



Efeito da aplicação de fertilizante à base de coprodutos de siderurgia na produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em *Panicum maximum*

Effect of applying steel slag-based fertilizer on dry matter production and nutrient accumulation in *Panicum maximum*

DOI: 10.55905/revconv.16n.11-085

Recebimento dos originais: 13/10/2023

Aceitação para publicação: 14/11/2023

Mariana Guedes Guimarães

Mestra em Engenharia de Biosistemas
Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF)
Endereço: Niterói – RJ, Brasil
E-mail: marigguima@gmail.com

Natália Fernandes Rodrigues

Mestra em Engenharia de Biosistemas
Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Endereço: Seropédica – RJ, Brasil
E-mail: fr.natalia@ufrj.br

Jorge Makhouta Alonso

Doutor em Ciências Ambientais e Florestais
Instituição: Embrapa Solos
Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mail: j_makh@hotmail.com

Eliane de Paula Clemente

Doutora em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Solos
Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mail: eliane.clemente@embrapa.br

Rosângela Stralio

Doutora em Agronomia
Instituição: Embrapa Solos
Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mail: rosangela.stralio@embrapa.br

Guilherme Kangussu Donagemma

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Solos
Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mail: guilherme.donagemma@embrapa.br



Paulo César Teixeira

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Embrapa Solos

Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: paulo.c.teixeira@embrapa.br

RESUMO

A escória de siderurgia é considerada um passivo ambiental, no entanto pode ser uma alternativa ao calcário para correção da acidez no solo, influenciando na disponibilização e absorção de nutrientes. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de fertilizante à base de coproduto de siderurgia na produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes no capim *Panicum maximum* cv. BRS Zuri. O Agrosilício Mg foi aplicado como fertilizante em solo previamente corrigido. O experimento foi conduzido em vasos em casa de vegetação no delineamento em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram doses do Agrosilício Mg equivalentes a 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75 e 2,00 t/ha. Foram realizados dois cultivos com cortes aos 45 e 90 dias após a semeadura, sendo quantificada a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e o acúmulo de nutrientes nas plantas. Não houve diferença entre as doses avaliadas para MSPA, bem como para o acúmulo da maioria dos nutrientes nos tecidos de capim BRS Zuri nos dois cultivos. Foi observado aumento no acúmulo de Ca e Mg e diminuição de Zn nas plantas em doses crescentes de Agrosilício Mg. Os resultados sugerem que a correção prévia do solo teria sido suficiente para promover a correção da acidez, o fornecimento de silício e micronutrientes. Nas condições estudadas, a viabilidade da aplicação do Agrosilício Mg como fertilizante em cobertura e em condições de solos já corrigidos deve ser avaliada considerando-se os ganhos na absorção e no acúmulo de Ca e Mg.

Palavras-chave: silicato, calagem, capim-colonião, resíduo industrial, escória de siderurgia.

ABSTRACT

Steel slag can be considered an environmental burden, although it presents a viable alternative for limestone to mitigate soil acidity. Its application in agriculture holds the potential to exert an impact on nutrient accessibility and subsequent plant uptake. This study aimed to assess the impacts of steel slag-based products on dry matter production and nutrient accumulation of *Panicum maximum* cv. BRS Zuri. Agrosilicon Mg was used as fertilizer in soil previously corrected with Agrosilicon Plus. The experiment was conducted in a greenhouse in a randomized block design with four replications. The treatments consisted of Agrosilicon Mg rates equivalent to 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75 e 2,00 t/ha. Two cultivation cycles were conducted, with harvests at 45- and 90-days post-sowing. The plants' shoot dry mass (SDM) production and nutrient accumulation were quantified during both stages. There was no difference among the evaluated doses for MSPA and the accumulation of most of the nutrients in the tissues of BRS Zuri grass in the two cultivation cycles. With growing rates of Agrosilicon Mg, an increase in Ca and Mg and a decrease in Zn accumulated in plants was observed. The results suggest that applying Agrosilicon Plus as a soil amendment was sufficient to promote acidity correction and supply silicon and micronutrients. The viability of using Agrosilicon Mg as a top-dressing fertilizer and on soil previously corrected should be assessed considering whether the gains in Ca and Mg accumulation justify this product application.

Keywords: silicate, liming, guinea grass, industrial waste, steel slag.



1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores áreas de pastagem do mundo, segundo o Atlas das Pastagens (LAPIG, 2022), em 2020 eram mais de 162 milhões de hectares de pastagens no total, dos quais 39% estavam intermediariamente e 16% severamente degradados. A característica de ter a grande maioria do seu rebanho bovino criado a pasto reduz custos de produção e eleva a qualidade da carne brasileira, tornando-a uma das mais competitivas do planeta (Dias-Filho, 2014). No entanto, a baixa produtividade e degradação das pastagens tende a estar vinculada ao baixo investimento na correção e recuperação da fertilidade dos solos (Dias-Filho, 2014).

A correção da acidez do solo é uma das alternativas para aumento da qualidade das pastagens. A calagem aumenta a assimilação de elementos como molibdênio, fósforo, cálcio e magnésio. Ao mesmo tempo, em que reduz de maneira drástica as concentrações de ferro, alumínio e manganês que, sob condições de elevada acidez, poderão atingir quantidades tóxicas (Sousa e Lobato, 2004). A utilização de coprodutos de siderurgia é uma alternativa à calagem para correção da acidez do solo e como fonte de cálcio e magnésio para as plantas (Brasil e Nascimento, 2019; Das et al., 2020).

Os coprodutos são subprodutos da indústria do ferro e do aço cujos componentes neutralizantes da acidez são os silicatos de cálcio (CaSiO_3) e de magnésio (MgSiO_3). Além de corrigir o pH do solo, podem fornecer às culturas nutrientes essenciais para o seu desenvolvimento, bem como silício que é um elemento benéfico para algumas plantas (Stocco et al., 2014; Prado et al., 2003). Os silicatos de Ca e Mg, presentes nos coprodutos de siderurgia, possuem composição semelhante aos carbonatos, podendo substituir com algumas vantagens o calcário, como a maior mobilidade no solo, já que os produtos da reação de dissociação dos coprodutos são mais solúveis quando comparados aos carbonatos (Das et al., 2020). Estudos como o de Mantovani et al. (2016) relatam que a utilização de coprodutos da siderurgia como corretivo de solo pode promover benefícios em comparação com a calagem, como o ganho de produtividade para o café relatado pelos autores.

A cultivar de *Panicum maximum* BRS Zuri possui características de elevada produção, alto valor nutritivo, resistência à cigarrinha das pastagens e foi inicialmente indicada para cultivo nos biomas Cerrado e Amazônia (Jank et al., 2022). Essa cultivar apresenta resposta à calagem e adubação similar a outras cultivares da espécie, tais como Tanzânia-1 e Mombaça, sendo recomendada para solos de média a alta fertilidade (Jank et al., 2022). Assim como para o capim



Mombaça, é necessário um manejo eficiente, para que a forrageira possa expressar o seu potencial (Araújo et al., 2019). Recomenda-se a manutenção de níveis de saturação por bases próximo de 50-55% na camada de 0-20cm de solo e a reposição de Ca e Mg sempre que os teores de Ca forem inferiores a $1,50 \text{ cmol}/\text{dm}^3$ e os de Mg inferiores a $0,5 \text{ cmol}/\text{dm}^3$ (Jank et al., 2022).

O produto Agrosilício Plus é um fertilizante mineral simples produzido a partir de um coproduto gerado na siderurgia. Utilizado como fonte de cálcio, magnésio e silício, também possui efeito corretivo de acidez do solo apresentando resultados agrônômicos semelhantes ao do calcário. Por outro lado, o produto Agrosilício Mg é um fertilizante mineral complexo produzido a partir de reação entre um coproduto gerado na siderurgia com ácido sulfúrico com 22% de concentração e tem sido usado em cobertura como um fertilizante multinutriente, em condições de solos já corrigidos. Por ser acidulado e se encontrar na forma de sulfato, o Agrosilício Mg pouco altera o pH do solo e tem sido recomendado como fonte de Ca, Mg, S e Si, sendo que uma prática corrente observada no campo tem sido a aplicação de 1 t/ha desse produto.

Tendo em vista as exigências nutricionais para a expressão do potencial genético do capim *Panicum maximum* cv. BRS Zuri, visando a manutenção da produtividade desta forrageira, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação do Agrosilício Mg na produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em solo previamente corrigido com Agrosilício Plus.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no período de janeiro a maio de 2019, na Universidade Federal Fluminense, campus do Gragoatá, Niterói-RJ, com as seguintes coordenadas geográficas: $22^\circ 52' 58'' \text{ S}$ e $43^\circ 6' 14'' \text{ O}$. O clima da região é caracterizado como tropical (Aw), pela classificação climática de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco.

O solo utilizado no experimento foi coletado na fazenda experimental da Embrapa Gado de Leite, em Coronel Pacheco-MG, região da Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, e é caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura argilosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). O solo foi retirado da camada superficial de 0-20 cm de profundidade, seco ao ar e passado na peneira em malha de 2 mm. Realizou-se análise química do solo no laboratório do Instituto Brasileiro de Análises (IBRA),



segundo metodologias descritas por Teixeira et al. (2017) e Camargo et al. (2009) e os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do solo coletado na camada de 0-20 cm de profundidade em Coronel Pacheco-MG

Atributos	Método	Unidade	Prof. 0 -20 cm
pH	CaCl ₂	-	3,90
pH	SMP	-	5,33
MO	Oxidação	g/dm ³	21
P	Mehlich-1	mg/dm ³	3,8
K	Resina	mmol _c /dm ³	2,5
Ca	Resina	mmol _c /dm ³	4
Mg	Resina	mmol _c /dm ³	3
Na	Mehlich-1	mmol _c /dm ³	0,4
H+Al	Cálculo	mmol _c /dm ³	86
Al	KCl	mmol _c /dm ³	8
SB	Cálculo	mmol _c /dm ³	9,9
CTC	Cálculo	mmol _c /dm ³	95,9
V	Cálculo	%	10
M	Cálculo	%	44,69
S	Fosfato de Cálcio	mg/dm ³	32
B	Água Quente	mg/dm ³	0,62
Cu	Mehlich-1	mg/dm ³	1,9
Fe	Mehlich-1	mg/dm ³	61
Mn	Mehlich-1	mg/dm ³	11,1
Zn	Mehlich-1	mg/dm ³	0,6
Mo	Água Régia	mg/dm ³	0,2
Areia grossa (2-0,2 mm)		%	18,86
Areia fina (0,20-0,05 mm)		%	11,65
Silte (0,05-0,002 mm)		%	11,93
Argila (<0,002 mm)		%	57,56

MO = Matéria Orgânica; SB = Soma de bases trocáveis (Ca + Mg + K + Na); CTC = SB + (H+Al); V% = (SB/T).100; m = [(Al/ (Ca + Mg + K + Na + Al)).100

Fonte: Autores

Para esse estudo utilizou-se dois produtos comerciais a base de silicato de cálcio e de magnésio. O Agrosilício Mg está registrado junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como fertilizante multinutriente e o Agrosilício Plus, registrado como corretivo de solo. As análises dos dois produtos foram feitas conforme Brasil (2017) e os resultados encontram-se na Tabela 2. Os teores de Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn e Al foram determinados pelo método de espectrometria de absorção atômica; K e Na por espectrometria de emissão; N pelo macrométodo da Liga de Raney; P pelo método analítico gravimétrico do Quimociac; B por espectrofotometria da Azometina -H e S pelo método gravimétrico do Sulfato de Bário.



Como unidades amostrais foram considerados vasos plásticos contendo 5 kg de solo por vaso. A necessidade de calagem foi calculada em função dos resultados da análise do solo (Tabela 1), conforme Ribeiro et al. (1999), e considerando o PRNT de 85% para o Agrosilício Plus cuja caracterização química encontra-se na Tabela 2. Aplicou-se o corretivo incorporado ao solo (5,45 g/vaso) aos 30 dias antes da semeadura mantendo-se o solo úmido, com umidade mantida próxima de 70% da capacidade de campo.

Tabela 2. Caracterização química de dois coprodutos de siderurgia a base de silicato de cálcio e de magnésio

Produtos	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	S	Na	B	Si	Cu	Zn
	----- %-----											---- mg/kg ---		

Agrosilício Mg	0,10	1,12	0,14	15,6	8,70	5,49	0,68	0,85	2,75	0,09	0,02	10,5	52,4	23,3
Agrosilício Plus	0,06	0,56	0,11	22,6	4,79	4,1	0,64	1,06	1,43	0,06	0,02	7,80	41,8	15,2

Fonte: Autores

Os tratamentos foram constituídos por nove doses de Agrosilício Mg (0,00; 0,62; 1,25; 1,87; 2,50; 3,12; 3,75; 4,37; 5,00 g/vaso), equivalentes a 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75 e 2,00 Mg/ha, respectivamente. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, no total 36 unidades experimentais. Aos 30 dias após a aplicação do corretivo Agrosilício Plus, foram aplicados os tratamentos seguidos do plantio de 10 sementes do capim *Panicum maximum* cv. BRS Zuri por vaso, na profundidade de 1,0 cm.

Após a semeadura, todos os vasos receberam 100 mL de uma adubação básica, contendo 300 mg/kg de P, 75 mg/kg de K, 0,81 mg/kg de B, 1,33 mg/kg de Cu, 1,55 mg/kg de Fe, 3,66 mg/kg de Mn, 0,15 mg/kg de Mo e 4,00 mg/kg de Zn, nas formas de MAP (60% de P₂O₅ e 11% de N), KCl, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, FeCl₃.6H₂O, NaMoO₄.2H₂O, NaMoO₄.2H₂O e ZnSO₄.7H₂O.

O período total de condução do experimento foi de 120 dias sendo de 30 dias o período de incubação seguido de dois ciclos de cultivo de 45 dias cada. Ao final de cada ciclo, realizou-se o corte da parte aérea rente ao solo. O material vegetal coletado foi submetido a secagem em estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 65° C por 72 horas. Em seguida, o material foi pesado e moído em moinho tipo Wiley, com facas e câmara de aço inoxidável. Foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn, B e Si nas plantas, conforme metodologias descritas por Malavolta et al. (1989) e Elliot et al. (1991). Todas as análises foram realizadas no Instituto Brasileiro de Análises (IBRA), com exceção das análises de Si, que foram realizadas no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia.



Os dados foram avaliados quanto aos pressupostos da análise de variância (ANOVA), sendo submetidos ao teste de Bartlett para análise de homogeneidade das variâncias e ao teste de Shapiro-Wilk para avaliação da normalidade da distribuição dos resíduos. Sempre que necessário os dados foram transformados e reavaliados quanto aos pressupostos.

Quando se observou diferença entre médias a 10% de probabilidade pelo teste F da ANOVA, procedeu-se com a análise de regressão, sendo testados os modelos linear e quadrático. A significância dos coeficientes da regressão foi analisada pelo teste F a 5%. As análises foram feitas utilizando o pacote ExpDes.pt (Ferreira et al., 2022).

Além da análise experimental, a associação entre as variáveis foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Spearman e o agrupamento por meio de análise multivariada de cluster hierárquico. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2023). A visualização gráfica dos resultados também foi elaborada no R com auxílio dos pacotes ggplot2 (Wickham, 2016) e “factoextra” (Kassambara e Mundt, 2020) para gerar o dendrograma.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o período de incubação, a correção da acidez do solo usando Agrosilício Plus resultou em aumento no valor do pH e redução da acidez potencial (H+Al) e trocável. Para a análise em CaCl₂ e SMP, respectivamente, o pH do solo era de 3,90 e 5,33. Após a aplicação do corretivo os valores observados foram de 4,50 e 5,92. A acidez potencial passou de 86 a 46 mmol/dm³ e a acidez trocável alterou de 8 para 2 mmol/dm³. Estes resultados são condizentes ao poder reativo do silicato de cálcio (Prado et al., 2003; Das et al., 2020).

Não houve diferença entre as doses de Agrosilício Mg para a produção de matéria seca da parte aérea, bem como para o acúmulo da maioria de nutrientes acumulados nos tecidos de capim BRS Zuri nos dois cultivos avaliados e no acumulado dos dois cultivos (Tabela 3). As diferenças entre os tratamentos foram observadas para o Mg nos dois ciclos e para Ca e Zn no segundo ciclo e no acumulado.



Tabela 3. Resumo da análise de variância (quadrado médio) para produção de matéria seca da parte aérea (MS) e acúmulo de N, P, Ca, Mg, S, Zn e Si na parte aérea de capim BRS Zuri, em dois ciclos de cultivo e no acumulado, em função da aplicação em cobertura de diferentes doses de Fertilizante multinutriente a base de silicato de cálcio e de magnésio

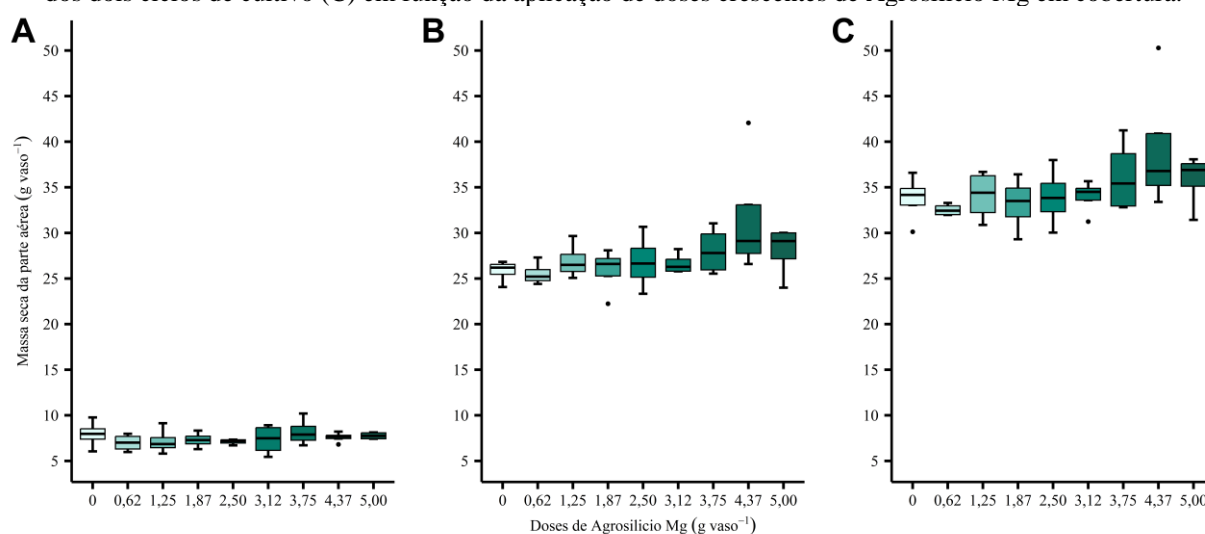
Cultivo	FV	GL	MS	N	P	Ca	Mg	S	Zn	Si
Primeiro cultivo	Bloco	3	2,19	1297	10,39	14,44	7,14	1,62	0,006	728,6
	Dose	8	0,66	494	3,85	49,76	69,93*	2,13	0,004	231,2
	Resíduo	24	1,17	877	7,13	33,29	31,20	5,76	0,005	348,1
Segundo cultivo	Bloco	3	0,022*	27464	0,041**	$6,5 \times 10^{-4}$	0,015	0,052**	0,022	0,055
	Dose	8	0,015	8711	0,013	$1,0 \times 10^{-3}$ **	0,215***	0,026	0,055**	0,015
	Resíduo	24	0,009	13752	0,011	$3,9 \times 10^{-4}$	0,049	0,015	0,017	0,044
Acumulado	Bloco	3	26,19	29362	240,6**	$9,3 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-7}$	0,034**	0,14	0,0033
	Dose	8	17,09	8176	77,9	$1,6 \times 10^{-3}$ **	$6,2 \times 10^{-6}$ ***	0,017	0,26***	0,0016
	Resíduo	24	11,9	14376	70,8	$6,3 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-6}$	0,011	0,07	0,0033

*, ** e ***: significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: Autores

Em relação à produtividade da cultura, verifica-se que variação da massa seca da parte aérea entre os tratamentos foi baixa, já que todos eles apresentaram medianas próximas nos dois cultivos e no acumulado (Figura 1). A variação entre observações dentro de um mesmo tratamento foi considerada de baixa a moderada de acordo com o coeficiente de variação, o que também é demonstrado pela dispersão dos dados ilustrada no boxplot. Esses resultados reforçam a ausência de resposta para os tratamentos, comprovando que não houve efeito deste insumo para aporte de biomassa da cultura avaliada.

Figura 1: Massa seca da parte aérea do capim colômbio BRS Zuri no primeiro (A), segundo (B) e no acumulado dos dois ciclos de cultivo (C) em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura.



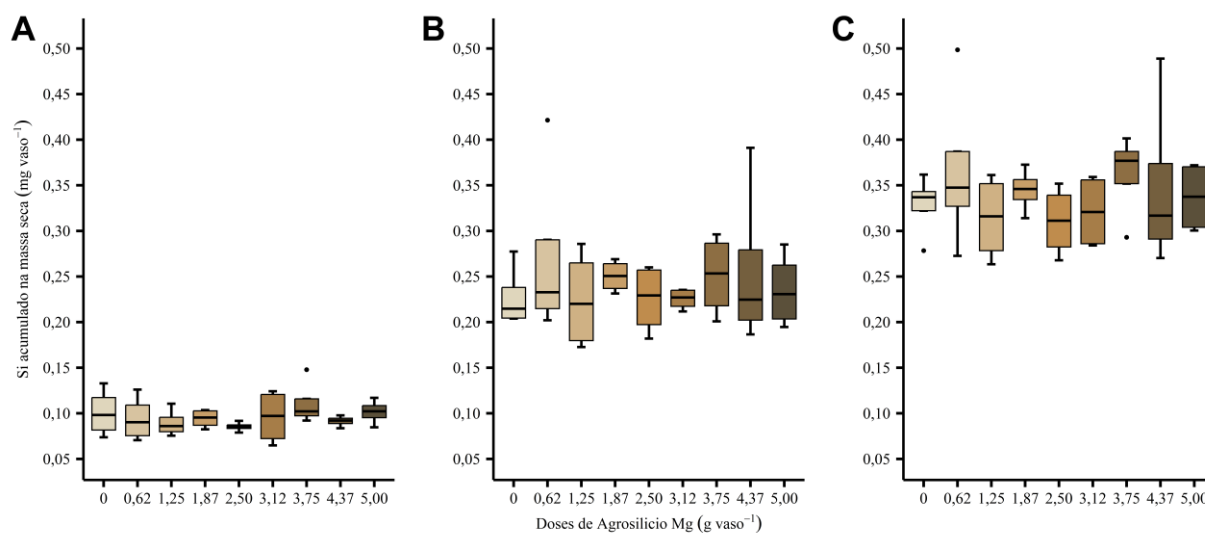
Fonte: Autores



A aplicação de coprodutos de siderurgia na agricultura pode promover benefícios, dentre os quais o ganho de produtividade para as culturas (Das et al., 2020). Por outro lado, existem estudos com resultados semelhantes ao presente trabalho, em que não se observou aumento da produtividade em decorrência da aplicação deste material para o milho (Miranda et al., 2018) e a soja (Deus et al., 2020). Os resultados contrastantes podem ser justificados pela variação entre características e composição de diferentes coprodutos de siderurgia, as quais têm relação com o metal processado, a composição mineralógica do material de origem, as condições da fornalha, dentre outros fatores (O'Connor et al., 2021). Outros fatores que podem ter influenciado nos resultados do presente trabalho são a cultura e o solo avaliados, bem como a aplicação prévia de corretivo também a base de coproduto de modo que o solo já estava em níveis não responsivos para a aplicação do silicato de cálcio e magnésio.

Apesar dos altos teores de silício presentes no material, não se observou resposta para o acúmulo deste elemento químico no tecido das plantas nos diferentes tratamentos. Assim como discutido para a matéria seca, a variação entre e dentro dos tratamentos pode ser considerada baixa a moderada (Figura 2), reforçando o resultado do teste F da ANOVA.

Figura 2: Acúmulo de silício (Si) na parte aérea do capim colômbio BRS Zuri no primeiro (A), segundo (B) e no acumulado dos dois ciclos de cultivo (C) em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura.



Fonte: Autores

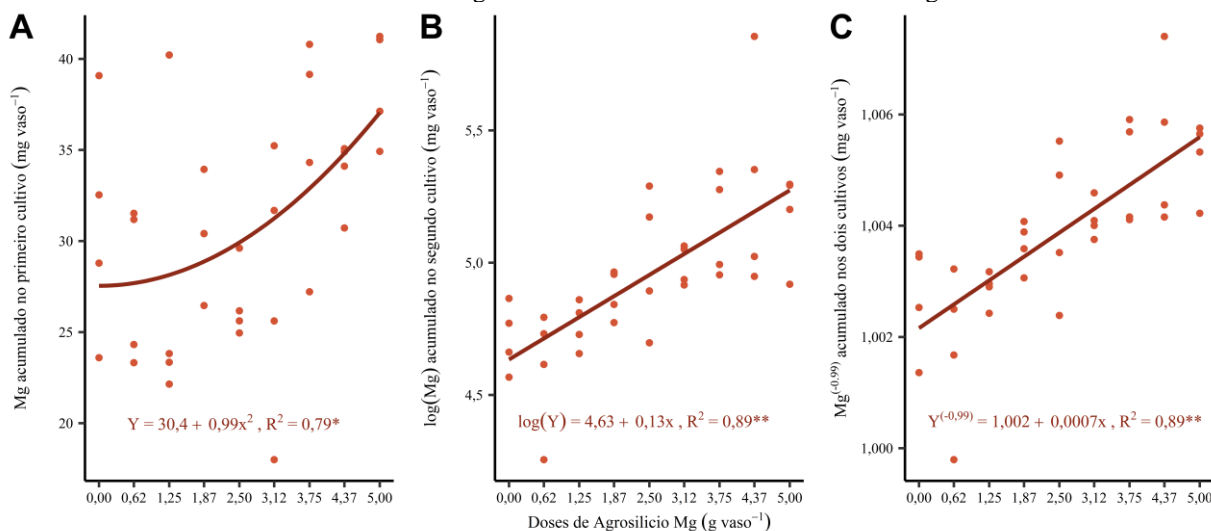
Em contraste ao presente estudo, Buchelt et al. (2023), avaliando a aplicação de silicato de potássio para a cultivar BRS Zuri, observaram valores semelhantes ao do presente estudo para



o acúmulo de Si na parte aérea das plantas. Além disso, os autores observaram que houve aumento na produção de biomassa das plantas em doses intermediárias desta fonte de Si. Tais resultados sugerem que a correção prévia do solo foi suficiente para suprir a demanda de Si das plantas, explicando a ausência de resposta a partir da aplicação do Agrosilício Mg no presente estudo.

Observou-se resposta linear para o acúmulo de Mg em relação aos tratamentos no segundo cultivo e no acumulado (Figura 3). No primeiro cultivo a resposta foi quadrática, com tendência de aumento do ganho nas doses mais altas. O coeficiente de determinação (R^2) sugere um bom ajuste do modelo para o segundo cultivo e no acumulado e um ajuste moderado para o primeiro cultivo, ou seja, doses crescentes do Agrosilício Mg implicaram em acúmulo crescente de Mg no tecido das plantas. Resultado semelhante foi observado para o Ca, com resposta linear no segundo cultivo e no acumulado e um bom ajuste do modelo (Figura 4). Tais resultados demonstram a capacidade deste insumo de fornecer Ca e Mg, o que numa estratégia de longo prazo pode influenciar o crescimento das plantas, como no caso das pastagens.

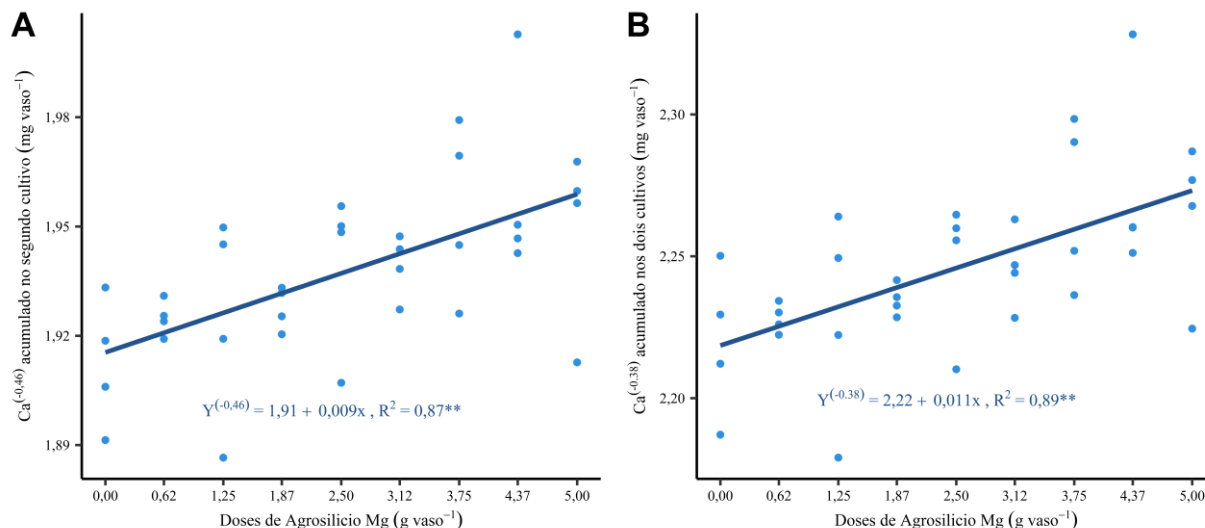
Figura 3: Quantidade de magnésio (Mg) na parte aérea do capim colônião BRS Zuri no primeiro (A) e segundo (B) cultivos e no acumulado dos dois cultivos (C) em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura. Coeficiente significativo ao nível de 5%* ou 1%** de significância.



Fonte: Autores



Figura 4: Quantidade de cálcio (Ca) na parte aérea do capim colônião BRS Zuri no primeiro (A), segundo (B) e no acumulado dos dois cultivos (C) em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura. Coeficiente significativo ao nível de 5%* ou 1%** de significância.



Fonte: Autores

Além do teor considerável de Ca e Mg no Agrosilício Mg, a aplicação de coproduto de siderurgia no solo favorece a disponibilidade no solo e a absorção destes nutrientes pelas plantas, o que ocorre pela ação destes materiais na correção do solo e pelo fato de suas fontes de Ca e Mg serem em geral mais solúveis do que os carbonatos presentes no calcário (Das et al., 2020). O uso de coprodutos de siderurgia, em comparação à aplicação de calcário, pode ainda diminuir a emissão de carbono e gases de efeito estufa na agricultura, além de aumentar o estoque de carbono no solo (O'Connor et al., 2021). Portanto, havendo disponibilidade local, viabilidade econômica e baixos teores de metais pesados no material, o uso de coprodutos como corretivo de solo pode ser considerada uma prática benéfica.

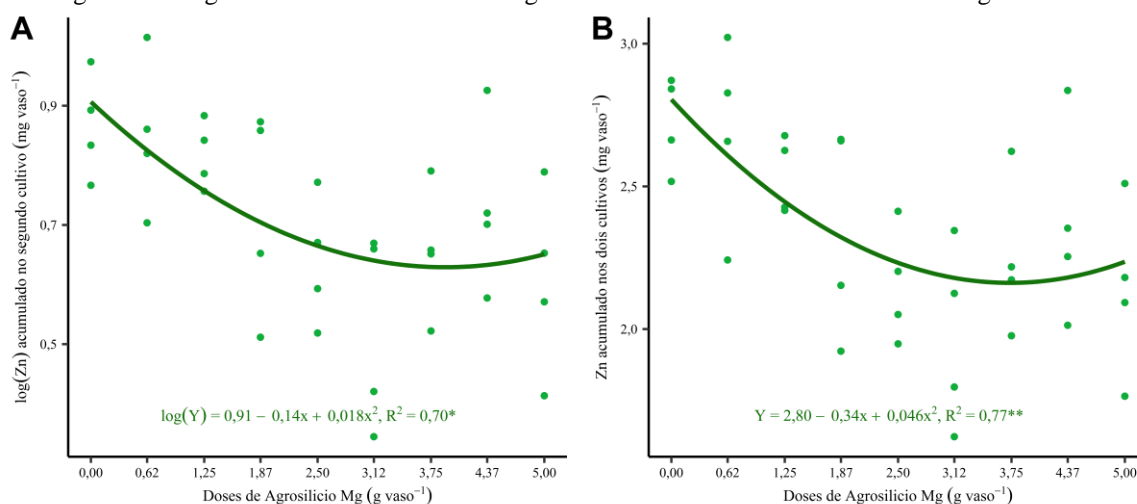
Considerando o cultivo do capim colônião BRS Zuri como planta forrageira, o maior acúmulo de Ca e Mg no tecido das plantas pode ser benéfico para fornecimento desses minerais na alimentação animal. Em ruminantes, a deficiência em Mg pode causar um transtorno chamado de hipomagnesemia ou tetania das pastagens (Underwood e Suttle, 1999). Quanto ao cálcio, a sua deficiência pode ocasionar doenças relacionadas aos ossos e dentes, principalmente na fase de crescimento e para o gado de leite, onde a falta de Ca pode ocasionar também a perda de produção (Underwood e Suttle, 1999). A suplementação da dieta com alimentos ricos em Ca e ou Mg é recomendada para ambos os nutrientes em caso de ruminantes criados em pastagens, especialmente gado de leite (Underwood e Suttle, 1999).



Por outro lado, a fertilização do solo é uma das práticas agrícolas que pode ser utilizada para aumentar a concentração desses elementos nas plantas forrageiras, melhorando a sua qualidade nutricional (Underwood e Suttle, 1999). A concentração média de Ca e Mg no tecido de gramíneas forrageiras tropicais é respectivamente de 4,75 e 2,20 g/kg (Chand et al., 2022). No presente estudo, para o Ca no segundo ciclo de cultivo, os teores foram acima da média citada por Chand et al. (2022) a partir da dose de 0,25 Mg/ha de Agrosilício Mg. O maior teor médio de Ca foi observado para a dose de 1,5 Mg/ha, atingindo 6,28 g/kg. Para o Mg no segundo ciclo os teores foram maiores que a média citada acima mesmo quando o Agrosilício Mg não foi aplicado. O maior teor foi verificado na dose de 1,75 Mg/ha, atingindo 6,54 g/kg. Tais resultados demonstram que a aplicação do Agrosilício Plus como corretivo de solo teve considerável efeito em fornecer Ca e Mg para as plantas, ao mesmo tempo em que a aplicação de Agrosilício Mg como fertilizante elevou significativamente os teores desses elementos no capim BRS Zuri.

Em relação ao Zn, observa-se que a resposta foi quadrática em relação às doses crescentes do Agrosilício Mg para o segundo ciclo de cultivo e no acumulado (Figura 5). Neste caso, o aumento das doses até 1,5 Mg/ha gerou uma diminuição do Zn acumulado nos tecidos das plantas. A partir desse ponto de mínimo, foi observado um leve aumento do acúmulo de Zn nas duas maiores doses, sendo que o modelo ajustado sugere que o acúmulo aumentaria em doses maiores. Em ambos os casos, o ajuste dos modelos foi de moderado a forte considerando o R^2 como parâmetro.

Figura 5: Quantidade absorvida de zinco (Zn) na parte aérea do capim colômbio BRS Zuri no primeiro (A) e segundo (B) cultivos e no acumulado dos dois cultivos (C) em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura. Coeficiente significativo ao nível de 5%* ou 1%** de significância.



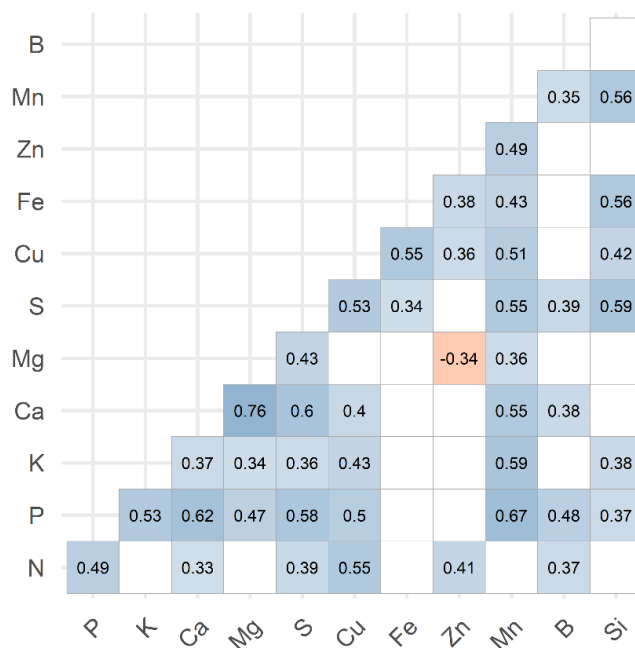
Fonte: Autores



A aplicação de coprodutos de siderurgia na agricultura pode levar a uma menor disponibilidade de Zn para as plantas (assim como de P, Fe e Cu), devido à alta reatividade dos óxidos de Ca e Mg (Das et al., 2022). O Zn é um elemento importante na formação de diversas enzimas, sua deficiência em animais pode ocasionar perda de peso, anormalidades na pele, distúrbios reprodutivos, dentre outras doenças (Underwood e Suttle, 1999). Assim como outros dados apresentados neste estudo, esse resultado reforça que a aplicação do Agrosilício Plus como corretivo teria sido suficiente para proporcionar os benefícios para a cultura avaliada. A aplicação de Agrosilício Mg resultou na elevação da disponibilidade de óxidos de Ca e Mg e por consequência diminuiu a disponibilidade de Zn.

A correlação linear entre os nutrientes avaliados em geral foi de baixa a moderada, isso considerando os valores acumulados na parte aérea das plantas durante os dois cultivos (Figura 6). Esse resultado demonstra que as variáveis estiveram pouco associadas entre si, ou seja, alterações nos teores de um nutriente não tiveram muita relação com teores de outros. A principal exceção foi a correlação positiva de moderada a forte entre Ca e Mg, o que pode ser explicado pelas características análogas desses elementos químicos e pelos resultados observados nas análises já apresentadas.

Figura 6: Coeficiente de correlação linear de Spearman para a massa seca e os teores acumulados de nutrientes na parte aérea do capim colômbio BRS Zuri em dois cultivos e no acumulado em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura.

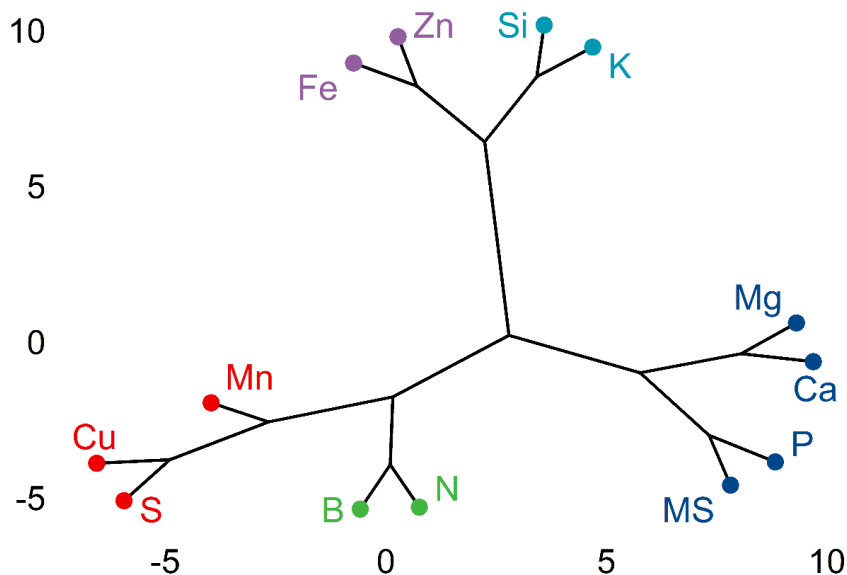


Fonte: Autores



O dendrograma elaborado por análise de cluster hierárquico demonstra que os nutrientes se agruparam em cinco diferentes grupos (Figura 7). Considerando que doze variáveis foram analisadas, conhecer como elas estão associadas e, ou se agrupam é importante para identificar padrões e reduzir a complexidade dos dados a serem avaliados. Sendo assim, optou-se por apresentar na Tabela 3 o resultado da ANOVA para sete dos doze elementos químicos avaliados. Dentre eles, pelo menos um nutriente de cada um dos diferentes grupos observados, bem como os que apresentaram diferença entre os tratamentos em pelo menos um dos ciclos.

Figura 7: Análise de cluster hierárquico para a massa seca e os teores acumulados de nutrientes na parte aérea do capim coloniã BRS Zuri em dois cultivos e no acumulado em função da aplicação de doses crescentes de Agrosilício Mg em cobertura.



Fonte: Autores

O acúmulo de Ca e Mg se agrupou em extremidades opostas do eixo x em relação ao acúmulo de Cu, Mn e S e em extremidades opostas no eixo y em relação a Fe, Zn, Si e K. O resultado reforça o antagonismo entre o Zn e Ca / Mg observado pela análise de regressão. Para os micronutrientes Cu, Mn, Zn e Fe, altos valores de pH podem diminuir sua solubilização no solo e absorção pelas plantas (Dechen et al., 2018). Como o aumento nas doses de Agrosilício Mg implicou em do acúmulo de Ca e Mg e provavelmente do pH, embora não se tenha observado diferença entre os tratamentos pelo teste F da ANOVA, o dendrograma sugere que o padrão observado para o Zn pode ter ocorrido para outros elementos químicos.



4 CONCLUSÕES

Nas condições estudadas, não houve efeito da aplicação em cobertura de Agrosilício Mg sobre a produção de matéria seca da parte aérea de capim colônia BRS Zuri em dois ciclos de cultivo com 45 dias cada. Entretanto, a aplicação de Agrosilício MG elevou o teor e acúmulo de Ca e de Mg e diminuiu o de zinco.

Os resultados sugerem que a aplicação do Agrosilício Plus como corretivo de solo teria sido suficiente para promover os principais benefícios decorrentes da aplicação de coprodutos de siderurgia na agricultura, notadamente a correção da acidez e o fornecimento de Ca e de Mg. A viabilidade da aplicação do Agrosilício Mg como fertilizante em cobertura deve ser avaliada considerando, no longo prazo, os ganhos no acúmulo de Ca e Mg e extração desses nutrientes pelo pastejo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Harsco Metals & Minerals, da Embrapa Solos e da Universidade Federal Fluminense, pelo apoio logístico e financeiro.



REFERÊNCIAS

Araújo, L. M. B., Andrade, A. C., Rodrigues, B. H. N., Santos, F. J. S., Magalhães, J. A., Rodrigues, R. C., & Oliveira, I. V. L. (2019). Produtividade do capim mombaça sob diferentes idades de rebrotação no norte do Piauí. *Nucleus*, 16(1), 233-244. DOI: 10.3738/1982.2278.3511

Beerling, D. J., Leake, J. R., Long, S. P., Scholes, J. D., Ton, J., Nelson, P. N., Bird, M., Kantzas, E., Taylor, L. L., Sarkar, B., Kelland, M., Delucia, E., Kantola, I., Muller, C., Rau, G., & Hansen, J. (2018). Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants*, 4(3), 138–147. DOI: 10.1038/s41477-018-0108-y.

Branca, T. A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., Pietruck, R., & Rosendahl, S. (2020). Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*, 10(345), 1-18. DOI: 10.3390/met10030345.

BRASIL. MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2017). *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília: MAPA, 2017. Disponível em: < https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Brasil, E. C., & Nascimento, E. V. (2019). *Aproveitamento agrônomo de escória de siderurgia de alto-forno na correção da acidez do solo*. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2019. 34 p. (Documentos / Embrapa Amazônia Oriental, 444).

Buchelt, A. C., Prado, R. M., Caione, G., Zanine, A. M., Justina, S. M., Ribeiro, J. S., Souza Júnior, A. M., Ferreira, D. J., & Sousa, F. C. S. (2023). The use of soluble silicon via fertigation and leaf application in *panicum maximum* modulates production without decreasing grass quality. *Silicon*. DOI: 10.1007/s12633-023-02602-4.

Camargo, O. A., Moniz, A. C., Jorge, J. A., & Valadares, J. M. A. S. (2009). *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas*. Campinas: Instituto Agrônomo.

Chand, S., Indu, Singhal, R. K., & Govindasamy, P. (2022). Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. *Grass and Forage Science*, 77(1), 11–32. DOI: 10.1111/gfs.12557.

DAS, S., GALGO, S. J., ALAM, M. A., LEE, J. G., HWANG, H. Y., LEE, C. H., & KIM, P. J. (2022). Recycling of ferrous slag in agriculture: Potentials and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(8), 1247–1281. DOI: 10.1080/10643389.2020.1853458

Dechen, A. R., Nachtigall, G. R., Carmello, Q. A. C., Santos, L. A., & Sperandio, M. V. L. *Micronutrientes*. (2018). In: Fernandes, M.S., Souza, S.R., & Santos, L.A. Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 491 – 562.



Deus, A. C. F., Büll, L. T., Guppy, C. N., Santos, S. M. C., & Moreira, L. L. Q. (2020). Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. *Soil and Tillage Research*, 196. DOI: 10.1016/j.still.2019.104422.

Dias-Filho, M. B. (2014). *Diagnóstico das pastagens no Brasil*. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 36p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/986147/1/DOC402.pdf>>. Acesso em 30 ago. 2023.

Elliot, C. L., & Snyder, G. H. (1991). Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39,1118-1119. DOI: 10.1021/jf00006a024.

Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2022). *ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Português). R package version 1.2.2*. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Jank, L., Santos, M. F., & Braga, G. J. (2022). *O capim-BRS Zuri (Panicum maximum Jacq.) na diversificação e intensificação das pastagens*. Comunicado Técnico, Brasília: Embrapa. 46p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1149054/1/Capim-BRS-Zuri-2022.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). *factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7*. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

LAPIG – Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento. (2022). *Atlas das pastagens: mapeamento da qualidade da pastagem brasileira entre 2000 e 2020*. Disponível em: <<https://atlasdaspastagens.ufg.br/assets/hotsite/documents/metodos/pt/Qualidade%20de%20PastageP.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. (1989). *Avaliação do estado nutricional das plantas*. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 319p.

Mantovani, J. R., Campos, G. M., Silva, A. B., Marques, D. J., Putti, F. F., Landgraf, P. R. C., & Almeida, E. J. (2016). Steel slag to correct soil acidity and as silicon source in coffee plants. *African Journal of Agricultural Research*, 11(7), 543–550. DOI: 10.5897/AJAR2015.10535.

Miranda, P. S., Moraes, T. R., Santos, J. R. E., Carvalho, F. D., Viana, J. P., & Maluf, R. P. (2018). Aplicação de silício na cultura do milho. *Revista de Ciências Agroambientais*, 16(1), 1–6. DOI: 10.5327/Z1677-606220181853.

O'Connor, J., Nguyen, T. B. T., Honeyands, T., Monaghan, B., O'Dea, D., Rinklebe, J.; Vinu, A., Hoang, S. A., Singh, G., Kirkham, M. B., & Bolan, N. (2021). Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 419. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126478.



Prado, R. M., Fernandes, F. M., & Natale, W. (2003). Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 287-296. DOI: 10.1590/S0100-06832003000200009.

R CORE TEAM (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Ribeiro, A. C, Guimarães, P. T. G, & Alvarez V., V. H. (1999). *Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 359p.

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Brazilian soil classification system*. 5th ed. Brasília: EMBRAPA. E-book.

Sousa, D. M. G., & Lobato, E. (2004). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2ª Edição. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 416p. Disponível em: <file:///C:/Users/m316025/Downloads/Cerrado-Correcao-solo-adubacao-ed-02-8a-impressao-2017.pdf>. Acesso em 15 set 2023.

Stocco, F. C, Passos, R. R., Andrade, F. V., & Mesquita, L. F. (2014). Escórias de siderurgia na nutrição de gramíneas cultivadas em Latossolo Vermelho-Amarelo. *Bioscience Journal*, 30(4), 1095-1107.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de Métodos de análise de solo*, 3. ed., Brasília, DF: Embrapa. 574p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2023.

Underwood, E. J., & Suttle, N. F. (1999). *The Mineral Nutrition of Livestock*. London: CABI Publishing. DOI: 10.1079/9780851991283.0000.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-319-24277-4.