA-HERNANDEZ, 2014). Em relação ao acúmulo de Si na parte aérea, as plantas são classificadas como acumuladora ($>10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), acumuladora intermediária ($5 \text{ a } 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e exclusora ou não-acumuladora ($<5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (MITANI; MA, 2005).

As plantas consideradas acumuladoras, como as *Poaceas*, possuem proteínas transportadoras específicas capazes de absorver ativamente o Si (MITANI; MA, 2005), o que pode potencializar os benefícios desse elemento para este grupo de plantas.

Depois de ser absorvido pelas raízes, o Si é translocado através do xilema para os tecidos onde é depositado na forma de sílica amorfa ($SiO_2 \cdot nH_2O$) na parede celular e nos espaços intercelulares na camada subcuticular externa das células e portanto não sendo redistribuído na planta (MA et al., 2011).

O Si também pode ser absorvido pelas folhas, mas a quantidade é relativamente baixa quando comparada as raízes especialmente em plantas acumuladoras.

O Si não é considerado nutriente mais um elemento benéfico sendo absorvido em grande quantidade especialmente pelas acumuladoras podendo atingir até 10% da massa seca da planta (EPSTEIN, 2009). Alguns autores consideram o Si como elemento quase-essencial ou elemento agronomicamente essencial, pelo seu impacto benéfico no rendimento das plantas (EPSTEIN;BLOOM, 2005).

No entanto, independentemente da sua essencialidade, a pesquisa atual tem consolidado o Si como um elemento multiestresse capaz de aliviar estresses bióticas e abióticas (FENG, 2004). No entanto, existem indicações de que o Si pode promover benefícios em plantas ainda que não estejam sob condição de estresse (GHASEMI-MIANAEI et al., 2011; ZIA et al., 2017), mas isso é pouco estudado.

Ao longo da história da humanidade um dos principais desafios das sociedades ao redor do mundo tem sido a produção de alimentos para satisfazer a demanda de uma população crescente. No entanto, existem diferentes estresse a exemplo dos abióticos que pode diminuir em 70% a produção agrícola em todo o mundo (ACQUAAH, 2012). O estresse nutricional por deficiência nutricional é pouco discutido na literatura, mas, como indicado no item 2.2, é comum em regiões tropicais solos de baixa fertilidade. Os cultivos nestes solos causam o desequilíbrio nutricional prejudicando o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da planta (PAUL; LADE, 2014).

De acordo com Etesami e Jeong (2018), em um futuro próximo os estresses nos cultivos tendem a aumentar, acarretando na elevação dos custos de produção e impactando fortemente a agricultura, a biodiversidade e o meio ambiente. Os autores destacam ainda que a segurança alimentar é uma das preocupações que nunca pode ser ignorada pelas sociedades. Assim, é cada vez mais presente a busca por alternativas de cultivos mais sustentáveis do ponto de vista ecológico e econômico.

Diante deste cenário, os benefícios comprovados do Si para as plantas apontam o uso agrícola desse elemento benéfico como uma potencial estratégia sustentável. No entanto, é necessário entender os mecanismos de ação do Si que permite aliviar estresses nutricionais para que possa permitir aumento da produtividade das culturas.

2.4 Mecanismos de ação do Si nas plantas

Há muito tempo se sugere que o Si tem um papel estrutural e biomecânico nas plantas (RAVEN, 1983). Há registros de quase um século que demonstram o papel do Si na proteção de plantas contra a herbivoria em sistemas agrícolas (MCCOLLOCH; SALMON, 1923). Estudos posteriores demonstraram que o acúmulo de silício na parede celular na forma de sílica amorfa confere a esse elemento o papel na proteção mecânica das plantas, conferindo resistência ao ataque de insetos praga. Na epiderme da célula, o Si se junta à celulose, podendo estar presente nos estômatos, nos tricomas e nos elementos de vasos (MA e YAMAJI, 2006), o que mitiga os estresses causados por fatores bióticos e abióticos.

Apesar do grande número de pesquisas nos últimos 40 anos voltados para o papel do Si na proteção das plantas, alguns autores sugerem que ainda existem poucas evidências concretas para quantificar essa função biomecânica do Si nas plantas (COOKE; DEGRABRIEL; HARTLEY, 2016). Essas informações ainda são muito restritas em alguns cultivos e ainda permanece incerta a relação entre Si, lignina e celulose (SCHOELYNCK; STRUYF, 2015). Por isso, há um interesse crescente na hipótese de que o Si possa substituir componentes estruturais baseados em carbono em plantas (RAVEN, 1983; COOKE; LEISHMAN, 2011).

Assim, existem estudos que indicam que o Si podem estar envolvidos na substituição de parte do carbono de estruturas orgânicas da célula vegetal (COOKE; LEISHMAN, 2012), promovendo ligações cruzadas com ligninas e carboidratos (INANAGA et al., 1995) colaborando com a estruturação da parede celular das folhas, órgão que concentra esse elemento nas gramíneas (NEU et al., 2017). O custo energético para a planta em incorporar Si na cadeia orgânica é relativamente baixo em comparação com o carbono (RAVEN, 1983; SCHALLER et al., 2012; NEU et al., 2017).

Outros estudos demonstram que o Si pode aumentar os teores de clorofila (XIE et al., 2014; CHEN et al., 2016) e ativar enzimas que são importantes no metabolismo vegetal (LIU et al., 2009), entre elas as enzimas do sistema antioxidante. Trabalhos recentes sugerem que o Si atua na melhoria do sistema antioxidante, a partir do aumento do metabolismo de compostos fenólicos e da

ativação de enzimas antioxidantes, diminuindo o estresse oxidativo nas plantas (BRUNINGS et al., 2009; CAO et al., 2015; RIBEIRA-FONSECA et al., 2018; VEGA et al., 2019).

Cooke e Leishman (2016) realizaram estudos com 145 experimentos, predominantemente com espécies agrícolas, avaliando as respostas de plantas estressadas ao suprimento de Si. Os resultados demonstraram que o Si atuou no aumento da massa seca, na assimilação, taxa e biossíntese de clorofila, bem como aliviou os danos oxidativos. Os autores complementam que as variações das respostas das plantas estressadas ao Si é influenciada pela família de plantas e pelo tipo de estresse.

Ribeira-Fonseca et al. (2018), avaliando o efeito do fornecimento de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e do silicato de cálcio (CaSiO_3) nas doses de 250 a 1000 mg kg^{-1} de Si em plantas de azevém cultivado em um Andisol demonstraram que as plantas fornecidas com silicato de sódio exibiram o maior teor de Si. Com isso, ocorreu o aumento dos fenóis totais e das atividades de enzimas antioxidantes (CAT, APX e POD), diminuindo a peroxidação lipídica e aumentou teor de lignina na parte jovem das plantas. Os autores concluíram ainda que a atividade da peroxidase parece estar associada ao aumento da biossíntese de lignina em plantas fornecidas com silicato de sódio.

Em outro trabalho, Vega et al. (2019), obtiveram resultados semelhantes analisando a cinética dependente do tempo de exposição de Al e Si e o impacto do Si na produção de fenóis antioxidantes ou estruturais em cultivares de cevada a curto prazo. Foram avaliadas duas cultivares de cevada a Sebastian (*Hordeum vulgare*), tolerante ao Al; e a Scartett (*Hordeum vulgare*), sensível a Al. Ambas foram expostas a soluções nutricionais: sem Al e com Al (0,2 mM) sem Si ou com Si (2mM) e cultivadas por 48 h e as coletas de raízes e brotos foram realizadas com 2, 4, 8, 12, 24 e 48 h. Os autores demonstraram que a concentração de Si diminuiu nas plantas em todos os tempos de colheita, quando Al e Si foram fornecidos simultaneamente, especialmente na cultivar "Scarlett". No entanto, o fornecimento de Si independentemente da tolerância ao Al da cultivar, diminuiu os danos oxidativos e melhorou atividade de eliminação radical livre, produção de compostos fenólicos e acúmulo de lignina na cevada com exposição ao Al em curto prazo.

Por outro lado, o avanço da pesquisa genômica tem contribuído para o surgimento de novas descobertas sobre o papel do Si a nível molecular. Estudo recente realizado por Wu et al. (2017) identificaram o papel do Si na expressão de genes relacionados à absorção, transporte e assimilação de nitrogênio na cultura do arroz.

Dessa forma, o Si apresenta diferentes mecanismos de ação no metabolismo das plantas dependendo do tipo de estresse. É conhecido que o estresse nutricional por deficiência é comum nos cultivos em regiões tropicais especialmente de macronutrientes. Assim os esforços da pesquisa para maior compreensão do papel benéfico do Si nestes estresses são importantes para garantir maior sustentabilidade nos cultivos, embora as pesquisas são restritas.

2.5 Estudos com uso do silício na mitigação dos efeitos da deficiência de macronutrientes em plantas

É conhecido que o Si é um elemento benéfico com potencial para aliviar os danos causados por diversas desordens nutricionais, que podem prejudicar o crescimento e produtividade das plantas (HERNANDES-APAOLAZA, 2014).

Sabe-se que a absorção desse elemento benéfico aumenta quando a planta está sob estresse. Com isso, os processos de absorção, transporte e redistribuição são favorecidos, a fim de aumentar a tolerância vegetal ao estresse (MA, 2004). Por outro lado, existem indicações de que alguns benefícios do Si podem ser observados mesmo quando a cultura não está sob condição de estresse (GHASEMI-MIANAEI et al., 2011; ZIA et al., 2017).

Apesar do interesse crescente em estudos sobre o papel do Si no alívio de estresses nutricionais, os estudos ainda são pontuais em algumas culturas e nutrientes.

Em estudo com a cultura do arroz, Deus et al. (2019), identificaram que houve benefício do Si no alívio da deficiência nutricional moderada de N, com reflexo no aumento da biomassa seca e no rendimento do grão de arroz. Segundo os autores o silício melhorou o estado nutricional da cultura equilibrando a absorção de nutrientes, transporte e distribuição.

Na mesma cultura, Wu et al., (2017), estudaram os mecanismos moleculares envolvidos nas interações entre N e Si, por meio da análise de respostas transcricionais de um painel de genes envolvidos no transporte e assimilação de Si e N, através da técnica de Reação em Cadeia de Polimerase em Tempo Real (PCR). Os autores observaram que em baixas doses de N, o tratamento com Si tendeu a aumentar os níveis de transcrição de certos genes envolvidos na absorção e assimilação de N. Esses resultados evidenciam que o Si pode mitigar a deficiência de N por meio da melhoria na assimilação desse macronutriente, refletindo no aumento da massa seca das plantas deficientes em N acrescidas de Si.

Chen et al. (2016) constataram efeitos benéficos do Si na mitigação da deficiência de potássio (K) na cultura do sorgo. Os autores observaram que o Si diminuiu os sintomas visuais da deficiência desse nutriente. Segundo os autores, isso ocorreu devido a um conjunto de mecanismos fisiológicos e bioquímicos mediados pelo Si, seja eles: a) a influência do Si na redução do acúmulo de putrescina, um composto nitrogenado que em alta concentração é tóxico aos vegetais; b) maior eficiência do fotossistema II, redução de espécies reativas de oxigênio e aumento dos teores de clorofila em relação ao controle; c) melhorias no desenvolvimento das plantas e nas taxas de atividade fotossintética; d) incremento nos teores de potássio no xilema, o que pode estar relacionado com o aumento da condutividade hídrica nas plantas, melhorando a absorção de água e seu transporte, comprovando o potencial mitigatório do Si; e) aperfeiçoamento no transporte hídrico da raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas, responsáveis pelo transporte hídrico nas plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) que é incitada pelo Si.

Miao et al. (2010), também em estudo sobre o papel do Si na deficiência de K, observaram que a adição de Si em plantas de soja resultou em incremento do comprimento de raízes, da concentração de K nas folhas, caules e raízes. Além disso, o Si provocou a diminuição de espécies reativas de oxigênio devido ao aumento na atividade de antioxidantes como a superóxido dismutase, a catalase e a peroxidase.

As informações sobre a relação do Si e Ca nas plantas são muito restritas. Por outro lado, há trabalhos indicando que esse elemento benéfico forma complexos

com polímeros estruturais das células, tais como pectinas e calose (BOYLSTON et al., 1990) e também ligações cruzadas com ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos ou anéis aromáticos (INANAGA et al., 1995). Este fato pode colaborar com melhor formação da parede celular, pois a função do cálcio é formar os pectatos de cálcio da parede celular que são responsáveis pela estruturação das células (PRADO, 2008). Nesse caso, é possível que em plantas com deficiência de Ca o Si auxilie na estrutura, ocupando locais de ligação semelhante aos ocupados pelo Ca na parede celular, potencializando o uso do cálcio pelas plantas, quando tratadas com baixas doses desse nutriente estrutural.

Existem registros de trabalhos associando o Si à mitigação da deficiência de magnésio. Hosseini et al. (2019), constataram que em plantas de milho cultivadas sob deficiência de Mg a aplicação de Si pode regular os metabólitos primários e aumentar os níveis de fito-hormônios (citocinina), aliviando a deficiência desse nutriente. Existem ainda indicações na literatura que associam o Si a elevação da biossíntese de clorofila e das taxas fotossintéticas (ZUCCARINI, 2008; CHEN et al., 2016), o que também pode estar associado a mitigação da deficiência desse macronutriente, pois pode aumentar a eficiência de uso desse macronutriente.

O enxofre faz parte de compostos orgânicos importantes como cistina, cisteína e metionina e todas as proteínas e ainda tem função enzimática e estrutural (PRADO, 2008). Portanto, a deficiência desse nutriente pode causar diversos danos às plantas que pode ser amenizada pela aplicação de Si. Maillard et al. (2018), constataram que na cultura da cevada submetida a deficiência de S, o Si influencia no metabolismo das plantas retardando a senescência das folhas e mantendo o maior teor de clorofila. Já nas raízes das plantas deficientes em S, o Si aumenta a absorção de sulfato e nitrato. O aumento da absorção do NO_3^- , incrementa o teor de glutamina e de prolina no tecido vegetal. Além disso, o Si promoveu aumento de sacarose nas raízes, o que é importante para o crescimento deste órgão sob estresse.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolveram-se dois experimentos simultaneamente em condições de casa de vegetação, localizada na Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, entre os meses de janeiro a junho de 2019. Avaliaram-se duas espécies forrageiras, a *Urochloa brizantha* cv Marandu (experimento 1) e *Megathyrus maximum* cv Massai (experimento 2).

Inicialmente, realizou-se a semeadura em bandejas de polipropileno contendo vermiculita, sendo as plantas mantidas nas bandejas por 20 dias, recebendo apenas água potável. Depois deste período, foram selecionadas, lavadas as raízes e transplantadas para vasos plásticos de 1,7 dm³, preenchidos com areia de granulometria média previamente lavada. Após o transplante foi fornecido, via radicular, 20 ml por vaso de solução nutritiva completa, conforme indicada por Hoagland e Arnon (1950), com força iônica de 25 %, por um período de quatro dias. Em seguida, ajustada para 50% da força iônica, e iniciou o fornecimento das soluções conforme os tratamentos.

As soluções nutritivas dos tratamentos foram preparadas com água destilada e deionizada. O valor pH foi mantido a $5,5 \pm 0,2$, sendo monitorado diariamente com medidor de pH digital (ICEL PH-1500 $\pm 0,1$) e, quando necessário, ajustado com solução de HCl ou NaOH, ambas a 1,0 M L⁻¹.

O delineamento foi inteiramente casualizado, com oito tratamentos e seis repetições em fatorial 4 x 2. Os tratamentos foram constituídos de solução nutritiva completa (controle) e solução deficiente de N, P, Ca, na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). A fonte de Si foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (94,2 g L⁻¹ de Si, 60 g L⁻¹ de Si e pH 12,6), na concentração de 2 mmol L⁻¹, fornecido via solução nutritiva.

Para os tratamentos com deficiência de N simulou-se uma deficiência equivalente a 50% da produção máxima de massa seca (LAVRES JR; MONTEIRO, 2002), sendo fornecido o N na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃) na concentração 3 mmol L⁻¹ durante três dias, depois 4,5 mmol L⁻¹ pelo mesmo período e 6mmol L⁻¹ até o final do experimento.

Nos tratamentos com deficiência de P, iniciou-se com a omissão desse nutriente da solução nutritiva e, após 30 dias, realizou-se o fornecimento de 0,05 mmol L⁻¹, ou 5% da concentração deste elemento indicada na solução de Hoagland e Arnon (1950). Já para os tratamentos com solução deficiente de Ca, foi realizada a omissão do nutriente até o final do experimento.

Aos 45 dias após o transplante das forrageiras foi realizado corte de uniformização a 5 cm do solo. Depois de 45 dias, com a expressão dos sinais clássicos de deficiência dos nutrientes, foram avaliadas o extravasamento de eletrólitos, o índice de cor verde e o rendimento quântico da fluorescência. Essas avaliações foram realizadas na segunda folha totalmente expandida para tratamentos deficiente de N e P e na primeira folha totalmente expandida para tratamentos deficiente de Ca. Nas plantas controle foram coletados dados nestas duas folhas.

Para a determinação do índice de cor verde utilizou-se o clorofilometro (Opti-sciences® – CCM-200) realizando três leituras por planta. A leitura do rendimento quântico da fluorescência foi realizada no período da manhã (7:30 a 8:30 h), utilizado o aparelho fluorômetro (Opti-sciences® – Os30P+). O extravasamento de eletrólitos foi realizado conforme proposto por Dionisio-Sese e Tobita (1998).

Realizou-se a quantificação dos compostos fenólicos totais na porção média da segunda folha totalmente expandida pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Singleton e Rossi (1965).

Aos 55 dias depois do corte de uniformização, realizou-se avaliação do comprimento médio das plantas, número de perfilhos e corte das plantas, separando em parte aérea e raiz. O material vegetal foi lavado em água corrente, seguido com solução detergente (0,1 %), solução de ácido clorídrico (0,3 %) e depois em água deionizada por duas vezes. Posteriormente, o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65±5°C), até atingir massa constante. Foi avaliada ainda a massa seca da parte aérea por vaso.

Na parte aérea e sistema radicular, foi determinado o teor de Si pelo método descrito por Korndörfer et al. (2004) e os teores totais de N, P, e Ca, conforme indicação de Bataglia et al. (1983). A partir dos dados dos teores dos nutrientes e do Si, e da massa seca da parte aérea foram calculados o acúmulo de cada elemento.

Em seguida, calculou-se a eficiência de uso do N, P e Ca, a partir da equação: $(\text{massa seca da parte \acute{a}rea})^2 / \text{ac\acute{u}mulo do nutriente na parte \acute{a}rea}$, conforme indicado por Siddiqi e Glass (1981).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). As médias dos tratamentos do controle e dos deficientes do nutriente e, os tratamentos com e sem Si foi submetida ao teste Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa AgroEstat® (BARBOSA; MALDONADO JUNIOR 2015).

4 RESULTADOS

4.1 Experimento 1 – *Urochloa brizantha* cv. Marandu

O acúmulo de Si na parte aérea diminuiu com as deficiências de N, P e Ca comparadas com o controle. Mas a adição de Si nas forrageiras do controle e das deficiências aumentou o acúmulo deste elemento na parte aérea da planta, comparada com a ausência de Si (Figura 1a).

O acúmulo de Si na raiz das plantas diminuiu com deficiência de N, P, independente do Si, e também na omissão Ca na ausência de Si, em comparação com o controle. O acréscimo de Si no controle e com omissão de P e Ca aumentou o acúmulo desse elemento na raiz da forrageira, comparadas à ausência de Si (Figura 1b). O acúmulo de Si na omissão de N não diferiu em relação à presença ou ausência de Si.

O extravasamento de eletrólitos celular aumentou nas plantas com a solução deficiente de P e Ca, independente do Si, e na deficiência de N apenas na ausência de Si, em relação à solução nutritiva do controle. O fornecimento de Si em todos os tratamentos diminuiu o extravasamento de eletrólitos em comparação aos tratamentos que não receberam Si (Figura 2a).

Os teores de compostos fenólicos nas plantas cultivadas em solução completa e nas soluções deficiente de N e P foram semelhantes, mas aumentou teor destes compostos na solução deficiente de Ca, independente do Si (Figura 2b). A concentração de fenóis aumentou na parte aérea da forrageira em consequência da adição de Si nas soluções nutritiva do controle e deficiente dos nutrientes.

O índice de cor verde diminuiu na forrageira cultivada com solução deficiente de N, P e Ca, comparadas com o controle, independente do Si. Porém esse índice aumentou devido ao acréscimo de Si nas plantas do controle e deficientes em N, P e Ca (Figura 3a).

O rendimento quântico da fluorescência foliar diminuiu na forrageira cultivada com solução nutritiva deficiente dos nutrientes estudados em relação à forrageira cultivada com solução nutritiva do controle, independente do Si. Mas com a adição de Si na solução nutritiva aumentou o rendimento quântico, comparadas à ausência de Si apenas nas soluções com deficiência dos nutrientes (Figura 3b).

As eficiências de utilização de N, P e Ca diminuíram na forrageira cultivada com deficiência desses nutrientes, comparadas à solução nutritiva do controle, independente presença ou ausência de Si. Porém essa eficiência aumentou nas plantas deficientes desses nutrientes em consequência da adição de Si, quando comparadas as plantas que não receberam Si (Figuras 4a, 4b e 4c).

O comprimento da forrageira diminuiu na solução nutritiva deficiente de N, P e Ca em relação à solução nutritiva do controle, independente do Si. O fornecimento do Si em relação a sua ausência incrementou o comprimento da forrageira cultivada em todas as soluções nutritivas estudadas (Figura 5a).

O número de perfilhos da forrageira cultivada na solução deficiente de N e P diminuiu em relação à solução nutritiva do controle, independente do Si. No entanto, na deficiência de Ca o número de perfilhos aumentou em relação às plantas cultivadas com solução nutritiva do controle. A adição de Si no controle e apenas nas soluções deficientes de N e P aumentou o número de perfilhos em comparação à ausência de Si (Figura 5b).

A produção de massa seca da parte aérea foi prejudicada na forrageira cultivada com solução nutritiva deficiente de N, P e Ca, comparadas as plantas cultivadas com solução nutritiva completa (controle), independente da presença ou ausência de Si. Por outro lado, a adição de Si no controle e deficiências de N, P e Ca aumentou a produção de massa seca da parte aérea em relação aos tratamentos ausentes de Si (Figura 5c).

4.2 Experimento 2 – *Megathyrus maximum* cv. Massai

O acúmulo de Si na parte aérea diminuiu nas deficiências de N, P e Ca comparadas com o controle, na presença do Si. A adição de Si aumentou o acúmulo desse elemento na parte aérea da forrageira em relação com os tratamentos que não receberam Si (Figura 1c).

O acúmulo de Si na raiz diminuiu nas forrageiras cultivadas em solução nutritiva deficiente de N e P e aumentou na omissão de Ca, comparadas com o controle, independente do Si. A adição de Si no controle e com deficiência de N, P e Ca aumentou o acúmulo desse elemento na raiz da forrageira, em relação aos tratamentos que não receberam Si (Figura 1d).

O extravasamento de eletrólitos celular aumentou na forrageira com a deficiência de N, P e Ca, em relação à solução nutritiva do controle, independente da presença ou ausência do Si. No entanto, a adição de Si diminuiu o extravasamento de eletrólitos em todos os tratamentos independente se cultivadas com solução nutritiva completa ou com deficiência de N, P e Ca em comparação as que não receberam Si (Figura 2c).

Os teores de compostos fenólicos diminuíram com a deficiência de Ca, independente do Si, e na deficiência de N apenas na presença de Si, comparadas com o controle. Na deficiência de P, a concentração de fenóis na forrageira aumentou em relação à solução nutritiva do controle apenas na ausência de Si. O acréscimo de Si aumentou os teores de fenóis na forrageira independente se cultivada em solução do controle ou sob deficiência dos nutrientes estudados, comparadas as que não receberam Si (Figura 2d).

O índice de cor verde diminuiu na forrageira cultivada com solução nutritiva deficiente de N, P e Ca, comparada com o controle, independente do Si. Entretanto, a adição de Si aumentou o índice de cor verde na forrageira cultivada com solução nutritiva do controle e deficiente de N, P e Ca em relação as que não receberam Si (Figura 3c).

O rendimento quântico da fluorescência foliar diminuiu na forrageira quando deficiente de P e Ca, independente do Si, e de N apenas na ausência de Si. Observou-se que a adição de Si aumentou a eficiência quântica da forrageira

cultivada sob deficiência de N, P e Ca, em relação à ausência de Si, mas não alterou a fluorescência da forrageira cultivada em solução nutritiva do controle (Figura 3d).

A eficiência de utilização de N diminuiu na forrageira deficiente nesse nutriente, em relação à solução nutritiva do controle, independente do Si. Mas essa eficiência aumentou na forrageira deficiente de N devido à adição de Si, comparada à ausência de Si (Figura 4d).

A eficiência de utilização de P na forrageira diminuiu com a indução de deficiência de P, comparada com o controle, tanto na presença ou na ausência de Si na solução nutritiva. Contudo, a eficiência de utilização de P na forrageira sob deficiência desse nutriente aumentou devido à adição de Si (Figura 4e).

A eficiência de utilização de Ca aumentou na forrageira cultivada com omissão de Ca, comparadas à solução nutritiva do controle, independente do Si. A adição de Si aumentou a eficiência de utilização na forrageira deficiente desse nutriente comparada a planta que não recebeu Si (Figura 4f).

O comprimento da forrageira diminuiu em todos os tratamentos com deficiência de N, P e Ca em comparação aos tratamentos com solução nutritiva controle, independente do Si. No entanto, a adição do Si não promoveu efeito sobre o comprimento da forrageira independente das soluções nutritivas avaliadas (Figura 5c).

O número de perfilhos diminuiu na forrageira quando deficiente de N, P e Ca, em comparação com o controle, independente do fornecimento de Si. Porém, o acréscimo de Si na solução nutritiva aumentou o número de perfilhos apenas na forrageira sob deficiência de N e P, comparadas com as que não receberam Si (Figura 5d).

A massa seca da parte aérea da forrageira diminuiu quando cultivada sob deficiência de N, P e Ca comparadas com o controle, independente da presença ou ausência de Si. No entanto, a massa seca da parte aérea das forrageiras aumentaram com adição de Si na solução nutritiva do controle e sob deficiência dos nutrientes (Figura 5e).

5 DISCUSSÃO

5.1 Solução nutritiva completa (controle)

Os efeitos benéficos do Si em plantas cultivadas sem desordens nutricionais específicas é pouco evidenciado, havendo mais relatos indicando seu benefício em cultivos sob estresses biótico ou abiótico (CHEN et al., 2016). No nosso estudo, ficou visível o efeito benéfico do Si na produção de massa seca mesmo nas plantas cultivadas sem a deficiência nutricional. Este efeito do Si ocorreu devido aos seus efeitos em melhorias da capacidade antioxidante, evidenciada pela maior produção de compostos fenólicos, diminuindo o índice de extravasamento de eletrólitos, resultando em incremento do índice de cor verde e da fluorescência, por fim, refletindo no aumento da eficiência de utilização de N, P e Ca nas duas forrageiras.

Soma-se a isto que é possível que esse efeito do Si no aumento da eficiência de uso de nutrientes se deve também ao fato que este elemento, ao compor estruturas da parede celular a custo energético relativamente baixo, poderia diminuir a demanda de outros compostos, como a lignina que demanda mais energia para sua síntese (NEU et al. 2017), mas é necessário mais pesquisas para elucidar esses benefícios do Si.

5.2 Deficiência de nitrogênio

As forrageiras cultivadas na solução nutritiva deficiente de N tiveram seu crescimento prejudicado. Por outro lado, o fornecimento de Si nessas plantas promoveu melhorias fisiológicas importantes, demonstradas pelo aumento na concentração de compostos fenólicos, índice de cor verde e rendimento quântico, em comparação às que não receberam Si.

Assim, ficaram evidenciados os benefícios do Si na fisiologia das plantas deficientes de N, resultados semelhantes foram relatados por outros autores, que verificaram o aumento da produção de fenóis e, com isso, melhorias no sistema antioxidante de forrageiras mediado pelo Si, visto na cevada (VEJA et al., 2019) e no azevém (RIBEIRA-FONSECA et al., 2018). Já Chen et al. (2016), revelaram

aumento dos teores de clorofila, da eficiência do fotossistema II e da atividade antioxidante mediados pelo Si.

As forrageiras sob deficiência de N que receberam Si ao apresentarem melhor condição fisiológica aumentaram as eficiências de utilização de N e de Ca, com reflexos benéficos no crescimento da planta e na produção de massa seca da parte aérea.

Portanto, ficaram evidentes de forma inédita os benefícios do Si na mitigação dos efeitos da deficiência de N nas forrageiras estudadas, da mesma forma que ocorreu em outras gramíneas como a cultura do arroz (DEUS et al., 2019).

5.3 Deficiência de fósforo

As duas espécies cultivadas em solução nutritiva deficiente de P apresentaram baixo crescimento devido aos prejuízos fisiológicos e nutricionais. Porém, com a adição de Si os danos da deficiência de P foram aliviados, fato ainda não descrito na literatura para essas espécies forrageiras. Isso se deve às melhorias ao sistema antioxidante das forrageiras, mediada pelo Si por meio da sua influência sobre o metabolismo dos compostos fenólicos nessas plantas, com reflexo na redução do estresse oxidativo e aumento da eficiência de uso deste nutriente e o crescimento das forrageiras.

5.4 Deficiência de Cálcio

As omissões de Ca prejudicaram o crescimento das forrageiras em relação ao tratamento controle, dado o aumento do extravasamento de eletrólitos, que diminuiu o índice de cor verde e o rendimento quântico da fluorescência, mas com a inclusão do Si foi constatada de forma inédita que houve alívio dos efeitos desta deficiência.

Este efeito benéfico do Si nas plantas ficou evidenciado pelo acúmulo de Si na parte aérea de plantas deficientes de Ca, que refletiu no aumento da produção de compostos fenólicos, fato também relatado no azevém (*Lolium multiflorum*) (RIBEIRA-FONSECA et al., 2018) e na cevada (*Hordeum vulgare*) (VEGA et al., 2019). A ação antioxidante do Si contribuiu para o incremento do índice de cor verde

e para o rendimento quântico da fluorescência foliar, favorecendo o aumento da eficiência de utilização de Ca e possibilitando maior produção de massa seca da parte aérea.

As informações inéditas obtidas sobre os benefícios do Si no alívio da deficiência nutricional nas forrageiras estudadas indicam a importância deste elemento benéfico para a sustentabilidade dos cultivos destas espécies uma vez que são cultivadas em solos tropicais de baixa fertilidade. É importante ampliar os estudos em outras espécies de forrageiras e também com os demais nutrientes para ampliar o conhecimento sobre os benefícios do Si na fisiologia e na nutrição de plantas forrageiras.

6 CONCLUSÃO

O Si mitiga os efeitos das deficiências de N, P e Ca, melhora a ação antioxidante, a eficiência da fotossíntese, o uso destes nutrientes e a produção de massa seca nas forrageiras. Nas forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Megathyrus maximum* cv. Massai o acréscimo de Si tem efeito benéfico mesmo em plantas sem estresse nutricional.

7 REFERÊNCIAS

- ACQUAAH, G. **Principles of Plant Genetics and Breeding**. Maryland: Bowie State University, 2012, p. 281.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO-JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica & AgroEstat: sistema para análise estatística de ensaios agronômicos**, Multipress Ltda: Jaboticabal, 2015.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. Campinas, 1983. (Boletim técnico, 78).
- BOYLSTON, E. K.; HEBERT, J. J.; HENSARLING, T. P.; BRADOW, J. M.; THIBODEAUX, D. P. Role of silicon in developing cotton fibers. **J. plant nutr.**, v. 13, n. 1, p. 131-148, 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904169009364063>>.
- BRUNINGS, A.; DATNOFF, L.; MA, J.; MITANI, N.; NAGAMURA, Y.; RATHINASABAPATHI, B.; KIRST, M. Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. **Ann. Appl. Biol.**, v. 155, ed. 2, p. 161-170, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00347.x>>.
- CAO, B.; MA, Q.; ZHAO, Q.; WANG, L.; XU, K. Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. **Sci. Hortic.**, v. 194, 53-62, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.037>>.
- CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Sci. Rep.** v. 6, n. 22882, p. 1-14, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep22882>>.
- COOKE, J.; DEGABRIEL, J. L.; HARTLEY, S. E. A ecologia funcional do silício vegetal: geociência aos genes. **Funct. Ecol.**, v. 30, n. 8, p. 1270-1276, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1365-2435.12711>>.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Concentração de silício e longevidade das folhas: o silício é um participante no espectro de massa seca das folhas ?. **Funct. Ecol.**, v. 25, ed. 6, p. 1181-1188, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01880.x>>.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Tradeoffs between foliar silicon and carbon-based defences: evidence from vegetation communities of contrasting soil types. **Oikos**, v. 121, ed. 12, p. 2052-2060, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2012.20057.x>>.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Funct. Ecol.** v. 30, ed. 8, p. 1340-1357, 2016. Disponível em:<<https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>>.

CORRÊA, L. DE A.; SANTOS, P. M. **Manejo e utilização de plantas forrageiras dos gêneros *Panicum*, *Brachiaria* e *Cynodon***. São Carlos: Embrapa: CPPSE, 2003, 36 p. (Embrapa-CPPSE, Documentos, 34).

DE MELO, S. P.; MONTEIRO, F. A.; DE BONA, F. D. Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. **Plant and soil**. v. 336, n. 1-2, p. 241-249, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0472-5>>.

DEUS, A. C. F.; PRADO, DE M. R.; ALVAREZ, R. D. C. F.; DE OLIVEIRA, R. L. L.; FELISBERTO, G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5>>.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa, 2014, 36 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 402).

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Sci.** v. 135, ed. 1, p. 1-9, 1998. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)>.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Ann. Appl. Biol.**, v.155, n. 2, p.155-160, 2009. Disponível em:< <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>>.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Massachusetts: Sinauer, 2005.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 147, p. 881-896, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>>.

FAO. Food and Agriculture Organization. **The state of food insecurity in the world: economic crises – impacts and lessons learned**. Rome: FAO, 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/012/i0876e/i0876e00.htm>>. Acesso em: 11 dez. 2019.

FENG, W.; BRASH, J.; ZHU, S. Atom-transfer radical grafting polymerization of 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine from silicon wafer surfaces. **J. Polym. Sci. Um Polym. Chem.**, v. 42, n. 12, p. 2931-2942, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pola.20095>>.

GHASEMI-MIANAEI, A.; MOBASSER, H. R.; MADANI, H.; DASTAN, S. Silicon and potassium application facts on lodging related characteristics and quantity yield in rice (*Oryza sativa* L.) Tarom Hashemi variety. **J. Find. New Agr.**, v. 5, n. 4, p. 423-435, 2011.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, 240, 447-458, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>>.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley: California Agricultural Experiment Station, 1950.

HOSSEINI, S. A.; NASERI RAD, S.; ALI, N.; YVIN, J. C. The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in Mg-deficient conditions. **Int. J. Mol. Sci.** v. 20 n. 969, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijms20040969>>.

INANAGA, S.; OKASAKA, A.; TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **J. Soil Sci. Plant Nutr.** v. 41, n. 1, p. 111-117, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00380768.1995.10419564>>.

KARAM, D.; SILVA, J. A.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, M. F. DE.; MOURÃO, S. A. **Manejo das forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum* consorciadas com o milho em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa: CNPMS, 2009, 7 p. (Embrapa-CNPMS. Circular técnica, 130).

- KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004, 34p. (UFU-ICIAG. Boletim técnico, 2).
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **Stab**, v.21, p. 6-9, 2002.
- LAPIG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. **Atlas das Pastagens do Brasil**. Goiânia: UFG: IESA, 2019. Disponível em: <<https://www.lapig.iesa.ufg.br/lapig/index.php/produtos/atlas-digital-das-pastagens-brasileiras>>. Acesso em: 11 de dez. de 2019.
- LAVRES JR, J.; MONTEIRO, F. A. Combinações de doses de nitrogênio e potássio para a produção e nutrição do capim-mombaça. **B. Indústr anim.**, Nova Odessa, v. 59, n. 2, p. 101-114, 2002.
- LIANG, Y.; HUA, H.; ZHU, Y.; CHENG, C.; ROMHELD, V. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. **New Phytol.** v.172, n. 1, p. 63-72, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01797.x>>.
- LIU, J. J.; LIN, S. H.; XU, P. L.; WANG, X. J.; BAI, J. G. Effects of exogenous silicon on the activities of antioxidant enzymes and lipid peroxidation in chilling-stressed cucumber leaves. **Agr. Sci, China**, v. 8, n. 9, p. 1075-1086, 2009. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(08\)60315-6](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60315-6)>.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Mol. Life Sci.** v.65, 3049-3057, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>>.
- MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITANI-UENO, N. Transporte de silício das raízes para as panículas nas plantas. **Proc. Jpn. Acad. Ser. B. Phys. Biol. Sci.** v. 87, n. 7, p. 377–385, 2011. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.2183%2Fpjab.87.377>>.
- MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F.; YVIN, J. C.; HOSSEINI, S. A. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf enescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environ. Exp. Bot.** v. 155, p. 394-410, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.07.026>>.

MCCOLLOCH, J. W.; SALMON, S. C. The resistance of wheat to the Hessian fly-a progress report. **J. Econ. Entomol.** v. 16, ed. 8, p. 293-298, 1923. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jee/16.3.293>>.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Ann. Bot.**, Exeter, v. 105, n. 6, p. 967-973, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcq063>>.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **J. Exp. Bot.**, v. 56, ed. 414, p. 1255-1261, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>>.

MONTEIRO, F. A.; RAMOS, A. K. B.; DE CARVALHO, D. D.; DE ABREU, J. B. R.; DAIUB, J. A. S.; DA SILVA, J. E. P.; NATALE, W. Cultivo de *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu em solução nutritiva com omissões de macronutrientes. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 52, p. 135-141, 1995.

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.). **Sci. Rep.** v. 7, n. 40829, p. 1-8, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep40829>>.

PAUL, D.; LADE, H. Plant-growth-promoting rhizobacteria to improve crop growth in saline soils: a review. **Agron. Sustain. Dev.**, v. 34 n. 4, p.737-752, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1007/s13593-014-0233-6>>.

PRADO, R. de M. **Manual de nutrição de plantas forrageiras**. Jaboticabal: Unesp-Funep, 2008.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, v. 58, ed. 2, p. 179-207, 1983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>>.

RIBEIRA-FONSECA, A.; RUMPEL, C.; MORA, M. D.; NIKOLIC, M.; CARTES, P. Sodium silicate and calcium silicate differentially affect silicon and aluminium uptake, antioxidant performance and phenolics metabolism of ryegrass in an acid Andisol. **Crop. Pasture Sci.**, v. 68, n. 2, p. 205-215, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/CP17202>>.

- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa: CNPM, 2010, 26 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).
- SCHALLER, J. BRACKHAGE, C.; GESSNER, M. O.; BAUKER, E.; GERTDUDEL, E. Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biol.**, v. 14, p. 392-396, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537.x>>.
- SCHOELYNCK, J.; STRUYF, E. Silicon in aquatic vegetation. **Funct. Ecol.**, v. 30, ed. 8, p. 1323-1330, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1365-2435.12614>>.
- SEIFFERT, N. F. **Gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria***. Rio de Janeiro: Embrapa: CNPGC, 1980, 88 p. (Embrapa-CNPGC. Circular técnica, 1).
- SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **J. Plant Nutr.**, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904168109362919>>.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. J. R. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **Am. J. Enol. Viticult.**, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.
- VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. DA C.; MOREIRA, P.; JANK, L.; SALES, M. F. L. **Capim Massai (*Panicum maxim* Jacq.): Nova fronteira para diversificação das pastagens no Acre**. Rio Branco: Embrapa: CPAFAC, 2007, 16 p. (Embrapa-CPAFAC. Circular técnica, 41).
- VEGA, I.; NIKOLIC, M.; PONTIGO, S.; GODOY, K.; MORA, M. DE LA L.; CARTES, P. Silicon improves the production of high antioxidant or structural phenolic compounds in barley cultivars under aluminum stress. **Agronomy**. v. 9, p. 1-15, 2019.
- WU, X.; YU, Y.; BAERSON, S. R.; SONG, Y.; LIANG, G.; DING, C.; NIU, J.; PAN, Z.; ZENG, R. Interactions between nitrogen and silicon in rice and their effects on resistance toward the brown planthopper *nilaparvata lugens*. **Front. Plant Sci.**, v. 8: 1-11, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00028>>.

XIE, Z.; SONG, F.; XU, H.; SHAO, H.; SONG, R. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **Sci. World J.**, v. 2014, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2014/718716>>.

ZIA, Z.; BAKHAT, H. F.; SAQIB, Z. A.; SHAH, G. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; HAMMAD, H. M.; NASEEM, W.; SHAHID, M. Effect of water management and silicon on germination, growth, phosphorus and arsenic uptake in rice. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 144, p. 11-18, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.004>>.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biol. Plantarum**, v. 52, n.1, p. 157-160, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10535-008-0034-3>>.

8 IMPLICAÇÕES

O estudo evidencia a importância do fornecimento de silício para as duas forrageiras estudadas devido a melhoria em aspectos fisiológicos e nutricionais. Essa importância foi notada em plantas sob suficiência ou deficiência nutricional (N, P e Ca). Isso implica que o fornecimento de Si pode ser importante em vasta área do Brasil seja em forrageiras cultivadas com baixa ou alta fertilidade do solo. Espera-se que esse fornecimento de Si seja mais promissor em áreas irrigadas que empregam a fertirrigação para que possa aplicar o elemento benéfico em solução de forma mais semelhante ao empregado no presente estudo. Existe forte potencial de uso do Si nestas áreas com grande chances de sucesso, mas é importante que novos estudos sejam realizados em condição de campo para definir a melhor concentração do elemento na solução e a frequência de aplicações. Diante do emprego do Si nas pastagens será possível aumentar a produtividade das forrageiras com maior sustentabilidade.

FIGURAS

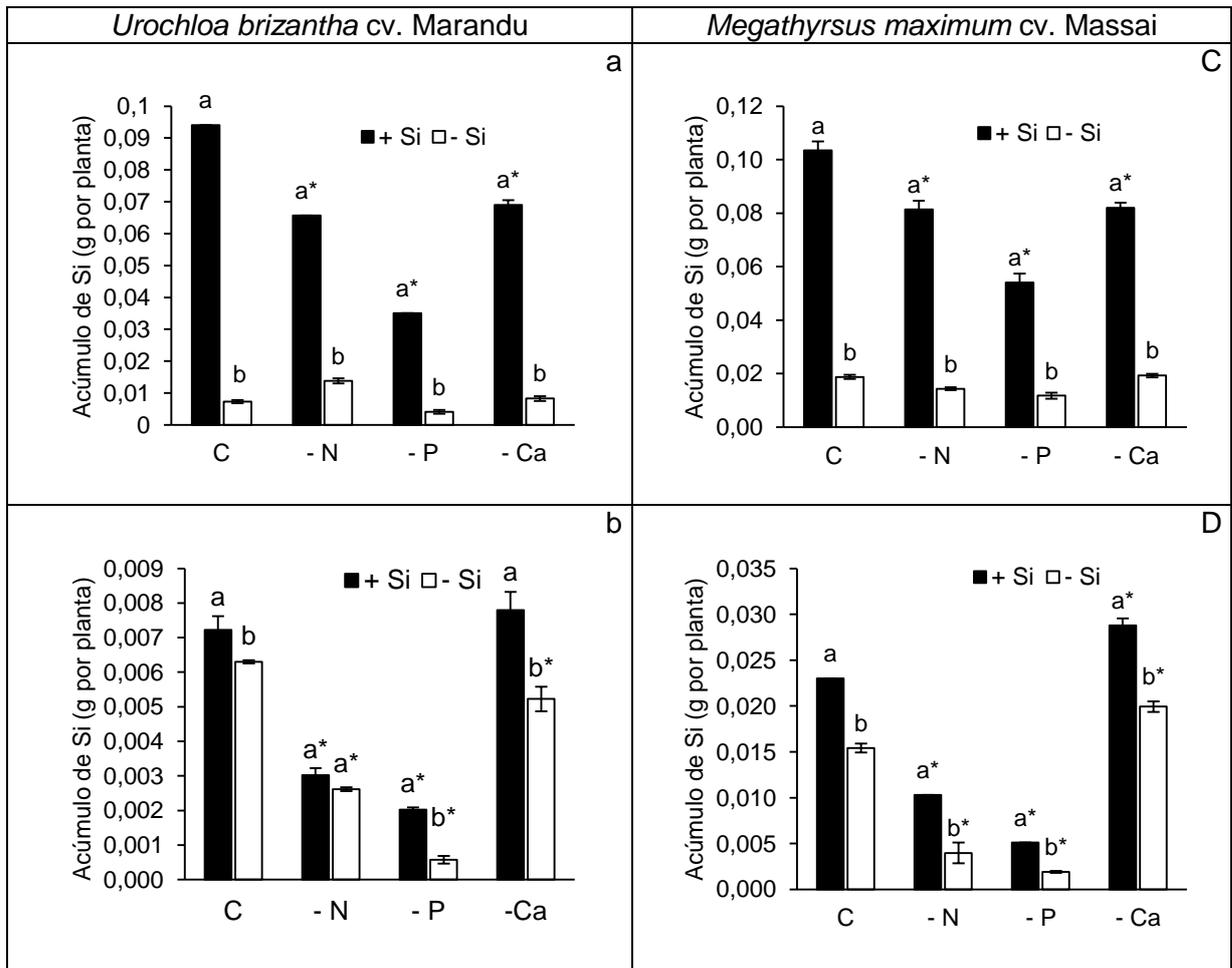


Figura 1. Acúmulo de silício na parte aérea (a) e raiz (b) de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e na parte aérea (c) e na raiz (d) de *Megathyrsus maximum* cv. Massai, ambas as forrageiras cultivadas em solução nutritiva completa (C) e com a omissão de nitrogênio (-N), fósforo (-P) e cálcio (-Ca), na presença de silício (+Si) e na ausência (-Si). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na condição de presença e ausência de Si. (*) Indica diferença significativa entre os tratamentos com omissões em relação aos tratamentos com solução nutritiva completa, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

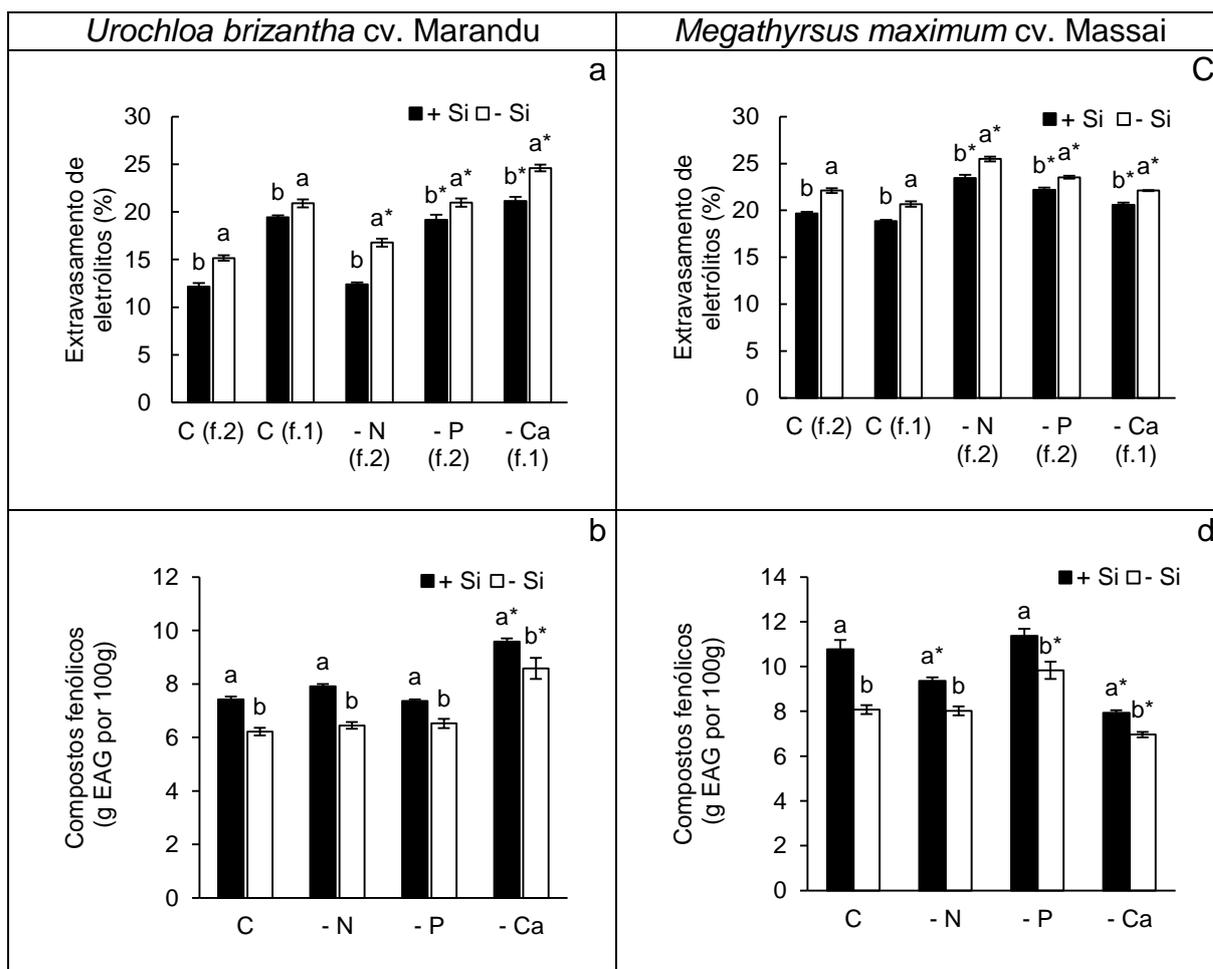


Figura 2. Extravasamento de eletrólitos (a) e compostos fenólicos (b) de plantas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e extravasamento de eletrólitos (c) e compostos fenólicos (d) de *Megathyrsus maximum* cv. Massai, ambas as forrageiras cultivadas em solução nutritiva completa (C) e com a omissão de nitrogênio (- N), fósforo (- P) e cálcio (- Ca), na presença (+Si) e na ausência (-Si). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na condição de presença e ausência de Si. (*) Indica diferença significativa entre os tratamentos com omissões em relação aos tratamentos com solução nutritiva completa (C). Para o extravasamento de eletrólitos os tratamentos solução nutritiva completa C (f.2) são comparados com os tratamentos - N (f.2), - P (f.2), se referem a valores obtidos pela avaliação da segunda folha completamente expandida. Os tratamentos solução nutritiva completa C (f.1) são comparados com os valores de - Ca (f.1) e se referem à primeira folha. A comparação das médias foi pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

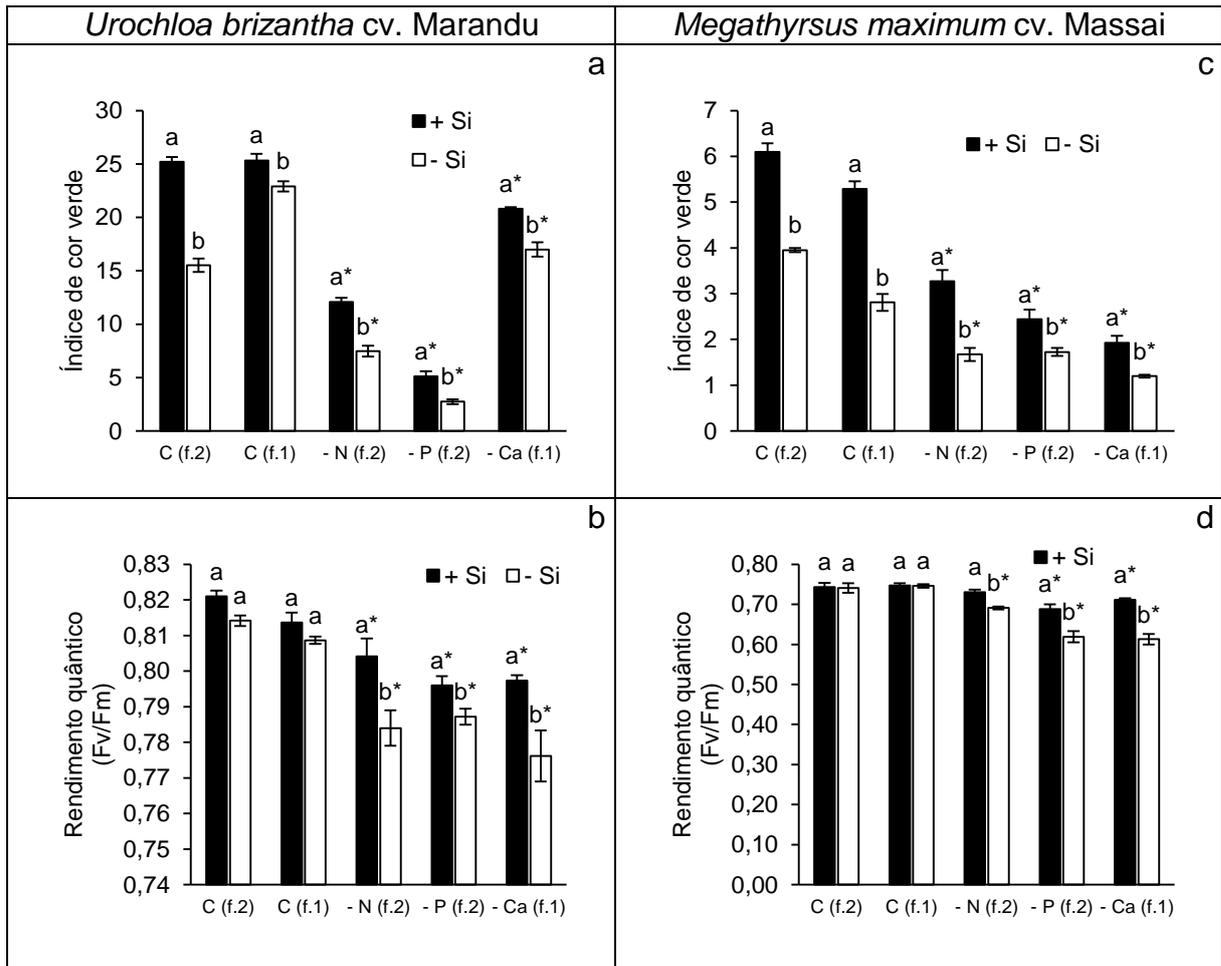


Figura 3. Índice de cor verde (a) e rendimento quântico Fv/Fm (b) de plantas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e índice de cor verde (c), rendimento quântico Fv/Fm (d) de *Megathyrsus maximum* cv. Massai, cultivadas em solução nutritiva completa (C) e com solução nutritiva com omissões nitrogênio (-N), fósforo (-P) e cálcio (-Ca), na presença de silício (+Si) e na ausência (-Si). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na condição de presença e ausência de Si. (*) Indica diferença significativa entre os tratamentos com omissões em relação aos tratamentos com solução nutritiva completa. Tratamentos solução nutritiva completa C (f.2) são comparados com os tratamentos - N (f.2), - P (f.2), se referem a valores obtidos pela avaliação da segunda folha completamente expandida. Os tratamentos solução nutritiva completa C (f.1) são comparados com os valores de - Ca (f.1) e se referem à primeira folha. A comparação das médias foi pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

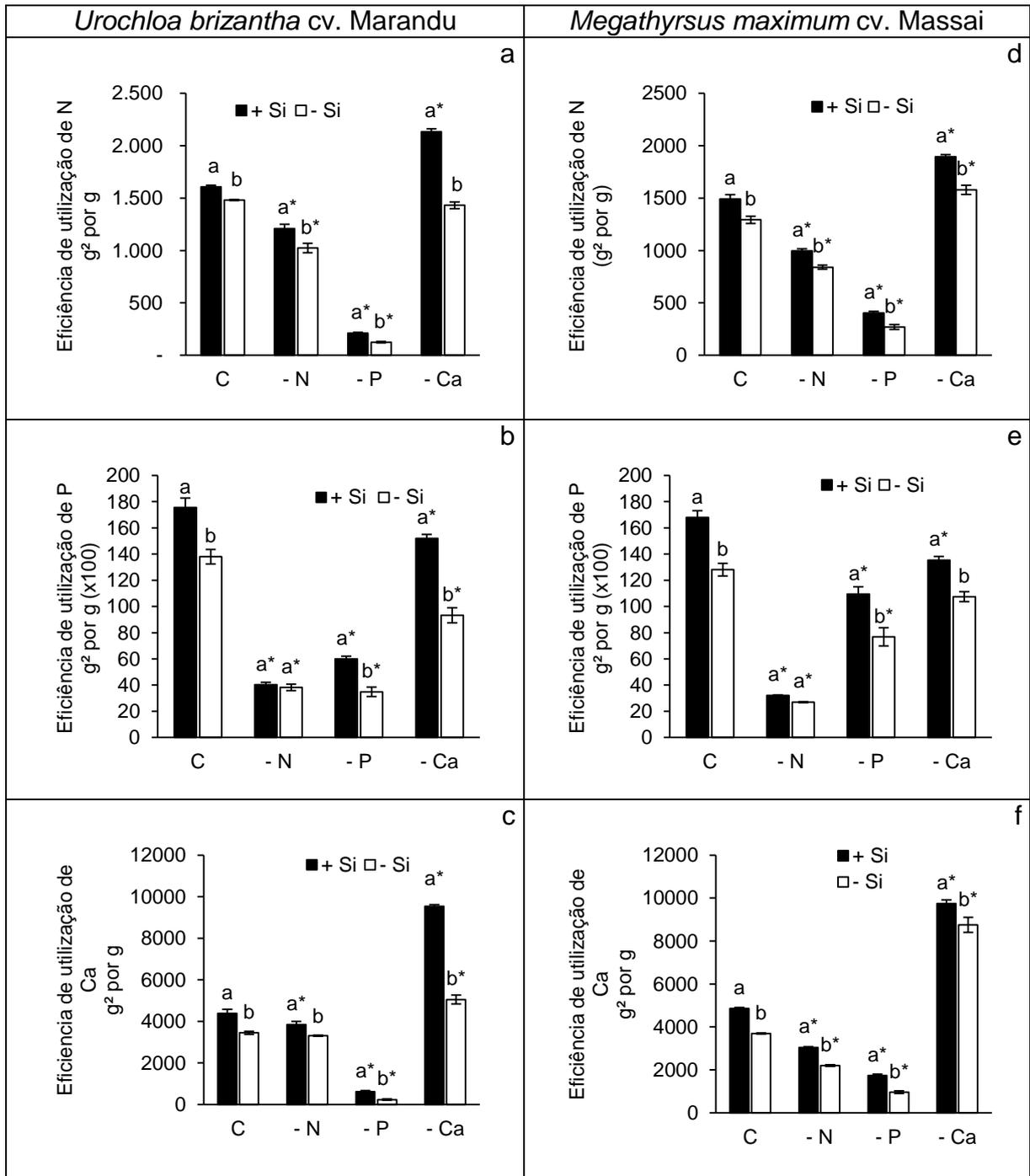


Figura 4. Eficiência de utilização de nitrogênio (a), fósforo (b) e cálcio (c) de plantas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e eficiência de utilização de nitrogênio (d), fósforo (e) e cálcio (f) de plantas de *Megathyrsus maximum* cv. Massai, cultivadas em solução nutritiva completa (C) e com solução nutritiva com omissões de nitrogênio (-N), fósforo (-P) e cálcio (-Ca), na presença de silício (+Si) e ausência (-Si). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na condição de presença e ausência de Si. (*) Indica diferença significativa entre os tratamentos com omissões em relação aos tratamentos com solução nutritiva completa (C), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

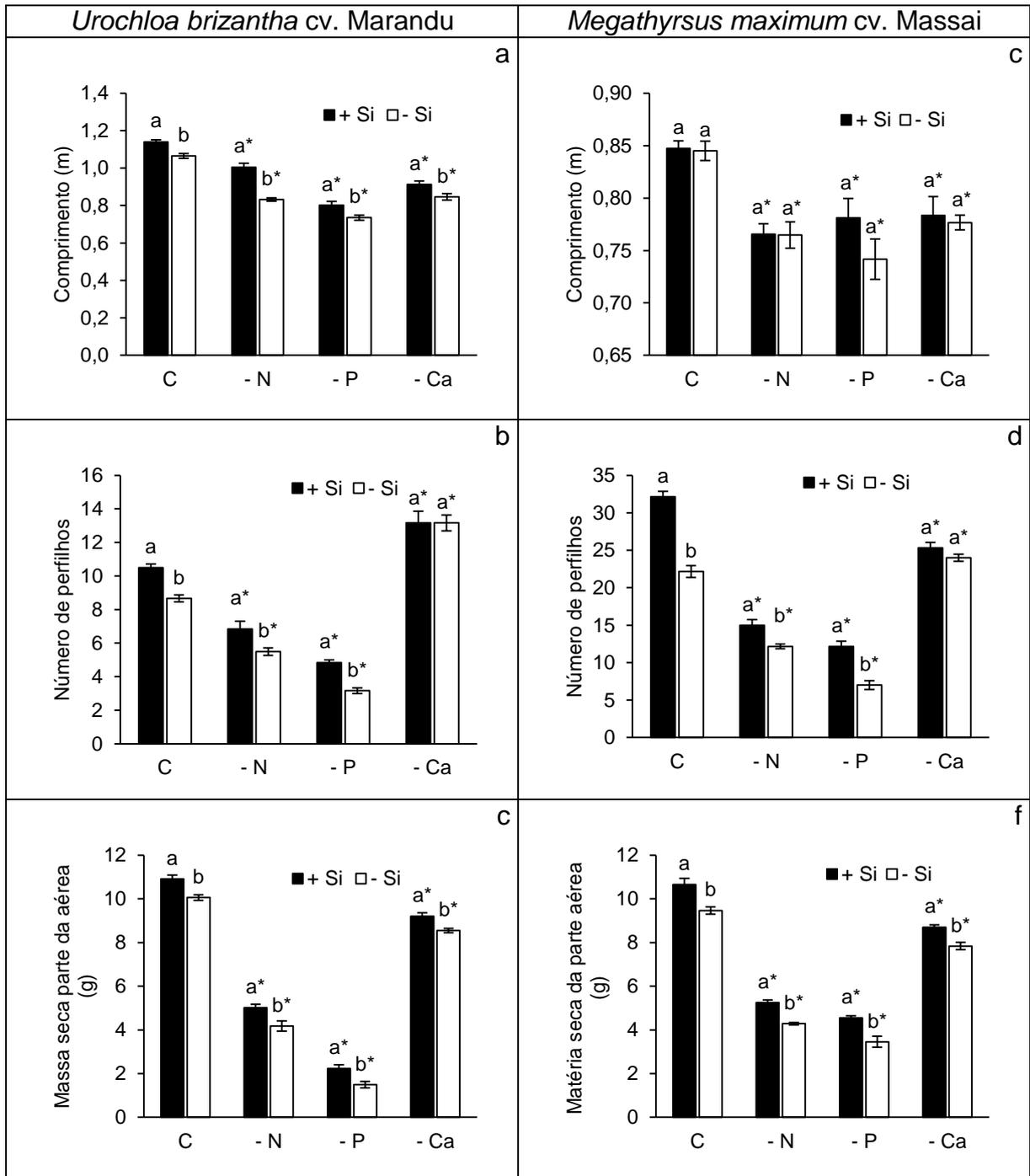


Figura 5. Comprimento (a), número de perfilhos (b) e massa seca da parte aérea (c) de plantas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e Comprimento (d), número de perfilhos (e) e massa seca da parte aérea (f) de plantas de *Megathyrus maximum* cv. Massai, cultivadas em solução nutritiva completa (C) e solução nutritiva com omissões de nitrogênio (- N), fósforo (- P) e cálcio (- Ca), na presença de silício (+Si) e ausência (-Si). Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos na condição de presença e ausência de Si. (*) Indica diferença

significativa entre os tratamentos com omissões em relação aos tratamentos com solução nutritiva completa (controle), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.