



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊCIAS
AGRÁRIAS – CECA
AGRONOMIA



MARCOS CÉSAR FERREIRA DA SILVA

REATIVIDADE DE DOIS CORRETIVOS DE ACIDEZ EM UM SOLO DE TEXTURA
MÉDIA

Rio Largo
Alagoas – Brasil
2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CECA
AGRONOMIA**

**REATIVIDADE DE DOIS CORRETIVOS DE ACIDEZ EM UM SOLO DE TEXTURA
MÉDIA**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado
a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus
de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA, como
pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro
agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Wagner de Oliveira.

Rio Largo
Alagoas – Brasil
2023

**Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586r Silva, Marcos César Ferreira da.

Reatividade de dois corretivos de acidez em um solo de textura média /
Marcos César Ferreira da Silva – 2023.
28 f. : il.

Orientador: Mauro Wagner de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Campus
de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio
Largo, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Sistema de produção. 2. Calagem. 3. Toxidez do alumínio. 4. Doses de
Corretivo. I. Título.

CDU: 631.67

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, a minha família e amigos que depositaram confiança e acreditaram que um dia eu estaria aqui finalizando esta fase de minha vida, o caminho foi árduo, mas sinto-me satisfeito por toda a caminhada, e poder agora estar concluindo este sonho.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Mauro Wagner de Oliveira, pela atenção, por ter me ajudado, orientado e por ter contribuído com todo seu ensinamento. Meus sinceros agradecimentos ao senhor, serei eternamente grato por tudo que fez!

A banca por avaliarem este estudo.

Agradeço em especial aos meus amigos Dalmo de Freitas Santos e Cleiton de Andrade Patrício que embarcaram comigo nesta aventura, pelo companheirismo e amizade que cultivamos.

RESUMO

Para que as culturas tenham boa produtividade é necessário adotar práticas agrícolas, que assegurem o suprimento adequados de água e nutrientes, e neutralizem elementos tóxicos do solo, especialmente o alumínio trocável, tanto da camada arável quanto da subsuperfície. Uma destas práticas agrícolas usualmente empregadas tanto nas pequenas, quanto nas médias e grandes propriedades rurais é a correção da acidez do solo, que visa, além de neutralizar o alumínio trocável, fornecer cálcio e magnésio para as plantas. Diversos materiais têm sido usados como corretivos da acidez de solos, tendo como componentes neutralizantes, carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos. No presente trabalho, foi avaliada a reatividade de dois corretivos de acidez em um solo de textura média, com elevada saturação por alumínio: 72,96 %. Os corretivos utilizados foram uma escória de siderurgia (silicato de cálcio), e um calcário dolomítico, aplicados em doses equivalentes a uma, uma e meia, duas vezes, e duas e meia vezes a quantidade predita analiticamente, para elevar a saturação por bases para 60%, usando o acetato de cálcio com extrator do $H^+ + Al^{3+}$. Constou também do estudo um tratamento testemunha, que não recebeu corretivo de acidez. O método utilizado para avaliar a reatividade dos dois corretivos foi a incubação do solo. O delineamento utilizado foi o de blocos, com seis repetições por dose de corretivo. As unidades experimentais foram sacos plásticos com 3,0 kg de solo. Após a mistura dos corretivos ao solo, nas doses correspondentes a cada tratamento, estes foram transferidos para os sacos plásticos e incubados, a 70% da capacidade máxima de retenção de água, por noventa dias. Findo o período de incubação o solo foi analisado quanto ao pH em $CaCl_2$, pH em H_2O , alumínio trocável (Al^{3+}), e saturação por bases (V %). A escória de siderurgia e o calcário dolomítico tiveram a mesma eficiência para neutralizar o alumínio e elevar a saturação por bases. O pH em $CaCl_2$ e pH em H_2O tiveram alta correlação, sendo que em média o pH em H_2O foi 0,50 unidade maior que o pH em $CaCl_2$. A equação para relacionar o pH em $CaCl_2$ com o pH em H_2O foi $Y = 1,0273x + 0,4716$, com $R^2 = 0,9730$. A completa neutralização do Al^{3+} ocorreu quando o pH do solo foi elevado para 5,03 (pH em $CaCl_2$) ou pH 5,50 (pH em H_2O). A extração do $H^+ + Al^{3+}$ com o acetato de cálcio resultou em subestimativa da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC T), e consequentemente da dose do corretivo a ser aplicado. Em média houve necessidade de dobrar a quantidade de corretivo predita analiticamente, para alcançar a saturação por base desejada. A equação para relacionar a saturação por bases com as doses do corretivo, em equivalentes a $CaCO_3$, foi $Y = 9,1476x + 3,8439$, com R^2 de 0,9449.

Palavra-chave: Sistemas de produção, calagem, toxidez do alumínio, doses de corretivo.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Relação entre o pH determinado em solução de CaCl_2 e o pH determinado em água, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a CaCO_321
- Figura 2a e 2b** - Alumínio trocável e pH determinado em solução de CaCl_2 e ou pH determinado em água, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes CaCO_322
- Figura 3 e 4** - Teor de alumínio trocável (Al^{3+}) e a saturação por bases, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a CaCO_324

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados analíticos da amostra do solo utilizado para o estudo de incubação com dois corretivos de acidez.....	18
Tabela 2 - Análise de variância para pH em CaCl ₂ , pH em H ₂ O, alumínio trocável (Al ³⁺), e saturação por bases (V %), no solo incubado com dois corretivos de acidez e quatro doses....	20

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Acidificação dos solos e toxidez do alumínio	14
2.2. Métodos para determinar a quantidade de corretivo a ser aplicado.....	15
2.3 Corretivos de acidez do solo	17
MATERIAL E MÉTODOS.....	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

A agropecuária brasileira evoluiu muito nas últimas décadas e várias tecnologias têm sido adotadas por pequenos, médios e grandes produtores rurais visando o uso de forma mais eficientes dos fatores de produção, o que tem resultado em aumento da produtividade e da lucratividade das lavouras. Dentre estas tecnologias rotineiramente mais empregadas está o uso de corretivos de acidez do solo, que além de fornecer cálcio e magnésio, neutraliza o alumínio tóxico do solo, originário da acidificação do terreno (DEMATTÉ, 2005; SOUSA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2018).

Os produtos mais usados na correção da acidez do solo são os carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e de magnésio. A capacidade de neutralização da acidez do solo é influenciada por diversos fatores, sendo, contudo, a constituição química, a granulometria, a umidade do solo e tempo de contato dos corretivos com o solo os mais importantes (OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2011, ALOVISI et al., 2018).

Nas diversas regiões agrícolas do Brasil tem-se avaliado a qualidade dos corretivos de acidez do solo em laboratórios e no campo. Nos laboratórios, as análises rotineiramente empregadas são a determinação do poder neutralizante do corretivo (PN) e a granulometria, incluindo-se algumas vezes a taxa de reação das frações granulométricas, mantendo-se, neste caso, a umidade das amostras de solo no intervalo de 60 a 80% da capacidade máxima de retenção de água, para potencializar a reação de neutralização do corretivo com o solo (ALCARDE, 2005; KAMINSKI et al., 2002; PRADO et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2018).

A quantidade de corretivo a ser aplicada tem sido estimada, pelo método de neutralização da acidez trocável e da elevação dos teores de cálcio e magnésio (OLIVEIRA et al., 2007) ou pelo método de saturação por bases (RAIJ, 2011). A estimativa da necessidade de calcário pelo critério da saturação por bases pode ter como limitação a determinação do hidrogênio + alumínio ($H^+ + Al^{+3}$), extraídos com acetato de cálcio a pH 7,0, especialmente em solos mais tamponados. Subestimativas do $H^+ + Al^{+3}$, irão repercutir em subestimativa da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 e da dose de corretivo a ser aplicado (KAMINISKI et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2021).

Ante ao exposto, no presente estudo avaliou-se a reatividade de dois corretivos de acidez, uma escória de siderurgia (silicato de cálcio) e um calcário dolomítico, em um solo de textura média, com alta saturação por alumínio. Obtiveram-se também equações de regressão que relacionam as doses de corretivos com o pH em $CaCl_2$ e em pH em H_2O , com o alumínio trocável (Al^{+3}), e com a saturação por bases (V %).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Aproximadamente metade das terras agricultáveis do mundo, são solos ácidos naturalmente ácidos, que limitam demasiadamente o crescimento das culturas, tanto por deficiência nutricional quanto por deficiência hídrica, resultante da inibição do crescimento radicular das plantas. Também no Brasil a grande maioria dos solos são naturalmente ácidos, apresentando baixa saturação por cátions básicos, tais como cálcio, magnésio, potássio e sódio. A deficiência de cátions básicos, associados a altos teores de alumínio, de ferro e de manganês são prejudiciais ao crescimento do sistema radicular e, consequentemente, de toda a planta, com reflexos negativos na produtividade das culturas. O uso de fertilizantes nitrogenados, principalmente os amoniacais, e a remoção de cátions básicos pelas colheitas também podem contribuir para que os solos se apresentem ácidos. Por estes motivos, tem sido prática comum realizar a correção da acidez do solo, empregando-se carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e magnésio (ALCARDE et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2011; REIS et al., 2019).

No Brasil, a pesquisa conduzida por universidades e centro de pesquisas permitiram a incorporação de grandes áreas, outrora marginais ou subutilizadas, ao moderno sistema agropecuário nacional, contribuindo desta forma para o aumento da produtividade da terra, da mão-de-obra e dos insumos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2018). Décadas atrás a acidez excessiva do solo limitava o desenvolvimento das plantas, principalmente devido à toxidez do alumínio e do ferro, e também pelos baixos teores de cálcio, magnésio e fósforo destes solos. Além do baixo teor de fósforo nesses solos, a reação deste nutriente com o alumínio e com o ferro produz compostos (fosfato de ferro e fosfato de alumínio) que são de baixa solubilidade, agravando ainda mais deficiência de fósforo (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA et al., 2023b).

A aplicação de corretivos de acidez dos solos, de gesso agrícola, as adubações químicas realizadas por ocasião da semeadura e em cobertura, a semeadura ou o plantio de híbridos ou variedades mais produtivas, associadas a outras práticas de melhoria da fertilidade e do manejo do solo, aumentou a capacidade produtiva da terra e, consequentemente, das lavouras; um item fundamental para viabilizar economicamente a agricultura e a pecuária nestas áreas inicialmente distróficas (OLIVEIRA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2018; FERNANDES 2021).

2.1 Acidificação dos solos e toxidez do alumínio

O alumínio é um dos elementos químicos mais abundantes nos solos brasileiros, constituindo parte dos minerais secundários, como a caulinita e a gibbsita. Esses minerais são de baixa solubilidade e o alumínio está retido na estrutura cristalina, não tendo efeito tóxico sobre as plantas. Entretanto, nas regiões brasileiras em que por milhares de anos a precipitação excede a evapotranspiração, houve lixiviação dos elementos químicos mais solúveis das camadas mais superficiais do solo. Assim, os cátions básicos como o sódio, o potássio, o magnésio e o cálcio foram arrastados no perfil do solo e gradativamente substituídos por outros menos solúveis ou de maior atração pela fase sólida do solo, como hidrogênio e alumínio, considerados cátions ácidos. Por esses motivos, a quase totalidade dos solos brasileiros é ácida, com teores elevados de alumínio trocável, consequência do alto grau de intemperismo e da intensa lixiviação dos cátions básicos (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b).

A cultura da cana-de-açúcar é uma das mais importantes para Alagoas e para o Brasil. Oliveira et al. (2018) cita que para a cana-de-açúcar ter boa produtividade no primeiro corte e pequenos decréscimos nas rebrotas é necessário adotar práticas agrícolas, que dentre outros fatores, assegurem o suprimento adequados de água e nutrientes, e neutralizem elementos tóxicos do solo, especialmente o alumínio trocável, tanto da camada arável quanto da subsuperfície. Uma destas práticas agrícolas usualmente empregadas tanto nas pequenas, quanto nas médias e grandes lavouras de cana-de-açúcar é a correção da acidez do solo, que visa, além de neutralizar o alumínio trocável, fornecer cálcio e magnésio para as plantas. A ação corretiva dos corretivos de acidez, na maioria das vezes, se restringe à camada arável do solo, sendo necessário o emprego de gesso agrícola para diminuir a saturação por alumínio e elevar a saturação por cátions básicos na camada não arável (DEMATTÉ, 2005; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023a).

O alumínio trocável do solo, e seus efeitos maléficos no desenvolvimento radicular e na fisiologia das plantas, tem sido muito prejudicial à produção das lavouras, especialmente durante períodos de deficiência hídrica, quando a absorção de água e de nutrientes das camadas subsuperficiais é de extrema importância para manter as taxas fotossintéticas das plantas e assegurar boa produtividade em condições de distribuição irregular das chuvas (OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b). Concentrações micromolares do alumínio interferem negativamente na cinética de absorção de nutrientes; na translocação da seiva e dos nutrientes para a parte aérea da planta; e, em algumas situações, induzem à formação de espécies reativas de oxigênio, que, por sua vez, promovem a peroxidação dos lipídios das membranas

da célula vegetal, resultando em modificações nas suas estruturas e nas suas funções. (PEIXOTO, CAMBRAIA, 2009; ROSSILO et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2021).

Conforme citado anteriormente, para aumentar a concentração de cálcio e de magnésio na camada não arável, tem sido utilizado o gesso agrícola, um sulfato de cálcio originário da indústria de fertilizantes fosfatados. A solubilidade do gesso em água é um fator que o diferencia dos calcários: ela não é muito alta, que promova rápida lixiviação de íons nos solos, nem muito baixa, que torne o material pouco reativo no solo. A solubilidade dos corretivos de acidez é baixa: à temperatura de 25 °C a solubilidade do CaCO_3 , do MgCO_3 , do Ca(OH)_2 , do Mg(OH)_2 e do CaSiO_3 é, respectivamente, 0,014; 0,106; 1,85; 0,009 e 0,095 g por litro. Para o gesso, a solubilidade média é de 2,50 g por litro, portanto, 179 vezes maior que o carbonato de cálcio e 24 vezes maior que o carbonato de magnésio (ALCARDE, 2005; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b).

O gesso arrasta o cálcio, o magnésio e o potássio para as camadas mais profundadas, aumentando a saturação por bases e diminuindo consequentemente a saturação por alumínio. Outro efeito benéfico do gesso é a formação do $\text{Al}(\text{SO}_4)^+$, um composto menos tóxico que o alumínio trocável. A redução da saturação do alumínio e o aumento na saturação por bases na subsuperfície permitem maior aprofundamento do sistema radicular das plantas, e esse aprofundamento do sistema radicular propicia melhor aproveitamento da água da chuva retida nas camadas mais profundas, aumentando a tolerância das plantas ao déficit hídrico, com consequente elevação da eficiência dos insumos e da produtividade dos canaviais. Para alguns autores, a disponibilidade de água para as culturas é o principal fator responsável pela variabilidade interanual da produtividade, e os extremos climáticos, como seca mais prolongadas e grande volume de chuvas em curto período de tempo, tendem a se acentuar ainda mais (DEMATTÊ, 2005; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b).

2.2. Métodos para determinar a quantidade de corretivo a ser aplicado

Em várias regiões do Brasil o método mais usado para calcular a quantidade de corretivo a ser aplicado é o método de saturação por bases. A recomendação é aplicar corretivo em quantidade suficiente para elevar a saturação por bases para 60 a 65% da capacidade de troca catiônica do solo, a pH 7,0, abreviadamente designada de CTC (T). A CTC (T) é o somatório dos cátions: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , mais o $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, expressa em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ou $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Para a extração do $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ do solo é empregada uma solução tampão de acetato de cálcio, na concentração de $1,00 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$, a pH 7,0 (RAIJ et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2007). O uso da solução de acetato de cálcio subestima demasiadamente a quantidade de $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$, resultando

em subestimativa da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 e, consequentemente, da dose de calcário a ser a aplicada (ERNANI & ALMEIDA, 1986; KAMINSKI et al. 2002; OLIVEIRA et al., 2018).

A quantidade de calcário (QC) a ser usada, quando se emprega o método de saturação por base, é calculada pela seguinte expressão (Eq.1):

$$QC \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = [(60 - V) \times T] \div PRNT \text{ (Eq. 1)}$$

Em que V = saturação por bases atual do solo; T = capacidade de troca catiônica a pH 7,0; e PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo utilizado.

Citando resultados de diversos estudos, Oliveira et al. (2021) relatam que foram necessários de 1,5 a 2,0 vezes a quantidade de corretivos predita analiticamente para elevar a saturação por bases para 60%. Kaminski et al. (2002), ao compararem métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do Rio Grande do Sul, também verificaram que a extração do $H^+ + Al^{3+}$ com o acetato de cálcio subestimou demasiadamente a necessidade de calcário dos solos estudados, sobretudo para os solos mais tamponados. Oliveira et al. (2023b), relata que em estudos conduzidos em laboratório, com solos de várias regiões canavieiras do centro-sul do Brasil, também constataram subestimativa da necessidade de calcário quando utilizou-se o acetato de cálcio a pH 7,0 na determinação do $H^+ + Al^{3+}$.

Uma das possíveis causas da subestimativa do $H^+ + Al^{3+}$ é que a solução de acetato de cálcio não extrai o alumínio ligado fortemente à matéria orgânica, uma vez que teores não trocáveis do alumínio, extraídos com cloreto de cobre, foram muito próximos aos teores de $H^+ + Al^{3+}$ extraídos com a solução de acetato de cálcio (OLIVEIRA et al., 2023b). Como forma prática para minimizar essa subestimativa, Oliveira et al. (2018) têm recomendado elevar de 1,5 a 2,0 vezes a quantidade de calcário a ser aplicado, predita analiticamente quando se utiliza o acetato de cálcio para a extração do $H^+ + Al^{3+}$.

Outra alternativa para determinar a necessidade de calagem é a incubação de amostras de solos, representativos da região, com quantidades crescentes de corretivos de acidez do solo, obtendo-se, posteriormente, equações que relacionam a saturação por bases com a quantidade de corretivo aplicado. Este método é designado de método de incubação do solo. Na incubação, utilizam-se sacos plásticos com volume útil em torno de dois litros, com quatro a cinco repetições por dose de corretivo e tipo de solo. Geralmente o período de incubação varia de 30 a 90 dias, devendo-se revolver semanalmente o solo dos sacos plásticos, para uniformizar ainda mais a mistura solo-corretivo e também permitir trocas gasosas, principalmente o desprendimento do CO_2 originário das reações de neutralização do carbonato com o H^+ do solo. Durante esse período, deve-se manter a umidade do solo próximo a 80% da capacidade máxima,

repondo-se, caso necessário, com água destilada. Semanalmente são coletadas amostras de solo, determinando-se, posteriormente, o pH em solução de CaCl_2 . A incubação deverá ser interrompida somente quando não houver diferença significativa entre as últimas duas determinações semanais do pH do solo (KAMINSKI et al. 2002; OLIVEIRA et al., 2023b).

Apesar de ser um método muito preciso, praticamente uma simulação do que ocorre no campo, não é um método prático para uso rotineiro, por ser demorado e trabalhoso, sendo empregado apenas em trabalhos de pesquisa, principalmente para aferir os outros métodos (RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2018). Usando o método de incubação de solo, Kaminski et al. (2002) verificaram que os valores de $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ foram 1,58 a 2,50 vezes maiores que os determinados na extração com o acetato de cálcio, na concentração de $1,00 \text{ mol c L}^{-1}$, a pH 7,0. Subestimativa semelhante do $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ extraído com o acetato de cálcio, comparativamente à incubação, foi observado por Oliveira et al. (2007) para solos do cerrado mineiro, com diferentes texturas, cultivados com cana-de-açúcar.

2.3 Corretivos de acidez do solo

Diversos materiais têm sido usados como corretivos da acidez de solos, tendo como componentes neutralizantes, carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos. A capacidade de neutralização da acidez do solo, do alumínio trocável e da elevação da saturação por bases pelos corretivos é influenciada por diversos fatores, sendo, contudo, a constituição química, a granulometria, a umidade do solo e tempo de contato dos corretivos com o solo os mais importantes. No Brasil, avalia-se a qualidade dos corretivos de acidez do solo em laboratórios e no campo. Nos laboratórios, as análises rotineiramente empregadas são a determinação do poder neutralizante do corretivo (PN) e a granulometria, incluindo-se algumas vezes a taxa de reação das frações granulométricas, mantendo-se, neste caso, a umidade das amostras de solo próximo a 80% da capacidade máxima de retenção de água, para potencializar a reação de neutralização do corretivo com o solo (RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b).

Nas análises químicas realizadas em laboratório toma-se o carbonato de cálcio (CaCO_3 puro) como referência, e 1,00 mol de moléculas do CaCO_3 puro (100 g de CaCO_3 puro) neutraliza 2,00 g de H^+ ou 2,0 moles de H^+ . Atribuindo-se a 100 g do CaCO_3 puro um poder neutralizante de 100%, calcula-se por equivalência o poder neutralizante dos outros corretivos. Assim, 100 g de MgCO_3 puro tem capacidade de neutralizar 2,38 moles de H^+ e o poder neutralizante do MgCO_3 puro é, portanto, 119%. Por equivalência química, o CaO , o MgO , o Ca(OH)_2 , o Mg(OH)_2 , o CaSiO_3 e o MgSiO_3 , com 100% de pureza, têm poder neutralizante de

179, 248, 135, 172, 86 e 100%, respectivamente (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2023b).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado no estudo foi um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, no qual constatou-se, por análise prévia, alto teor de alumínio trocável na camada de 0 a 20 cm. Após a coleta do solo para a condução do estudo em laboratório, uma subamostra foi analisada quanto ao pH em água, pH em CaCl_2 , alumínio trocável, bases do solo, a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 e, capacidade máxima de retenção de água, seguindo métodos descritos por De Felippo & Ribeiro (1997), Raij et al. (2001) e Donagema et al. (2011). A análise química de uma amostra deste solo é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados analíticos da amostra do solo utilizado para o estudo de incubação com dois corretivos de acidez.

pH em CaCl_2	pH em H_2O	P -mg dm^{-3}	K 5	Ca 90	Mg 0,29	Al^{3+} -----	H + Al cmolc dm^{-3} -----	SB 0,63	CTC (t) 2,33	CTC (T) 6,19	V 10,18	m 72,96
3,78	4,39	5	90	0,29	0,11	1,7	5,56	0,63	2,33	6,19	10,18	72,96

pH em CaCl_2 ou em H_2O (Relação 1:2,5). P, K, Fe, Zn, Mn e Cu: Extrator Mehlich. Ca, Mg e Al: Extrator KCl. H+Al: Extrator Acetato de Cálcio. **Fonte:** Autor, 2023.

O estudo foi um fatorial 2 x 4: dois corretivos de acidez do solo, aplicados em quatro doses. Os corretivos utilizados foram: uma escória de siderurgia (silicato de cálcio) e um calcário dolomítico, aplicados em doses equivalentes a uma, uma e meia, duas, e duas e meia vezes a quantidade predita analiticamente, para elevar a saturação por bases para 60%. Constou também do estudo um tratamento testemunha, que não recebeu corretivo de acidez. Na extração do hidrogênio mais alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi utilizada a solução de acetato de cálcio, na concentração de 1,00 molc L^{-1} (DE FELIPPO & RIBEIRO, 1997; RAIJ et al., 2001; DONAGEMA et al., 2011).

O método utilizado para avaliar a reatividade dos dois corretivos foi a incubação do solo, por noventa dias, considerado como tempo de referência para a avaliação da reatividade de corretivos de acidez (ALCARDE, 2005; PEREIRA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2018). Depois de secos, os corretivos foram passados em peneira para uniformizá-los quanto à granulometria, utilizando-se nas análises químicas e no estudo de incubação somente a fração que passou pela peneira ABNT número 50. Tanto nas análises de solo quanto nas análises dos corretivos os procedimentos analíticos adotados foram os descritos por De Felippo e Ribeiro (1997) e Raij et al. (2001), Donagema et al. (2011). O poder neutralizante da escória de siderurgia e do calcário dolomítico foram respectivamente de 60% e 94%.

Para o cálculo das massas de corretivos a serem misturadas ao solo foi considerada como sendo de 2.000 t a massa de solo de um hectare. Assim, para cada tratamento, quantidades

equivalentes de CaCO₃, desses corretivos, foram adicionadas a 3,0 kg de terra fina seca ao ar (TFSA), massa de cada unidade experimental. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados, com seis repetições. Após a mistura dos corretivos aos solos, estes foram transferidos para sacos plásticos e incubados a 70% da capacidade máxima de retenção de água. Semanalmente os solos dos sacos plásticos foram retirados, revolvidos, retornando-os aos recipientes e pesando-os posteriormente. Com base no valor da massa de cada saco plástico foi adicionado volume de água destilada necessária para alcançar novamente a massa do solo com 70% de umidade.

Ao término do período de incubação foram realizadas análises químicas do solo dos tratamentos, determinando-se o pH em água, o pH em CaCl₂, o alumínio trocável, as bases do solo, a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 e a saturação por bases. Os valores obtidos foram submetidos a análise de variância e a testes de médias para os corretivos. Quando houve significância foram obtidas equação de regressão para relacionar as doses utilizadas com as variáveis avaliadas, usando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve diferença significativa entre escória de siderurgia e o calcário dolomítico, quanto ao pH em CaCl_2 , pH em água, alumínio trocável, e a saturação por bases. Por outro lado, o efeito de doses desses corretivos foi significativo a 0,1%. Os quadrados médios, a média geral e o coeficiente de variação, para as variáveis analisadas, estão apresentados na tabela 2. A variabilidade experimental foi muito pequena para o pH em água, pH em CaCl_2 e saturação por bases, todos com coeficiente de variação inferior a 5,0%. Entretanto, para o alumínio trocável (Al^{3+}), o coeficiente de variação foi alto, cerca de 25%, porque a partir de uma e meia dose de equivalente a CaCO_3 (4,6 t por hectare), os valores de Al^{3+} foram zero, resultando em alta variabilidade.

Tabela 2 -Análise de variância para pH em CaCl_2 , pH em H_2O , alumínio trocável (Al^{3+}), e saturação por bases (V %), no solo incubado com dois corretivos de acidez e quatro doses.

Fonte de Variação	G L	Quadrados médios			
		pH em CaCl_2	pH em H_2O	Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	V (%)
Corretivo	1	0,0111 ^{ns}	0,0212 ^{ns}	0,0042 ^{ns}	0,1180 ^{ns}
Dose	3	2,4583***	2,9772***	1,9160***	7.102,48 ***
Bloco	5	0,0126 ^{ns}	0,0117 ^{ns}	0,0026 ^{ns}	4,8418 ^{ns}
Resíduo	38	0,0135	0,0148	1,0148	4,4621
Média geral		4,90	5,48	0,20	52,06
C.V.(%)		2,38	2,23	25,94	4,06

*** e ns, respectivamente, significativo a 0,1%, e não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

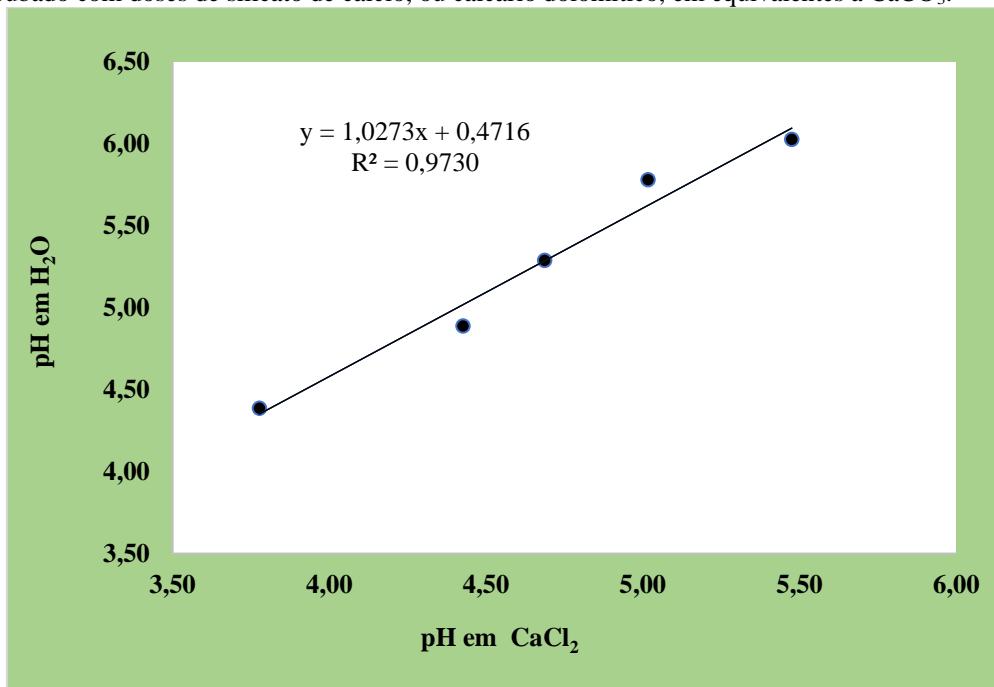
Fonte: Autor, 2023.

Alguns estudos citados na literatura brasileira relatam haver a mesma eficiência da escória de siderurgia e do calcário, na neutralização do Al^{3+} e na elevação da saturação por bases, quanto aplicados em doses equivalentes a CaCO_3 . Prado e Fernandes (2001) mostraram a similaridade da escória de siderurgia em relação ao calcário, incorporados na camada de 0-20 cm em pré-plantio de cana-de-açúcar, na correção da acidez do solo e na elevação da saturação por bases, tanto nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade. Brassioli et al. (2009), em estudo conduzido em campo, com a variedade de cana-de-açúcar SP801842, avaliaram a eficiência de uma escória de siderurgia e de um calcário calcítico, com poder neutralizante, respectivamente de 51,40 e 73,30%. O estudo foi por quatro ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, da cana-planta a terceira rebrota. Os autores também constataram que não houve diferença entre a escória de siderurgia e o calcário, tanto na elevação da saturação por bases, quanto na produtividade da cana-de-açúcar. Guimarães (2019), conduziram um estudo de incubação do

solo, no qual avaliaram os efeitos da aplicação de uma escória de siderurgia comparativamente a um calcário dolomítico. Esta autora também constatou eficiência semelhante entre escória de siderurgia e o calcário dolomítico, na correção da acidez do solo. Igualmente, Nunes et al. (2019) verificaram a mesma eficiência entre uma escória de siderurgia e um calcário dolomítico.

Uma outra análise bastante usual na comparação de fontes de corretivo é a elevação do pH do solo, e geralmente determina-se o pH em CaCl_2 e o pH em água. O pH é a concentração dos íons H^+ livres na solução do solo. Conforme citado na tabela 2, não houve efeito de corretivo na acidez do solo, sendo a escória de siderurgia semelhante ao calcário dolomítico. Contudo o efeito de doses dos corretivos foi altamente significativo. O pH em CaCl_2 e pH em H_2O tiveram alta correlação, sendo que em média o pH em H_2O foi 0,50 unidade maior que o pH em CaCl_2 . A equação para relacionar o pH em CaCl_2 com o pH em H_2O foi $y = 1,0273x + 0,4716$, com $R^2 = 0,9730$. Raij (2011) cita que em média os valores de pH em H_2O são de 0,6 unidades maiores que o pH em CaCl_2 , valores muito próximos aos obtidos no presente estudo.

Figura 1 - Relação entre o pH determinado em solução de CaCl_2 e o pH determinado em água, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a CaCO_3 .



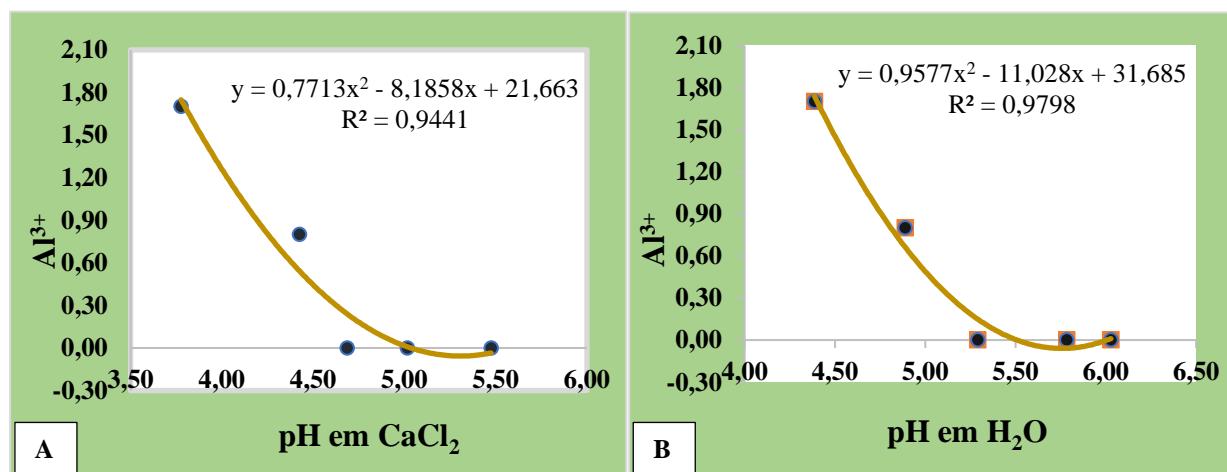
Fonte: Autor, 2023.

O pH determinado em água representa a acidez ativa, sendo, portanto, a concentração de H^+ presente na solução do solo. Desta forma, a concentração de H^+ na solução depende da relação solo: solução, devido ao efeito diluição. Pavan e Oliveira (1997) citam como exemplo que aumentando a relação solo: solução de 1:1 para 1:10 há um aumento no valor do pH em

água devido à menor concentração de H^+ . Por outro lado, o pH determinado em solução de $CaCl_2$ fornece indicações da acidez ativa (concentração de H^+ na solução) e da acidez trocável, uma vez que o cálcio desloca íons H^+ para a solução. A determinação do pH em solução de $CaCl_2$ permite obter resultados mais consistentes do que a determinação do pH em água, pois o pH em água é mais afetado por pequenas quantidades de sais que podem estar nas amostras de solo que chegam ao laboratório, em consequências de adubações, períodos de seca ou de mineralização que ocorrem em amostras úmidas acondicionadas em sacos plásticos (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2018).

Na figura 2-A e 2-B, é mostrado o teor de alumínio trocável, em pH determinado em solução de $CaCl_2$, ou em pH determinado em água, no solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a $CaCO_3$. A completa neutralização do Al^{3+} ocorreu quando o pH do solo foi elevado para 5,03 (pH em $CaCl_2$) ou pH 5,50 (pH em H_2O). O alumínio trocável do solo, e seus efeitos maléficos no desenvolvimento radicular e na fisiologia das plantas, tem sido muito prejudicial à produção da cana-de-açúcar, especialmente durante períodos de deficiência hídrica, quando a absorção de água e de nutrientes das camadas subsuperficiais é de extrema importância para manter as taxas fotossintéticas das plantas e assegurar boa produtividade das lavouras em condições de distribuição irregular das chuvas (OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2013; OLIVEIRA et al., 2023b).

Figuras 2 – Alumínio trocável e pH determinado em solução de $CaCl_2$ e ou pH determinado em água, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a $CaCO_3$.



Fonte: Autor,2023.

O alumínio é um dos elementos químicos mais abundantes nos solos brasileiros, constituindo parte dos minerais secundários, como a caulinita e a gibbsita. Esses minerais são

de baixa solubilidade e o alumínio está retido na estrutura cristalina, não tendo efeito tóxico sobre as plantas. Entretanto, nas regiões brasileiras em que por milhares de anos a precipitação excedeu a evapotranspiração, houve lixiviação dos elementos químicos mais solúveis das camadas mais superficiais do solo. Assim, os cátions básicos como o sódio, o potássio, o magnésio e o cálcio foram arrastados no perfil do solo e gradativamente substituídos por outros menos solúveis ou de maior atração pela fase sólida do solo, como hidrogênio e alumínio, considerados cátions ácidos. Por esses motivos, a quase totalidade dos solos brasileiros é ácida, com teores elevados de alumínio trocável, consequência do alto grau de intemperismo e da intensa lixiviação dos cátions básicos (RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2021).

Mesmo os solos de fertilidade média e de alta fertilidade se acidificam após vários anos de cultivo, devido a grande remoção de cátions básicos pela colheita havendo ainda a acidificação causada pelo uso de adubos amoniacais ou amídicos (PAVAN & OLIVEIRA, 1997; DEMATTÉ, 2005). Além disso, os ânions NO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- , originários da mineralização da matéria orgânica do solo, e também dos fertilizantes, podem também ficar livres na solução e arrastar as bases trocáveis para camadas mais profundas do solo (RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al., 2018).

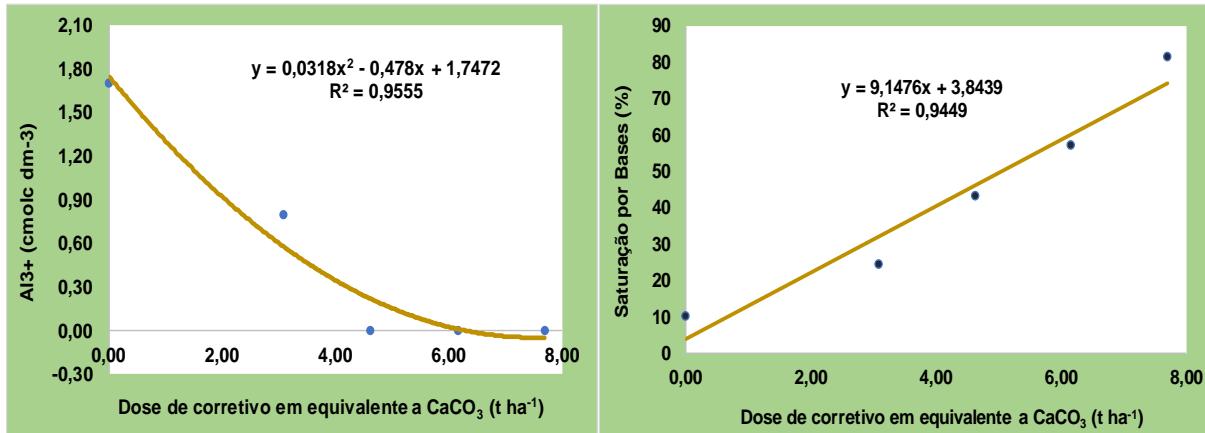
Concentrações micromolares do alumínio interferem negativamente na cinética de absorção de nutrientes; na translocação da seiva e dos nutrientes para a parte aérea da planta; e, em algumas situações, induzem à formação de espécies reativas de oxigênio, que, por sua vez, promovem a peroxidação dos lipídios das membranas da célula vegetal, resultando em modificações nas suas estruturas e nas suas funções. (PEIXOTO, CAMBRAIA, 2009; OLIVEIRA et al., 2023b).

O teor de alumínio trocável (Al^{3+}) e a saturação por bases, em função de doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a CaCO_3 , estão apresentados nas figuras 3 e 4. Pela análise da figura 3, e utilizando-se a equação de regressão $Y = 0,0318x^2 - 0,0478x + 1,7472$, verifica-se que aplicando-se a dose de corretivo predita analiticamente para elevar a saturação por bases a 60%, o equivalente a 3,08 t de CaCO_3 por hectare, o solo ainda teria 0,58 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Usando-se a equação $Y = 9,1476x + 3,8439$ (figura 4), obtém-se para a dose de 3,08 t de equivalente a CaCO_3 por hectare a saturação por bases de 32,02%.

Alguns autores (DEMATTÉ, 2005; OLIVEIRA et al., 2007; RAIJ, 2011; OLIVEIRA et al. 2023a) afirmam que quando a saturação por bases alcança 50%, o teor de Al^{3+} do solo, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, é zero ou muito próximo de zero. Usando-se novamente as duas equações citadas no parágrafo anterior verifica-se haver necessidade de aplicar 5,43 t de equivalente a CaCO_3 por hectare, para alcançar 50% de saturação por bases. Usando a dose de 5,43 t de equivalente

a CaCO_3 por hectare nela equação $Y = 0,0318x^2 - 0,0478x + 1,7472$, constata-se que de fato o valor de Al^{3+} do solo, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, é muito próximo de zero: $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, confirmando as citações de Demattê (2005); Oliveira et al. (2007); Raij (2011) e Oliveira et al. 2023a)

Figuras 3 e 4 - Teor de alumínio trocável (Al^{3+}) e a saturação por bases, em solo de textura média incubado com doses de silicato de cálcio, ou calcário dolomítico, em equivalentes a CaCO_3 .



Fonte: autor, 2023.

Em média houve necessidade de dobrar a quantidade de corretivo predita analiticamente, para alcançar a saturação por base desejada. Por exemplo, para alcançar 60% de saturação por bases houve necessidade de aplicar 6,14 t de corretivo, em equivalentes a CaCO_3 , valor obtido pelo uso da equação $Y = 9,1476x + 3,8439$. A extração do $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ com o acetato de cálcio tem resultado em subestimativa da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC T), e consequentemente da dose do corretivo a ser aplicado. Ernani (1986) em estudo de comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina, já havia alertado para essa limitação do método que o acetato de cálcio para a extração do $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. Kaminski et al. (2002) numa pesquisa de estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário, constatou que a utilização dos valores de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ obtidos pela extração com acetato de cálcio, resultou em recomendação de cerca de 40% da necessidade real de calcário para a dose estimada analiticamente. Oliveira et al. (2018) tem relatado que é preciso elevar de 1,5 a 2,0 vezes a dose de calcário predita analiticamente para se alcançar os valores desejados de saturação por bases.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir:

A escória de siderurgia e o calcário dolomítico tiveram a mesma eficiência para neutralizar o alumínio e elevar a saturação por bases;

O pH em CaCl_2 e pH em H_2O tiveram alta correlação, sendo que em média o pH em H_2O foi 0,50 unidade maior que o pH em CaCl_2 . A completa neutralização do Al^{+3} ocorreu quando o pH do solo foi elevado para 5,03 (pH em CaCl_2) ou pH 5,50 (pH em H_2O).

A extração do H^+ + Al^{3+} com o acetato de cálcio resultou em subestimativa da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC T), e consequentemente da dose do corretivo a ser aplicado. Em média houve necessidade de dobrar a quantidade de corretivo predita analiticamente, para alcançar a saturação por base desejada.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C. **Corretivo de acidez dos solos:** características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, p. 24, (Boletim Técnico, 6). 2005.
- ALOVISI, A. M. T, AGUIAR, G. C. R., ALOVISI, A. A., GOMES, C. F., TOKURA, L. KAZUE, LOURENTE, E. R. P., MAUAD, M., SILVA, R. S. Efeito residual da aplicação de silicato de cálcio e magnésio nos atributos químicos do solo e na produtividade da cana-soca. **Revista Agrarian**, v.11, n. 40, p. 150 -158. 2018.
- DE FELIPO, B.V., RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo** (metodologia). 2^a edição. Viçosa-MG: UFV, 1997. 26 p. (Boletim de Extensão, 29).
- DEMATTÊ, J. L. I. (2005). Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Informações Agronômicas**, n. 111, set., 2005.
- DONAGEMA G.K.; CAMPOS D.V.B.; CALDERANO S.B.; TEIXEIRA W.G; VIANA J.H.M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.
- ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.2, p.143-150, maio/ago. 1986.
- FERNANDES, L. S. Reação de um solo a doses de silicato de cálcio. Trabalho de conclusão de curso. Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Universidade Federal de Alagoas. 28 p. 2021.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D.S., GATIBONI, L.C., MARTINS, J.R., SANTOS, E.J.S., TISSOT, C. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 26:1107-1113, 2002.
- OLIVEIRA, M. W.; FREIRE, F. M.; MACÊDO, G. A. R.; FERREIRA, J. J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, 2007.
- OLIVEIRA, M.W., MACÊDO, G.A.R., MARTINS, J.A., SILVA, V.S.G., & OLIVEIRA, A.B. **Mineral Nutrition and Fertilization of Sugarcane**. In: Alexandre Bosco de Oliveira. (Org.). Sugarcane - Technology and Research. 1ed. London: INTECH - Open Science, 1,169-191. DOI:10.5772/intechopen.72300. 2018.
- OLIVEIRA, M.W., NASCIF, C., OLIVEIRA, T. B. A., RODRIGUES, T. C., ASSIS, W. O., SANTOS, D. F., MOURA, S. C. S. Adubação verde com crotalária juncea em áreas de implantação ou reforma de canaviais, em pequenas propriedades rurais. *In: Extensão Rural: práticas e pesquisas para o fortalecimento da agricultura familiar*, 2. p. 45-66. 2021.

OLIVEIRA, M.W. et al. Production and quality of sugarcane forage RB92579 as a function of phosphate fertilization applied in the fourth regrowth. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v.16, n.42, p. 247-261, 2023a.

OLIVEIRA, M.W. et al. **Aluminium toxicity in the era of climate change and their management strategies**. In: Rajan Bhatt et al. (Org.). Climate Smart Sugarcane Cultivation. p. 25 a 50. 2023b.

PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L. **Manejo da acidez do solo**. Londrina, IAPAR, 1997. 86 p.

PEIXOTO, P. H. P., CAMBRAIA, J. Composição de ácidos graxos em raízes de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, v. 68, p. 29-33. 2009.

PEREIRA, H. S. et al. Reatividade de escórias silicatadas da indústria siderúrgica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 382-390, 2010

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.201-209, 2001.

PRADO, R. DE M., FERNANDES, F.M., NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo, e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Sci. Agric.** 59, p. 129 -135. 2002.

RAIJ, B. et al. **Análise de solo para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC. 2001. 285 p

RAIJ, B. **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. 1. ed. Piracicaba - SP: IPNI - International Plant Nutrition Institute, 420 p. 2011.

REIS, M. C.; ANDRADE, B. B.; VASCONCELOS, G. R. Silicato de cálcio e magnésio no milho segunda safra: fitossanidade, fertilidade do solo e produtividade. **Revista do COMEIA**, v. 1, p.9-22. 2019.

ROSSIELLO, R. O. P., ZONTA, E., BUCHER, C. A. Mais de uma década de pesquisas sobre o alumínio em plantas: progressos em mecanismos de toxidez e de tolerância ao estresse. In: Manlio Silvestre Fernandes; Sonia Regina de Souza; Leandro Azevedo Santos. (Org.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2 ed. Viçosa: SBCS, 2018, v. 1, p. 600-647. 2018.

SOUZA, D. M. G. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, F. R. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205 - 274.