

ALESSANDRA VIEIRA DA SILVA

**ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO EM
RESPOSTA A REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO E ESCÓRIA DE SIDERURGIA EM
SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

Botucatu

2021

ALESSANDRA VIEIRA DA SILVA

**ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO EM RESPOSTA
A REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO E ESCÓRIA DE SIDERURGIA EM SISTEMA DE
PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

Coorientadora: Prof^a Dr^a. Angélica Cristina

Fernandes Deus

**Botucatu
2021**

S586a	<p>Silva, Alessandra Vieira da</p> <p>Alterações nos atributos químicos de um latossolo em resposta a reaplicação de calcário e escória de siderurgia em sistema de plantio direto / Alessandra Vieira da Silva. -- Botucatu, 2021</p> <p>74 p. : tabs.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu</p> <p>Orientadora: Leonardo Theodoro Büll</p> <p>Coorientadora: Angélica Cristina Fernandes Deus</p> <p>1. Glycine max (L.). 2. Acidez do solo. 3. Silicatos. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

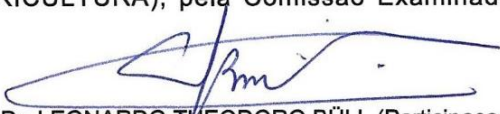
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO EM RESPOSTA A REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO E ESCORIAS DE SIDERURGIA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTORA: ALESSANDRA VIEIRA DA SILVA

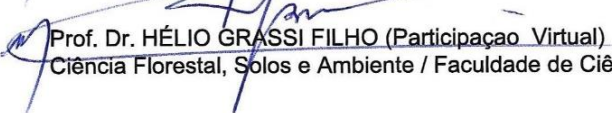
ORIENTADOR: LEONARDO THEODORO BÜLL

COORIENTADORA: ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LEONARDO THEODORO BÜLL (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof.ª Dr.ª DALCIMAR REGINA BATISTA WANGEN (Participação Virtual)
Agronomia / Instituto Federal Goiano


Prof. Dr. HÉLIO GRASSI FILHO (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 28 de julho de 2021

A Deus e a minha amada mãe,

Sandra e família,

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por tornar mais um sonho uma realidade, por me manter firme na caminhada mesmo perante os obstáculos e desafios.

A minha mãe Sandra, por sempre acreditar em mim e me incentivar a correr atrás dos meus sonhos. A minha família por me dar forças durante toda essa caminhada, em especial minhas irmãs Vanessa e Rodriana, ao meu pai e padrasto Rui e Fábio e, a todos da minha família que acreditaram em mim, em especial a minha avó Francisca, aos meus tios Nayara e Thiago que participaram da minha caminhada mesmo longe.

Ao meu grande companheiro, amigo e namorado Jamerson pelo carinho, amor e pela força ao me incentivar na realização desse sonho.

Aos meus amigos Mara Lúcia, Amanda Rithielly, Amanda Maria, Tatiane Cristovam, Ana Paula, Brunna Rithielly, Valquiria Pirolli, João de Jesus, Álvaro e Osvaldir pelo carinho e motivação.

A Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll, pela orientação, ensinamentos e paciência. A Prof Dra. Angélica Cristina Fernandes Deus pela coorientação, ensinamentos e suporte necessário durante o mestrado.

Aos meus amigos técnicos e funcionários do Departamento de Ciência do Solo Adriana, Marta, Selminha, Jair, Felipe, Dori, Edilson, Luiz, José Carlos pela amizade, carinho e apoio técnico. Ao meu amigo Cirinho do Departamento de Agricultura pela amizade e apoio técnico no campo.

Aos meus amigos agrônomos pela amizade, carinho e suporte técnico em especial ao meu grande amigo Emerson, Osvaldir, Álvaro.

A todos os funcionários da portaria do Lageado pelo apoio e suporte de segurança na ida ao experimento no campo, em especial ao Chefe da vigilância Biazote.

A todos da Fazenda Lageado em especial a Sílvia, Rúbia, Flávio, Dirceu, Mauro, José Roberto e Tio Carlinhos pelo carinho, amizade e apoio técnico em campo.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP/Botucatu.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos. A todos que de alguma forma contribuiriam para minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

A maioria dos solos do Brasil são classificados como ácidos, que limita muito a produção agrícola no país. Com isso é necessário a prática de calagem utilizando o calcário para que ocorra a correção da acidez do solo e a disponibilização dos nutrientes para as plantas. Todavia, existem outros corretivos que podem ser utilizados, tais como as escórias de siderurgia cujas informações sobre seu uso no solo ao longo do tempo e alterações fisiológicas e bioquímicas proporcionadas em plantas ainda carecem de informações. Visando contribuir para este tema, realizou-se experimento em condições de campo na Faculdade de Ciências Agronômicas / UNESP. O experimento foi instalado em blocos casualizados com subparcelas subdivididas medindo 42 m² e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por dois fatores: corretivos e formas de aplicação. Os corretivos foram: escória de aço inox, escória de aciaria, escória forno de panela, wollastonita, calcário agrícola, calcário agrícola calcinado e tratamento testemunha, sem a aplicação de corretivo. As formas de aplicação dos corretivos foram superficiais e incorporadas, sendo que em ambas as formas os materiais foram aplicados de forma manual e somente na forma incorporada o material foi revolvido usando grade niveladora na camada subsuperficial (20 cm). Nesse sentido, o capítulo 1 propôs avaliar as alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de soja em estágio vegetativo submetidas à aplicação de calcário e escórias de siderurgia em sistema de plantio direto. Decorridos 30 dias após a aplicação dos materiais no solo, foi implantada a cultura da soja, e posteriormente avaliados os seguintes índices: índice de área foliar, teor relativo de água, perdas eletrolíticas, teor de pigmento e massa fresca e seca de as folhas e o caule na fase R1. Ao final do ciclo da cultura, também foram avaliados os componentes de produção e produtividade de grãos da cultura da soja. A aplicação incorporada resultou em maior biomassa foliar, caule, número de plantas por metro linear, teores foliares de macronutrientes e micronutrientes, teor de proteína solúvel total, teor de silício foliar, atividades das enzimas superóxido dismutase, peroxidase e catalase, e o número de vagens por planta. A forma de aplicação dos corretivos de acidez alterou a resposta da soja, a incorporação de corretivos proporcionou maior produção de massa foliar fresca e seca e massa fresca do caule, aumentou o teor de clorofila *b*, teor de K nas folhas e contribuiu para um maior número de plantas por hectare e número de vagens por planta em relação à aplicação na superfície, apesar dos benefícios, não houve efeito do modo de aplicação sobre a produtividade da soja, mostrando que tanto a incorporação quanto a aplicação na superfície são eficientes no aumento da produtividade de grãos da soja. O objetivo do capítulo 2 foi avaliar o efeito da aplicação das escórias de siderurgia nos atributos químicos do solo e nas respostas metabólicas e produtividade de grãos na cultura do feijoeiro em sistema de plantio direto (SPD). Passados 16 meses que os materiais foram aplicados no solo foi implantada a cultura do feijoeiro avaliando-se, 40 dias após a germinação, altura de planta, massa seca de folhas e caules, o conteúdo relativo de água (CRA), perdas de eletrólitos (PE) e teor de pigmentos (Clo *a*, Clo *b* e carateoides), teor foliar de macronutrientes e micronutrientes, teor de proteína solúvel total, teor de silício na folha, atividade da enzima superóxido dismutase - SOD, peroxidase e catalase. Realizou-se também análise de trocas gasosas, fotossíntese,

concentração interna de CO₂, condutância estomática ao vapor de água, e taxa transpiratória. Ao final do ciclo da cultura avaliou-se componentes da produção e produtividade de grãos. Os valores de P, pH, V% e Si aumentaram com a aplicação dos silicatos, refletindo no número de plantas por metro e na massa de 100 grãos, contudo não mostraram interferência na produção de grãos do feijoeiro. O modo de aplicação superficial dos corretivos de acidez aumentou a fotossíntese e a condutância estomática das plantas de feijoeiro. As plantas de feijoeiro apresentaram elevados teores de Fe e Mn, resultando em a ativação das três enzimas SOD, POD e CAT, que atuam como indicador de estresse. Os silicatos apresentaram melhores resultados quando comparados aos calcários, no sistema de plantio direto.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.); acidez do solo; silicatos; calcário.

ABSTRACT

Most soils in Brazil are classified as acidic, which greatly limits agricultural production in the country. Thus, it is necessary to practice liming using limestone so that soil acidity is corrected and nutrients are made available to the plants. However, there are other correctives that can be used, such as steel slag providing information about its use in the soil over time and physiological and biochemical changes provided in plants still lack information. Aiming to contribute to this theme, an experiment was carried out under field conditions at the Faculty of Agricultural Sciences / UNESP. The experiment was installed in randomized blocks with subdivided subplots measuring 42 m² and four replications. The treatments consisted of two factors: correctives and forms of application. The correctives were: stainless steel slag, steel slag, ladle slag, wollastonite, agricultural limestone, calcined agricultural limestone and control treatment, without the application of corrective agent. The forms of application of correctives were superficial and incorporated, being that in both forms of materials they were manually and only in the incorporated form the material was revolved using a leveling grade in the subsurface layer (20 cm). In this sense, chapter 1 proposed to evaluate the physiological and biochemical changes in soybean plants in the vegetative stage submitted to the application of limestone and steel slag in a no-tillage system. Twenty days after the application of the materials to the soil, the soybean crop was implemented, and the following indexes were subsequently adopted: leaf area index, relative water content, electrolyte losses, pigment content and fresh and dry mass of leaves and leaves. stem at stage R1. At the end of the crop cycle, the components of production and grain yield of the bean crop were also obtained. An incorporated application resulted in higher leaf biomass, stem, number of plants per linear meter, leaf contents of macronutrients and micronutrients, total soluble protein content, leaf silicon content, activities of superoxide dismutase, peroxidase and catalase enzymes, and the number of pods per plant. The way of applying the acidity correctives changed the soybean response, we observed that the incorporation of correctives provided greater production of fresh and dry leaf mass and fresh stem mass, also increased the chlorophyll b content, K content in the leaves and contributed for a greater number of plants per hectare and number of pods per plant in relation to surface application, despite the benefits, there was no effect of the mode of application on soybean yield, showing that both incorporation and surface application are efficient in increasing soybean grain yield. In this sense, the objective of chapter 2 was to evaluate the effect of the application of steelmaking slag on the chemical attributes of the soil and on the metabolic responses and grain yield in the bean crop under no-tillage system (SPD). After 16 months that the materials were obtained in the soil, the bean crop was implanted, evaluating, 40 days after germination, plant height, fresh and dry mass of leaves and stems, the relative water content (CRA), electrolyte losses (PE) and pigment content (Clo *a*, Clo *b* and carateoids), leaf macronutrient and micronutrient content, total soluble protein content, leaf silicon content, superoxide dismutase - SOD, peroxidase and catalase enzyme activity. A gas exchange analysis was also carried out for what was needed a plant for treatment; also evaluated photosynthesis, internal CO₂ concentration, stomatal conductance to water vapor, and transpiration rate. At the end of the crop cycle,

components of production and grain yield were evaluated. The values of P, pH, V% and Si increased with the application of silicates, reflecting in the number of plants per meter and in the mass of 100 grains, however there was no differentiation in the bean grain production. The surface application of acidity correctives increased photosynthesis and stomatal conductance of common bean plants. The bean plants independent of Fe and Mn, discover in activation of the three enzymes SOD, POD and CAT, which act as stress indicator. Silicates had better results when compared to limestones, in the no-tillage system.

Keywords: Glycine max (L.); silicate; carbonate.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 – Physiological, biochemical and nutritional changes in soybean in response to application of steel slag	18
1.1 Introduction.....	19
1.2 Results.....	20
1.2.1 Physiological and nutritional Soybean characteristics	20
1.2.2 Biochemical characteristics and soybean productivity	21
1.3 Discussion.....	21
1.4 Material and Methods	23
1.4.1 Site description and soil	23
1.4.2 Treatments, experimental design and study conducting	24
1.4.3 Plant measurements.....	25
1.4.4 Statistical analysis	26
1.5 Conclusions	26
References.....	26
CAPÍTULO 2 - Alteração nos atributos químicos do solo e produtividade da cultura do feijoeiro em resposta a aplicação de escórias de siderurgia	35
2.1 Introdução.....	37
2.2 Material e métodos.....	39
2.2.1 Descrição do local e do solo	39
2.2.2 Delineamento experimental e manejo da cultura	41
2.2.3 Análise estatística	42
2.3 Resultados.....	43
2.3.1 Características químicas do solo	43
2.3.2 Características fisiológicas, nutricionais e bioquímicas das plantas de feijoeiro.....	50
2.3.3 Componentes de produtividade do feijão.....	54
2.4 Discussão	55
2.5 Conclusão	64
Referências.....	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS	73

INTRODUÇÃO GERAL

A maioria solos do Brasil apresenta elevado grau de intemperismo principalmente em regiões tropicais e subtropicais como é o caso dos Latossolos e Argissolos. Esses tipos de solos representam cerca 571 milhões de hectares, com apenas 67% das terras aráveis em solo brasileiro (IBSRAM, 1985). A composição mineralógica desses solos apresenta predominantemente óxidos de ferro e alumínio e filossilicatos do tipo 1:1, ou seja, caulinita (FINK et al., 2014; BORTOLUZZI et al., 2015, FINK et al., 2016).

No Brasil cerca de 75% das áreas com potencial para atividade agrícola apresentam problemas de acidez do solo com pH entre 3,8 e 5,5 (ABREU et al., 2003). Além disso, o Al é o cátion predominante em mais de um terço das áreas com pH do solo abaixo de 5,6 (RHEINHEIMER et al., 2018).

Os problemas relacionados à acidez do solo podem ser notados mediante redução no rendimento final das culturas e, para eliminar esse efeito é necessário realizar a calagem. A prática mais utilizada para corrigir a acidez do solo em sistema de plantio direto (SPD) é a calagem superficial sem incorporação. Desse modo, os efeitos benéficos apresentados no solo a curto prazo com a calcário superficial podem ser mostrados em pequena movimentação no perfil do solo (RHEINHEIMER et al., 2000b; ALLEONI et al., 2005, CAIRES et al., 2006a, TIRITAN et al., 2016). Todavia, a correção da acidez do solo em maiores profundidades ocorre de forma mais lenta, devido à baixa solubilização e movimentação do calcário nas camadas mais profundas uma vez que a formação de pares iônicos é comprometida em função da transformação do ânion bicarbonato em CO₂, que, após as reações de neutralização se difunde para a atmosfera.

Outros fatores que devem ser levados em consideração e que podem interferir nessa eficiência de correção com o uso do calcário é a forma e método de aplicação, o sistema de cultivo, características do solo, condições climáticas (CAIRES et al., 2015; CRUSCIOL et al., 2016), podendo variar em solos com carga variável (FRAGERIA e NASCENTE, 2014). Uma alternativa viável para corrigir a acidez do solo é o uso de escórias de siderurgia, um subproduto da produção do aço e do ferro. Ressalte-se que esses materiais são importantes fontes de Ca e Mg.

A produção mundial de aço vem crescendo no Brasil e no mundo, impulsionadas pelo avanço industrial resulta em uma elevada produção de escória de siderurgia, principalmente em outros países como Estados Unidos, China e Austrália, além de diversos países europeus (WSA, 2017), o que incentiva pesquisas sobre a utilização desse material na agricultura. Porém, é um material pouco utilizado na agricultura brasileira, talvez pelas poucas pesquisas realizadas no Brasil. As escórias de siderurgia têm um grande potencial de corrigir a acidez do solo, principalmente quando aplicadas a solos sob SPD.

O SPD é uma prática que cresceu muito no Brasil e no mundo devido aos vários benefícios que esse sistema pode proporcionar. Essa prática visa a minimizar problemas de perda de solo como o caso da erosão, aumenta os teores de matéria orgânica no solo, aumenta a produtividade das culturas e, contribui para melhorar a sustentabilidade da agricultura moderna (PITTELKOW et al., 2015). Dessa maneira, no Brasil são utilizadas cerca de 32 milhões de hectares de áreas de terra em SPD (PEIXOTO et al., 2019) sendo um dos principais países a adotar esse sistema. Além disso, o SPD é uma prática adotada em muitas áreas do país associadas a forma de aplicação dos materiais corretivos no solo o que garante melhor eficiência do sistema (RHEINHEIMER et al., 2018; AULER et al., 2019).

A aplicação dos materiais corretivos no solo ocorre na forma incorporada ou não, podendo notar que há diferença entre ambas as formas como maior área de contato do material com as partículas do solo quando incorporada. O calcário é o corretivo de acidez mais utilizado na agricultura brasileira e quando esse material é aplicado de forma superficial ocorre a elevação de cargas negativas do solo fazendo com que reduza os ânions presentes e como consequência tem uma menor eficiência de correção do solo (GONÇALVES et al., 2011; DEUS et al., 2020). Assim, para realizar a calagem no solo, seja utilizando o calcário ou as escórias, é recomendado atingir a camada de até 20 cm de profundidade (FURTINI, 2001).

A correção da acidez do solo é um fator muito relevante pois quando não neutralizada a acidez pode refletir no desenvolvimento das culturas, principalmente em regiões de clima mais seco. Com isso é recomendado corrigir as camadas subsuperficiais do solo a fim de melhorar o desempenho do vegetal. Desse modo, o corretivo de acidez que tem maior solubilidade do perfil do solo é a escória de siderurgia com cerca de 6,7 vezes a mais que o calcário em SPD (ALCARDE e RODELLA, 2003). Além disso, deve-se sempre lembrar que essas características

dependem do poder de neutralização e da área de contato com as partículas do solo. Diante disso, pode-se inferir que a escória de siderurgia teria potencial de atingir camadas subsuperficiais devido a maior solubilidade em água, fornecer silício (Si) para a solução do solo e conseqüentemente ser absorvido pela planta (CASTRO et al., 2016).

O Si é um elemento classificado como não essencial para as plantas, pois não atende os critérios diretos e indiretos de essencialidade. Porém, esse elemento entra na classificação como um elemento benéfico e útil durante o desenvolvimento do ciclo das culturas. Portanto, quando adicionado ao solo através de materiais silicatados, pode beneficiar o solo, bem como a planta. Vale ressaltar que alguns solos são pobres em Si devido a desilificação que consiste na remoção do Si durante a meteorização das rochas. Assim, quando esse elemento é adicionado ao solo pode promover nas plantas maior resistência contra estresses bióticos e abióticos (AGARIE et al., 1998) principalmente naquelas classificadas como acumuladoras de Si. Contudo, há relatos dos benefícios do Si nas plantas classificadas como não acumuladoras de Si como as leguminosas.

Neste contexto, torna-se importante o estudo e o entendimento da reação dos diferentes tipos de escórias no solo. Pouco se sabe sobre a utilização de escórias de siderurgia de diferentes origens, composição química e granulometria (reatividade) em aplicações superficiais, tornando-se importante para o SPD conhecer as alterações nos atributos do solo e da planta, bem como as respostas fisiológicas e bioquímicas para seu melhor aproveitamento, contribuindo também para redução do acúmulo de escórias geradas pelas indústrias siderúrgicas.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de calcários e escórias de siderurgia na correção da acidez do solo em sistema de plantio direto, nas alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de soja (Capítulo 1) e nos atributos químicos do solo e respostas metabólicas na cultura do feijoeiro (Capítulo 2).

CAPÍTULO 1

Physiological, biochemical and nutritional changes in soybean in response to the application of steel slag

Alessandra Vieira da Silva^{1*}, Angélica Cristina Fernandes Deus¹, Mara Lúcia Cruz de Souza², Fernando Broetto², Leonardo Theodoro Büll¹

¹Departament of Soil and Environmental Resources, College of Agronomic Sciences, São Paulo State University, Botucatu, SP, Brazil.

²Rural Engineering Departament, College of Agronomic Sciences, São Paulo State University, Botucatu, SP, Brazil.

*Corresponding author: alessandrav.silvaa@gmail.com

Abstract

Steel slag is a powdery industrial residue that has CaO, MgO and SiO₂ in its composition, which enables its use in agriculture for soil acidity correction. Most studies involving this residue have focused on understanding its effects on the soil, not always considering its action on the plant metabolism. Thus, the present study aimed to evaluate physiological, biochemical and nutritional changes in soybean plants due to application of lime and steel slag on the soil surface or by incorporation. The experiment was carried out in the field, with six soil acidity corrective materials: stainless steel slag, steel slag, ladle slag, wollastonite slag, dolomitic lime and calcined dolomite, plus a negative control, which did not receive correctives. Two application methods were adopted: soil surface application or incorporation. Sixty days after application, the soybean crop was established. Soybean response changed with the application method, since incorporation of corrective materials provided greater production of fresh and dry leaf mass and stem fresh mass, increased chlorophyll b and leaf K levels, and contributed to a greater number of plants per hectare and pods per plant, compared to surface application. Besides such benefits, there was no difference between the effect of application methods on soybean yield, indicating that both incorporation and surface application are efficient in increasing soybean grain yield. The correctives steel slag, wollastonite and calcined dolomite provided significant increases in soybean yield.

Keywords: soil acidity; liming; Slags; Silicate; *Glycine max*.

Abbreviations: CEC_ Cation exchange capacity; ROS_ reactive oxygen species; Fe_ Iron; Mn_ manganese; Al_ aluminum; DSW_ dry leaf weight; SS_Steel slag; W_Wollastonite; C_Control; LS_Ladle slag; SSS_Stainless steel slag; CDL_Calcined dolomitic lime and DL_Dolomitic lime. S_Superficial; I_Incorporated. BS_Base saturation. K_potassium; N_nitrogen; P_phosphorus; Ca_calcium; Mg_magnesium; S_sulfur; PTS_; POD_ Peroxidase; CAT_ catalase; SOD_ superoxide dismutase; SRA_antioxidative system; LA_Leaf area; FLW_ fresh leaf weight; DLW_ dry leaf weight; FSW_ fresh stem weight; DSW_ dry stem weight; Si_ silicon;

1.1. Introduction

Soybean (*Glycine max*) is the crop of highest productive expression in Brazil. In the 2019 harvest, the area and volume of soybean production corresponded to approximately 48% of the 240.65 million tons of grains produced in the country (Conab, 2019). Most soybean cultivation involves no-till system (Pauletti et al, 2014) and liming (Lopes et al, 1991)

Brazilian soils have several limiting attributes for the crop yield, including acidity, toxic elements (Al and Mn), and low cation exchange capacity (CEC) (Gama et al., 2007). Liming is frequently used to neutralize the soil acidity, reduce the acidity effect on plant development, improve the microorganism activity, reduce the abiotic stress, and increase the nutrient availability (Martins et al, 2017). Lime is the most used corrective material; however, residues from the metallurgical industries such as steel slags can also be successfully employed in agricultural activity (Deus et al., 2019).

Steel slags are Ca and Mg silicates containing CaO, MgO, SiO₂, P₂O₅, FeO and MnO in their composition. Their chemical and physical constitution may vary due to the different processes and different raw materials used in metallurgical industries (Deus et al., 2019). Steel slags can be adopted to correct soil acidity; increase pH levels, exchangeable calcium, exchangeable magnesium, CEC, and soil base saturation; improve phosphorus and silicon availability, and reduce Fe, Mn and Al toxicity (Pulz et al., 2008). It must also be emphasized that the use of steel slag in agriculture is a viable alternative for the final disposal of this such material since its waste is inappropriately discarded in landfills and improper places.

Some studies have shown that steel slags efficiently replace lime in soil acidity correction since they dissolve and make elements available to the plants more rapidly and at greater depths (Corrêa et al., 2009; Deus et al., 2019).

Another advantage of slag application is Si supply to the crop. Silicon has been evidenced to have an indirect effect on the productivity of soybean crops by improving the plant architecture and the leaf arrangement, which makes the plants stronger and more resistant to lodging (Agarie et al., 1998).

Plants may alter their metabolism when exposed to inadequate environmental conditions and abiotic stress. Excess elements in the soil, such as manganese, may induce abnormal metabolic events that can lead to the production of reactive oxygen species (ROS) (Amaro et al., 2018). Unless ROSs are neutralized, they may affect the cell structure and cause cellular death. Oxidative damage to the plant cell structures creates an imbalance between antioxidant activity and ROS production, which activates enzymes like superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) (Qi et al, 2018).

Therefore, better understanding how different types of slag can be used to correct the soil acidity and improve the plant development is important. Steel slag is suggested to alter the capacity of plants to respond to metabolic changes caused by biotic and abiotic factors. Thus, the aim of the present study was to evaluate physiological, biochemical and nutritional changes in soybean plants due to surface application or incorporation of lime and steel slags.

1.2. Results

1.2.1. Soybean physiological and nutritional characteristics

The application method influenced Fresh Leaf Weight (FLW), Fresh Stem Weight (FSW), Electrolyte Loss (EL) and Chlorophyll *b* (Table 3). Incorporation of acidity correctives led to greater FSW and FLW than surface application. Similarly, the highest EL and chlorophyll *b* levels were found when the correctives were incorporated into the soil.

The tested corrective materials had an effect on Dry Leaf Weight (DLW) and Chlorophyll *b* (Table 3). Stainless steel slag significantly influenced DLW, compared to control, while the remaining treatments had no significant differences. The lowest Dry Stem Weight (DSW) was obtained with the control treatment. Chlorophyll *b* levels ranged from 16.0 $\mu\text{g cm}^{-2}$ for the control to 23.8 $\mu\text{g cm}^{-2}$ for wollastonite; however, there was no significant difference between the studied correctives.

The nutrients K and B were also influenced by the application method, since K level was higher with the incorporation of correctives while B level was higher with

surface application. Considering the soil acidity correctives, there was also a significant effect on the leaf levels of Ca, Mg, Fe, Mn, and Zn (Table 4).

Higher levels of the nutrient Ca were provided by the correctives SS, W and SSS, which were similar to each other, whereas limestones did not differ from control (Table 4). Mg levels obtained with DL were higher than those found with SS and W and similar to those resulting from control, LS, SSS and CDL application.

Fe level obtained with the control treatment was superior to that found with LS and W and similar to the levels resulting from SS, SSS, CDL and DL, while for Mn levels, the control was superior to all other treatments. Regarding Zn levels, control treatment was superior to SSS and DL and similar to SS, W, LS and CDL (Table 4).

1.2.2. Biochemical characteristics and soybean productivity

The analyzed biochemical parameters indicated interactions between the application method and the acidity correctives considering the enzyme SOD, which is part of the plant's antioxidative response system (Tables 5 and 6). When incorporation was adopted, SOD activity was the same, regardless of the corrective material. However, for surface application, W and the control were similar to each other in showing higher SOD activity, compared to the other correctives.

Considering the factors separately, there was a difference between the application methods since incorporation resulted in higher number of plants per hectare and higher number of pods per plant, compared to surface application.

The biochemical parameter Total Soluble Proteins (TSP) was influenced by the corrective materials, ranging from 17.7200 mg g⁻¹ for the control to 25.9400 mg g⁻¹ for steel slag, which showed no difference from the other treatments.

1.3. Discussion

Application of correctives by incorporation resulted in the highest values of the parameters FLW, FSW, EL, Chlorophyll *b*, K level, number of plants, and number of pods/plants, compared to surface application. This was possibly due to the improved distribution of correctives (0-0.20 m) provided by incorporation, also favoring soil aeration and, consequently, improving the development of the plant's root system with higher nutrient and water absorption.

Wollastonite application had the greatest effect on Chlorophyll *b*, while the remaining treatments showed no significant differences (Table 4). Chlorophyll *b* is characterized as an accessory pigment, responsible for aiding in light absorption

(Silva et al., 2014), maximizing energy absorption that effectively acts in the photochemical reactions (Gill & Tuteja, 2010) and in the photosynthesis maintenance (Imtiaz et al., 2016).

Increased leaf Ca levels provided by the treatment with Wollastonite was due to the Ca percentage present in this corrective material.

Mg concentration in soybean leaves was higher with DL, compared the other treatments. This increase is related to the composition of such material, which has higher MgO values than the other correctives (Table 2), combined with the rain that occurred during the experimental period, leading to good nutrient distribution. The leaf levels of the nutrients Ca, Mg, N and P remained within the adequate range for soybean, except K, which kept below the optimal range, according to Ambrosano et al. (1997).

The higher leaf level of B provided by the surface application of acidity correctives can be explained by the storage of part of the available form of this element in the superficial layer of the soil, together with organic matter (Raij et al. 1997). Leaf Fe level was higher with the control than with the other treatments.

The increased Mn level in soybean leaves was not within the adequate range proposed by Ambrosano for the crop: from 20 to 100 mg kg⁻¹. In this study, Mn values were higher than 100 mg kg⁻¹ for all treatments. According to Rosolem et al. (1992), the range from 140 mg kg⁻¹ to 300 mg kg⁻¹ Mn in mature leaves corresponds to toxic levels for soybean crops. The highest Mn levels (300 mg kg⁻¹) obtained with the control treatment might have contributed to the lower number of pods per plant in the control (Table 4), compared to the other treatments, corroborating the study by Heenan & Campbel (1980).

TSP content is regarded as a reference indicator to determine and quantify several other enzyme activities. SS, either incorporated or applied on the soil surface, was the only treatment that had an effect on soluble proteins, probably because it provided greater protease activity, which decreased manganese toxicity for SOD in soybean leaves.

Plants are capable of developing biochemical responses to survive stress; such responses are generated by an antioxidative system (SRA) and have been evaluated as stress indicators (Souza et al, 2020). In the present study, there was an increase in the activity of the enzyme SOD in response to the surface application of acidity correctives. The greater SOD activity obtained with the control treatment can

be related to the excessive leaf level of manganese present in the treatment, compared to the incorporated correctives, which showed low SOD activity. Thus, activity of other enzymes (CAT and POD) was not observed, i.e., only the enzyme that is considered the first line of the plant defense against stress was activated: SOD. However, this evidences that the plant has adapted to the environment and has not activated the other enzymes (CAT and POD) through its defense mechanism.

Critical Mn^{+2} levels in the leaves (below or above the adequate range) cause oxidative stress due to an increase in the concentration of hydrogen peroxide and malondialdehyde, an indicator of lipid peroxidation (Amaro et al., 2018). Such oxidative stress was evidenced by the enzyme SOD in soybean leaves. In addition, in the present study, even though Mn^{+2} was above the optimal level for soybean leaves, it did not inhibit the availability of Ca^{+2} , Mg^{+2} and Fe^{+2} in the leaves. The number of plants per linear meter increased with the incorporation of soil acidity correctives in a no-till system (Rheinheimer et al, 2000). The number of pods per plant varied from 53 for incorporation to 78 for surface application (Table 4). This might have occurred because larger soybean plant populations are capable of producing more pods due to the greater number of ramifications, which determines higher knot production potential and, consequently, higher number of pods per plant (Mauad et al., 2010). Thus, this positively influenced the number of pods per plant considering the two analyzed factors.

There were satisfactory differences in productivity ($t\ ha^{-1}$) with the application of the soil acidity correctives; steel slag led to the highest productivity, showing an average value of $7.18\ t\ ha^{-1}$, while control had an average value of $4.32\ t\ ha^{-1}$. Thus, the increased productivity observed in the present study is due to the residual effect of using steel slags as soil acidity corrective over time in the same area, which acted as a nutrient supplier to the soil and had a positive effect on productivity. It must be highlighted that productivity is also favored by other factors like genotypes of high productive potential and some environmental factors (Prado et al., 2001).

1.4. Material and Methods

1.4.1. Description of the experimental site and soil

The experiment was conducted between July 2019 and February 2020, under field conditions, at the College of Agronomic Sciences – São Paulo State University (Unesp), Botucatu, São Paulo State, Brazil (22°50'19" S and 48°25'54" W, at 738m above sea level). The soil in that area was classified as Rhodic Hapludox (Soil Survey Staff, 2014), a dystrophic Red Latosol, according to the classification of Embrapa (2018).

The experiment was established in 2010 with the surface application and incorporation of the soil acidity corrective materials described on item 1.4. Still in 2010, before application of the corrective materials, the plots designated to receive treatments by incorporation were prepared by plowing with a reversible disc plough and harrowing with leveling disc harrow. Then, the corrective materials were manually applied on the soil surface and mechanically incorporated to 0–20 m. After application, the no-tillage system was followed (Deus et al., 2020) for all treatments until 2013.

The liming was reapplied in 2013 and 2017, considering the soil chemical analysis for those years and the chemical characteristics of each corrective material; the dose was calculated to increase base saturation to 70%. The corrective materials were applied on the soil surface and incorporated to 0-20 cm depth, following the proposed treatments. After each reapplication, the crops were conducted in a no-tillage system for all treatments.

In July 2019, chemical analysis was performed to characterize the soil at the 0-20cm layer, following the methodology proposed by Raij et al. (2001).

1.4.2. Treatments, experimental design and study development

Treatments consisted of two application methods (surface application and incorporation) of six soil acidity corrective materials, namely, steel slag (SS), ladle slag (LS), stainless-steel slag (SSS), Wollastonite (W), Dolomitic lime (DL) and calcined dolomitic lime (CDL), in addition to one control treatment (C), to which no corrective material was applied.

Experimental design was in randomized blocks with 42m² (6m×7m) subplots and four replicates. The major plots were compared for the application method, surface application or incorporation, while the sub-plots were compared for the applied corrective materials.

The plots that received treatments by incorporation were prepared with a grid of disc levelers; then, in October 2019, the correctives were manually applied on the soil

surface and mechanically incorporated to 0–20 m with an intermediate degree grid. For the plots receiving surface treatments, the corrective materials were manually applied on the soil surface.

The used dose of each corrective was calculated to increase base saturation to 70%, considering the result of the soil chemical analysis (Table 1) and the chemical composition of each corrective (Table 2). The chemical and physical characterization of corrective materials was carried out according to the Brazilian Legislation for Limestone (Alcarde, 2009).

After 60 days of application of the acidity correctives, soybeans of the cultivar 'TMG 7062 IPRO' were sown. The seeds were previously treated with the fungicide carboxin (carboxanilide) + thiram (dimethyldithiocarbamate) (9.6 g a.i. per 40 kg seeds) and the insecticide thiamethoxam (34 g a.i. per 40 kg seeds) and inoculated with liquid inoculum (5×10^9 CFU *Bradyrhizobium japonicum* mL⁻¹).

Sowing was performed in November 2019, adopting 0.45 cm row spacing and 20 seeds m⁻¹ sowing rate. Fertilization was conducted based on the recommendations for soybean by Raji et al. (1997) and on the chemical characteristics obtained in the soil analysis (Table 1), considering the average of all treatments, except the control treatment. Thus, 300 kg ha⁻¹ of the formula 02-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) were applied.

1.4.3. Plant Measurements

During full blooming (70 days after germination), analyses included leaf area (cm²) measurement with a leaf area meter model LICOR LI-3000; fresh and dry masses of leaves and stems; relative water content (RWC) (Barr et al. 1962); electrolyte loss (EL) (Lafuente et al., 1991); pigment content (Hiscox & Israelstam, 1979); leaf levels of macro and micronutrients (Malavolta et al., 1997), Total Soluble Proteins (TSP) (Bradford, 1976) and silicon (Korndörfer et al., 2004), and activity of the enzymes SOD (Giannopolitis and Ries, 1977), POD and CAT (Lock, 1963). For both variables, 2 to 5 leaves were collected from the middle third of the plant to perform all analyses.

At the end of the crop cycle, evaluations included number of pods per plant, number of grains per pod, silicon content in the grain, mass of 100 grains, and yield. Soybean harvest was manually performed 115 days after seedling emergence and

consisted of collecting 2 lines of 2 meters per subplot; then, humidity was corrected to 13% and the yield was calculated as t^{-1} ha.

1.4.4. Statistical analysis

Data were subjected to Shapiro-Wilk test for normality. Results underwent analysis of variance and, when significant, were compared according to Tukey's test at 5% probability. Statistical analysis was performed with the statistical software AgroEstat (Barbosa; Maldonado, 2015).

1.5. Conclusions

Application of correctives by incorporation favored soil aeration, which increased leaf biomass, stem weight, number of plants per linear meter, pigment content and, consequently, number of pods per plant.

The levels of micronutrients (B, Cu, Fe and Zn) were within the adequate range for the crop, except manganese, which was toxic, triggering SOD activity (stress indicator) and promoting, especially for the control treatment, a decrease in the number of pods per plant and consequently lower soybean productivity.

Funding

To financial support from CNPq (National Council for Scientific and Technological Development) (Grant nº 134287/2019-3), for the awarded master's scholarship.

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

References

- Agarie S, Hanaoka N, Ueno O, Miyazaki A, Kubota F, Agata W, Kaufman PB (1998) Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Prod. Science.* 1:96-103.
- Amaro ACE, Baron D, Ono EO, Rodrigues JD (2020) Physiological effects of strobilurin and carboxamides on plants: an overview. *Acta Physiologiae Plantarum.* 42:4.
- Alcarde JC (2009) Official Methodology for Acidity Corrective Analysis. Porto Alegre-RS, 58p.
- Ambrosano EJ, Tanaka RT, Mascarenhas HAA, Raij B van, Quaggio JÁ, Cantarella H (1997) Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J. A.;

Furlani, A. M. C. (Eds.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agronômico. 2:187-202 (Boletim Técnico 100).

Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) AgroEstat – Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos. Jaboticabal: UNESP.

Barr HD and Weatherley PE (1962) A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. Aust. J. Biol. Sci. p. 413-428.

Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye-binding. Anal Biochem 72:248–254.

Companhia Nacional de Abastecimento (2019). Sexto levantamento de avaliação da safra 2019/2020. Brasília, p. 1-31.

Corrêa JC, Büll LT, Crusciol CAC, Morais MH (2009b) Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33: 263-272.

Deus ACF, Bertani RMA, Meirelles GC, Soares AAVL, Moreira LLQ, Büll LT, Fernandes DM (2019) The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. In: Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste. 10p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2018) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa, E-book, Brasília

Gama JRFN, Carvalho EJM, Rodrigues TE, Valente MA (2007) Solos do estado do Pará. In: Cra Vom MS, Viégas IJM, Brasil EC (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o estado do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 19-29.

Gill SS, Tuteja N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry, 48:909-930.

Giannopolitis CN, Ries SK (1977) Superóxido dismutases. I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology 59:309–314.

Heenan DP, Campbel OG (1980) Growth, yield componets and seed composition of two soy-bean cultivars affected by manganese supply – Australian Journal of Agricultural Research, 31: 471 – 476.

HiscoX JD, Israelstam GF (1979) A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. Canadian Journal & Botany.57:1132-1334.

Imtiaz M, Rizwan MS, Mushtaq MA, Ashraf M, Shahzad, SM, Yousaf B, Saeed DA, Rizwan M, Nawaz A, Mehmood S, Tu S (2016) Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants

with future prospects: A review. *Journal of Environmental Management*, v.183, 3:521-529.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi 50p. (Boletim Técnico n° 02).

Lafuente MT, Belver A, Guye MG, Salveit ME (1991) Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. *Plant Physiology*. 95:443-449.

Lock H (1963) Catalase. In: Bergmeyer HU (ed) *Methods of enzymatic analysis*, vol 2. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr, pp 885–894.

Lopes AS, Silva MC, Guimarães GLR (1991) Correção da acidez do solo. São Paulo: ANDA. 22 p. (Boletim Técnico 1).

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. ver. e atual. Piracicaba: Potafos, 2:319.

Martins CM, Martins SCS, & Borges, WL (2017). Correção da acidez, adubação e fixação biológica. *Embrapa Amapá-Capítulo em livro científico (ALICE)*.

Mauad M, Silva TLB, Neto AIA, Abreu VG (2010) Influência da densidade de semeadura sobre características agrônômicas na cultura da soja. *Dourados - MS*,3:9:175-181.

Pauletti V, Pierri LD, Ranzan T, Barth G, Motta ACV (2014). Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(2), 495-505.

Prado RM, Fernandes FM, Natale W (2001) Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal, Funep, 68.

Pulz AL, Crusciol CAC, Lemos LB, Soratto RP (2008) Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade de batata sob deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1651-1659.

Qi J, Song CP, Wang B, Zhou J, Kangasjarvi J, Zhu JK, Gong Z (2018) Reactive oxygen species signaling and stomatal movement in plant responses to drought stress and pathogen attack. *J Integr Plant Biol* 60:805–826.

Raij B. van, Cantarela H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (1997) Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2:285 (Boletim Técnico 100).

Rheinheimer DS, Santos EJS, Kaminski J, Bortoluzzi EC, Gatiboni LC (2000) Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 24:797-805.

Rosolem CA, Bessa MA, Amaral PG, Pereira HFM (1992) Manganês no solo: sua avaliação e toxidez de manganês em soja. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasília, 27:2:277-285.

Silva MA, Santos CM, Vitorino HS, Rhein AFL (2014) Pigmentos fotossintéticos e índice spad como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 30:1:173-181.

Soil Survey Staff, (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, twelfth ed. USDA- United States Department of Agriculture. Vargas, J.P.R., Santos, D.R., Bastos, M.C., Schaefer, G., Parisi, P.B., 2019.

Souza MLC, Starling CDSAZ, Machuca LMR, Zuñiga EA, Galvão ÍM, de Jesus Guimarães J, & Broetto, F. (2020). Biochemical parameters and physiological changes in maize plants submitted to water deficiency. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1-9.

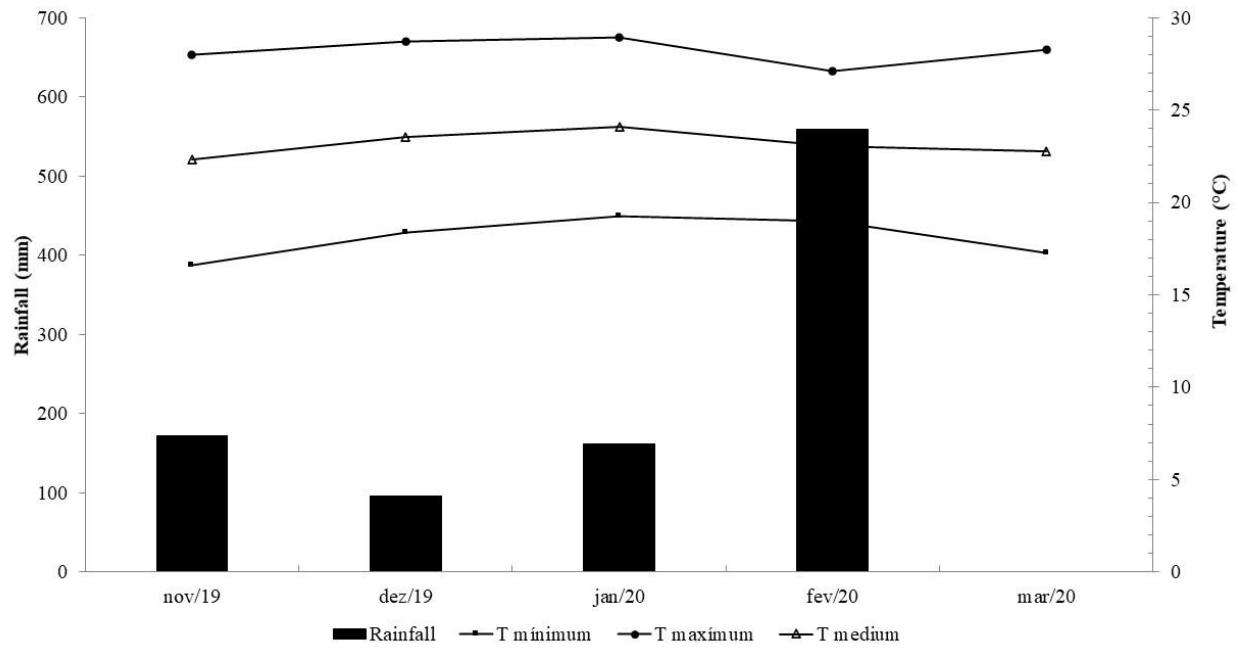


Fig. 1 Monthly rainfall and maximum, medium and minimum temperature in Botucatu, State of São Paulo, Brazil during the study period, from November 2019 to March 2020.

Table 1. Chemical characterization of the soil before the installation of the experiment, according to the different treatments, correctives and form of application.

Correctives	Application	pH	O.M.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CEC	BS
		CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmolc dm ⁻³ -----						
SS	I	4.4	28	12	65	0.8	23	4	27	90	30
W	I	4.3	27	12	64	0.6	24	4	28	92	31
LS	I	5.0	26	36	38	0.8	42	8	51	89	57
SSS	I	4.5	37	33	53	0.9	32	7	41	94	44
CDL	I	4.5	32	10	52	0.3	29	7	36	88	41
DL	I	4.9	33	31	44	0.9	31	11	43	87	49
SS	S	4.6	34	11	55	1.1	35	5	41	96	43
W	S	4.4	27	14	62	0.5	28	4	32	94	34
LS	S	4.7	32	15	48	0.9	36	7	44	92	48
SSS	S	4.5	33	26	54	1.3	48	12	62	116	53
CDL	S	4.4	32	9	59	1.1	26	7	35	94	37
DL	S	5.2	31	28	35	0.6	42	14	57	91	62
Medium		4.6	31	20	48	0.8	33	8	41	87	44
C	I	3.8	25	58	110	0.9	7	2	10	120	8
C	S	4.2	28	88	62	1.3	22	5	28	90	31

SS: Steel slag; W: Wollastonite; C: Control; LS: Ladle slag; SSS: Stainless steel slag;

CDL: Calcined dolomitic lime and DL: Dolomitic lime. S: Superficial and I: Incorporated.

SB: Sum of Bases. BS: Base saturation. CEC: Cation exchange capacity

Table 2. Chemical and physical characterization of soil acidity correctives.

Correctives	Result in %					
	CaO	MgO	RE	NP	PRNT	Moisture
Stainless steel slag	39.67	11.33	70.97	86	61	2.2
Steel slag	35.30	13.10	73.00	72	53	0.9
Calcined dolomitic lime	52.30	17.90	97.00	139	134	0.2
Dolomitic lime	31.18	16.29	89.36	82	74	1.9
Ladle slag	33.35	6.05	74.11	68	51	1.2
Wollastonite	33.38	4.40	99.64	65	64	0.1

RE= reactivity, expresses the corrective percentage that reacts in three months; NP= neutralizing power, expresses the corrective chemical potential, in CaCO₃ equivalent.

Tabela 3. Leaf area (LA), leaf fresh mass (FLW), leaf dry mass (DLW), stem fresh mass (FSW), stem dry mass (DSW), leaf silicon content (Si), relative water content in leaf tissue (RWC), loss of electrolytes (EL) and pigment content: chlorophyll *a* (Clo *a*), chlorophyll *b* (Clo *b*) and carotenoids (Car) as a function of the effect of the application mode and correctives of soil acidity on soybean cultivar TMG 7062 IPRO.

Treatments	LA	FLW	DLW	FSW	DSW	Leaf silicon content (Si)	RWC	EL	Clo <i>a</i>	Clo <i>b</i>	Car	
Application (A)	cm ² plant ⁻¹	----- g plant ⁻¹ -----				mg kg ⁻¹	%	µg cm ⁻² of leaf				
Incorporated	4924.9 a	54.0 a	24.3 a	149.7 a	43.35 a	3.05 a	84.8 a	6.3 a	35.0 a	22.3 a	8.7 a	
Superficial	3509.1 a	39.7 b	19.3 a	96.2 b	43.92 a	2.89 a	88.3 a	5.2 b	34.0 a	19.2 b	8.5 a	
F	47.82 ^{ns}	11.59*	3.73 ^{ns}	20.71*	6.37 ^{ns}	0.22 ^{ns}	3.19 ^{ns}	1.29*	1.16 ^{ns}	20.71*	6.37 ^{ns}	
Correctives (C)												
SS	4117.4 a	43.8 a	21.9 ab	126.8 a	43.00 ab	2.37 a	88.8 a	6.2 a	35.0 a	20.8 a	8.6 a	
W	4244.7 a	46.0 a	22.1 ab	120.5 a	44.50 ab	3.18 a	87.3 a	4.5 a	36.7 a	23.8 a	8.8 a	
C	3109.7 a	35.7 a	17.5 b	88.7 a	49.00 a	3.35 a	89.3 a	5.7 a	30.8 a	16.0 b	8.0 a	
LS	4537.5 a	47.6 a	22.5 ab	136.1 a	43.00 ab	2.62 a	83.9 a	6.7 a	35.0 a	21.6 a	8.3 a	
SSS	5274.4 a	58.2 a	25.6 a	150.1 a	40.62 b	2.75 a	84.2 a	4.8 a	36.9 a	21.9 a	9.1 a	
CDL	4313.3 a	47.3 a	21.9 ab	124.0 a	45.12 ab	2.78 a	82.8 a	5.3 a	35.1 a	21.4 a	9.1 a	
DL	3922.0 a	49.1 a	21.1 ab	114.7 a	40.25 b	2.73 a	88.4 a	7.2 a	34.2 a	20.1 ab	8.2 a	
F	0.28 ^{ns}	1.24 ^{ns}	2.12*	1.41 ^{ns}	2.52*	2.00 ^{ns}	0.69 ^{ns}	0.79 ^{ns}	1.19 ^{ns}	5.84*	0.74 ^{ns}	
A x C	2.02 ^{ns}	1.72 ^{ns}	1.82 ^{ns}	1.97 ^{ns}	2.07 ^{ns}	1.92 ^{ns}	0.39 ^{ns}	0.81 ^{ns}	0.65 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.64 ^{ns}	
VC (%) plot	55	33	43	35	46	42	8	61	3	10	4	
VC (%) subplot	29	36	21	36	22	21	11	54	15	13	16	

Averages followed by different letters in the columns differ among themselves. By the Tukey test at 5% (*) and 1% (**) probability. SS – Steel slag. W – Wollastonite. C – control. LS – Ladle slag. SSS – Stainless steel slag. CDL – Calcined dolomitic lime. DL – Dolomitic lime. ns - not significant.

Table 4. Average leaf contents of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (B, Cu, Fe, Mn and Zn) in soybeans, harvest 2019/20 as a function of the incorporated and superficial application of acidity correction materials from soil.

Treatments	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Application (A)	----- g Kg ⁻¹ -----						----- mg Kg ⁻¹ -----				
Incorporated	49.85 a	2.95 a	16.96 a	7.5 a	5.02 a	1.90 a	43.96 b	10.75a	145 a	183 a	43.35 a
Superficial	47.78 a	2.86 a	14.46 b	7.0 a	5.01 a	2.06 a	47.82 a	10.96 a	130 a	150 a	43.92 a
F	3.10 ^{ns}	0.47 ^{ns}	12.54*	2.52 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.57 ^{ns}	47.82*	0.68 ^{ns}	0.36 ^{ns}	8.68 ^{ns}	0.05 ^{ns}
Correctives (C)											
SS	48.75 a	2.88 a	15.12 a	7.8 ab	4.76 b	2.03 a	43.12 a	10.12 a	130 ab	134 b	43.00 ab
W	48.50 a	2.93 a	15.75 a	8.0 a	4.66 b	2.01 a	47.62 a	11.12 a	118 b	103 b	44.50 ab
C	48.87 a	3.01 a	17.50 a	7.0 c	4.87 ab	2.01 a	46.62 a	11.50 a	181 a	312 a	49.00 a
LS	50.50 a	2.92 a	15.25 a	7.5 abc	5.05 ab	2.02 a	47.25 a	11.12 a	120 b	187 b	43.00 ab
SSS	49.12 a	2.97 a	16.00 a	7.7 ab	5.08 ab	1.90 a	46.25 a	10.75 a	131 ab	152 b	40.62 b
CDL	48.50 a	2.91 a	15.87 a	7.2 bc	5.47 a	1.91 a	46.37 a	11.25 a	133 ab	170 b	45.12 ab
DL	47.50 a	2.72 a	14.50 a	7.2 bc	5.23 ab	1.93 a	44.00 a	10.12 a	150 ab	111 b	40.25 b
F	0.92 ^{ns}	1.64 ^{ns}	2.15 ^{ns}	2.53*	2.53*	0.65 ^{ns}	0.71 ^{ns}	0.12 ^{ns}	3.12*	11.67**	2.53*
A x C	2.31 ^{ns}	1.21 ^{ns}	0.79 ^{ns}	1.77 ^{ns}	0.32 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.84 ^{ns}	0.17 ^{ns}	2.20 ^{ns}	1.00 ^{ns}	0.32 ^{ns}
VC (%) plot	9	17	16	8	11	39	9	16	37	24	23
VC (%) subplot	5	6	12	7	8	12	12	10	25	35	12

Averages followed by different letters in the columns differ among themselves. By the Tukey test at 5% (*) and 1% (**) probability. SS – Steel slag. W – Wollastonite. C – control. LS – Ladle slag. SSS – Stainless steel slag. CDL – Calcined dolomitic lime. DL – Dolomitic lime. ns - not significant.

Table 5. Total soluble protein content (PTS), activity of the enzymes Superoxide dismutase (SOD), Peroxidase (POD), Catalase (CAT), No. of plants per hectare, No. of pod / plant, No. of grains / plant and productivity depending on the application and the corrective effect of soil acidity on soybean cultivar TMG 7062 IPRO.

Treatments	TSP	SOD	POD	CAT	Number of plants per hectare	Number of pods/plant	Number of grains/plant	Silicon content in the grain	Yield (t ha ⁻¹)
	(mg g ⁻¹)	(UI µg protein ⁻¹)	µKat µg protein ⁻¹					mg kg ⁻¹	
Application (A)									
Incorporated	24.3 a	0.98 a	2.7 a	370.4 a	550594 a	78 a	2.0 a	1.05 a	6.46 a
Superficial	20.8 a	1.03 a	2.8 a	362.5 a	444346 b	53 b	2.0 a	1.04 a	5.30 a
F	37.42 ^{ns}	1.01 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.05 ^{ns}	46,15**	17,81*	1,00 ^{ns}	0,79 ^{ns}	3,88 ^{ns}
Correctives (C)									
SS	25.9 a	0.86 b	2.7 a	291.9 a	463194 a	75 a	2.0 a	1.09 a	7.18 a
W	22.2 ab	1.10 ab	2.7 a	426.9 a	515277 a	53 c	2.0 a	1.21 a	6.25 ab
C	17.7 b	1.16 a	2.8 a	345.7 a	519443 a	55 bc	2.0 a	1.01 a	4.32 c
LS	23.8 ab	0.94 ab	2.8 a	389.4 a	513548 a	64 abc	2.0 a	0.86 a	5.98 abc
SSS	21.6 ab	1.02 ab	2.7 a	419.8 a	503471 a	75 a	2.0 a	1.16 a	5.22 bc
CDL	22.4 ab	1.09 ab	2.8 a	383.5 a	474999 a	68 ab	2.0 a	1.03 a	6.40 ab
DL	24.2 ab	0.87 ab	2.8 a	307.9 a	492360 a	65 abc	2.0 a	0.94 a	5.80 abc
F	2.49*	3.08*	1.62 ^{ns}	1.67 ^{ns}	0.43 ^{ns}	2.87*	0.64 ^{ns}	0.64 ⁿ	4.86**
A x C	0.66 ^{ns}	2.76*	0.80 ^{ns}	1.91 ^{ns}	0.43 ^{ns}	1.88 ^{ns}	1.53 ^{ns}	0.33 ^{ns}	1.00 ^{ns}
VC (%) plot	21	18	6	34	12	34	7	26	37
VC (%) subplot	20	19	4	31	19	23	15	29	20

Averages followed by different letters in the columns differ among themselves. By the Tukey test at 5% (*) and 1% (**) probability. SS – Steel slag. W – Wollastonite. C – control. LS – Ladle slag. SSS – Stainless steel slag. CDL – Calcined dolomitic lime. DL – Dolomitic lime. ns - not significant.

Table 6 - Deployment of the interaction x corrective for the enzyme Superoxide dismutase (SOD) ($\text{UI } \mu\text{g protein}^{-1}$).

Correctives	Forms of application	
	Incorporated	Superficial
SS	0.90 aA	0.81 aC
W	0.97 aA	1.24 aB
C	0.99 bA	1.33 aA
LS	0.98 aA	0.91 aC
SSS	0.90 aA	1.13 aC
CDL	1.23 aA	0.95 aC
DL	0.89 aA	0.85 aC

SS – Steel slag. W – Wollastonite. C – control. LS – Ladle slag. SSS – Stainless steel slag. CDL – Calcined dolomitic lime. DL – Dolomitic lime. ns - not significant. Capital letters correspond to the comparisons between the soil acidity correctives within the same mode of application. Lower case letters correspond to comparisons between the mode of application for the same soil acidity correction by the Tukey test at a level of 5% (*) and 1% (**) probability.

CAPÍTULO 2

Alteração nos atributos químicos do solo e produtividade da cultura do feijoeiro em resposta a aplicação de escórias de siderurgia

Resumo

Grande parte dos solos agrícolas brasileiros são classificados como ácidos e isso resulta na limitação da produção agrícola no país, devido a toxidez por alumínio e a baixa disponibilidade de nutrientes, capaz de reduzir o potencial produtivo das culturas. A prática de correção da acidez do solo se restringe ao uso do calcário, havendo poucas informações em relação às escórias de siderurgia. Diante disso, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação das escórias de siderurgia nos atributos químicos do solo e nas respostas metabólicas e produtividade do feijão em sistema de plantio direto (SPD). O experimento foi instalado em 2010 em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por dois fatores: corretivos e formas de aplicação em 2010, 2013, 2017 e 2019. Os corretivos foram: escória de aço inox, escória de aciaria, escória forno de panela, wollastonita, calcário agrícola, calcário agrícola calcinado e tratamento testemunha, sem a aplicação de corretivo. As formas de aplicação dos corretivos foram superficiais e incorporadas, sendo que em ambos os modos o material foi aplicado de forma manual e somente na forma incorporada o material foi revolvido usando grade niveladora na camada superficial (20 cm). Após 10 meses da última reaplicação dos corretivos de acidez realizou-se a coleta de amostras do solo para a análise química, nas camadas 0 – 10, 10 – 20 e 20 – 40 cm utilizando trado tipo sonda. Passados 16 meses da aplicação dos materiais foi implantada a cultura do feijão e avaliando-se 40 dias após a germinação (estádio R7), altura de planta, massa seca de folhas, o conteúdo relativo de água (CRA), perdas de eletrólitos (PE) e teor de pigmentos (Clo *a*, Clo *b* e caratenoides), teor foliar de macronutrientes e micronutrientes, teor de proteína solúvel total, teor de silício na folha, atividade da enzima superóxido dismutase - SOD, peroxidase e catalase. Foram coletadas de 2 a 5 folhas no terço médio da planta para a realização de todas as análises. Realizou-se também análise de trocas gasosas, selecionando-se uma planta por tratamento e avaliaram-se a fotossíntese, concentração interna de CO₂; condutância estomática ao vapor de água; e taxa transpiratória. Ao final do ciclo da cultura avaliou-se componentes da produção e produtividade de grãos. Os teores de P, pH, V% e Si aumentaram com a aplicação dos silicatos refletindo no número de plantas/metro e na massa de 100 grãos, contudo não mostraram interferência na produção de grãos. O modo de aplicação superficial dos corretivos de acidez aumentou a fotossíntese e a condutância estomática das plantas de feijoeiro. As plantas de feijoeiro apresentaram elevados teores de Fe e Mn, principalmente no tratamento testemunha, proporcionou a ativação das três enzimas SOD, CAT e POD. Os silicatos apresentaram melhores resultados quando comparados aos calcários, no sistema de plantio direto.

Palavra-chave: silicatos; carbonato; silício.

Abstract

Brazilian agricultural soils are classified as acidic and this results in the limitation of agricultural production in the country, due to the toxicity of aluminum and the low availability of nutrients, capable of reducing the productive potential of crops. The practice of correcting the acidity of the soil is restricted to the use of limestone, with information regarding the slag from the steel industry. Therefore, the objective was to evaluate the effect of the application of steelmaking slag on the chemical attributes of the soil and on the metabolic responses and productivity of beans in a no-tillage system (SPD). The experiment was installed in 2010 in randomized blocks with split plots and four replications. The treatments consisted of two factors: correctives and forms of application in 2010, 2013, 2017 and 2019. The correctives were: stainless steel slag, steel slag, ladle slag, wollastonite slag, dolomitic lime, calcined dolomitic lime, plus a negative control, with no corrective application and two ways of materials application, superficial or incorporated. After 10 months of the last re-application of acidity correctives, soil collection for chemical analysis, in layers 0 - 10, 10 - 20 and 20 - 40 cm using a probe type auger. 16 months after the application of the materials, the bean crop was implemented and 40 days after germination (R7 stage), plant height, fresh and dry mass of leaves, relative water content, losses were evaluated. of electrolytes and pigment content (Clo *a*, Clo *b* and caratenoids), leaf macronutrient and micronutrient content, total soluble protein content, leaf silicon content, superoxide dismutase - SOD, peroxidase and catalase enzyme activity. From 2 to 5 leaves were collected in the middle third of the plant to carry out all analyses. An analysis of gas exchange was also carried out, a plant was located for treatment and photosynthesis, internal concentration of CO₂ was evaluated; stomatal conductance to water vapor; and transpiration rate. At the end of the crop cycle, components of production and grain yield were evaluated. The values of P, pH, V% and Si increased with the application of silicates, reflecting in the number of plants/meter and in the mass of 100 grains, however there was no differentiation in grain production. The surface application of acidity correctives increased photosynthesis and stomatal conductance of common bean plants. The bean plants independent of Fe and Mn contents, which provided the activation of the three enzymes SOD, CAT and POD. Silicates had better results when compared to limestones, in the no-tillage system.

Keyword: silicates; carbonate; silicon.

2.1 Introdução

Em muitas regiões do Brasil e do mundo, a acidez do solo é um fator limitante no crescimento e produtividade das culturas. A prática mais utilizada para correção da acidez do solo é a calagem. No Brasil é utilizado de forma mais usual o calcário como corretivo de acidez e, por ser um material pouco solúvel em água é recomendável incorporá-lo ao solo a fim de aumentar a eficiência de correção (FLOWER & CRABTREE, 2011). Além do calcário, as escórias de siderurgia podem ser uma alternativa viável para corrigir a acidez do solo.

A escória de siderurgia é um subproduto gerado a partir da produção de aço. Com o avanço industrial nos últimos anos houve um aumento na produção dos resíduos siderúrgicos, resultando no elevado volume desse resíduo. A fim de mitigar as consequências ambientais causadas pela disposição final desse resíduo em aterros e reduzir o custo de transporte para disposição da escória, as indústrias siderúrgicas incentivam o uso sustentável das escórias na agricultura (BRANCA & COLLA, 2012; ITO, 2015).

No Brasil, apesar do potencial de aproveitamento de escórias de siderurgia de quase 32,1 milhões de toneladas por ano segundo a Relatório Estatístico Anual da Associação Mundial do Aço (WSA, 2018), o aproveitamento agrícola desse subproduto ainda é pequeno. As indústrias siderúrgicas estão concentradas em cinco estados com cerca de 72,6% em Minas Gerais, 14,5 % no Maranhão e o Pará junto, 9,1% no Espírito Santo e 3,8% no Mato Grosso do Sul em produção de aço, conforme mostra o Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico (MME, 2018).

Entretanto, as escórias de siderurgia são pouco utilizadas, sendo somente uma parte destinada a agricultura, cerca de apenas 1%, e outros 3% do total não é reaproveitado e vai para aterro (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017). Ressalta-se ainda que esses materiais ao final do processo nas indústrias siderúrgicas, apresenta-se em pó, facilitando o transporte do material e a aplicação no solo quando implantada junto ao sistema de plantio direto (SPD)(DEUS et al, 2020).

O uso do SPD na agricultura brasileira aumentou nas últimas décadas, por ser uma prática que tem o potencial de melhorar o solo, mantendo os resíduos da cultura na superfície e aumentando o armazenamento de carbono orgânico do solo, bem como, melhora a estrutura dos agregado (PITTELKOW et al., 2015; TAO et al., 2018).

Além disso, com a adoção do SPD, a aplicação de calcário na superfície do solo sem a incorporação mecânica tornou-se uma prática adotada em muitas áreas do país (RHEINHEIMER et al., 2018). Ressalta-se ainda que quando o corretivo é incorporado ao solo ocorre maior área de contato com as partículas do solo aumentando a eficiência de correção em camadas subsuperficiais (GONÇALVES et al., 2011; DEUS et al, 2020). Desse modo, no SPD recomenda-se fazer a calagem em profundidade de 20 cm do solo para que corrija a camada subsuperficial (FURTINI, 2001).

A correção da acidez do solo nas camadas subsuperficiais é importante em regiões de clima seco, pois pode resultar em perdas na produtividade das culturas. Considerando o silicato de cálcio como um corretivo de acidez, sua maior solubilidade (cerca de 6,7 vezes mais solúvel que o calcário) e mobilidade (SiO_3^{2-}) no perfil do solo é uma alternativa viável para a disposição final desses materiais (ALCARDE e RODELLA, 2003). Assim, as escórias de siderurgia têm a capacidade de promover maior correção da acidez do solo por ser mais solúvel na subsuperfície em comparação com calcário (DEUS et al, 2020). Além do potencial de correção da acidez do solo, as escórias de siderurgias são fontes de silício (Si) e apesar de não ser um elemento classificado como nutriente para as plantas, o mesmo é benéfico para algumas espécies vegetais.

O feijoeiro é classificado como uma planta não acumuladora de Si, porém esse elemento (Si) pode proporcionar vários benefícios durante o crescimento e desenvolvimento da planta, tal como maior resistência a pragas e doenças, melhora arquitetura da planta e favorece maior resistência a estresses bióticos e abióticos (AGARIE et al., 1998).

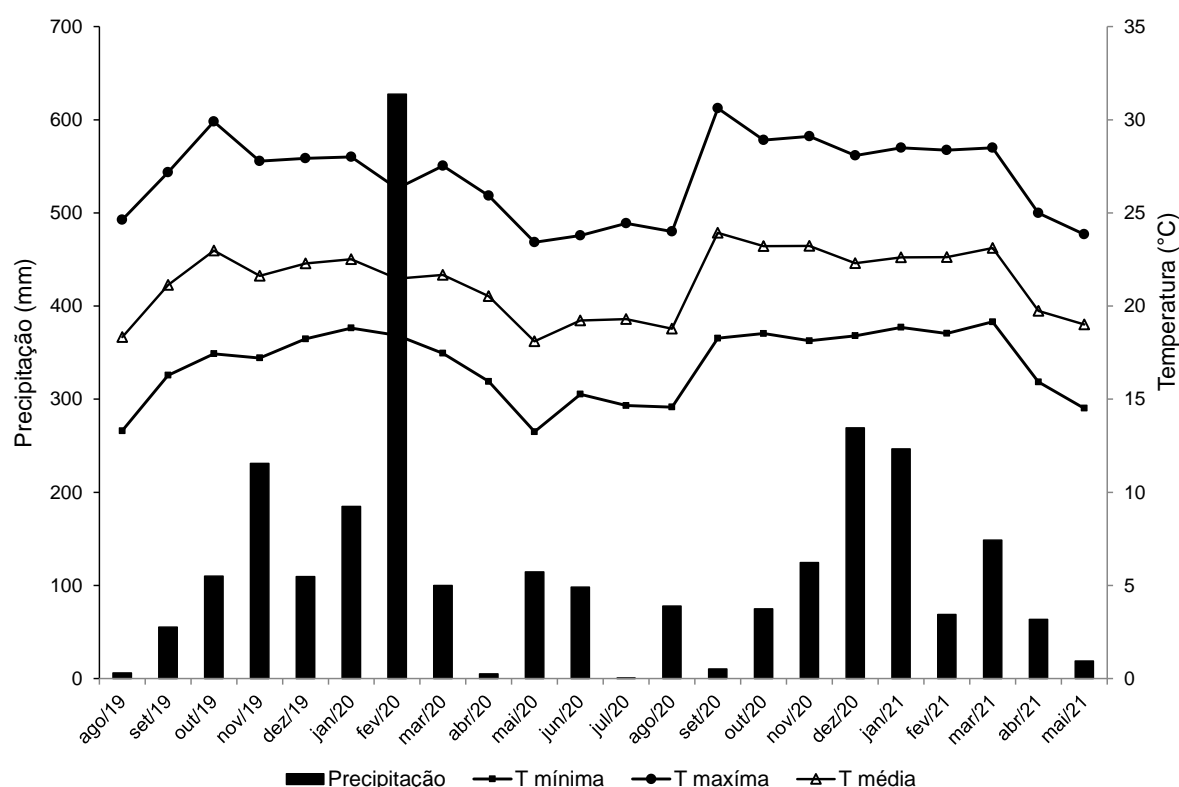
Neste contexto, as hipóteses testadas neste estudo foram que as escórias de siderurgia corrigem a acidez do solo em maior profundidade em relação ao calcário e, que as escórias alteram a capacidade da planta a responder às mudanças fisiológicas e bioquímicas causadas por fatores de estresse biótico e abiótico na cultura do feijoeiro. Diante disso, objetivou-se nesse estudo avaliar o efeito da aplicação das escórias de siderurgia nos atributos químicos do solo e nas respostas metabólicas e produtividade da cultura do feijoeiro em SPD.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Descrição do local e do solo

O experimento foi realizado de agosto de 2019 a maio de 2021 em um Latossolo Vermelho Distrófico, de acordo com a classificação da Embrapa (2018), na Faculdade de Ciências Agrônômicas, em Botucatu, SP, Brasil, nas coordenadas geográficas (22°51'15" S e 48°26'30" W), a 740 m de altitude. De acordo com o Sistema de classificação Köppen, o clima no local é categorizado como Tipo Cwa (clima tropical de altitude, com um inverno seco e um clima quente e húmido verão) (Figura 1).

Figura 1 - Precipitação mensal e temperatura mínima, máxima e média em Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil durante o período de estudo, de agosto de 2019 a maio de 2021



Antes do início dos experimentos, o local encontrava-se em pousio por 20 anos com cobertura vegetal de capim braquiária (*Urochloa decumbens*) sem nenhum cultivo. O primeiro experimento foi implantado no ano de 2010 e recebeu a aplicação superficial e incorporada dos corretivos de acidez do solo, visando a implantação do sistema de plantio direto (SPD). As reimplantações foram realizadas nos anos de 2013

e 2017, com base na análise química do solo do período e nas características químicas de cada corretivo em todas as aplicações o cálculo da dose foi feito para elevar a saturação por bases a 70%.

Anteriormente à quarta reaplicação dos corretivos, em 2019, 30 meses após a terceira a reaplicação, foram coletadas amostras de solo de cada tratamento na profundidade de 0 – 20 cm para caracterização química (Tabela 1), de acordo com a metodologia descrita por Raij et al. (2001). A caracterização física e química dos corretivos (Tabela 2) foi realizada de acordo com a Legislação Brasileira de Calcários (ALCARDE, 2009).

A reaplicação dos corretivos foi realizada em outubro de 2019, de forma manual e a lanço. Para os tratamentos com aplicação incorporada, realizou-se primeiramente a preparação do solo com uma aração e uma gradagem antes da reaplicação, e após a reaplicação, procedeu-se a incorporação com a grade intermediária.

Tabela 1 - Caracterização química do solo em função dos diferentes tratamentos, corretivos de acidez e forma de aplicação antes da reaplicação dos corretivos de acidez

Corretivos	Formas de Aplicação	pH CaCl ₂	M.O. g/dm ³	P _{resina} mg/dm	H+Al -----mmolc	K dm ⁻³ -----	Ca	Mg	SB	CTC	V %
EA	I	5,1	26	21	39	1,2	70	11	76	94	63
W	I	5,3	26	13	35	1,0	45	12	60	76	63
FP	I	4,9	27	12	46	0,9	37	10	48	68	51
EAI	I	4,8	27	14	50	0,9	36	10	49	69	49
CC	I	4,9	29	15	49	1,1	36	12	51	67	52
CA	I	4,5	28	14	63	1,1	31	10	42	64	41
EA	S	5,4	32	24	29	1,3	72	14	85	97	73
W	S	5,1	30	21	46	1,3	71	14	78	89	61
FP	S	5,1	30	18	40	1,1	79	15	89	104	64
EAI	S	5,0	30	21	53	0,8	52	12	67	83	56
CC	S	5,0	29	17	52	1,0	45	12	58	71	54
CA	S	4,8	30	18	53	1,0	49	13	57	81	51
Média		4,9	29	17	46	1,1	52	12	63	87	44
T	I	4,9	27	15	78	0,9	24	6	31	80	56
T	S	5,0	30	29	82	1,3	32	8	41	80	56

EA: escória de aciaria; W: wollastonita; T: testemunha; EFP: escória forno de panela; EAI: escória de aço inox; CAC: calcário agrícola calcinado e CA: calcário agrícola. S: Superficial e I: Incorporado. M.O.: matéria orgânica; SB: saturação por bases. CTC: capacidade de troca cationica.

2.2.2 Delineamento experimental e manejo da cultura

O delineamento adotado foi blocos ao acaso em parcelas subdivididas de 42 m² (6 m x 7 m) com quatro repetições. As parcelas consistiram nas formas de aplicação dos corretivos de acidez do solo, superficial ou incorporado, enquanto as subparcelas materiais corretivos: escória de aço inox (EAI), calcário agrícola (CA), calcário agrícola calcinado (CAC), escória de aciaria (EA), escória de forno de panela (EFP), wollastonita (W), além de uma testemunha (T) sem aplicação dos corretivos.

Os materiais corretivos utilizados estavam na forma de pó prontos para uso na agricultura e foram caracterizados (Tabela 2) de acordo com Brasil (2006). A partir dos resultados obtidos da análise química do solo, e das características dos corretivos calculou-se a dose de cada corretivo a ser reaplicada por subparcela, com base no método da saturação por bases (RAIJ e QUAJJIO, 1983), buscando elevar a saturação por bases do solo a 70% em todos os tratamentos, à exceção da testemunha.

Tabela 2 - Caracterização dos corretivos de acidez do solo

Corretivos	Resultado em %					Unidade
	CaO	MgO	RE	PN	PRNT	
Escória do aço inox	39,67	11,33	70,97	86	61	2,2
Escória de aciaria	35,30	13,10	73,00	72	53	0,9
Calcário agrícola calcinado	52,30	17,90	97,00	139	134	0,2
Calcário agrícola	31,18	16,29	89,36	82	74	1,9
Escória forno de panela	33,35	6,05	74,11	68	51	1,2
Wollastonita	33,38	4,40	99,64	65	64	0,1

RE= reatividade, expressa o percentual do corretivo que reage em três meses; PN= poder neutralizante, expressa o potencial químico do corretivo, em equivalente de CaCO₃; PRNT= Poder Relativo Neutralizante Total.

Antes do plantio do feijão (Cultivar IAC-Imperador) as sementes foram tratadas com fungicida e inseticida Standap Top (70 ml p.c. 30 kg de sementes) (equivalente a 25 g i.a. Piraclostrobina, 225 g i.a. Tiofanato Metílico e 250 g i.a. Fipronil) e ainda inoculadas com inoculante líquido (70 ml de Biomarhyzo - *Rhizobium tropici*).

Foi realizada a semeadura em 19 fevereiro de 2021 utilizando o espaçamento entre linhas de 0,45 m e 12 plantas por metro linear. Para a adubação de semeadura aplicou-se 200 kg ha⁻¹ do formulado 02-20-20, levando-se em consideração os resultados analíticos as médias de todos os tratamentos, exceto a testemunha,

adotando as recomendações de Raij et al. (1996). Ressalta-se ainda que adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a emergência das plantas com a aplicação a lanço de 44 kg ha⁻¹ de N, utilizando o sulfato de amônia.

2.2.3 Amostragem do solo, tecido vegetal e análises químicas.

A coleta para a análise química do solo foi realizada 10 meses após a reaplicação dos corretivos de acidez, coletando-se quatro subamostras por subparcela para constituir uma amostra composta nas camadas de 0 – 10, 10 – 20 e 20 – 40 cm, utilizando trado tipo sonda. A análise química do solo foi realizada conforme a metodologia proposta por Raij et al. (2001) e Si de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et. al, (2004).

As plantas foram coletadas no florescimento pleno, correspondente ao estágio de desenvolvimento R7 do feijoeiro (40 dias após a germinação) e avaliou-se altura de planta, massa fresca e seca de folhas e caules, o conteúdo relativo de água (CRA) (BARR e Weatherley, 1962), perdas de eletrólitos (LAFUENTE et al 1991) e teor de pigmentos (HISCOX & ISRAELSTAM, 1979), teor foliar de macronutrientes e micronutrientes (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), teor de proteína solúvel total (BRADFORD, 1976), o teor de silício na folha foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004), atividade da enzima superóxido dismutase - SOD (GIANNOPOLITIS e RIES, 1977), peroxidase e catalase (LOCK, 1963). Para avaliação das variáveis biométricas e fisiológicas, nutricionais foram coletadas de 2 a 5 folhas no terço médio da planta para a realização de todas as análises. Para as bioquímicas a coleta foi realizada da mesma forma, porém armazenadas imediatamente em nitrogênio líquido para posteriormente realizar o processo de extração e leitura.

Para cada análise de trocas gasosas foi selecionada uma planta por tratamento. Com as leituras foi possível avaliar os seguintes parâmetros: fotossíntese; concentração interna de CO₂; condutância estomática ao vapor de água; e taxa transpiratória. As leituras foram realizadas entre as 9 e 11 horas, com auxílio de um sistema fechado, o qual permite registrar as trocas gasosas composto por um analisador infravermelho de gases (IRGA) modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska – USA).

Ao final do ciclo da cultura foi avaliado o número de vagens por plantas – realizou-se a coleta de 10 plantas dentro da área útil de cada área experimental, sendo determinado mediante a contagem do número total de vagens com pelo menos um grão; o número de grãos por vagem - relação entre número total de grãos e o número total de vagens, avaliados em 10 plantas coletadas dentro da área útil de cada subparcela; a massa de 100 grãos - determinada por meio da pesagem de quatro amostras de 100 grãos, corrigindo-se os dados para 13% de umidade (base úmida) as plantas da área útil de cada subparcela foram colhidas manualmente, secas ao sol e trilhadas mecanicamente.

A colheita foi realizada manualmente 82 dias após a emergência das plântulas coletando-se de 2 linhas de 2 metros por subparcela, para o cálculo de produtividade em $t\ ha^{-1}$, corrigindo-se a umidade dos grãos para 13%.

2.2.4 Análise Estatística

Os dados foram submetidos as pressuposições de normalidade pelo teste de Shapiro - Wilk. Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando significativos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada utilizando o programa estatístico AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO, 2015).

2.3 Resultados

2.3.1 Características químicas do solo

Analisando-se a Tabela 3, observa-se que não houve interação entre as formas de aplicação e os corretivos de acidez do solo para as variáveis: pH, Ca, Mg e V%. Entretanto observa-se efeito isolado em ambos os fatores.

Os maiores níveis de correção do pH foram obtidos na camada de 0 – 10 cm de profundidade pelos corretivos EA, W e CC em relação a T, porém não se diferiram do tratamento CA, que por sua vez foi igual à EAI e FP. Com relação a camada de 10 – 20 cm de profundidade, o maior índice de correção do solo foi observado na aplicação do corretivo EA em relação ao tratamento CC, sendo igual a W, T, FP, EAI

e CA. Assim, em maiores profundidades (20 – 40 cm) notou-se que a W foi superior a T e semelhante a EA, FP, EAI, CC e diferente de CA (Tabela 3).

No fator modo de aplicação superficial observou-se houve efeito significativo nas variáveis V% em relação à aplicação incorporada na profundidade de 0 - 10 cm (Tabela 3). Para o fator corretivos de acidez aplicados no solo mostrou-se efeito significativo para as variáveis V% (na camada de 0 – 10 cm e 20 – 40 cm), teores de Ca (camada de 20 - 40 cm) e teor de Mg (nas três camadas analisadas).

Nota-se também, para o teor de Ca, que os corretivos de acidez na profundidade de 0 – 10 cm promoveram aumento em relação a T, com resultados semelhantes os corretivos EA, W, FP, EAI, CC e diferente CA (Tabela 5). Observa-se que para os teores de Ca na camada de 20 – 40 cm, os tratamentos EA, W, FP, EAI foram superiores à T, semelhante ao CC e diferentes do CA. Para o teor de Mg na camada de 0 – 10 cm, os tratamentos EA, FP, CC e CA proporcionaram maiores valores em relação a T e, diferente de W e EAI. Na camada de 10 – 20 cm a W foi superior a EAI e CC e igual EA, T, FP e CA. Por fim, em maiores profundidades observa-se que o teor de Mg do CC foi superior à T, semelhante ao FP, EAI e CA, diferente de EA e W.

Verificando a V% para o fator corretivos de acidez nota-se que na camada de 0 – 10 cm de profundidade que os corretivos EA, W, CC foram superiores a testemunha, iguais aos corretivos FP, EAI e diferentes dos CA. Na camada de 10 – 20 cm, o valor de V% da EA foi superior a EAI, CC e CA, e semelhante a W, T e FP.

Por fim, na profundidade de 20 – 40 cm para a variável V% os corretivos EA, W, FP, EAI, CC mostraram-se maiores valores em relação a T, diferindo somente do corretivo CA (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores médios de pH em CaCl₂, Ca, Mg e V% do solo após 10 meses da aplicação incorporada e em superfície de escória de aciaria (EA), wollastonita (W), testemunha (T), escória de forno de panela (EFP), escória de aço inox (EAI), calcário calcinado (CC) e calcário agrícola (CA)

Tratamento	pH			Ca			Mg			V%		
	CaCl ₂			mmolc/dm ³								
	Camadas (cm)											
Aplicação (A)	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
Incorporado	5,0 a	4,6 a	4,4 a	46 a	33 a	27 a	11 a	9 a	3 a	56 b	43 a	38 a
Superficial	5,2 a	4,6 a	4,4 a	67 a	40 a	28 a	15 a	9, a	3 a	65 a	46 a	38 a
F	4,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	8,5 ^{ns}	2,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}	7,9 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,4 ^{ns}	11,9*	1,4 ^{ns}	0,0 ^{ns}
Corretivo (C)												
T	3,9 c	4,5 ab	4,0 c	16 c	37 a	14 c	6 b	8 ab	1 c	20 c	44 ab	20 b
EA	5,4 a	5,0 a	4,4 ab	87 a	45 a	33 a	15 a	10 ab	4 bc	74 a	60 a	41 a
W	5,5 a	4,8 ab	4,7 a	70 ab	41 a	32 a	12 ab	13 a	4 bc	74 a	49 ab	44 a
FP	5,3 ab	4,7 ab	4,5 ab	70 ab	40 a	34 a	15 a	10 ab	2 ab	66 ab	49 ab	44 a
EAI	5,2 ab	4,5 ab	4,5 ab	60 ab	32 a	31 a	14,3 ab	7 b	3 ab	66 ab	39 b	42 a
CC	5,5 a	4,3 b	4,6 ab	54 abc	28 a	29 ab	16,1 a	7 b	3 a	70 a	35 b	44 a
CA	4,8 b	4,3 ab	4,3 bc	40 bc	32 a	19 bc	15,3 a	8 ab	3 ab	54 b	37 b	30 ab
F	24,8**	2,6*	6,0**	5,8**	0,8 ^{ns}	8,8*	3,0*	2,8*	6,8**	27,7*	2,0*	7,5**
A x C	1,0 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,64 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CV (%) parcela	7	11	8	48	45	35	35	46	29	16	29	45
CV(%)subparcela	6	10	5	47	49	27	44	39	14	17	38	14

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Não houve interação entre os fatores formas de aplicação e corretivos de acidez para o teor de M.O, P, S e Si (Tabela 4). Contudo, houve interação entre os fatores para as variáveis S na camada de 10 – 20 cm de profundidade.

O modo de aplicação superficial dos corretivos de acidez influenciou os teores de M.O, P e Si até 10 cm de profundidade, apresentando-se maior a aplicação incorporada (Tabela 5). Para o fator corretivos de acidez houve efeito para o teor de P e S na camada de 0 – 10 cm e, somente para o teor de Si nas três camadas até 40 cm de profundidade.

Com relação aos corretivos de acidez, verifica-se para o teor de P na camada de 0 – 10 cm que a EA foi superior a FP, semelhante a T e W e diferente de EAI, CC e CA. Na mesma camada o teor de S da T, apresentou-se maior que EA, W e EAI e semelhante a FP, CC e CA.

Os corretivos de acidez também promoveram efeito significativo nos teores de Si nas três profundidades do solo (0 até 40 cm). Na profundidade até 10 cm, EA, FP, EAI, CC e CA foram superiores a testemunha e igual W. Na camada de 10 – 20

cm, observa-se que EAI proporcionou aumento no teor silício em relação aos tratamentos EA, W e CA, mas mostrou-se semelhante aos tratamentos T, FP e CC. Por fim, na última camada (20 a 40 cm de profundidade), a EA e FP apresentou-se maior que o tratamento T e foi semelhante os tratamentos EAI, CC e, diferente de W e CA.

Tabela 4 - M.O., P, S e Si no solo após 10 meses da aplicação incorporada e em superfície de escória de aciaria (EA), wollastonita (W), testemunha (T), escória de forno de panela (EFP), escória de aço inox (EAI), calcário calcinado (CC) e calcário agrícola (CA)

Tratamento	M.O			P			S			Si		
	g/m ³			mmolc/dm ³			mg kg ⁻¹					
	Camadas (cm)											
Aplicação (A)	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
Incorporado	28 b	25 a	24 a	16 b	13 a	9 a	27 a	57 a	62 a	15 a	15 a	18 a
Superficial	33a	26 a	23 a	27 a	14 a	9 a	26 a	44 b	75 a	18 a	18 a	18 a
F	20,4*	0,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	18,3*	0,5 ^{ns}	4,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	28,5*	2,9 ^{ns}	11,9*	1,4 ^{ns}	0,0 ^{ns}
Corretivo (C)												
T	30 a	27 a	25 a	27 ab	16 a	9 a	45 a	58 a	65 a	10 c	15 ab	14 c
EA	31 a	25 a	23 a	32 a	12 a	10 a	18 b	30 b	75 a	19 a	14 b	22 a
W	32 a	23 a	23 a	22 abc	12 a	9 a	21 b	38 ab	74 a	16 ab	14 b	16 bc
FP	32 a	25 a	25 a	16 c	13 a	9 a	25 ab	58 a	62 a	19 a	19 ab	21 a
EAI	30 a	27 a	24 a	20 bc	15 a	8 a	22 b	49 ab	63 a	19 a	21 a	19 ab
CC	31 a	26 a	23 a	18 bc	14 a	9 a	33 ab	65 a	73 a	20 a	15 ab	17 abc
CA	31 a	26 a	22 a	17 bc	14 a	8 a	25 ab	53 ab	69 a	20 a	14 b	16 bc
F	0,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,5*	0,4 ^{ns}	2,0 ^{ns}	3,14*	4,07**	0,4 ^{ns}	27,7*	2,0*	7,5**
A x C	1,0 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	3,24*	0,3 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CV (%) parcela	14	5	5	36	45	28	12	18	41	30	25	45
CV(%)subparcela	10	9	10	40	40	30	21	33	33	27	23	14

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Para o teor de S, a interação entre o modo de aplicação e os corretivos de acidez na camada de 10 – 20 cm, nota-se que o modo de aplicação superficial apresentou o mesmo comportamento em todos os corretivos aplicados (Tabela 5). Entretanto, para os corretivos aplicados no modo de aplicação incorporado observou-se que a T apresentou maior teor em relação EA e CA, mas foram iguais aos corretivos W e CC e diferente de FP e EAI.

Na aplicação superficial dos corretivos de acidez na camada de 10 – 20 cm, verificou-se, para o teor de S, que os tratamentos EA, T e CA foram os que apresentaram menores teores (Tabela 5), sendo que os demais corretivos aplicados apresentaram teores de S que não diferiram entre si.

Tabela 5 - Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor S no solo

Corretivo*	S (mmlm ³)	
	Incorporada	Superficial
	10- 20 cm	
T	84 aA	32 bA
EA	34 aC	27 aA
W	34 aB	42 aA
FP	61 aBC	55 aA
EAI	44 aBC	54 aA
CC	73 aB	56 aA
CA	68 aC	39 bA

EA – Escória de aciaria, W – Wollastonita, T – testemunha, FP – Escória de Forno de Panela, EAI- Escória de aço inox, CC – Calcário Calcinado, CA - Calcário Agrícola. ns - não significativo. Letras maiúsculas correspondem as comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação. Letras minúsculas correspondem as comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo pelo teste Tukey ao nível de 5% () e 1% (**) de probabilidade.

Com relação aos micronutrientes catiônicos (Tabela 6) a forma de aplicação dos corretivos de acidez somente influenciou os teores de Mn nas camadas de 0 – 10 e 10 – 20 cm e, de Cu na profundidade de 0 – 10 cm com teores mais elevados para a forma incorporada. Com relação aos corretivos de acidez observa-se para o teor de Cu na camada de 0 – 10 cm e 20 – 40 cm que a T foi superior a todos os outros tratamentos com exceção ao FP que apresentou valor estatisticamente igual à T na camada de 20 – 40 cm.

Na camada de 10-20 cm, todos os tratamentos apresentaram teores de Cu estatisticamente iguais, com exceção dos corretivos FP e CC, que diferiram entre si.

Tabela 6 - Valores médios de Fe, Cu, Mn e Zn no solo após 10 meses da aplicação incorporada e em superfície de escória de aciaria (EA), wollastonita (W), testemunha (T), escória de forno de panela (EFP), escória de aço inox (EAI), calcário calcinado (CC) e calcário agrícola (CA)

Tratamento	Fe			Cu			Mn			Zn		
	mg/dm ³											
	Camadas (cm)											
Aplicação (A)	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
Incorporado	0,8 a	23 a	19 a	5,7 a	5,8 a	5,6 a	22 a	26 a	10 a	0,8 a	0,5 a	0,7 a
Superficial	0,9 a	23 a	18 a	5,0 b	5,6 a	5,5 a	18 b	12 b	10 a	0,9 a	0,6 a	0,6 a
F	0,4 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,59 ^{ns}	23,4*	2,70 ^{ns}	1,1 ^{ns}	22,6*	241,4*	0,09 ^{ns}	8,6 ^{ns}	6,8 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Corretivo (C)												
EA	22 b	19 b	19 ab	5,1 b	5,6 ab	5,4 b	21 b	19 a	11 a	0,9 a	0,6 a	0,6 a
W	17 c	21 ab	17 bc	4,9 b	5,7 ab	5,3 b	17 c	19 a	8 a	0,9 a	0,6 a	0,6 a
T	33 a	24 ab	22 a	6,3 a	5,7 ab	6,0 a	27 a	19 a	11 a	0,8 a	0,6 a	0,7 a
FP	20 bc	23 ab	20 ab	5,2 b	5,5 b	5,7ab	22 b	19 a	12 a	0,9 a	0,5 a	0,7 a
EAI	21 bc	25 ab	20 ab	5,3 b	5,7 ab	5,5 b	11 d	19 a	10 a	0,9 a	0,6 a	0,7 a
CC	18 c	26 a	15 c	5,2 b	6,1 a	5,4b	16 c	18a	9 a	0,8 a	0,5 a	0,6 a
CA	22 b	23 ab	18 abc	5,5 b	5,8 ab	5,5 b	17 c	19 a	10 a	0,8 a	0,5 a	0,6 a
F	13,1*	2,8*	7,3**	9,7**	2,0*	5,6**	48,5**	0,3 ^{ns}	1,8 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,6 ^{ns}
A x C	2,8*	2,1 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,6 ^{ns}	38,9**	7,1**	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	5,2**	0,8 ^{ns}
CV (%) parcela	19	14	33	9	6	8	15	18	41	19	22	49
CV(%)subparcela	18	15	11	7	7	4	11	17	25	18	21	15

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Observa-se na tabela 6, que houve interação entre os fatores formas de aplicação e corretivos de acidez para os micronutrientes Mn (0 – 20 cm), Fe (0 - 10) e Zn (10 - 20). Entretanto, para as demais variáveis não houve interação entre os fatores.

Observa-se na tabela 7, o desdobramento da interação dos fatores formas de aplicação e corretivos de acidez para o teor de Fe (0 – 10 cm), Mn (0 – 20 cm) e Zn (10 – 20 cm).

Para o teor de Fe (0 – 10 cm), o desdobramento da interação entre os fatores mostrou que as formas de aplicação incorporada e superficial em todos os tratamentos apresentaram o mesmo comportamento. Nota-se ainda, na aplicação incorporada dos corretivos, que o tratamento W apresentou maior teor de Fe que os corretivos EA e CC e, semelhante aos outros. No modo de aplicação superficial dos corretivos, observa-se que os teores de Fe foram mais elevados na W em relação aos demais tratamentos.

Para o Mn, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, a forma incorporada de aplicação, ou apresentou teor estatisticamente igual à superficial ou maior, exceção para a

wollastonita, que apresentou teor mais elevado na aplicação superficial na camada 0-10 cm.

O teor de Mn na camada de 0 - 10 cm de profundidade na aplicação incorporada dos corretivos de todos os tratamentos apresentaram o mesmo comportamento. Para os corretivos de acidez na forma de aplicação incorporada mostrou que somente o corretivo EAI apresentou valor inferior aos demais tratamentos. Logo, no modo de aplicação superficial verificou que o corretivo W apresentou teor mais elevado de Mn em comparação aos demais tratamentos. Com relação aos corretivos de acidez, notou-se que a W apresentou teor de Mn superior no corretivo CC e CA.

Observando a forma de aplicação incorporada dos corretivos, verifica-se que os valores de Mn na camada de 10 - 20 cm de profundidade apresentaram o mesmo comportamento. Porém, no modo de aplicação superficial o tratamento testemunha apresentou valores mais elevados em relação aos demais tratamentos em ambos os fatores analisados.

O desdobramento da interação entre os fatores para o teor de Zn na profundidade de 10 – 20 cm indicou que no modo de aplicação incorporado do corretivo W apresentou maior teor em relação aos demais tratamentos. Entretanto, no fator corretivos de acidez a W promoveu maior teor de Zn em relação aos demais tratamentos. Contudo, no modo de aplicação superficial o resultado foi ao contrário, mostrando que W apresentou menor valor no teor de Zn entre os demais corretivos. Para o fator corretivos de acidez na aplicação superficial a EAI apresentou maior teor de Zn em relação aos demais tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7 - Desdobramento da interação do modo de aplicação x corretivos de acidez para o teor Fe, Mn e Zn no solo

Corretivo*	Fe		Mn				Zn	
	mg/dm ³							
	Formas de Aplicação							
	Incorporada	Superficial	Incorporada	Superficial	Incorporada	Superficial	Incorporada	Superficial
	0 - 10 cm		0 - 10 cm		10 - 20 cm		10 - 20 cm	
T	22 aAB	22 aB	27 aA	16 bCD	20 aA	22 aA	0,6 aB	0,8 aB
EA	17 aB	17 aB	24 aAB	11 bB	27 aA	10 bB	0,7 aB	0,6 aB
W	28 aA	29 aA	28 aA	28 aA	27 aA	11 bB	0,9 aA	0,5 bB
FP	22 aAB	19 aB	27 aA	19 bBC	28 aA	11 bB	0,4 bB	0,8 aB
EAI	22 aAB	20 aB	23 aB	11 bCDE	27 aA	10 bB	0,5 bB	1,0 aA
CC	19 aB	19 aB	24 aA	8 bE	23 aA	8 bB	0,6 aB	0,6 aB
CA	22 aAB	24 aB	24 aA	10 bDE	26 aA	11 bB	0,4 aB	0,7 aB

*EAI: escória do aço inox, CA: calcário agrícola, CAC: calcário agrícola calcinado, EA: escória de aciaria, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita e T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem as comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo

de aplicação. Letras minúsculas correspondem as comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo pelo teste t de Student $p > 0,05$.

2.3.2 Características fisiológicas, nutricionais e bioquímicas das plantas de feijoeiro

Não houve interação entre os fatores formas de aplicação e corretivos de acidez para todas as variáveis analisadas (Tabela 8). Observa-se que houve efeito isolado na forma de aplicação para as variáveis fotossíntese e condutância estomática, sendo maior no tratamento com aplicação incorporada.

Com relação aos corretivos de acidez aplicados apenas a variável PE apresentou significância, as demais variáveis não houve efeito significativo. Nota-se que somente o tratamento T apresentou menor perda de eletrólitos (PE) em comparação com os demais tratamentos e, igual a EAI e CA.

Tabela 8 - Conteúdo relativo de água no tecido foliar (CRA), perda de eletrólitos (PE) e teor de pigmentos: clorofila a (Clo a), clorofila b (Clo b) e carotenoides (Car), Fotossíntese, Condutância Estomática, Concentração interna de CO₂ e Transpiração em função do efeito de aplicação e corretivos da acidez do solo no feijão cultivar IAC-IMPERADOR

Tratamento	CRA	PE	Clo a	Clo b	Car	Fotossíntese	Cond. Estomática	C. interna de CO ₂	Transpiração
Aplicação (A)	%	-----	µg cm ⁻² de folha	-----		(µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	(mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	(µmol CO ₂ mol ⁻¹)	(mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)
Incorporado	77 a	34 a	10,1 a	10,9 a	2,5 a	12,4 b	0,2 b	280 a	3 a
Superficial	74 a	32 a	10,4 a	11,8 a	2,5 a	14,4 a	0,3 a	286 a	4 a
F	2,83 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,15 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,18 ^{ns}	15,41*	19,20*	6,25 ^{ns}	9,16 ^{ns}
Corretivo (C)									
T	79 a	19 a	10,7 a	10,5 a	2,5 a	12,9 a	0,29 a	291 a	4 a
EA	75 a	38 a	10,1 a	11,8 a	2,1 a	13,6 a	0,28 a	277 a	4 a
W	74 a	39 a	10,7 a	12,2 a	2,7 a	13,2 a	0,29 a	288 a	4 a
FP	74 a	36 a	9,0 a	11,3 a	2,2 a	13,1 a	0,26 a	278 a	4 a
EAI	76 a	31 a	11,4 a	11,5 a	2,8 a	13,5 a	0,31 a	288 a	4 a
CC	78 a	39 a	9,0 a	10,6 a	2,6 a	14,3 a	0,28 a	279 a	4 a
CA	74 a	28 a	11,0 a	11,5 a	2,7 a	13,2 a	0,27 a	281 a	4 a
F	0,69 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,26 ^{ns}	1,28 ^{ns}	0,20 ^{ns}
A x C	0,35 ^{ns}	2,03 ^{ns}	0,44 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,25 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,80 ^{ns}
CV (%) parcela	10	56	33	27	27	15	22	3	20
CV (%) subparcela	10	42	29	15	31	21	32	4	22

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. EA – Escoria de aciaria, W – Wollastonita, T – testemunha, FP – Escoria de Forno de Panela, EAI- Escoria de aço inox, CC – Calcário Calcinado, CA - Calcário Agrícola. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Analisando a tabela 9, nota-se que houve interação entre os fatores formas de aplicação e corretivos de acidez nos teores médios foliares de Mg e Mn (Tabela 9). Para as demais variáveis não houve interação entre os fatores. Observa-se que,

houve efeito isolado no fator modo de aplicação para o teor foliar de K, Ca, Mg, Mn e Zn. Nota-se que o modo de aplicação incorporada foi superior nos corretivos para as variáveis Ca, Mg, Mn e Zn, já para o teor foliar de K esse aumento foi na forma de aplicação superficial.

Com relação aos corretivos de acidez observa-se o efeito isolado nos teores foliares dos macronutrientes K, Ca, Mg e dos micronutrientes Mn e Zn, além de efeitos sobre o teor de Si. Nota-se que a testemunha foi superior em K e Si a todos os demais corretivos. Quanto ao Ca, a testemunha só foi inferior ao tratamento FP, enquanto para o Mg, tanto a W como a EA apresentaram teores inferiores aos demais tratamentos, incluindo a testemunha. A testemunha apresentou teores de Mn mais elevados que todos os tratamentos, que não se diferiram entre si. Para o teor de Zn, a T foi superior a EA, FP e CA e semelhante aos corretivos EAI, CC e, diferente de W (Tabela 9). Com relação aos teores foliares de Si, apenas a testemunha apresentou teores foliares de Si inferiores aos demais tratamentos.

Tabela 9 - Teores médios foliares de nutrientes e de Si de plantas de feijoeiro (cultivar IAC-IMPERADOR) em função da aplicação incorporada e superficial de materiais corretivos da acidez do solo

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
Aplicação (A)	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					g Kg ⁻¹
Incorporado	41 a	2,3 a	17 b	16 a	5,4 a	1,5 a	26 a	11,9 a	1107 a	262 a	30 a	5,1 a
Superficial	39 a	2,5 a	21 a	12 b	4,4 b	1,4 a	27 a	11,2 a	1042 a	188 b	28 b	6,2 a
F	2,2 ^{ns}	1,9 ^{ns}	20,7*	11,3 [†]	48,4**	4,0 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,3 ^{ns}	37,8**	11,2*	17,3 ^{ns}
Corretivo (C)												
T	41 a	2,6 a	24 a	11 b	4,7 c	1,4 a	27 a	11,2 a	1130 a	430 a	34 a	2,6 b
EA	39 a	2,5 a	18 b	15 ab	3,7 d	1,5 a	26 a	9,8 a	1021 a	203 b	28 c	5,1 a
W	40 a	2,5 a	19 b	15 ab	4,0 d	1,5 a	26 a	14,3 a	1060 a	175 b	28 bc	6,4 a
FP	42 a	2,3 a	18 b	16 a	5,1 bc	1,5 a	29 a	11,7 a	999 a	234 b	27 c	5,2 a
EAI	40 a	2,4 a	18 b	14 ab	5,4 abc	1,4 a	28 a	11,1 a	1108 a	151 b	32 ab	5,5 a
CC	40 a	2,3 a	19 b	13 ab	5,8 ab	1,5 a	25 a	11,5 a	1081 a	174 b	30 abc	5,2 a
CA	41 a	2,1 a	17 b	14 ab	6,0 a	1,5 a	25 a	11,3 a	1123 a	208 b	27 c	5,3 a
F	0,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}	5,9**	2,8*	30,0**	0,5 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,2 ^{ns}	23,7**	7,0**	3,43*
A x C	1,0 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,1 ^{ns}	7,4**	0,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,6 ^{ns}	19,6**	2,1 ^{ns}	1,9 ^{ns}
CV (%) parcela	12	27	16	23	10	12	22	45	10	20	9	36
CV(%)subparcela	6	19	14	19	9	14	15	30	25	24	9	21

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. EA – Escória de aciaria, W – Wollastonita, T – testemunha, FP – Escória de Forno de Panela, EAI- Escória de aço inox, CC – Calcário Calcinado, CA - Calcário Agrícola. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Analisando a tabela 10, observa-se o desdobramento da interação entre os fatores para o teor de Mg e Mn. Quanto ao teor de Mg, no modo de aplicação incorporada, nota-se que, à exceção da EA e W que se equivaleram a testemunha, o

comportamento de todos os corretivos foi o mesmo, com teores mais elevados. Já para aplicação superficial, a EA, W e T foram inferiores aos tratamentos FP, EAI, CC e CA.

Verifica-se na forma de aplicação incorporada que todos os corretivos de acidez se apresentaram o mesmo comportamento com teores inferiores a T. Dentro da forma de aplicação incorporada dos corretivos de acidez. Quando se verificam os corretivos de acidez dentro da forma de aplicação superficial que todos os tratamentos se apresentaram iguais. Para os teores de Mn, o modo de aplicação influenciou somente a testemunha, cujo teor foi muito superior na forma incorporada.

Tabela 10 - Desdobramento da interação do modo de aplicação x corretivos de acidez para o teor Mg e Mn na planta

Corretivo*	Mg		Mn	
	mg/dm ³			
	Formas de Aplicação			
	Incorporada	Superficial	Incorporada	Superficial
T	4,7 aB	4,8 aBCD	661 aA	199 bA
EA	34 aB	3,5 aD	195 aB	212 aA
W	4,7 aB	3,9 aCD	170 aB	162 aA
FP	6,1 aA	4,2 bBCD	229 aB	229 aA
EAI	6,2 aA	4,5 b BCD	171 aB	169 aA
CC	6,7 aA	5,0 bAB	177 aB	171 aA
CA	6,7 aA	5,1 bA	212 aB	210 aA

*EAI: escória do aço inox, CA: calcário agrícola, CAC: calcário agrícola calcinado, EA: escória de aciaria, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita e T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem as comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação. Letras minúsculas correspondem as comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo pelo teste t de Student $p > 0,05$.

Verifica-se na tabela 11, que houve interação entre os fatores formas de aplicação e corretivos de acidez para a variável POD. Para as demais variáveis não houve interação entre os fatores. Ressalta-se ainda que houve efeito isolado no fator modo de aplicação para a atividade da enzima SOD que apresentou maior na aplicação incorporada dos corretivos em relação ao modo de aplicação superficial.

Com relação aos corretivos de acidez nota-se que somente houve efeito na atividade da enzima CAT, apresentando maior atividade no corretivo W em relação a T, semelhante a FP, EAI e CA, diferente de EA e CC.

Tabela 11 - Altura de planta (AP), massa seca da folha (MSF), massa seca do caule (MSC), teor de proteína solúvel total (PTS), atividade das enzimas Superóxido dismutase (SOD), Catalase (CAT) e Peroxidase (POD) em função do efeito de aplicação e corretivos da acidez do solo

Tratamento	AP	MSF	MSC	PTS	SOD	CAT	POD
Aplicação (A)	(cm)	g planta ⁻¹		(mg g ⁻¹)	(UI µg proteína ⁻¹)	(UI µg proteína ⁻¹)	
Incorporado	46 a	16 a	4,2 a	11,9 a	1,0 a	577 a	918 a
Superficial	44 a	16 a	4,7 a	11,4 a	2,0 b	496 a	972 a
F	3,42 ^{ns}	0,04 ^{ns}	2,72 ^{ns}	0,27 ^{ns}	11,85*	6,86 ^{ns}	0,89 ^{ns}
Corretivo (C)							
EA	48 a	17 a	4,30 abc	12,1 a	1,3 a	460 bc	815 b
W	46 a	16 a	5,1 ab	10,9 a	1,3 a	641 a	1058 ab
T	39 a	15 a	3,2 c	11,4 a	1,2 a	397 c	1325 a
FP	46 a	17 a	4,8 ab	12,6 a	1,2 a	593 ab	832 b
EAI	44 a	16 a	3,8 bc	11,5 a	1,4 a	609 ab	991 ab
CC	45 a	16 a	4,4 abc	12,3 a	1,0 a	444 bc	780 b
CA	46 a	14 a	5,4 a	10,7 a	1,6 a	610 ab	815 b
F	1,83 ^{ns}	1,34 ^{ns}	4,73**	0,57 ^{ns}	1,69 ^{ns}	2,67 ^{ns}	5,41**
A x C	0,37 ^{ns}	0,44 ^{ns}	9,00**	0,37 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,85 ^{ns}	4,06**
CV (%) parcela	12	35	23	28	15	21	22
CV(%)subparcela	13	15	22	22	31	31	25

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. EA – Escória de aciaria, W – Wollastonita, T – testemunha, FP – Escoria de Forno de Panela, EAI- Escoria de aço inox, CC – Calcário Calcinado, CA - Calcário Agrícola. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

Para a variável MSC, nota-se que o modo de aplicação incorporada dos corretivos que o FP foi maior em relação as demais variáveis. Porém no modo de aplicação superficial, observa-se esse aumento no FP e em outros tratamentos, tal como, EA e CA, em relação a W, T e CC.

Na atividade da enzima POD, o desdobramento da interação entre os fatores mostra que a forma de aplicação superficial para todos os corretivos apresentaram o mesmo comportamento. Com relação aos corretivos de acidez dentro da forma de aplicação incorporada, verificou-se que W e T apresentaram maior atividade da enzima peroxidase. Para o modo de aplicação incorporada nota-se na Tabela 12, que o W e FP foram os que obtiveram maiores valores e relação a EA, T, EAI, CC e CA.

Tabela 12 - Desdobramento da interação do modo de aplicação x corretivos de acidez para a variável MSC e POD na planta

Corretivo*	MSC		POD	
	----- g planta ⁻¹ -----		(UI µg proteína ⁻¹)	
	Formas de Aplicação			
	Incorporada	Superficial	Incorporada	Superficial
T	4 aC	2 bBC	1379 aA	1290 aA
EA	4 aAB	4 aC	797 aB	803 aA
W	6 aA	4 bC	1367 aA	749 bA
FP	3 bBC	6 aA	634 aB	1029 bA
EAI	4 aBC	4 aBC	826 aB	1157 aA
CC	5 aAB	3 bC	708 aB	853 aA
CA	4 bAB	6 aAb	718 aB	911 aA

*EAI: escória do aço inox, CA: calcário agrícola, CAC: calcário agrícola calcinado, EA: escória de aciaria, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita e T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem as comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação. Letras minúsculas correspondem as comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo pelo teste t de Student $p > 0,05$.

2.3.2 Componentes de produtividade do feijoeiro

Não houve interação entre os fatores modo de aplicação e corretivos da acidez do solo para os componentes de produção e produtividade de grãos do feijoeiro (Tabela 13). Para os fatores isolados observa-se que somente o fator corretivo de acidez para a variável massa de 100 grãos apresentou diferença, as demais variáveis não mostraram efeito significativo.

Tabela 13 - Valores médios para as variáveis N° de vagem/planta, N° de grãos/vagem, massa de 100 grãos e produtividade em função do efeito de aplicação e corretivos da acidez do solo no Feijão cultivar IAC-IMPERADOR

Tratamento	N° de vagens por planta	N° de grão por vagem	Massa de 100 grãos	Produtividade (t ha ⁻¹)
Aplicação(A)				
Incorporado	9 a	6 a	26 a	1,14 a
Superficial	9 a	7 a	26 a	1,59 a
F	0,94 ^{ns}	1,00 ^{ns}	3,80 ^{ns}	4,86 ^{ns}
Corretivo (C)				
T	9 a	7 a	26 ab	1,21 a
EA	9 a	7 a	28 a	1,45 a
W	10 a	7 a	28 a	1,56 a
FP	10 a	7 a	28 a	1,61 a
EAI	9 a	7 a	28 a	1,18 a
CC	9 a	7 a	23 ab	1,52 a
CA	9 a	6 a	21 b	1,22 a
F	1,15 ^{ns}	0,64 ^{ns}	5,59*	2,45 ^{ns}
A x C	0,59 ^{ns}	1,53 ^s	2,41 ^{ns}	2,02 ^{ns}
CV (%) parcela	42	43	10	46
CV (%) subparcela	30	23	11	29

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. EA – Escória de aciaria, W – Wollastonita, T – testemunha, FP – Escória de Forno de Panela, EAI- Escória de aço inox, CC – Calcário Calcinado, CA - Calcário Agrícola. ns - não significativo. CV: Coeficiente de variação; Aplicação (A); Corretivos (C).

2.4 Discussão

Verificou-se que os valores de pH do solo em todos os tratamentos usando os corretivos de acidez na camada de 0 - 10 cm foram corrigidos, exceto para o tratamento testemunha que o calcário agrícola cujo p se apresentou abaixo de 5,0.

Um fator relevante que deve ser considerado em condições de campo, é a adubação e correção da acidez quando diz respeito a solos ácidos na camada superficial. Entretanto, a camada subsuperficial permanece nas condições naturais do solo apresentando muitas vezes, alta saturação por Al e baixa saturação por bases (ROSSATO et al, 2009), comprometendo o crescimento e desenvolvimento das culturas.

Apesar dos silicatos apresentarem maior solubilidade, cerca de 6,78 vezes maior que os carbonatos (ALCARDE & RODELLA, 2003), neste estudo não foi observado superioridade das escórias em relação ao calcário na neutralização da acidez do solo. Sendo assim, observam-se resultados semelhantes aos obtidos por Prado & Fernandes (2001) e Fonseca et al. (2007), ao verificar semelhança entre silicato e calcário na correção do pH do solo.

Uma alternativa bastante utilizada para corrigir a acidez do solo é a calagem, no qual pode-se utilizar calcário ou silicatos que proporcionarão ambiente favorável ao crescimento radicular e diminuindo a atividade de elementos tóxicos (VARGAS et al., 2019) e resultar no aumento da V% (JORIS et al., 2013). Diante disso, a calagem possui inúmeros benefícios ao solo, bem como, aumento no efeito residual no perfil do solo (VARGAS et al., 2019), fazendo assim a correção e melhorando a estrutura do solo.

Quando os valores de pH se apresentam abaixo dos valores considerados adequados para que ocorra a disponibilização de nutrientes para as plantas, o mesmo é classificado como acidez ativa alta (RAIJ et al., 1996). Nesse estudo, o corretivo W foi o único que apresentou acidez ativa em concentrações médias nas camadas de 10 – 20 cm e 20 – 40 cm de profundidade após 10 meses de aplicação. Isto pode ser explicado pelo fato de que em maiores profundidades existe maior dificuldade de correção da acidez no solo, entretanto, os silicatos possuem maior reatividade que o calcário, fazendo que a correção do solo atingisse até a camada de 40 cm do solo.

Segundo Rheinheimer et al. (2000), a correção do solo só tem efeito em grandes profundidades se o pH da zona de dissolução do calcário atingir valores entre 5,2 e 5,5, fazendo a liberação dos ânions pelo corretivo que logo serão consumidos pelos cátions de reação ácida (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}). Desse modo, essas reações só irão para as camadas mais profundas do solo se o pH da superfície estiver em torno de 5,5. Portanto, nesse estudo mesmo que a camada superficial do solo apresentasse o pH corrigido, ao longo das profundidades analisadas notou-se o efeito residual maior nos tratamentos que receberam os silicatos.

Quando o solo se encontra com o pH adequado principalmente na camada superficial, há formação e migração de $Ca(HCO_3)_2$ e $Mg(HCO_3)_2$ através de partículas pequenas dos corretivos deslocando-se juntamente com o movimento da água no perfil do solo (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004). Em contrapartida esse efeito pode ser ao contrário caso o solo se encontre em condições não favoráveis,

podendo proporcionar redução ineficiente na acidez do solo e menor disponibilização de Ca com a aplicação dos silicatos em relação ao carbonato (NOLLA et al., 2013). Assim, neste estudo a aplicação dos silicatos apresentou teores de Ca maiores em relação aos carbonatos na camada superficial (0 - 10 cm).

Segundo NOLLA et al., (2013) ao utilizarem a adubação com baixo teor de Mg, com fontes de silicatos e carbonatos, verificaram que os carbonatos tiveram maior disponibilidade de Mg do que os silicatos. Diante disso, nesse estudo os teores de Mg no solo considerados baixos foram nos tratamentos com os corretivos W e EAI que apresentaram teores baixos desse elemento na sua composição. Além disso, o teor de Mg foi encontrado também nas camadas (10 - 20 cm) principalmente no tratamento com corretivo W.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato dos ânions como os nitratos e sulfatos que têm origem através da decomposição dos resíduos culturais ou incremento de fertilizantes, podem promover a movimentação descendente de cátions básicos como o Mg^{2+} e até mesmo Ca^{2+} (CRUSCIOL et al., 2011). Assim, observa-se que os valores encontrados nesse estudo variaram de 16 à 5 $mmolc/dm^3$ na camada superficial (0 – 10 cm), de 10 à 8 $mmolc/dm^3$ na camada de 10 – 20 cm e, na camada mais profunda (20 – 40 cm) de 3 a 2 $mmolc/dm^3$ de profundidade.

O teor de Ca apresentado após a aplicação dos corretivos silicatados mostrou nas camadas mais profundas um efeito benéfico quando diz respeito a correção da acidez do solo nesse estudo. Apesar da solubilização superior apresentada pelos silicatos, esse material foi capaz de corrigir a acidez do solo na camada superficial e na camada 0 - 10 cm usando o corretivo escória de aciaria (EA). Esse aumento pode ter ocorrido devido à presença dessas de pequenas partículas de Ca e Mg presente nos corretivos que foram amostrados junto com o solo e solubilizados no processo de extração, ficando na forma disponível Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A maior disponibilidade do Ca e Mg nos solos refletiu na elevação dos valores de V% nas camadas de 0 -10 cm e 20 – 40 cm após 10 meses da aplicação dos corretivos, condizente com os teores de Ca e Mg no solo. Isto pode ter acontecido na camada superficial (0 – 10 cm) devido aos íons OH^- e o HCO_3^- liberados através da aplicação dos corretivos, resultando na reação de neutralização do pH e consequentemente na disponibilização dos nutrientes (DEUS et al, 2020). Assim, os ânions são liberados pelos corretivos migrando para as camadas mais profundas do

solo, corrigindo a acidez do solo em profundidade (LI et al., 2019). Ressalta-se também que a decomposição dos resíduos vegetais combinado ao SPD promove a liberação ácidos orgânicos de baixo peso molecular da fracção solúvel dos resíduos, que podem aumentar e mobilizar cátions como Ca e Mg, para camadas mais profundas do solo (RHEINHEIMER et al., 2018), conforme mostrado também nessa pesquisa.

Alguns estudos mostram que o uso do SPD tem promovido maiores efeitos benéficos na correção da acidez e elevação da V% em camadas subsuperficiais com aplicação de silicatos em comparação com o calcário aplicado superficialmente sem ser incorporado (CORRÊA et al., 2007; CASTRO et al., 2016).

Outros estudos conduzidos por Corrêa et al. (2007, 2008a, 2009) mostraram aumento da V% e redução do Al^{3+} após 27 meses da aplicação de escória de aciaria (EA) na profundidade do solo de 40 cm, enquanto para o calcário isso foi apresentado até a camada 20 cm do solo. Observa-se que a V% está ligada diretamente ao pH, pois a maioria dos solos intemperizados, predomina minerais 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio, as cargas negativas do solo são em grande parte dependentes de pH que resultará no aumento e disponibilidade Ca, Mg e K aos colóides de argila, principalmente orgânicos, fazendo com que os valores de V% aumentem consecutivamente (QUAGGIO, 2000).

O aumento dos valores de matéria orgânica na aplicação superficial (0 – 10 cm) foi proporcionado pelos restos da cultura anterior na superfície e do não revolvimento do solo que favoreceu o acúmulo da matéria orgânica pela decomposição da palhada, reciclando os nutrientes. Ressalta-se, que em solos cujo manejo adotado é o SPD por longo prazo, o teor de M.O. aumenta na camada superficial do solo, colaborando com dados de Santos et al. (2011). Contudo, o teor de matéria orgânica pode ser reduzido com o aumento da profundidade do solo, devido ao pH encontrar-se alto vai ocorrer um aumento da atividade microbiana, resultando na mineralização da matéria orgânica (DINIZ et al, 2021).

Em solos que apresentam alto teor de M.O, resulta em maior atividade microbiana e conseqüentemente aumento da taxa de decomposição matéria orgânica causado principalmente pela temperatura e aeração no solo (SANTOS et al, 2011). Desse modo, o aumento da matéria orgânica pode diminuir consideravelmente os efeitos negativos causados pela acidificação em solos e, a junção do alto teor de M.O com o SPD (DINIZ et al, 2021) promovendo melhorias nas características do solo e

na disponibilização de nutrientes importantes bem como, o Si, elemento encontrado nos corretivos silicatados. Os dados obtidos no presente trabalho indicam que os silicatos não proporcionaram elevação no conteúdo de M.O. no solo.

O acúmulo do teor de P na camada superficial do solo nesse estudo ocorreu no solo cujo modo de aplicação não envolveu implemento, fazendo com que a deposição das culturas na superfície resulta-se na interação entre os ácidos orgânicos presentes nas plantas com a fase sólida. Com isso ocorreria a ocupação dos sítios de adsorção de nutrientes, competindo entre si e aumentando a disponibilidade do elemento (P) no solo (PAVINATO e ROSOLEM, 2008). Assim, apesar desse elemento apresentar-se com baixa mobilidade no solo, a aplicação desse elemento de forma superficial fica mais retido e, normalmente é mais elevado que os demais nutrientes (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001).

Desse modo, esse estudo mostra que a maior disponibilidade de P com o uso do SPD foi proporcionado principalmente na camada de 0 -10 cm pelo corretivo EA, cujo resultado pode estar associado a composição e natureza química do corretivo, apresentando no corretivo EA um teor de P de 11,0 g.kg⁻¹ apresentados por DEUS et al, (2020).

Outros estudos mostram que há maior disponibilidade de P no solo com aplicação de escórias de siderurgia (PRADO; FERNANDES; NATANE, 2001; CORRÊA et al, 2008), isso pode ser explicado pela competição do ânion SiO₃²⁻ com PO₄³⁻ pelos mesmos sítios de adsorção (KATO & OWA, 1997). Diante disso, neste estudo mostra que o teor de P na camada superficial variou de 32 a 16 mg/dm³, para a EA e de 22 à 12 mg/dm³ para a W em relação a T, sendo significativo apenas para o modo de aplicação superficial dos corretivos. Os maiores teores de P na testemunha podem ser atribuídos à menor extração pelas plantas em razão do menor desenvolvimento da cultura nesse tratamento, influenciado pelo baixo pH.

Os maiores teores de S foram apresentados nas camadas mais profundas do solo, sendo que na camada superficial (0 -10 cm) apresentou uma variação de 45 mmolc/dm³ na T em relação ao menor valor de 18 mmolc/dm³ para a EA. Em maiores profundidades do solo como na camada de 10 – 20 cm, o teor de S foi encontrado elevado no modo de aplicação incorporada. Esse maior movimento de S no solo pode ser influenciado pela precipitação pluvial, temperatura, adubação, manejo dos restos culturais e fertilizantes utilizados (NOGUEIRA & MELLO, 2003) e sobretudo pelo fato

do elemento possuir natureza aniônica (SO_4^{-2}), o qual faz com que ele permaneça na solução do solo nas camadas superficiais devido maior quantidade de cargas negativas, podendo ser lixiviado para as camadas mais profundas do solo, onde se encontram maiores quantidades de cargas positivas (SFREDO, 2008). Não se observam efeitos dos corretivos silicatados no movimento de sulfato, quando comparados aos dois calcários utilizados no experimento.

O teor de silício presente nos corretivos EA (14,4%), EAI (18,5%), CA (6,7%), FP (24,4%), W (24,8%) e CC (1,8%) de Si quando combinado ao pH ideal, resulta na disponibilização desse elemento no perfil do solo (DEUS et al., 2020). Nesse estudo os teores de Si no solo ficaram em torno de 15 a 20 mg dm^{-3} de Si em todos os corretivos aplicados principalmente aqueles tratamentos que receberam silicatos, exceto para T e o corretivo CC cujos valores ficaram abaixo de 15 mg dm^{-3} de Si. Os corretivos que proporcionaram níveis de Si em torno de 20 mg dm^{-3} no solo, valores considerados satisfatórios (KORNDORFER et al., 2001).

O aumento no teor de Si nas camadas de 20 – 40 cm foi proporcionado principalmente pela mobilidade desse elemento no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Meinhardt et al, (2020), mostrando a eficiência dos corretivos na disponibilização de Si no perfil do solo. Segundo Catem, (2013) o pH influencia na disponibilidade de Si no solo, podendo ser solubilizado nas faixas de pH de 4 a 9. Em contrapartida se o pH estiver muito elevado no solo, resulta na polimerização do Si e a formação de complexos de alumínio silicatado que podem ter influência na solubilidade e disponibilidade de Si (PEREIRA et al., 2010).

Observou-se também que após 10 meses de aplicação dos corretivos de acidez, o teor de Mn apresentou interação entre os fatores modo de aplicação e corretivos de acidez semelhante em todos os tratamentos, exceto para o tratamento Wollastonita que se mostrou com teor baixo de Mn em relação aos demais tratamentos (Tabela 8). Uma explicação seria que as escórias utilizadas apresentam quantidades significativas de Mn na sua composição e, o corretivo W (100 mg kg^{-1}) e CD (100 mg kg^{-1}) são os materiais que apresentam teores menores desse elemento, por isso os teores baixos (DEUS, 2014). Já a escória de forno de panela (FP) apresentou maior teor de Mn na forma de aplicação incorporada dos corretivos e no modo de aplicação superficial os maiores teores foram encontrados no tratamento T.

A disponibilização dos nutrientes Cu, Mn, Fe e Zn está diretamente relacionada ao pH do solo que, quando adequado, elevou a solubilidade desses nutrientes no solo.

Os altos teores desses elementos disponíveis no tratamento testemunha estão relacionados a acidez do solo, sendo que em pH de 4,3 e 5,0 no qual encontrava-se neste estudo, há maior disponibilização dos elementos na solução do solo, favorecendo a absorção pelas plantas.

Prado et al. (2001), trabalhando com a aplicação de quatro doses crescentes de escória de aciaria em pré-plantio de cana-de-açúcar, verificaram que a aplicação da escória de siderurgia promoveu efeito residual favorável na disponibilidade de Fe, Cu e Zn no solo. Da mesma forma, Prado et al (2002) notaram maior disponibilidade de Zn e outros elementos como B, Cu, Mn em resposta as diferentes doses de EA no solo caracterizado como Argissolo Vermelho-Amarelo.

O revolvimento realizado no modo de aplicação incorporado do solo juntamente com os restos das culturas na superfície do solo favoreceu a degradação da matéria orgânica e aumentou a disponibilidade do Cu na camada superficial do solo nesse estudo. Essa disponibilidade do micronutriente Cu pode ser influenciada pelo pH do solo (LINDSAY, 1972), que quando corrigido disponibilizada esse elemento para o solo. Entretanto, o excesso desse elemento no solo na forma disponível pode atuar de forma negativa na morfologia e anatomia do sistema radicular das plantas bloqueando a absorção de água e outros elementos, resultando também na redução do crescimento dos vegetais (AMBROSINI et al., 2015; MIOTTO et al., 2014).

As demais variáveis analisadas no solo nas três camadas não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Os valores médios dos teores de K nas camadas foram; 0 -10 cm entre 0,8 a 1,2 mmolc/dm³, 10 – 20 e 20 cm entre 0,6 e 0,8 mmolc/dm³ e, na última camada de 20 - 40 cm entre 0,4 a 0,7 mmolc/dm³ de K. Para o teor de B, os valores médios variaram nas camadas de 0 – 10 cm entre 0,3 – 0,4 mg/dm³ de B, na camada de 10 – 20 cm variou entre 0,3 a 0,5 mg/dm³ de B e, na camada de 20 – 40 cm variou entre 0,4 – 0,5 mg/dm³ de B.

O modo de aplicação superficial dos corretivos de acidez proporcionou aumento da fotossíntese (12,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e condutância estomática (0,2 mol H₂O $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) das plantas (Tabela 8) em relação a aplicação incorporada dos corretivos nesse estudo. Nota-se ainda que os calcários e os silicatos não apresentaram diferença na concentração interna de CO₂ e transpiração para ambos os fatores analisados nesse estudo. Desse modo, o mecanismo de absorção de água pelas plantas nos tratamentos com aplicação superficial de camadas no solo apresentou-se

maior refletindo no aumento da condutância estomática nesse estudo. Resultou também em aumento da perda de eletrólitos no fator corretivos de acidez, variando de $39 \mu\text{g cm}^{-2}$ de PE na folha do feijoeiro no tratamento W, EA, FP e CC em relação a T com valores de PE de $19 \mu\text{g cm}^{-2}$ na folha.

Os teores de nutrientes presentes no feijoeiro apresentaram-se dentro dos valores considerados adequados para a cultura, com exceção de dois micronutrientes Fe e Mn que apresentaram elevados teores, sobretudo para o Fe, que resultaram na ativação das enzimas SOD, POD e CAT (TAVANTI et al, 2021), que atuam com indicadores de estresse (SOUZA et al, 2020).

Há evidências de que o teor de Fe pode servir como um ativador de processos bioquímicos como respiração, fotossíntese e fixação simbiótica de nitrogênio e metabolismo de proteínas envolvidas no crescimento da planta (MARSCHNER, 1995; TAVANTI et al, 2021).

O Fe apresentou teores foliares fora da faixa considerada excessiva para a cultura do feijão neste estudo. Segundo Hansch & Mendel (2009) e MALAVOLTA, (2006) os teores adequados para o feijoeiro é de 200 à 500 mg Kg^{-1} . Esse aumento pode ser causado por diversos fatores, tal como, baixo pH resultando em maior disponibilidade desse micronutrientes para as plantas, podendo causar fitotoxidez (CAMARA, 2015) ou pelo efeito residual do Fe presente nos corretivos aplicados.

Estudos mostram ação neutralizante da acidez do solo das escórias e os calcários são semelhantes, todavia, as escórias de siderurgia apresentam reação mais lenta e efeito residual prolongado no solo (PRADO; FERNANDES, 2000). Essa reação mais lenta da escória pode ser decorrente da presença de impurezas, que podem reduzir a solubilidade da escória ou pela formação de uma película alcalina de oxidróxido de Fe e Al ao redor das partículas do corretivo no momento da hidrólise (ANDO; OWA; ASANO, 1998).

Os teores foliares de Mn apresentaram dentro da faixa considerada adequada para cultura do feijoeiro, exceto para o tratamento testemunha (430 mg kg^{-1}) que se apresentou elevado. Segundo Rosolem e Marubayashi, (1994) os níveis considerados adequados são de 100 à 200 mg kg^{-1} de Mn em folhas do feijoeiro. O aumento no teor de Mn no tratamento T pode ter resultado na redução no porte da planta devido seu efeito fitotóxico (acima de 334 mg kg^{-1} , segundo Kohno & Foy (1983a). Assim, esse aumento nos teores de Mn promoveu a ativação das enzimas antioxidativas que atuam com indicadores de estresse, resultado na ativação das enzimas SOD, CAT e

POD. Esse mecanismo é apenas uma defesa da planta contra estresses bióticos e abióticos (SOUZA et al, 2020; TAVANTI et al, 2021). Ressalta-se ainda que o Si presente nos silicatos pode diminuir os estresses causados por excesso de algum elemento.

No feijoeiro verificou-se que a testemunha apresentou teores foliares de Si (2,6 g Kg⁻¹) menores em relação aos demais corretivos (acima de 5,0 g Kg⁻¹ de Si nas folhas). Isto mostra que neste estudo o uso de silicatos foi eficiente no fornecimento de Si nas três camadas do solo e, conseqüentemente favorecer a absorção de Si pelas plantas, todavia, os silicatos não se diferiram dos calcários. Segundo Gutierrez et al., (2011), o Si e o P ocupam os mesmos sítios de adsorção dos colóides do solo e ambos têm elevada afinidade com o colóide, impedindo ou dificultando a adsorção de Si. Mesmo que o feijoeiro seja uma planta classificada como não acumuladora de Si, a mesma foi capaz de absorver esse elemento, se acumular na parede celular (MA et al., 2001) e resultar na diminuição do estresse causado pelo excesso de nutrientes. Assim, é relevante lembrar que qualquer estresse que a planta passe pode interferir nos componentes de produção e produtividade.

Apesar da produtividade não ter apresentado diferença estatística, verifica-se o efeito positivo dos corretivos de acidez para a massa de 100 grãos (Tabela 12). Deve ser evidenciada a baixa produtividade de grãos obtida no experimento.

Para a massa de 100 grãos, somente o corretivo CA apresentou-se massa 21 g em relação aos demais tratamentos que apresentaram valores mais altos variando de 23 e 28 g para a massa de 100 grãos. Assim, mesmo que tenha apresentado diferença na massa de 100 grãos, isso não foi refletido na produtividade. O excesso de alguns nutrientes, como o Fe e Mn nas plantas do feijoeiro pode ter promovido os mecanismos de defesa das plantas através das enzimas oxidativas, resultando na menor massa 100 grãos no corretivo CA. Ressalta-se ainda que esse resultado não apresentou diferença nos demais parâmetros analisados.

Deus & Büll (2013) utilizando os mesmos corretivos na cultura do feijoeiro também verificaram que não houve diferença entre os corretivos na produtividade, 12 meses após a aplicação dos corretivos.

2.5 Conclusão

Os silicatos estudados apresentaram eficiência semelhante aos calcários na correção da acidez do solo, independente do sistema de manejo do solo.

Os valores de pH, V%, P e Si aumentaram com a aplicação dos silicatos, refletiram na massa de 100 grãos, sem, contudo, influenciarem a produtividade da cultura do feijoeiro.

O modo de aplicação superficial dos corretivos de acidez aumentou a fotossíntese e a condutância estomática das plantas de feijão.

As plantas de feijoeiro apresentaram teores elevados de Fe em todos os tratamentos e Mn apenas no tratamento testemunha induzindo a ativação das enzimas SOD, POD e CAT, que atuam como indicadoras de estresse.

Referências

- AGARIE, S; UCHIDA, H; AGATA, W; KUBOTA, F; KAUFMAN, P. T. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v.1, p.89-95, 1998.
- ANDO, J.; OWA, N. & ASANO, M. Studies on structure, solubility and agronomic response of industrial slag. Effects of aluminium on solubility and agronomic response of slags. Jap. J. **Soil Sci. Plant Nutr.**, 59:27-32, 1998.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.115-123, 2004a.
- ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. **Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos**. CURI, N.; MARQUES, JJ; GUILHERME, LRG; LIMA, JM, p. 291-334, 2003.
- Alcarde J. C. **Official Methodology for Acidity Corrective Analysis**. Porto Alegre-RS, 58p. 2009.
- AMBROSINI V. G; ROSA D. J; CORREDOR P. J. P; BORGHEZAN M.; BASTOS de Melo GW, FONSÊCA S. S. C. R; COMIN J. J; SIMÃO D. G.; BRUNETTO G. Reduction of copper phytotoxicity by liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). **Plant Physiol Biochem**. 2015; 96: 270 – 280.
- BARBOSA J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat – Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos**. Jaboticabal: UNESP, 2015.
- BARR H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. Aust. J. **Biol. Sci.** p. 413-428,1962.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Portaria Nº 110, DE 09 DE JUNHO DE 2006. **Diário Oficial**, Brasília, 09 de junho de 2006. seção 1, p.15-16, 2006.
- BRANCA, T. A.; COLLA, V. **Possíveis usos da escória de siderurgia na agricultura: uma visão geral, reciclagem de materiais - tendências e perspectivas**, (ed. Achilias, D.), InTech (2012).
- BRADFORD M. M. A rapid and sensitive method for the microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye-binding. **Anal Biochem** 72:248–254,1976.
- CÂMARA, G. M. S.; **Adubação**. In: SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T. Soja: do plantio à colheita. Viçosa: UFV, 2015. p.110-148

CATEN, A. **Efeito de silicato e tensões de água no solo no crescimento de maracujazeiro amarelo**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 105 f, 2013.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1307-1317, 2007.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; FERNANDES, D. M.; PERES, M.G.M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1583-1590, 2008(a).

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M.H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.263-272, 2009(b).

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M.; FERRARI N., J.; MANCUSO, M. A. C., Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **J. Soil Sci. Plant Nutr.** 16, 362–379, 2016.

CRUSCIOL, C.A.C.; GARCIA, R.A.; CASTRO, G.S.A.; ROSOLEM, C.A. Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1975– 1984, 2011.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, Leonardo Theodoro. Eficiência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 43, n. 10, p. 1783-1789, 2013.

DEUS, A. C. F. **Aplicação de corretivos de acidez do solo na implantação do sistema plantio direto**. Botucatu, 2014. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T.; GUPPY, C. N.; SANTOS, S. M. C.; MOREIRA, L. L. Q. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, 196, 104422. (2020).

DINIZ, A. P. M. J.; COSTA ARAGÃO, M.; EL-HUSNY, J. C.; PEREIRA, G. M.; HUNGRIA, L. C.; SILVA, B. S. N. Atributos químicos do solo sob sistema plantio direto como indicador de sustentabilidade ambiental. **Brazilian Journal of Development**, 7(1), 3130-3152, 2021.

FURTINI, A. E. F. et al.; **Fertilidade do Solo**. Lavras, 2001.

FLOWER, K.C.; CRABTREE, W.L.; 2011. Soil pH change after surface application of lime related to the levels of soil disturbance caused by no-tillage seeding machinery. **Field Crops Res.** 121, 75–87.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; VIDAL, A. A.; NOGUEIRA, T. A. R. **Efeito da escória de siderurgia e do calcário na disponibilidade de silício no solo.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 4., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, 2007. p.26-28.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superóxido dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology** 59:309–314. 1977.

GUTIERREZ, Robson Santos; INOCÊNCIO, Maykom Ferreira; NOVELINO, José Oscar. Extração de silício em solos fertilizados com fosfato e silicato. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 01-07, 2011.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; BOAS, R.L.V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Sci. Agron.** 33, 369–375, 2011.

ITO, K. **Steelmaking slag for fertilizer use.** Relatório técnico Nippon Steel e Sumitomo Metal No. 109, 2015.

HANSCH, R; MENDEL, RR. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology** 12: 259-266. 2009.

HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal & Botany.**57:1132-1334. 1979.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados estatísticos – Produção siderúrgica brasileira.** Disponível em: < <https://acobrasil.org.br/site/estatistica-mensal/>> Acesso em: 14 mar. 2020.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant soil.**, v. 365, p. 409-424, 2013.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil – Estudos na cultura da cana-de-açúcar. **Jaboticabal**, Funep, 2001. 68p.

PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C. M.; CINTRA, A. C. O.; NATALE, W.; SILVA, M. A. C. Liberação de micronutrientes de uma escória aplicada em um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com mudas de goiabeira (*Psidiumguajava L.*). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, p.536-542, 2002.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.

- PEREIRA, H.S.; GAMA, A. J. M.; CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H. Reatividade de escórias Silicatadas da indústria siderúrgica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 382-390, 2010a.
- PITTELKOW, C. M.; LINQUIST, B. A.; LUNDY, M. E.; LIANG, X.; VAN GROENIGEN, K. J.; LEE, J.; VAN GESTEL, N.; SIX, J.; VENTEREA, R. T.; VAN KESSEL, C. When does no-till yield more? A global meta-analysis. **Field Crops Res.** 183, 156–168. H 2015.
- PRADO, R. M.; FERNANADES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1199-1204, 2001.
- QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. 111p.
- KATO, N.; OWA, N. Dissolution of slag fertilizers in a paddy soil and Si uptake by rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v.43, n.2, p.329-341,1997.
- KORNDÖRFER, G.H.; SNYDER, G.H.; ULLOA, M; POWEL, G. & DATNOFF, L.E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **J. Plant Nut.**, 24:1071-1084,2001.
- KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi, 2004. 50p. (Boletim Técnico n° 02).
- LAFUENTE, M. T.; BELVER, A.; GUYE, M. G.; SALVEIT, M. E. Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. **Plant Physiology**. 95:443-449.1991.
- LINDSAY, W. L. **Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils**. In: MORTVEDT, JJ.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L., ed. Micronutrients in agriculture. Madison, Soil Science Society of America, 1972. p.41-78.
- LI, G. D.; CONYERS, M.; HELYAR, K. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. **Geoderma**, v. 338, p. 236–246, mar. 2019a.
- LOCK, H. Catalase. In: Bergmeyer HU (ed) **Methods of enzymatic analysis**, vol 2. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr, pp 885–894. 1963.
- KOHNO, Y.; FOY, C.D. Differential tolerance of bush bean cultivars to excess manganese in solution and sand culture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.6, n.10, p.877-893, 1983a.
- MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium Tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 6, n. 6, p. 273- 279, 2001.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**. Brasília: MME, 2018. Disponível em: < <https://acobrasil.org.br/site/sobre-o-instituto/>> Acesso em: 23 jan. 2020.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

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

MEINHARDT, J. C; DEUS, A. C. F; BÜLL, L. T. Alterações no sistema solo-planta em função da reaplicação de silicatos no sistema plantio direto. **NATIVA**, Sinop, v. 8, n. 1, p. 08-16. 2020.

MIOTTO, A.; CERETTA C. A; BRUNETTO G; NICOLOSO F. T; GIROTTO E, FARIAS JG, TIECHER TL, De Conti L, Trentin G. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. **Plant Soil**. 2014; 374:593–610.

NOGUEIRA, M.A. & MELO, W.J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:655-663, 2003.

NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; SILVA, T. R. B.; Saraiva, A. Correção da acidez de um Neossolo submetido à aplicação de carbonato e silicato de cálcio. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.2, n.1, p.113-120, 2013.

PRADO, R.M. & FERNANDES, F.M. Eficiência da escória de siderurgia em Areia Quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB Açúcar**, Álcool Subp., 18:36-39, 2000.

TAO, Y.; ZHAO, C.; YAN, Z.; Du, W.-q. He Inter-annual changes in the aggregate-size distribution and associated carbon of soil and their effects on the straw-derived carbon incorporation under long-term no-tillage. **J. Integr. Agric.**, 17 (2018), pp. 2546-2557

VARGAS, J. P. R. de.; SANTOS, D. R. dos.; BASTOS, M. C.; SCHAEFER, G.; PARISI, P. B. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47–60, 2019.

RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agronômico, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81)

RAIJ, B. van; SILVA, N. M.; BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; CATARELLA, H.; BELLINAZZI JR., R.; DECHEN, A. R.; TRANI, P. E. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100).

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

RHEINHEIMER, D.S., SANTOS, E.J.S., KAMINSK, J., BORTOLUZZI, E.C., GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.794-805, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D.S.; TIECCHER, T.; GONZATTO, R.; Brunetto, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018.

ROSSATO, O. B. et al. Correction of soil acidity in the subsurface of na oxisol with Sandy loam texture under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 659-667, 2009.

ROSOLEM, C. A.; MARUBAYASHI, O. M. Seja o doutor do seu feijoeiro. **Informações agrônomicas**, v. 68, p. 01-16, 1994.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1339-1348, 2011a.

SFREDO, G. J. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral. Londrina: **Embrapa Soja**, p. 69, 2008.

SOUZA, M. L. C.; STARLING, C. D. S. A. Z.; MACHUCA, L. M. R.; ZUÑIGA, E. A.; GALVÃO, Í. M.; JESUS GUIMARÃES, J.; BROETTO, F. Biochemical parameters and physiological changes in maize plants submitted to water deficiency. **SN Applied Sciences**, 2(3), 1-9. 2020.

TAVANTI, T. R.; MELO, A. A. R.; MOREIRA, L. D. K.; SANCHEZ, D. E. J.; SILVA, R. S.; SILVA, R. M.; REIS, A. R. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. **Plant Physiol. Biochem.** 2021.

VARGAS, J. P. R. de.; SANTOS, D. R. dos.; BASTOS, M. C.; SCHAEFER, G.; PARISI, P. B. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47–60, 2019.

WSA - World Steel Association. **Steel statistical yearbook 2018**. Bruxelas: World Steel Association. 2018. Disponível em:< <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>>. Acesso em: 23 jan. 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação incorporada dos corretivos de acidez promoveu efeito positivo nos parâmetros fisiológicos, nutricionais (exceto K e Mn) e rendimento das plantas de soja em relação a aplicação superficial.

O excesso de K e Mn proporcionou estresse oxidativo, ativando a enzima SOD, levando a menor produtividade na cultura da soja.

A aplicação dos silicatos elevou a massa de 100 grãos na cultura do feijoeiro, e, em linhas gerais, proporcionou melhores resultados quando comparados aos calcários, no sistema de plantio direto.

Os silicatos não se mostraram eficazes na correção da acidez do solo em profundidade maior que 20 cm, inferindo-se, portanto, que maior solubilidade não implica necessariamente em maior movimentação dos corretivos de acidez em profundidade.

REFERÊNCIAS

- AGARIE, S; UCHIDA, H; AGATA, W; KUBOTA, F; KAUFMAN, P. T. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v.1, p.89-95, 1998.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 29, 923–934, 2005.
- ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. **CURI, N.; MARQUES, JJ; GUILHERME, LRG; LIMA, JM**, p. 291-334, 2003.
- ABREU JR.; C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Sci. Agric.** 60, 337–343, 2003.
- BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Appl. Clay Sci.** 104, 196–204, 2015.
- CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 30, 87–98, 2006c.
- CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **Eur. J. Agron.** 66, 41–53, 2015.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M.; FERRARI N., J.; MANCUSO, M. A. C., Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **J. Soil Sci. Plant Nutr.** 16, 362–379, 2016.
- CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena** 137, 87–99, 2016.
- DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T.; GUPPY, C. N.; SANTOS, S. M. C.; MOREIRA, L. L. Q. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, 196, 104422. (2020).
- FRAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. **Adv. Agron.** 128, 221–275, 2014.
- FINK, J. R.; INDA, A.V.; BAYER, C.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Sci. Agron.** 36, 379, 2014.

FINK, J. R.; INDA, A.V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil Tillage Res.** 155, 62–68, 2016.

FURTINI, A. E. F. et al.; Fertilidade do Solo. Lavras, 2001.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; Büll, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; BOAS, R.L.V.; 2011. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Sci. Agron.** 33, 369–375.

IBSRAM, (1985). **Acid Tropical Soils Management Network**. International Board of Soil Research and Management, Bangkok, Tailândia.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; da SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research** 194, 104307, 2019.

PITTELKOW, C. M.; LINQUIST, B. A.; LUNDY, M. E.; LIANG, X.; VAN GROENIGEN, K. J.; LEE, J.; VAN GESTEL, N.; SIX, J.; VENTEREA, R. T.; VAN KESSEL, C. When does no-till yield more? A global meta-analysis. **Field Crops Res.** 183, 156–168. H 2015.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 24, 797–805, 2000b.

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; & BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, 313, 7-16, 2018.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil Tillage Res.** 155, 437–447, 2016.

WORLD STEEL ASSOCIATION (Bélgica). **Steel Statistical Yearbook 2016**. Bruxelas: [s.n.], 2017.