

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Rodrigo Knevitz Hammerschmitt

**RESIDUALIDADE E REAPLICAÇÃO DE CORRETIVO DA ACIDEZ,
ASSOCIADA OU NÃO AO GESSO, EM LATOSSOLO NO CERRADO:
ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO PERFIL E
BAIXO IMPACTO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO**

Santa Maria, RS
2021

Rodrigo Knevez Hammerschmitt

**RESIDUALIDADE E REAPLICAÇÃO DE CORRETIVO DA ACIDEZ, ASSOCIADA
OU NÃO AO GESSO, EM LATOSSOLO NO CERRADO: ALTERAÇÕES NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO PERFIL E BAIXO IMPACTO NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Hammerschmitt, Rodrigo Knevez
RESIDUALIDADE E REAPLICAÇÃO DE CORRETIVO DA ACIDEZ,
ASSOCIADA OU NÃO AO GESSO, EM LATOSSOLO NO CERRADO:
ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO PERFIL E
BAIXO IMPACTO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO /
Rodrigo Knevez Hammerschmitt.- 2021.
68 p.; 30 cm

Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos
Coorientador: Fábio Joel Kochem Mallmann
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Reacidificação do solo 2. Modos de aplicação 3.
Calcário 4. Sistema plantio direto 5. Disponibilidade de
nutrientes I. dos Santos, Danilo Rheinheimer II.
Mallmann, Fábio Joel Kochem III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, RODRIGO KNEVITZ HAMMERSCHMITT, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Rodrigo Knevez Hammerschmitt

**RESIDUALIDADE E REAPLICAÇÃO DE CORRETIVO DA ACIDEZ, ASSOCIADA
OU NÃO AO GESSO, EM LATOSSOLO NO CERRADO: ALTERAÇÕES NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO PERFIL E BAIXO IMPACTO NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 29 de janeiro de 2021:



Danilo Rheinheimer dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Fábio Joel Kochem Mallmann, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Gerson Laerson Drescher, Dr. (UARK)



Edson Campanhola Bortoluzzi, Dr. (UPF)

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial, meus pais Mário José Hammerschmitt e Leci Knevitiz Hammerschmitt, e meus irmãos Bruno e Cesar Knevitiz Hammerschmitt pela amizade, amparo, ensinamentos e apoio em todas as minhas escolhas.

À minha parceira Daniela Basso Facco, que esteve ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em especial ao Departamento de Solos, pela estrutura disponibilizada, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela oportunidade de realizar o curso de mestrado, e à CAPES, pela bolsa concedida.

À Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT), pela disponibilidade do experimento utilizado neste trabalho e pelo apoio e estrutura fornecida durante o desenvolvimento das atividades, em especial aos pesquisadores Fábio Benedito Ono e Leandro Zancanaro, que intermediaram a parceria UFSM/Fundação MT.

Ao professor orientador Danilo Rheinheimer dos Santos, pela confiança, ensinamentos e orientação desprendidos durante o período do mestrado.

Ao professor coorientador Fábio Joel Kochem Mallmann, pelo apoio, ensinamentos e orientação desprendidos durante o período do mestrado.

Ao professor Gustavo Brunetto, pelos conselhos, incentivo e ensinamentos ofertados no decorrer da minha trajetória acadêmica.

A todos os professores do PPGCS pela amizade, ensinamentos e convívio.

Aos funcionários do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul da Fundação MT, ao Gerson Laerson Drescher e à Daniela Basso Facco, pelo auxílio na coleta das amostras de solo.

A todos os colegas do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFSM, pela amizade, convivência e aprendizados.

À banca examinadora, composta por Gerson Laerson Drescher e Edson Campanhola Bortoluzzi, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e por contribuir na minha formação acadêmica.

A todos o meu sincero Obrigado!

RESUMO

RESIDUALIDADE E REAPLICAÇÃO DE CORRETIVO DA ACIDEZ, ASSOCIADA OU NÃO AO GESSO, EM LATOSSOLO NO CERRADO: ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NO PERFIL E BAIXO IMPACTO NA PRODUTIVIDADE DA SOJA E DO MILHO

AUTOR: Rodrigo Knevez Hammerschmitt
ORIENTADOR: Danilo Rheinheimer dos Santos

A reacidificação dos solos é um processo lento e inicia a partir da superfície. Em solos sob sistema plantio direto (SPD) a reacidificação pode ser controlada pela reaplicação de calcário em superfície, desde que, a correção da acidez potencial natural do solo tenha sido feita adequadamente. Há ainda algumas dúvidas quanto à necessidade ou não de se reiniciar o SPD quando ele não foi corretamente adotado. O gesso agrícola é utilizado no solo com o objetivo de melhorar o ambiente para crescimento radicular em profundidade devido a sua maior solubilidade em água. Dessa forma, o uso combinado do calcário e do gesso agrícola pode favorecer a correção da acidez do solo e melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo das camadas mais profundas. O objetivo do estudo foi avaliar as alterações na distribuição vertical de nutrientes e dos atributos da acidez do solo e o rendimento das culturas decorrentes de estratégias de reaplicação de corretivo da acidez e do gesso agrícola e verificar se há necessidade de reinício do SPD, com incorporação do calcário, para correção da reacidificação do solo em Latossolo do bioma Cerrado. O bioma natural foi convertido em sistema agrícola em 1983, e até 2008 o solo foi revolvido constantemente e realizado a aplicação e reaplicações de corretivos da acidez. A conversão do sistema de cultivo convencional para SPD foi feito simplesmente parando o revolvimento do solo. Entre 2008 e 2012, embora cultivado com culturas de grãos, não foram adicionados corretivos da acidez e nutrientes às plantas. Em setembro de 2012, seis tratamentos foram aplicados, seguindo duas estratégias: i) manutenção do SPD: sem reaplicação de corretivo da acidez e sem adição de gesso (SC), aplicação superficial de gesso (GS), reaplicação superficial de corretivo da acidez (CS) e reaplicação superficial de corretivo da acidez associado à adição superficial de gesso (CS+GS); e ii) reinício do SPD: incorporação do corretivo da acidez (CI) e incorporação do corretivo da acidez associado à adição superficial do gesso (CI+GS). Em setembro de 2019, sete anos após a instalação do experimento, o solo foi amostrado em oito camadas estratificadas até 50 cm de profundidade (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-40 e 40-50 cm). Solo sob bioma natural, também foi coletado. Foram analisados os atributos químicos da acidez do solo, a disponibilidade de nutrientes e a produtividade das culturas de soja (*Glycine max* L. Merrill) e de milho (*Zea mays* L.). A comparação dos atributos da acidez do solo sob bioma natural com aquele transformado em sistema agrícola há 36 anos e sem reaplicação de corretivo há mais de uma década evidencia que o processo de reacidificação do solo é lento. A reaplicação superficial de calcário no solo diminuiu a saturação por alumínio até 25 cm de profundidade, sem, no entanto, a sua neutralização total e se mostrou suficiente para manter níveis adequados dos atributos da acidez e da disponibilidade de nutrientes do solo. A incorporação do corretivo da acidez alterou os atributos da acidez do solo de forma mais homogênea na camada arável do solo (0-20 cm), com efeitos restritos ao solo da camada mobilizada. Entretanto, esta estratégia não resultou em grandes benefícios relacionados a melhoria nos atributos da acidez do solo quando comparada a aplicação superficial de calcário. A aplicação de gesso agrícola não alterou a dinâmica do alumínio no perfil do solo e tampouco a produtividade das culturas. A produtividade da soja apresentou resposta positiva à reaplicação do corretivo da acidez do solo, independente da forma de reaplicação (aumento de 252 kg ha⁻¹). O milho respondeu positivamente apenas quando o calcário foi aplicado de forma incorporada e associado ao gesso (aumento de 578 kg ha⁻¹) comparado ao tratamento SC, mas não diferiu dos tratamentos que receberam calcário. Os prejuízos do revolvimento do solo para incorporação do corretivo em SPD são maiores que os ganhos com o aumento da produtividade do milho. Não há necessidade de incorporar o corretivo da acidez, uma vez que a correção da acidez natural tenha sido feita adequadamente, e tampouco adicionar gesso agrícola ao solo nessas condições.

Palavras-chave: Reacidificação do solo. Modos de aplicação. Calcário. Sistema plantio direto. Disponibilidade de nutrientes.

ABSTRACT

RESIDUAL EFFECT AND REAPPLICATION OF SOIL ACIDITY CORRECTIVE ASSOCIATED OR NOT WITH GYPSUM IN A CERRADO'S OXISOL: CHANGES IN SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN PROFILE AND LOW IMPACT ON SOYBEAN AND CORN YIELD

AUTHOR: Rodrigo Knevez Hammerschmitt

ADVISOR: Danilo Rheinheimer dos Santos

Soil reacidification is a slow process and starts from the surface. In soils under a no-tillage (NT) system the reacidification can be controlled by reapplying lime on the surface provided that the soil native potential acidity correction was done properly. There are still questions regarding the necessity to restart the NT when it was not adopted correctly. Gypsum is used to improve the soil environment for deep root growth due to its greater water solubility. Thus, the combined use of lime and gypsum can favor the correction of soil acidity and improve soil nutrient availability in deeper layers. The objective of the study was to evaluate the vertical nutrient distribution, soil acidity attributes changes, and crop yields due to reapplication strategies of soil acidity corrective and gypsum and verify the need to restart the NT system (with lime incorporation) to correct the soil reacidification process in an Oxisol of the Cerrado biome. The natural biome was converted into an agricultural system in 1983, and until 2008 the soil was constantly revolved and the application and reapplication of limestone were performed. The conversion of the conventional tillage to NT was done simply by stopping the soil tillage. Between 2008 and 2012, although cultivated with grain crops, no lime and plant nutrients were applied. In September 2012, six treatments were applied, following two strategies: i) maintenance of the NT system: without soil acidity corrective reapplication and no gypsum application (SC), superficial application of gypsum (GS), superficial reapplication of soil acidity corrective (CS), and superficial reapplication of soil acidity corrective associated with the superficial application of gypsum (CS + GS); and ii) restarting the NT system: soil acidity corrective incorporation (CI) and soil acidity corrective incorporation associated with the superficial application of gypsum (CI + GS). In September 2019, seven years after the installation of the experiment, the soil was sampled in eight stratified layers down to 50 cm deep (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-40 and 40-50 cm). The soil under the natural biome was also collected. The chemical attributes related to soil acidity, nutrient availability, and the yield of soybean (*Glycine max* L. Merrill) and corn (*Zea mays* L.) were analyzed. The comparison of the attributes of soil acidity between the soil under natural biome and the soil under an agricultural system for 36 years without reapplication of soil acidity corrective for more than a decade shows that the soil reacidification process is slow. The superficial reapplication of lime reduced soil aluminum saturation down to 25 cm deep, without, however, its total neutralization and proved to be sufficient to maintain adequate levels of the attributes of soil acidity and nutrient availability. The incorporation of the soil acidity corrective changed the soil acidity attributes more homogeneously in the soil arable layer (i.e., 0-20 cm), with the effects been restricted to this layer. However, this strategy did not result in great benefits regarding the improvement of soil acidity attributes when compared to the superficial application of lime. The application of gypsum did not change aluminum dynamics in the soil profile, nor the crops yield. Soybean showed a positive yield response to the reapplication of the soil acidity corrective, regardless of the reapplication method (252 kg ha year⁻¹ increase). Corn responded positively only when the lime was incorporated and associated with gypsum (578 kg ha year⁻¹ increase) compared with SC, but no difference was observed from the treatments that received lime. The losses caused by soil turning to incorporate the soil acidity corrective in a NT system are greater than the gains from corn yield increase. The losses caused by soil turning to incorporate the soil acidity corrective are greater than the gains from corn yield increase. There is no need to incorporate the soil acidity corrective once the soil native acidity was properly corrected, neither to apply gypsum to the soil under these conditions.

Keywords: Soil reacidification. Application methods. Limestone. No-tillage system. Nutrient availability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Localização da área experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, Brasil.....24
- Figura 2 – Distribuição anual da temperatura média, máxima e mínima, e precipitação média na área experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, durante sete anos (2012 a 2019).....25
- Figura 3 – Histórico da área experimental e doses de calcário dolomítico e gesso agrícola aplicados nos tratamentos (SC = sem calagem, GS = gesso superficial, CS = calagem superficial, CS+GS = calagem superficial + gesso superficial, CI = calagem incorporada, CI+GS = calagem incorporada + gesso superficial) ao longo do tempo.....28
- Figura 4 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c), saturação por alumínio (d) e acidez potencial (H^0+Al^{3+}) (e) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após onze anos de manejo sob plantio direto sem reaplicação de calcário (SC) e de um solo sob vegetação natural do cerrado (CN) dividido em oito camadas, da superfície até 50 cm profundidade.....33
- Figura 5 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c) e saturação por alumínio (d) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), com reaplicação superficial de gesso agrícola (GS), com reaplicação superficial apenas de calcário (CS) e com aplicação superficial de calcário e gesso agrícola (CS+GS). DMS = diferença mínima significativa.....34
- Figura 6 – Teores de cálcio (a) e de magnésio (b) trocáveis, de fósforo (c), de potássio (d) e de enxofre (e) disponíveis determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), com reaplicação superficial apenas de gesso agrícola (GS), com reaplicação superficial apenas de calcário (CS) e com aplicação superficial de calcário e gesso agrícola (CS+GS). DMS = diferença mínima significativa.36
- Figura 7 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c) e saturação por alumínio (d) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), reinício do sistema plantio direto apenas com incorporação de calcário (CI) e reinício do sistema plantio direto com incorporação de calcário associado a aplicação superficial de gesso agrícola (CI+GS). DMS = diferença mínima significativa.....38
- Figura 8 – Teores de cálcio (a) e de magnésio (b) trocáveis, de fósforo (c), de potássio (d) e de enxofre (e) disponíveis determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), reinício do sistema plantio direto apenas com incorporação de calcário (CI) e reinício do sistema plantio direto com incorporação de calcário associado a aplicação superficial de gesso agrícola (CI+GS). DMS = diferença mínima significativa.....40

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Teores de argila, silte e areia determinados pelo método da pipeta e classe textural do solo de oito camadas de solo até a profundidade de 50 cm de um Latossolo Vermelho distrófico localizado na estação experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, Brasil.....25
- Tabela 2 – Características químicas de um Latossolo Vermelho nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, localizado no Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, em setembro de 2012, antes da aplicação dos tratamentos.....26
- Tabela 3 – Cultivares de soja e híbridos de milho utilizados, fertilizantes e quantidade de nutrientes adicionados ao solo em cada ano agrícola de condução do experimento.....29
- Tabela 4 – Produtividade acumulada e média de cada tratamento e produtividade média anual de soja e milho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS)...41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ASE	Área superficial específica
Ca	Cálcio
CI	Calagem incorporada
CI+GS	Calagem incorporada + gesso superficial
CN	Vegetação natural do Cerrado
CS	Calagem superficial
CS+GS	Calagem superficial + gesso superficial
CTC _{ef.}	Capacidade de troca de cátions efetiva
CTC _{pH 7,0}	Capacidade de troca de cátions potencial
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Fundação MT	Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso
GS	Gesso superficial
H ⁰ +Al ³⁺	Acidez potencial
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
<i>m</i>	Saturação por alumínio
MAP	Monoamônio fosfato
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MOS	Matéria orgânica do solo
P	Fósforo
S	Enxofre
SC	Sem calagem
SCC	Sistema de cultivo convencional
SC+GS	Sem calagem + gesso superficial
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SPD	Sistema plantio direto
SSP	Superfosfato simples
SST	Superfosfato triplo
V	Saturação por bases
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO DO CERRADO	13
2.2	INTEMPERISMO E ACIDEZ NATURAL DO SOLO	14
2.3	CORREÇÃO DA ACIDEZ NATURAL DO SOLO	16
2.4	REACIDIFICAÇÃO DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO E REAPLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO	18
2.5	EFEITOS DA APLICAÇÃO DO GESSO AGRÍCOLA NO SOLO	20
3	HIPÓTESES.....	22
4	OBJETIVOS	23
4.1	OBJETIVO GERAL	23
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
5	MATERIAL E MÉTODOS	24
5.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL.....	24
5.2	HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	26
5.3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	27
5.4	AMOSTRAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	29
5.5	ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO	30
5.6	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DAS CULTURAS.....	30
5.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	31
6	RESULTADOS	32
6.1	REACIDIFICAÇÃO DO SOLO	32
6.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO SOB MANUTENÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	32
6.3	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO APÓS REINÍCIO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	37
6.4	RENDIMENTO DAS CULTURAS.....	41
7	DISCUSSÃO	43
8	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICE A – CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL	60
	APÊNDICE B – IMAGENS DO EXPERIMENTO E DA COLETA DE SOLO	61
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	62
	APÊNDICE D – RESULTADOS	63
	APÊNDICE E – RESUMO GRÁFICO	67
	ANEXO A – FAIXAS DE INTERPRETAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	68

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil e uma das principais regiões para a produção de culturas agrícolas. Os solos desta região são predominantemente Latossolos, que se caracterizam por serem bastante intemperizados, naturalmente pobres em nutrientes e com elevada saturação por alumínio (m). As culturas anuais comumente cultivadas no Cerrado, como a soja (*Glycine max* L. Merrill) e milho (*Zea mays* L.), apresentam suscetibilidade à toxidez por alumínio (Al) e elevada demanda nutricional. Dessa forma, as culturas anuais não produzem satisfatoriamente quando as práticas de manejo da fertilidade do solo, como calagem e adubação, não são realizadas. Neste sentido, para o adequado desenvolvimento e produção das culturas agrícolas no Cerrado se faz necessária a correção dos níveis de disponibilidade de nutrientes do solo e a neutralização do Al passível de ir à solução do solo.

A aplicação de corretivo da acidez (calcário ou mármore) é a única forma de eliminar os problemas causados pela acidez do solo e toxidez por Al. Devido a sua baixa solubilidade, a incorporação do corretivo no solo da camada onde a maioria das raízes das culturas se desenvolvem é, sem dúvida, a maneira mais eficaz de neutralizar rapidamente o Al trocável. Além disso, esta prática adiciona cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ao solo, eleva os valores de pH do solo, com conseqüente dissociação de prótons (H^+) dos grupos funcionais da caulinita e óxidos, tornando-os menos adsorventes de fosfato e mais adsorventes de nutrientes catiônicos, como Ca, Mg e potássio (K). Entretanto, essa prática, que é frequente no sistema convencional de preparo do solo, apenas é recomendada para iniciar um sistema de culturas perenes/semiperenes ou no momento da mudança do sistema de cultivo convencional (SCC) e/ou vegetação natural para o sistema plantio direto (SPD), uma vez que afeta negativamente as propriedades físicas do solo, como a estrutura e porosidade.

A reacidificação do solo é um processo lento e ocasionado principalmente pela desprotonação da água da chuva, ocorrendo a partir da superfície. À medida que o processo de reacidificação do solo avança, inicialmente ocorre acúmulo de prótons na solução do solo, com conseqüente diminuição dos valores de pH. No entanto, não necessariamente haverá liberação de quantidades expressivas de Al^{3+} à solução do solo e aumento da acidez potencial. Dessa forma, a reacidificação do solo pode ser controlada pela reaplicação superficial de corretivo em SPD, desde que a incorporação inicial do calcário seja bem sucedida e, conseqüentemente, o Al^{3+} do solo na camada subsuperficial tenha sido previamente corrigido. A ausência de mobilização do solo em SPD é prática recomendada, pois contribui para a preservação da

estruturado solo, extremamente importante para obter um bom desenvolvimento radicular das culturas e para reduzir os processos de degradação do solo, como a erosão.

O uso do gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), embora não apresente poder corretivo da acidez do solo, é frequentemente utilizado nos sistemas de produção do Cerrado como fonte de Ca e enxofre (S) por meio de sulfato (SO_4^{2-}). Devido à sua maior solubilidade em água, o gesso agrícola percola em maior quantidade do que o corretivo da acidez e pode, portanto, aumentar a saturação de bases (V) no solo em subsuperfície. Embora pouco eficaz, essa prática pode diminuir a atividade do Al^{3+} na solução do solo melhorando o ambiente para o crescimento radicular. Em solos com baixos estoques de S e sem a aplicação de fontes desse nutriente têm se constatado aumentos na produtividade das culturas com a aplicação de gesso agrícola.

Dessa forma, o uso combinado do calcário e do gesso agrícola pode favorecer a correção da acidez do solo e melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo das camadas mais profundas. Há ainda algumas dúvidas quanto à necessidade ou não de se reiniciar o SPD quando ele não foi corretamente adotado. O conhecimento das mudanças nos atributos químicos do solo e seus efeitos sobre o rendimento de grãos são necessários para estabelecer e ajustar práticas de reaplicação de corretivo em solos altamente intemperizados e em ambientes tropicais, onde a distribuição das chuvas ocorre de maneira irregular. Além disso, como a maioria das culturas no Cerrado são manejadas sob SPD, é necessário identificar como diferentes formas de reaplicação do corretivo da acidez do solo, incorporado ou em superfície, alteram os atributos da acidez e a disponibilidade de nutrientes no perfil de solo. Desta forma, estudos que contemplem a dinâmica da acidez do solo, em especial do Al, em sistemas de produção no Cerrado são importantes para embasar cientificamente critérios para recomendação da reaplicação de corretivo da acidez, bem como, da aplicação de gesso agrícola.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E SISTEMAS DE PRODUÇÃO DO CERRADO

O Cerrado brasileiro ocupa uma área de 204 milhões de hectares (FAGERIA; NASCENTE, 2014; VINHAL-FREITAS et al., 2012), aproximadamente 22% do território brasileiro, sendo o segundo maior bioma do país (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; VINHAL-FREITAS et al., 2017). Este bioma abrange a maior parte do Brasil Central, estendendo-se pelos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, leste do Maranhão, oeste de Minas Gerais, Bahia e Piauí, com áreas menores distribuídas nos estados de São Paulo e Paraná (SANO et al., 2008, 2010).

O clima da região do Cerrado, segundo classificação de Köppen, é Aw (Tropical úmido), e se caracteriza por ser úmido e sazonal com precipitação anual que varia de 800 a 1.800 mm e temperatura média anual de 20 a 26 °C. Caracteriza-se pela presença de uma estação chuvosa entre os meses de outubro e abril, com cerca de 90% da precipitação anual ocorrendo nesse período, e uma estação seca que pode durar de 4 a 7 meses (BUSTAMANTE et al., 2012). Neste ambiente, a distribuição irregular das chuvas e a existência de veranicos (período de estiagem durante a época chuvosa) constituem uma limitação para a exploração agrícola.

Os principais solos da região são os Latossolos (46%), Argissolos (15%) e Neossolos (15%) (REATTO; CORREIA; SPERA, 1998). Os Latossolos, predominantes na região, se caracterizam por serem altamente intemperizados, profundos, porosos, com teor de argila acima de 15% (VINHAL-FREITAS et al., 2012) e pobres em nutrientes em condição natural (VINHAL-FREITAS et al., 2013). Embora a baixa fertilidade natural seja característica deste tipo de solo, a atividade agrícola é facilitada devido a grande maioria do relevo ser plano a suave-ondulado (GRECCHI et al., 2014; SANTOS et al., 2020), favorecendo a mecanização intensiva das áreas cultivadas, tornando o Cerrado uma das principais regiões do mundo para a produção de culturas agrícolas (HOFFMANN et al., 2019; HUNKE et al., 2015; VINHAL-FREITAS et al., 2017).

A taxa de conversão da vegetação nativa para terras agrícolas no Cerrado foi alta, impulsionada pela pressão econômica (CORBEELS et al., 2006). A partir da década de 1970, políticas governamentais destinadas a aumentar a produção de *commodities* para exportação resultaram em uma rápida expansão da agricultura comercial de larga escala. De um total de 135 milhões de hectares adequados para agricultura intensiva nesse bioma, mais de 56% foi convertido em áreas agrícolas, principalmente cultivada por pastagens e culturas de grãos e

fibras, o que corresponde a aproximadamente 80 milhões de hectares (SANO et al., 2010). O modelo de produção estabelecido no Cerrado brasileiro foi baseado na ocupação do bioma natural, na concentração das terras e meios de produção, no uso de monocultivo de *commodities*, especialmente soja, no preparo convencional do solo, com revolvimento constante do solo, e no uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes. Entretanto, nos últimos anos muitos agricultores adotaram o SPD, resultando hoje em aproximadamente 32,8 milhões de hectares no Brasil e cerca de 16 milhões de hectares de terra na região do Cerrado brasileiro cultivados sob este sistema (FEBRAPDP, 2019).

O estado que mais se destaca na produção de culturas de grãos e fibras é o Mato Grosso (SANO et al., 2010). Neste estado são cultivados 9,62 milhões de hectares de soja, 4,69 milhões de hectares de milho e 1,0 milhão de hectares de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) (IMEA, 2019), sendo o sistema de produção da soja como cultura principal, seguido de milho de segunda safra, o mais representativo do estado. As culturas anuais cultivadas nessa região, como a soja e milho, apresentam suscetibilidade à toxidez por Al^{+3} e requerem alta disponibilidade de nutrientes, como fósforo (P) e K, e não se desenvolvem bem quando práticas de manejo da fertilidade, como calagem e adubação, são menosprezadas (ARUNAKUMARA; WALPOLA; YOON, 2013; HARIDASAN, 2008). Assim, práticas de manejo como a correção da acidez e toxicidade do Al^{3+} , aumento da disponibilidade de P, K e outros nutrientes essenciais requeridos em menor quantidade pelas culturas e o manejo da matéria orgânica do solo (MOS) são recomendadas para melhorar a fertilidade do solo (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; LEPSCH, 2016; WILCKE; LILIENFEIN, 2005) e elevar o rendimento das culturas (CARVALHO et al., 2009; YAMADA, 2010).

2.2 INTEMPERISMO E ACIDEZ NATURAL DO SOLO

A acidez do solo é o principal limitante da produção agrícola em muitas áreas do mundo (FAGERIA; NASCENTE, 2014). Estima-se que cerca de 40% dos solos aráveis do mundo são ácidos e, portanto, apresentam riscos de toxicidade de Al às plantas (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). No Brasil, mais de 500 milhões de hectares são constituídos por solos ácidos, compreendendo cerca de dois terços do território nacional, representando a maior área de solos ácidos dentro de um único país (VITORELLO; CAPALDI; STEFANUTO, 2005).

A origem e a dinâmica da acidez de solos têm sido relatada por diversos autores em temas relacionados a área da ciência do solo (ERNANI, 2016; FAGERIA; NASCENTE, 2014; GOULDING, 2016; RHEINHEIMER et al., 2018a, 2018b; VARGAS et al., 2019). Esses

autores destacam que a presença de Al na forma trocável e, portanto, em equilíbrio com o Al^{+3} da solução do solo, é o maior problema para a produtividade das culturas. O Al^{+3} é originário da dissolução dos minerais aluminossilicatados nos processos de intemperismo (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Dessa forma, o processo de acidificação do solo ocorre de forma natural e é intensificado pelo tempo, precipitação pluviométrica e temperatura.

No Cerrado, o predomínio de Latossolos é consequência da atuação dos fatores de intemperismo sobre o material de origem, resultando em solos com predomínio de caulinita, óxidos de ferro (goethita e hematita) e óxidos de Al (gibbsita). O predomínio desses argilominerais e óxidos é resultado da dissolução dos minerais (primários e secundários) devido à diminuição do pH do solo. Em condições ácidas, esses minerais se dissolvem ou se transformam liberando o Al^{+3} , ácido silícico e, em maior ou menor concentração, todos os elementos químicos presentes nas rochas à solução do solo (HIRADATE, 2004; ZHOU et al., 2011). O silício e nutrientes como cloro são facilmente removidos do meio por percolação. Outros nutrientes, especialmente os na forma catiônica, como Ca, Mg e K, são parcialmente percolados. Em contrapartida, a maior parte do Al^{+3} é adsorvido pelos grupos funcionais dos minerais e MOS ou incorporado na estrutura dos óxidos de ferro, especialmente, na goethita (COLEMAN; THOMAS, 1967). Assim, as altas taxas de intemperismo, favorecido pelas condições climáticas do Cerrado, resultaram em solos ácidos e pobres em nutrientes, tanto pela adsorção como perda por percolação (FAGERIA; BALIGAR, 2008; VINHAL-FREITAS et al., 2013).

A acidificação dos solos é caracterizada pela diminuição do pH, aumento da acidez potencial, liberação de Al^{+3} dos octaedros/tetraedros, diminuição da área superficial específica (ASE) e dos grupos funcionais portadores de cargas negativas, percolação de elementos químicos, inclusive de alguns que são nutrientes, da diminuição drástica da disponibilidade de P, entre outros. A presença de Al^{+3} , a percolação de Ca e Mg, com concomitante diminuição das cargas negativas, conduz a altas saturações por Al^{+3} na superfície dos coloides e grande atividade em solução. Esses são os principais fatores limitantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas e que requerem a correção (aumento) do pH dos solos ácidos. Para a maioria das culturas, a faixa de pH recomendada é entre 6,0 e 6,5 (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Contudo, valores de pH do solo acima do recomendado para as culturas pode acarretar em deficiências de nutrientes como ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997) .

Os efeitos adversos da acidez do solo (excesso de Al e baixos teores de Ca e Mg) não ocorrem somente no solo da camada superficial (0-20 cm); eles são, inclusive, mais intensos no

solo das camadas mais profundas. Na região do Cerrado, Cochran e Azevedo (1988) verificaram que 79 e 70% das amostras de solo coletadas nas camadas de 0-20 e 20-50 cm, respectivamente, apresentavam m maior que 10%. Esses autores também verificaram que em 86% das amostras coletadas na camada de 20-50 cm o solo apresentava teor de Ca menor que $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, na maioria das situações, valores de m em torno de 10% não são prejudiciais às plantas, desde que as demais condições químicas e físicas do solo estejam adequadas e as precipitações pluviométricas regulares. Em situações onde há restrição na produtividade das culturas devido a elevada m (maiores que 35%) e baixos teores de Ca e Mg, a correção da acidez do solo na superfície e em subsuperfície se faz necessária para melhorar a eficiência das plantas na absorção de água e nutrientes e manter o patamar produtivo, bem como a rentabilidade da lavoura.

2.3 CORREÇÃO DA ACIDEZ NATURAL DO SOLO

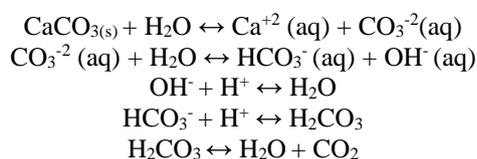
A correção da acidez natural em solos é prática obrigatória para a produção agrícola, visando promover melhor crescimento e produção das plantas pela eliminação dos efeitos deletérios da toxidez por Al (CRUSCIOL et al., 2016; INAGAKI et al., 2016; JORIS et al., 2016; TIRITAN et al., 2016). O sistema de produção do Cerrado, logo após a conversão da vegetação natural em terras agrícolas, caracterizou-se pelo revolvimento constante do solo, com lavrações e gradagens, e no uso intensivo de corretivos da acidez e fertilizantes, visando corrigir a acidez do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes, especialmente o P e K. Então, a acidez natural do solo da camada superficial foi corrigida com aplicação de corretivo incorporado. Somente depois do início do presente século é que a grande maioria das lavouras foi convertida em sistema sem revolvimento. Na conversão do SCC para o SPD, a maioria dos agricultores e empresas interromperam o sistema de revolvimento, sem uma avaliação química do solo e, particularmente, sem as devidas correções do solo em profundidade por meio da calagem (RHEINHEIMER et al., 2018b). Consequentemente, persistem os atuais problemas relacionados à acidez, toxicidade por Al^{+3} e o baixo conteúdo de Ca em camadas mais profundas do solo (ZANDONÁ et al., 2015).

A incorporação do calcário na dose recomendada para elevar o pH do solo a 6,0 e em um maior volume de solo possível (geralmente na camada de 0-20 cm), principalmente na conversão de um sistema natural ou no início do SPD de longa duração, é a prática mais recomendada para manter altas produtividades por longo período (KAMINSKI et al., 2007). Isso ocorre porque as alterações dos atributos químicos promovidos pela calagem são de longo

prazo e o processo de reacidação é lento e dificilmente evolui para a condição original (RHEINHEIMER et al., 2018b).

O calcário e o mármore são constituídos, predominantemente, por carbonatos de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3), e são classificados em dolomítico, calcítico e magnesiano, de acordo com as concentrações de Ca e Mg. Segundo Kaminski et al. (2007):

“A reaplicação de corretivo em superfície no SPD cria uma frente alcalinizante a partir do solo em contato com as partículas do corretivo da acidez. Entretanto, a migração em profundidade pode ser limitada pela baixa solubilidade do corretivo em água e, portanto, a quantidade de íons resultante da solubilização do carbonato de cálcio é infinitamente menor do que a acidez potencial banhada pela solução portadora de poder neutralizante; e a hidrólise do íon CO_3^{2-} ocorrerá significativamente somente na presença de prótons na solução do solo. As reações do calcário no solo ocorrem de acordo com as seguintes equações:



À medida que a reação do íon CO_3^{2-} com os prótons presentes na solução avança [$\text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + \text{H}^{+} \leftrightarrow \text{HCO}_3^{-}(\text{aq})$], o equilíbrio da reação [$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{+2}(\text{aq}) + \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$] se desloca na direção dos produtos, gerando mais íons Ca^{+2} e íons CO_3^{2-} em solução. Como os íons CO_3^{2-} são consumidos pelos prótons, como resultado da soma das reações $\text{OH}^{-} + \text{H}^{+} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$ e $\text{HCO}_3^{-} + \text{H}^{+} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ [$\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^{+} \leftrightarrow \text{HCO}_3^{-}$], a concentração de íons Ca^{+2} em solução necessária para manter constante o produto de solubilidade [$(\text{Ca}^{+2})(\text{CO}_3^{2-}) = 10^{-8,4}$] torna-se maior em relação aos íons CO_3^{2-} . Isso indica que os prótons acentuam a dissolução e a consequente dissociação do calcário e à medida que o pH da solução do solo aumenta, em função do consumo de calcário, a quantidade de íons CO_3^{2-} na solução disponível para neutralizar outros prótons diminui. A baixos valores de pH, a taxa de geração de OH^{-} é superior à sua taxa de consumo, de forma que o pH da solução do solo aumenta. No pH de 8,3, essas duas taxas se igualam e a concentração de OH^{-} permanece constante. Consequentemente, as concentrações dos íons CO_3^{2-} e Ca^{+2} em solução não variam mais, cessando o consumo do carbonato de cálcio sólido. Desse modo, a reaplicação de calcário na superfície de um solo cujo pH do primeiro centímetro de solo seja elevado, desfavorece a sua solubilização”.

A reação do calcário com o solo é relativamente lenta e depende basicamente da presença de prótons na solução do solo. Além disso, todas as reações são limitadas ao solo em contato com as partículas do corretivo, uma vez que sua solubilidade depende da presença de H^{+} na solução do solo (KAMINSKI et al., 2007), fato esse que proporciona a correção da acidez apenas ao local próximo onde foi aplicado o calcário. A neutralização do H^{+} da solução facilita a hidrólise da água de hidratação do Al^{+3} , com consequente liberação de mais H^{+} e consequente neutralização desse elemento tóxico. A diminuição da atividade do Al^{+3} provoca a dessorção do Al^{+3} fracamente adsorvido (acidez potencial), enquanto íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} o substituem nos grupos funcionais, agora desbloqueados.

A neutralização do Al é pré-requisito para o sucesso do sistema produtivo. Isso porque, solos que contêm teores elevados de Al^{3+} apresentam limitações ao crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (TANG et al., 2003). Os sintomas de elevadas concentrações de Al^{3+} incluem engrossamento das raízes e diminuição de suas ramificações, o que reduz a absorção de água e nutrientes, levando a uma maior vulnerabilidade da planta, especialmente em condições de restrição hídrica (LI et al., 2019; TANG et al., 2003). Na região do Cerrado, este efeito pode ser ainda mais pronunciado no cultivo do milho de segunda safra, onde as precipitações diminuem devido a presença de uma estação seca no período de inverno.

Desta forma, pode-se resumir que a correção da acidez bem feita eleva o pH aos valores pré-estabelecidos para cada cultura, neutraliza o Al^{3+} tóxico (ZANDONÁ et al., 2015), fornece Ca^{2+} e Mg^{2+} (SUMNER; YAMADA, 2002), desbloqueia as cargas negativas ocupadas pelo Al^{3+} , promove a desprotonação de grupos funcionais (aumento da capacidade de troca de cátions - CTC) e diminui a capacidade de adsorção de fosfato, entre outros. Todos esses efeitos derivados da realização da calagem no solo favorecem o crescimento do sistema radicular e cria condições que melhoram a disponibilidade e absorção de água e nutrientes essenciais para as culturas (SUMNER; YAMADA, 2002; YAMADA, 2010).

2.4 REACIDIFICAÇÃO DO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO E REAPLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO

Os distúrbios causados pela calagem e a magnitude do processo de reacidificação do solo dificilmente fará com que os níveis de acidez do solo retornem à sua condição inicial (BARROW, 1999). Uma vez corrigida a acidez potencial natural do solo não há mais Al trocável no solo em subsuperfície (mínimo 10 a 20 cm), e o processo de reacidificação do solo ocorre, principalmente, pela injeção de prótons pela água da chuva (RHEINHEIMER et al., 2000a, 2000b). A água da chuva, quando em contato com o gás carbônico atmosférico (CO_2) carrega para o solo íons HCO_3^- e H^+ , subprodutos dessa reação, que é a principal causa do processo de reacidificação do solo. Assim, o processo de reacidificação do solo ocorre a partir da superfície, inicialmente com a redução dos valores de pH do solo, sem necessariamente o reaparecimento de Al trocável. Dessa forma, em solos cuja acidez potencial natural tenha sido corrigida pela incorporação do corretivo da acidez, o processo de reacidificação do solo pode ser corrigido pela reaplicação do corretivo em superfície.

Além disso, em menor intensidade, a reacidificação do solo ocorre pela deposição de fertilizantes no solo, entre eles estão os fertilizantes nitrogenados nas formas amoniacais

(produzem íons H^+ durante o processo de nitrificação) (FAGERIA; NASCENTE, 2014; GOULDING, 2016), fertilizantes fosfatados solúveis em água (na dissolução liberam íons H^+) (CIOTTA et al., 2002; ERNANI, 2016) e o S elementar (pela oxidação do elemento por bactérias) (ERNANI, 2016; GOULDING, 2016). O revolvimento do solo resulta em decomposição da MOS pelos organismos do solo, que produzem gás carbônico por consequência, que por ser um ácido fraco libera íons H^+ (ERNANI, 2016; GOULDING, 2016). O processo de reacidificação do solo também ocorre pela absorção de cátions pelas culturas, e consequente liberação de quantidades estequiométricas iguais de H^+ . Entretanto, essas causas de reacidificação do solo apresentam baixa contribuição no processo de reacidificação quando comparado aquela causada pela água da chuva.

A tomada de decisão para reaplicação de calcário no SPD, na maioria dos Estados, é feita somente baseada nos atributos químicos do solo da camada 0-10 cm (ANGHINONI; SALET, 1997; CFSEMG, 1999; CQFS-RS/SC, 2016; NOLLA; ANGHINONI, 2006; PAULETTI; MOTTA, 2017; SILVEIRA; STONE, 2002). Essa tomada de decisão considera que o solo da camada subsuperficial não apresenta restrições ao crescimento radicular pela presença de Al trocável ou deficiência de Ca e/ou Mg (KAMINSKI et al., 2007). Dessa forma, a reaplicação do calcário em superfície será suficiente para neutralizar a acidez que se forma com o processo de reacidificação. A reaplicação de calcário superficial no SPD cria uma frente alcalinizante a partir do solo em contato com as partículas do corretivo da acidez. No entanto, existem alguns fatores que limitam e outros que contribuem para a migração do calcário em profundidade. Uma das limitações é que a simples deposição do corretivo na superfície do solo limita a área de contato carbonato/próton e, portanto, tem dificuldades de neutralizar a acidez potencial do solo abaixo da zona de deposição do corretivo (TANG et al., 2003), devido à baixa solubilidade do calcário e dos produtos de sua reação no solo (RAMPIM et al., 2011). Os efeitos da calagem só ocorrem em profundidade após o pH na zona de dissolução do calcário ter atingido valores de 5,2 a 5,5 (RHEINHEIMER et al., 2000b). Desta forma, enquanto existirem cátions ácidos, a reação de neutralização da acidez fica limitada à camada superficial, retardando o efeito na subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000b).

Alguns autores (CASSIOLATO et al., 2000; FRANCHINI et al., 2001; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002; ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999), ao usarem doses de material orgânico extremamente elevadas e não compatíveis com as observadas nos sistemas de produção, alegam que as substâncias orgânicas solúveis em água podem favorecer a percolação de Ca e Mg no perfil do solo. O fenômeno é passível de ser explicado quimicamente, pois é normal que grupos funcionais carboxílicos, especialmente, adsorvem Ca se estiverem

ambos em solução. Também, é passível de haver a troca do Ca pelo Al quando esse complexo hidrossolúvel entrar numa zona da solução do solo rica em Al e pobre em Ca. No entanto, a contribuição desse fenômeno deve ser muito limitada nos sistemas agrícolas pelas quantidades de material orgânicos realmente aportadas. Além disso, ânions, como nitratos, sulfatos, cloretos e silicatos, decorrentes da adição de fertilizantes ou da decomposição de resíduos culturais, podem contribuir para o movimento de Ca e Mg em profundidade (ZAMBROSI; ALLEONI; CAIRES, 2008).

Por outro lado, partículas finas do corretivo podem migrar em profundidade através de macroporos e, principalmente, biocanais formados pela morte das raízes ou pela atividade da meso e macrofauna. O arraste das partículas do corretivo é acidental e pode ser potencializado em sistemas que preservam e/ou melhoram a estrutura do solo, como o SPD (AMARAL et al., 2004; PETRERE; ANGHINONI, 2001). Independentemente do processo físico e químico que esteja envolvido na neutralização da acidez do solo de camadas abaixo da zona de aplicação do corretivo, a magnitude dos efeitos em profundidade também é dependente da quantidade e granulometria do corretivo, das precipitações pluviométricas e do tempo transcorrido após a aplicação (KAMINSKI et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2000b).

2.5 EFEITOS DA APLICAÇÃO DO GESSO AGRÍCOLA NO SOLO

O gesso agrícola é utilizado para melhorar as propriedades químicas do solo na zona de crescimento das raízes, especialmente em regiões tropicais (FARINA; CHANNON; THIBAUD, 2000a) sujeitas à escassez de água, como o Cerrado (ZANDONÁ et al., 2015). O gesso agrícola é um sal altamente solúvel que fornece dois nutrientes, Ca e S, e mesmo que seja aplicado em superfície, apresenta alta mobilidade no solo. A mobilidade do gesso agrícola no solo é favorecida por valores mais altos de pH e, conseqüentemente, maior proporção de cargas negativas (COSTA; CRUSCIOL, 2016). Isso é principalmente observado quando o calcário é incorporado no início do SPD. O gesso se hidrata facilmente e de imediato dissocia-se e forma dois íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} e um par iônico CaSO_4^0 na solução do solo. Portanto, havendo precipitação maior do que evapotranspiração, haverá percolação desses íons no solo (NEIS et al., 2010) e poderá ocorrer a redução da atividade do íon Al^{3+} e a melhoria do ambiente de crescimento radicular e com isso, melhorias na produtividade das culturas.

Embora possa ocorrer melhorias nos atributos químicos do solo pela aplicação de gesso agrícola, os poucos experimentos que respondem a aplicação de gesso e em pequenas magnitudes são relacionados às respostas das culturas a adição de S. Pias et al. (2019),

compilando dados disponíveis na literatura, verificaram que as culturas respondem à fertilização de S apenas quando os teores de S disponível no solo estão abaixo do nível crítico. Esses autores definiram como limites críticos, na superfície do solo (0-20 cm) e em subsuperfície (20-40 cm), teores de S disponível extraídos por fosfato de cálcio, de 7,5 e 8,5 mg dm⁻³, respectivamente. Para solos no sul do Brasil, o nível crítico de S disponível no solo extraído por fosfato de cálcio, embora ainda não totalmente confiável (TIECHER et al., 2013), na camada 0-10 cm, é de 5,0 a 10,0 mg dm⁻³ para culturas de baixa e alta demanda, respectivamente (CQFS-RS/SC, 2016). Além disso, é mais provável que as culturas cultivadas em solos tropicais sejam mais responsivas a adição de S do que aquelas cultivadas em solos subtropicais no Brasil (PIAS et al., 2019). Solos com altos potenciais produtivos (sem restrições físicas, químicas e biológicas), com baixa deposição atmosférica de S e com ótimo suprimento de água respondem mais facilmente a fertilização sulfatada (OSÓRIO FILHO et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2005; TIECHER et al., 2013). O desenvolvimento de novos híbridos e cultivares comerciais de milho e soja com maior potencial produtivo (MENDES et al., 2018) facilitam a remoção do S do sistema pela exportação das culturas, aumentando a probabilidade de resposta dessas culturas a fertilização de S.

Dessa forma, o uso combinado do calcário e do gesso agrícola pode favorecer a correção da acidez do solo e melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo das camadas mais profundas. Há ainda algumas dúvidas quanto à necessidade ou não de se reiniciar o SPD quando ele não foi corretamente adotado. Somente em casos de restrições de produtividade das culturas é que se deve levar em consideração a possibilidade de incorporação do corretivo, concomitantemente a correção da carência de outro nutriente, como é o caso do P. A reaplicação de corretivo da acidez em superfície é a melhor estratégia quando a *m* no solo da camada abaixo dos 10 cm seja inferior a 35%, associado à ausência de carência de P ou camada compactada. Por outro lado, é possível que se tenha que reiniciar o sistema caso essas condições não sejam as observadas a campo.

3 HIPÓTESES

A aplicação de corretivo da acidez é a única forma de eliminar os problemas causados pela acidez do solo e toxidez por Al. Devido à baixa solubilidade do corretivo da acidez, a incorporação do calcário é frequentemente realizada no momento da implantação do SPD com a finalidade de corrigir a acidez potencial do solo. Após corrigida a acidez potencial natural do solo, a reacidificação do solo ocorre de forma lenta e é ocasionada, principalmente pela desprotonação da água da chuva, ocorrendo a partir da superfície. Nessas condições, não há mais Al trocável em subsuperfície, uma vez que a reacidificação do solo acontece a partir da superfície do solo. Desse modo, inicialmente ocorre acúmulo de prótons na solução do solo, com consequente diminuição dos valores de pH, mas não necessariamente haverá liberação de quantidades expressivas de Al^{3+} para a solução do solo e aumento da acidez potencial.

O gesso agrícola é um condicionador de solo utilizado para melhorar as propriedades químicas do solo na zona de crescimento das raízes, especialmente em regiões tropicais sujeitas à escassez de água, como o Cerrado. Esse insumo apresenta alta mobilidade no solo e é fonte de Ca^{2+} e SO_4^{2-} às plantas. A alta mobilidade do gesso no solo se dá, pois ele facilmente se hidrata e de imediato forma dois íons, Ca^{2+} e SO_4^{2-} , e um par iônico CaSO_4^0 na solução do solo. Este processo promove, portanto, a migração desses íons no solo, podendo melhorar o ambiente para desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, promover melhorias na produtividade das culturas. Entretanto, em solos com a aplicação de corretivo da acidez os níveis de Ca do solo já estão corrigidos. Além disso, normalmente os solos apresentam quantidades de S suficientes para suprir as necessidades das culturas pela deposição atmosférica ou pela aplicação via fertilizantes com a presença de S em sua composição. Assim, a resposta das culturas a aplicação de S apenas é esperada em condições de baixo teor de SO_4^{2-} disponível no solo. Dessa forma, a hipótese do trabalho é de que:

A reaplicação superficial de calcário em solos altamente intemperizados, em sistema plantio direto adotado após correção da acidez potencial com lavração e gradagem, é suficiente para corrigir a reacidificação do solo e a resposta das culturas a aplicação de gesso agrícola é nula ou muito baixa.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações na distribuição vertical de nutrientes e dos atributos da acidez na fase sólida do solo e o rendimento das culturas decorrentes de estratégias de reaplicação de corretivo da acidez e do gesso agrícola e verificar se há necessidade de reinício do sistema plantio direto, com incorporação do calcário, para correção da reacidificação do solo em Latossolo do bioma Cerrado.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Evidenciar que há baixa taxa de reacidificação do solo e que uma vez realizada a correção da acidez do solo no perfil, dificilmente ela retornará ao seu estado natural;
- ii) Verificar que a reaplicação do corretivo da acidez pode ser feita na superfície do solo mantido sob sistema plantio direto, sem prejuízos a produtividade das culturas;
- iii) Demonstrar que há limitações na mobilidade da frente alcalinizante decorrentes da reaplicação de corretivo da acidez do solo;
- iv) Demonstrar que a resposta das culturas de soja e milho à aplicação de gesso agrícola, mesmo em regiões do Cerrado brasileiro, são ausentes ou pequenas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL

A área de estudo está localizada no Centro de Aprendizagem e Difusão (CAD) - Sul da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT), no município de Itiquira, Mato Grosso, Brasil ($17^{\circ}09'17.1''\text{S}$ e $54^{\circ}45'05.6''\text{O}$, a uma altitude de 490 m) (Figura 1). O solo é um Latossolo Vermelho distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018). Os teores de argila, silte e areia e a classe textural do solo até a profundidade de 50 cm estão descritos na Tabela 1.

Figura 1 – Localização da área experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, Brasil.

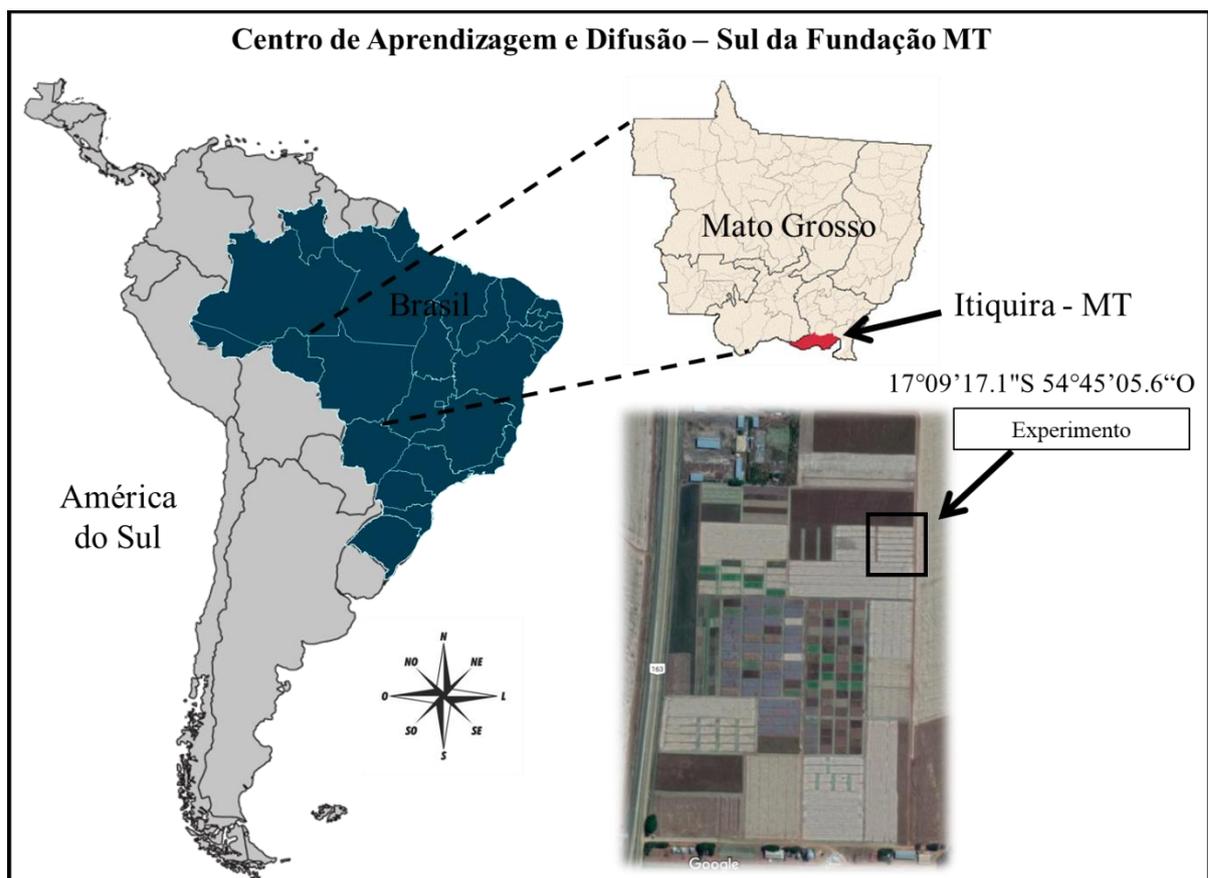
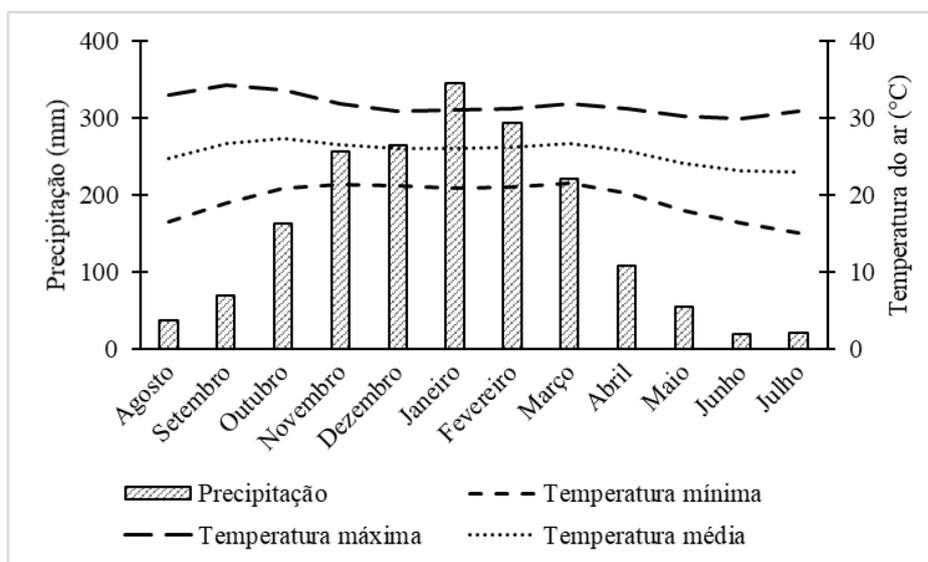


Tabela 1 – Teores de argila, silte e areia determinados pelo método da pipeta e classe textural do solo de oito camadas de solo até a profundidade de 50 cm de um Latossolo Vermelho distrófico localizado na estação experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, Brasil.

Camada de solo (cm)	Teores			Classe textural
	Argila	Silte	Areia	
	g kg ⁻¹			
0 – 5	640	55	305	Muito argilosa
5 – 10	637	60	303	Muito argilosa
10 – 15	647	52	301	Muito argilosa
15 – 20	645	67	287	Muito argilosa
20 – 25	651	78	271	Muito argilosa
25 – 30	671	75	254	Muito argilosa
30 – 40	672	75	253	Muito argilosa
40 – 50	669	78	253	Muito argilosa

De acordo com a classificação de Köppen, o clima regional é do tipo Aw, que corresponde a um clima tropical estacional de savana com 1.500 mm de precipitação média anual e duas estações bem definidas (seca, de abril a setembro, e chuvosa, de outubro a março). A temperatura média anual varia de 20 a 26 °C. A temperatura e a precipitação média mensal da estação experimental durante sete anos de condução do experimento estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição anual da temperatura média, máxima e mínima, e precipitação média na área experimental do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, durante sete anos (2012 a 2019).



Fonte: Estação Experimental da Fundação MT, Itiquira, Estado do Mato Grosso.

5.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O bioma natural do Cerrado foi convertido em área de cultivo em 1983. Durante 25 anos, 1983 até 2008, o solo da área experimental foi cultivado com soja, com eventuais culturas de entressafra como o milheto (*Pennisetum glaucum*), sorgo (*Sorghum bicolor*) ou milho. O manejo do solo nessa época ocorreu sob sistema convencional de preparo de solo, com uso de grades aradora e niveladora. Durante esse período a aplicação inicial e as reaplicações de calcário e fertilizantes foram realizadas a taxas desconhecidas. A partir de 2008 parou-se o revolvimento do solo e, portanto, o sistema de cultivo convencional (SCC) foi convertido em SPD. O solo foi cultivado com soja e milho sem adubação e sem reaplicação de corretivo por 4 anos (4 cultivos de soja e 4 de milho de segunda safra). Em setembro de 2012, antes da instalação do experimento, foram avaliadas as propriedades químicas do solo nas camadas 0-20 e 20-40 cm (Tabela 2).

Tabela 2 – Características químicas de um Latossolo Vermelho nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, localizado no Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, pertencente a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, no município de Itiquira, Mato Grosso, em setembro de 2012, antes da aplicação dos tratamentos.

Variáveis	Camada de solo (cm)	
	0-20	20-40
pH do solo (CaCl ₂ - 1:2,5)	4,7	4,5
pH do solo (H ₂ O - 1:2,5)	5,3	5,1
Acidez potencial (cmol _c kg ⁻¹) ⁽¹⁾	4,8	4,5
Alumínio trocável (cmol _c kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,3	0,4
Matéria orgânica do solo (%) ⁽³⁾	3,9	2,3
Cálcio trocável (cmol _c kg ⁻¹) ⁽²⁾	1,8	1,1
Magnésio trocável (cmol _c kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,7	0,4
Enxofre disponível (mg kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	9,0	11,0
Soma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	2,6	1,5
CTC _{efetiva} (cmol _c kg ⁻¹)	2,9	1,9
CTC _{pH 7,0} (cmol _c kg ⁻¹)	7,4	6,0
Saturação por alumínio (%)	10,0	21,0
Saturação por bases (%)	35,0	25,0
Fósforo disponível (mg kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	9,0	4,0
Potássio disponível (mg kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	32,0	4,0
Cobre disponível (mg kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	0,8	0,2
Zinco disponível (mg kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	5,4	2,0

⁽¹⁾ Extraído por acetato de cálcio pH 7,0 (Embrapa, 2017); ⁽²⁾ Extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ (Tedesco et al., 1995); ⁽³⁾ Determinado por digestão úmida usando solução de dicromato de potássio (Walkley and Black, 1934); ⁽⁴⁾ Extraído por fosfato de cálcio (Tedesco et al., 1995); e ⁽⁵⁾ Extraídos por Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995).

Pode-se observar que, considerando os limites críticos dos atributos da acidez do solo e da disponibilidade de nutrientes no momento da implantação do experimento (Tabela 2), no solo da camada 0-20 cm os teores de Al trocável e *m* são classificados como baixo, o pH do solo e a V como médio, os teores de Ca e Mg trocáveis são classificados como adequados, o teor de P disponível é alto e o de K disponível é médio (SOUSA; LOBATO, 2004).

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

Em outubro de 2012 foram implementadas as aplicações dos dois insumos agrícolas, calcário dolomítico e gesso agrícola, em seis tratamentos distribuídos em delineamento blocos ao acaso, com cinco repetições. Os tratamentos envolveram:

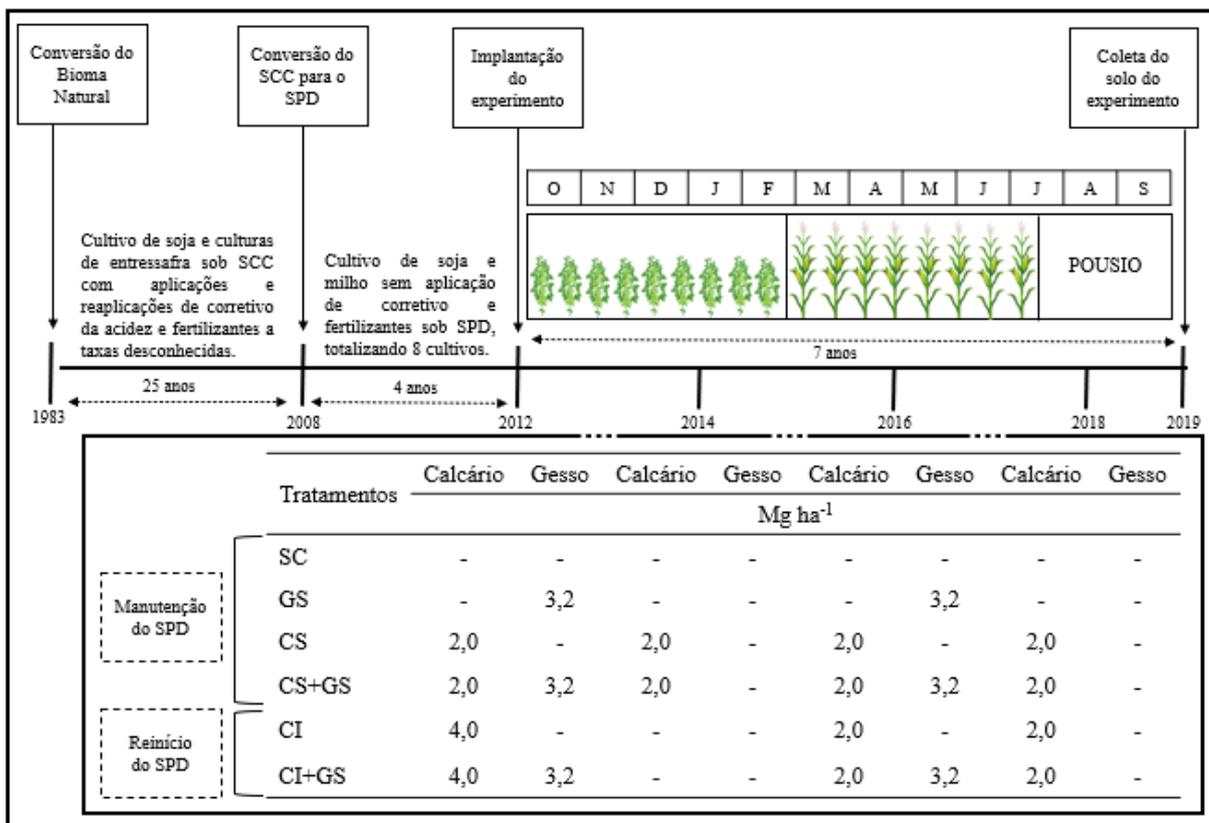
- (a) Manutenção do SPD, cujo histórico era de 25 anos de SCC mais 4 anos de SPD: i) sem reaplicação do corretivo da acidez e do gesso agrícola (SC); ii) aplicação somente de gesso agrícola em superfície (GS); iii) reaplicação somente de corretivo da acidez em superfície (CS); iv) reaplicação de corretivo da acidez em superfície em conjunto com gesso agrícola (CS+GS).
- (b) Reinício do SPD com aração e gradagem: com v) reaplicação somente do corretivo da acidez incorporado (CI); e vi) reaplicação do corretivo da acidez incorporado em conjunto com gesso agrícola em superfície (CI+GS).

O calcário dolomítico (PRNT 84%) foi aplicado na dose de 4.000 kg ha⁻¹. A dose de calcário foi calculada visando aumentar a V do solo para 75% na camada de 0 a 20 cm. O gesso agrícola utilizado, contendo 15% de S, foi aplicado na dose de 3.200 kg ha⁻¹, estimado em função do teor de argila do solo (SOUSA; LOBATO, 2004).

Nos tratamentos que mantiveram o SPD, tanto o corretivo da acidez quanto o gesso agrícola foram simplesmente depositados na superfície do solo. O gesso foi aplicado em uma única aplicação em 2012 e o corretivo em duas: 2012 e 2014. Nos tratamentos com reinício do SPD, após a distribuição do corretivo da acidez na superfície do solo, foi realizada uma gradagem com grade aradora de 32 polegadas (profundidade aproximada de 20 cm), seguida de duas passadas com grade niveladora. Após o revolvimento do solo, foi realizada a aplicação de gesso agrícola na superfície do solo antecedendo a semeadura da soja. A partir de 2012, todos os tratamentos foram mantidos sob SPD. Quatro anos após a implantação do experimento, em 2016, foi realizada a reaplicação dos dois insumos em superfície: 2.000 kg ha⁻¹ do mesmo calcário dolomítico e 3.200 kg ha⁻¹ de gesso agrícola, nos seus respectivos tratamentos. Seis anos após a implantação do experimento, em 2018, foi realizada a reaplicação 2.000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico em superfície, em todos os tratamentos que receberam calcário. O histórico

da área e as reaplicações de calcário dolomítico e gesso agrícola de cada tratamento ao longo do tempo são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Histórico da área experimental e doses de calcário dolomítico e gesso agrícola aplicados nos tratamentos (SC = sem calagem, GS = gesso superficial, CS = calagem superficial, CS+GS = calagem superficial + gesso superficial, CI = calagem incorporada, CI+GS = calagem incorporada + gesso superficial) ao longo do tempo.



As parcelas experimentais possuem as dimensões de 12,6 m de largura e 18 m de comprimento, totalizando uma área de 226,8 m². As culturas utilizadas no experimento foram soja e milho de segunda safra, cultivadas em espaçamento de 0,45 m. A semeadura da cultura da soja é realizada no mês de outubro, no início da estação das chuvas, e a semeadura do milho ocorre após a colheita da soja, no final do mês de fevereiro.

A adubação da soja ao longo das sete safras consiste da aplicação de superfosfato triplo (SFT, 46% de P₂O₅) e superfosfato simples (SFS, 20% de P₂O₅ e 10% de S), ambos aplicados no sulco de semeadura, e a aplicação de cloreto de potássio (KCl, 60% K₂O) em superfície. Na adubação do milho foi utilizado os fertilizantes monoamônio fosfato (MAP, 52% P₂O₅ e 11% N) no sulco de semeadura, e a ureia (45% de N) aplicado em superfície nos estágios fenológicos

V3 ou V4 do milho. Até o ano de 2015, foi realizada aplicação de KCl em superfície na cultura do milho de segunda safra. A partir da safra 2015/16, as aplicações de KCl realizadas no milho de segunda safra passaram a ser realizadas junto com a adubação potássica da cultura da soja em superfície. As cultivares e híbridos utilizados, bem como as doses de fertilizantes usados e a quantidade de nutrientes adicionados aos tratamentos durante as sete safras podem ser consultadas na tabela 4. Após sete anos, a quantidade total de fertilizantes aplicados em cada parcela experimental foi de 784 kg P₂O₅ ha⁻¹, 1.050 kg K₂O ha⁻¹ e 677 kg N ha⁻¹ (Tabela 3).

Tabela 3 – Cultivares de soja e híbridos de milho utilizados, fertilizantes e quantidade de nutrientes adicionados ao solo em cada ano agrícola de condução do experimento.

Ano de cultivo	Cultivares /Híbridos	Fertilizantes adicionados					Quantidade de nutrientes				
		Ureia	SFT	SFS	MAP	KCl	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	
-- Safra --	---- Soja----	----- kg ha ⁻¹ -----									
2012/2013	TMG 1176 RR	-	130	-	-	150	-	60	90	-	
2013/2014	TMG 1176 RR	-	130	-	-	150	-	60	90	-	
2014/2015	TMG 1176 RR	-	130	-	-	200	-	60	120	-	
2015/2016	M6972 IPRO	-	-	300	-	250	-	60	150	30	
2016/2017	BRS 7380 RR	-	-	300	-	250	-	60	150	30	
2017/2018	BMX Ultra IPRO	-	-	300	-	250	-	60	150	30	
2018/2019	BMX Ultra IPRO	-	-	300	-	250	-	60	150	30	
-- Safra --	---- Milho ----	----- kg ha ⁻¹ -----									
2012/2013	P30F35 Hx	178	-	-	100	83	91	52	50	-	
2013/2014	Dow 2B587 PW	178	-	-	100	83	91	52	50	-	
2014/2015	RB 9110 PRO	178	-	-	100	83	91	52	50	-	
2015/2016	DKB 390 VTPRO	200	-	-	100	-	101	52	-	-	
2016/2017	DKB 315 VTPRO	200	-	-	100	-	101	52	-	-	
2017/2018	P30F35 VYHR	200	-	-	100	-	101	52	-	-	
2018/2019	P3707 VYH	200	-	-	100	-	101	52	-	-	
Total adicionado (kg ha ⁻¹)		1.334	390	1.200	700	1.749	677	784	1.050	120	

SFT = superfosfato triplo; SFS = superfosfato simples; MAP = monoamônio fosfato; KCl = cloreto de potássio. Nas safras de 2012 a 2016 foram aplicados 10 kg ha⁻¹ Zincodur (Zn) em cada ano no sulco de plantio na semeadura do milho junto com o fertilizante MAP. TMG = Tropical Melhoramento & Genética; M = Monsoy; BRS = Embrapa; BMX = Brasmax; P = Pionner; Dow = Dow Agrosiences; e DKB = Dekalb.

5.4 AMOSTRAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO

O solo foi coletado em setembro de 2019, sete anos após a instalação do experimento e depois da colheita do milho de segunda safra. Foram abertas duas trincheiras de dimensão 70 x 70 x 60 cm (comprimento x largura x profundidade) em cada parcela. O solo foi amostrado até 50 cm de profundidade, estratificado em oito camadas (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30,

30-40 e 40-50 cm). A coleta foi realizada no sentido perpendicular à linha de plantio, iniciando-se do meio de uma entrelinha e até o meio da outra entrelinha. O solo das duas trincheiras foi homogeneizado para compor uma única amostra. Após a coleta, o solo foi encaminhado ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. O solo foi seco ao ar, destorroado com rolo de madeira, peneirado em malha de 2 mm e armazenado em recipientes plásticos para posterior análise dos atributos químicos do solo.

Além da coleta do solo na área experimental, a fim de conhecer e caracterizar as condições químicas naturais do solo do Cerrado, amostras de solo também foram coletadas em uma área sob vegetação natural do Cerrado (CN), adjacente a área experimental (17°09'06.7"S e 54°42'27.5"O). A sistemática de amostragem, as camadas amostradas e os procedimentos de preparo do solo para análises foram as mesmas adotadas no solo do experimento.

5.5 ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO

O pH do solo em suspensão aquosa (1:2,5) e a acidez potencial foram determinados segundo metodologia descrita em Embrapa (2017). Os teores de Al, Ca e Mg trocáveis foram extraídos por solução KCl 1,0 mol L⁻¹ (1:10, v/v) (TEDESCO et al., 1995). O teor de Al foi determinado por titulação com solução de NaOH 0,0125 mol L⁻¹ padronizada e os teores de Ca e Mg foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (Perkin Elmer-AAAnalyst 200). O teor de S foi extraído com solução de fosfato de cálcio (500 mg de P L⁻¹) e determinado por turbidimetria (TEDESCO et al., 1995). Os teores de P e K disponíveis foram extraídos por solução Mehlich-1 (1:10, v/v), de acordo com metodologia descrita por Tedesco et al. (TEDESCO et al., 1995). O teor de K foi analisado em espectrofotômetro de emissão de chama e o teor de P avaliado por fotolorimetria seguindo os procedimentos descritos em Murphy e Riley (MURPHY; RILEY, 1962).

A capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_{ef}) foi calculada pela soma de Al³⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺. A capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH7,0}) foi calculada pela soma de (H⁺ + Al³⁺) + Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺. A *m* foi calculada por: $m (\%) = Al / (CTC_{ef}) \times 100$. A *V* foi calculada por: $V (\%) = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}) / (CTC_{pH7,0}) \times 100$.

5.6 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DAS CULTURAS

A determinação da produtividade das culturas foi realizada pela equipe da Fundação MT durante o período de condução do experimento. Foram determinados a produtividade de

soja e milho, cultivados em sucessão, em 7 safras, totalizando 14 cultivos. Para a determinação da produtividade dessas culturas, dois pontos representativos por parcela em duas linhas adjacentes de 4,0 m de comprimento, totalizando 7,2 m², foram colhidas em cada parcela. A produtividade foi obtida através da trilha mecânica e pesagem dos grãos e a umidade foi corrigida para 13% (base úmida). A produção acumulada foi calculada pela soma da produtividade das culturas dos sete anos de cultivo.

5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade, e quando os pressupostos foram atendidos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), que, quando significativa ($p < 0,05$) (APÊNDICE A), foi seguida do teste de Tukey para comparação de médias ($p < 0,05$). Para os resultados dos atributos químicos do solo, o delineamento experimental utilizado foi fatorial 6 x 8, sendo o fator principal os tratamentos e fator de sub-parcela as camadas de solo. Para os resultados de rendimento de grãos, o delineamento experimental utilizado foi fatorial 6 x 7, sendo o fator principal os tratamentos e fator de sub-parcela as safras. Para os resultados de produção acumulada de grãos, o delineamento experimental utilizado foi delineamento blocos ao acaso.

Os seguintes modelos estatísticos foram utilizados na ANOVA:

a) Atributos químicos da acidez do solo e disponibilidade de nutrientes:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + T_j + \text{erro a (i, j)} + P_k + \text{erro b (i, k)} + TP_{jk} + \text{erro b (i, j k)}$$

Onde: y_{ijk} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i= 5$); T = Tratamento ($j = 6$); P = profundidade ($k= 8$); e erro = erro experimental.

b) Rendimento de grãos:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + T_j + \text{erro a (i, j)} + A_k + \text{erro b (i, k)} + TA_{jk} + \text{erro c (i, j, k)}$$

Onde: y_{ijk} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i= 5$); T = Tratamento ($j = 6$); A = ano ($k= 7$); e erro = erro experimental.

c) Rendimento acumulado de grãos:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + M_j + \text{erro a (i, j)}$$

Onde: y_{ijk} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i= 5$); T = Tratamento ($j = 6$); e erro = erro experimental.

A análise estatística foi realizada com o software SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011).

6 RESULTADOS

6.1 REACIDIFICAÇÃO DO SOLO

Após sete anos da instalação do experimento, o solo que não recebeu reaplicação de calcário, quando comparado ao solo sob CN, apresenta maiores valores de pH_{H_2O} do solo e V e menores valores de acidez potencial, Al trocável e m em todo solo do perfil avaliado (Figura 4). O solo que não recebeu reaplicação de calcário apresenta, na camada 0-20 cm, valor médio de pH do solo de 5,0, de H^0+Al^{3+} e Al trocável, de 8,70 e 0,82 $cmol_c\ kg^{-1}$, respectivamente, e de V e m , de 23 e 26%, respectivamente. O solo sob bioma natural apresenta nessa mesma camada (0-20 cm), pH em H_2O de 4,2; H^0+Al^{3+} e Al trocáveis, de 12,4 e 2,18 $cmol_c\ kg^{-1}$, respectivamente; e V e m , de 5 e 78%, respectivamente.

6.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO SOB MANUTENÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO

A ausência de reaplicação do calcário resultou em menores valores de pH (em torno de 5,0), sem variações significativas entre as camadas amostradas (valores médios de 4,97 no SC e 4,89 no GS na camada 0-50 cm) (Figura 5a). O tratamento CS alterou o pH do solo até 25 cm de profundidade quando comparado ao SC. Houve diferenças significativas para os valores de pH entre as camadas de solo, com os maiores valores ocorrendo na camada superficial (6,4 e 6,5 nos tratamentos CS e CS+GS, respectivamente) e os menores valores no solo das camadas mais profundas, geralmente com valores de pH inferiores a 5,1. O tratamento GS não alterou os valores de pH do solo de nenhuma camada amostrada.

O tratamento GS não alterou a V do solo de nenhuma camada amostrada no perfil quando comparado ao tratamento SC (Figura 5b). Os tratamentos sem reaplicação de corretivo (SC e GS) apresentaram os maiores valores de V no solo da camada superficial (0-5 cm) (31 e 35%, respectivamente). Nesses tratamentos, não houve diferença estatística no solo entre as camadas 5 e 45 cm de profundidade. A reaplicação superficial de calcário (CS e CS+GS) alterou a V até 20 cm de profundidade (Figura 5b), com valores de V de 85% na camada 0-5 cm, decrescendo até 24% na camada 15-20 cm. Nas camadas abaixo de 15 cm não houve diferença entre as camadas de solo, com valores médios de 21 e 22% nos tratamentos CS e CS+GS, respectivamente.

Figura 4 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c), saturação por alumínio (d) e acidez potencial (H^0+Al^{3+}) (e) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após onze anos de manejo sob plantio direto sem reaplicação de calcário (SC) e de um solo sob vegetação natural do cerrado (CN) dividido em oito camadas, da superfície até 50 cm profundidade.

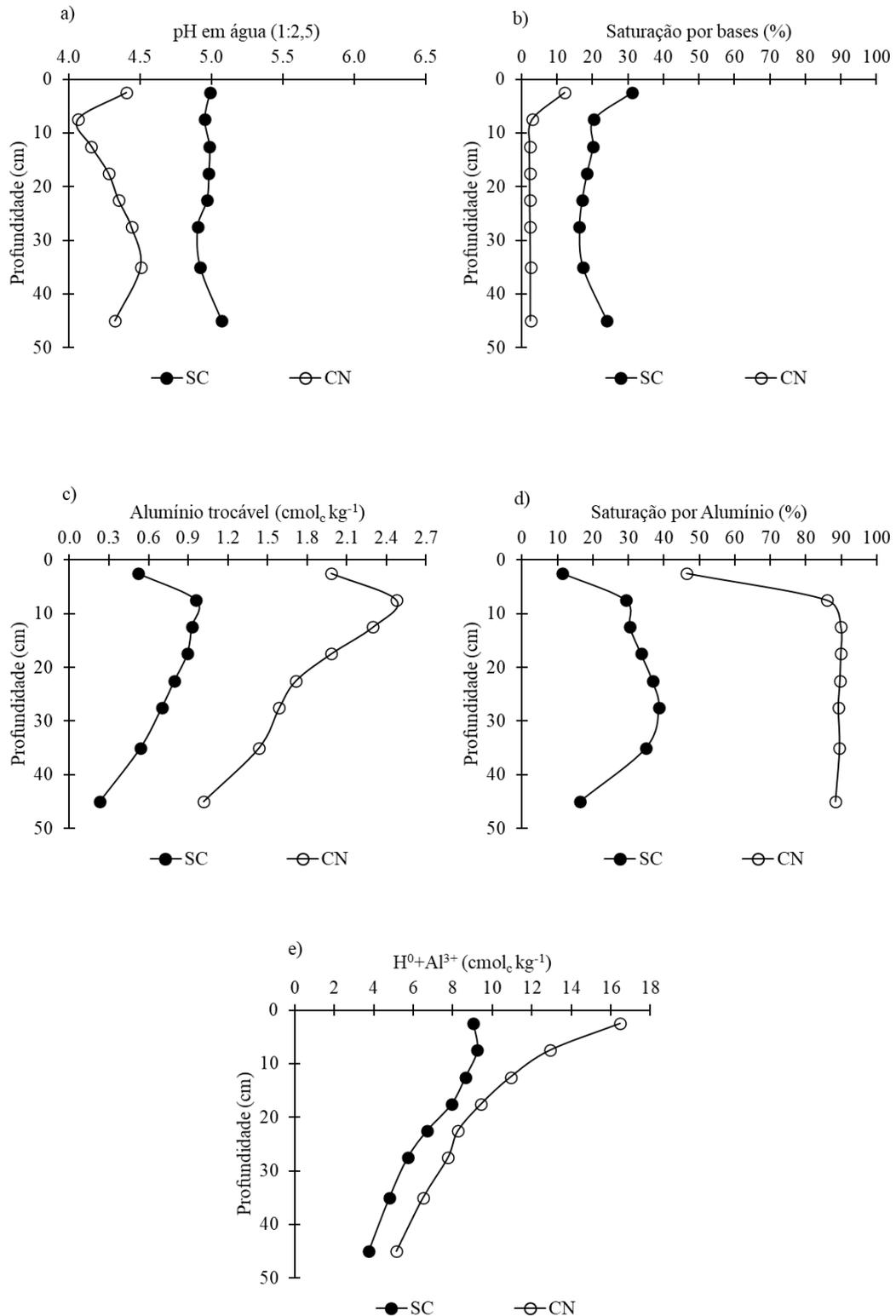
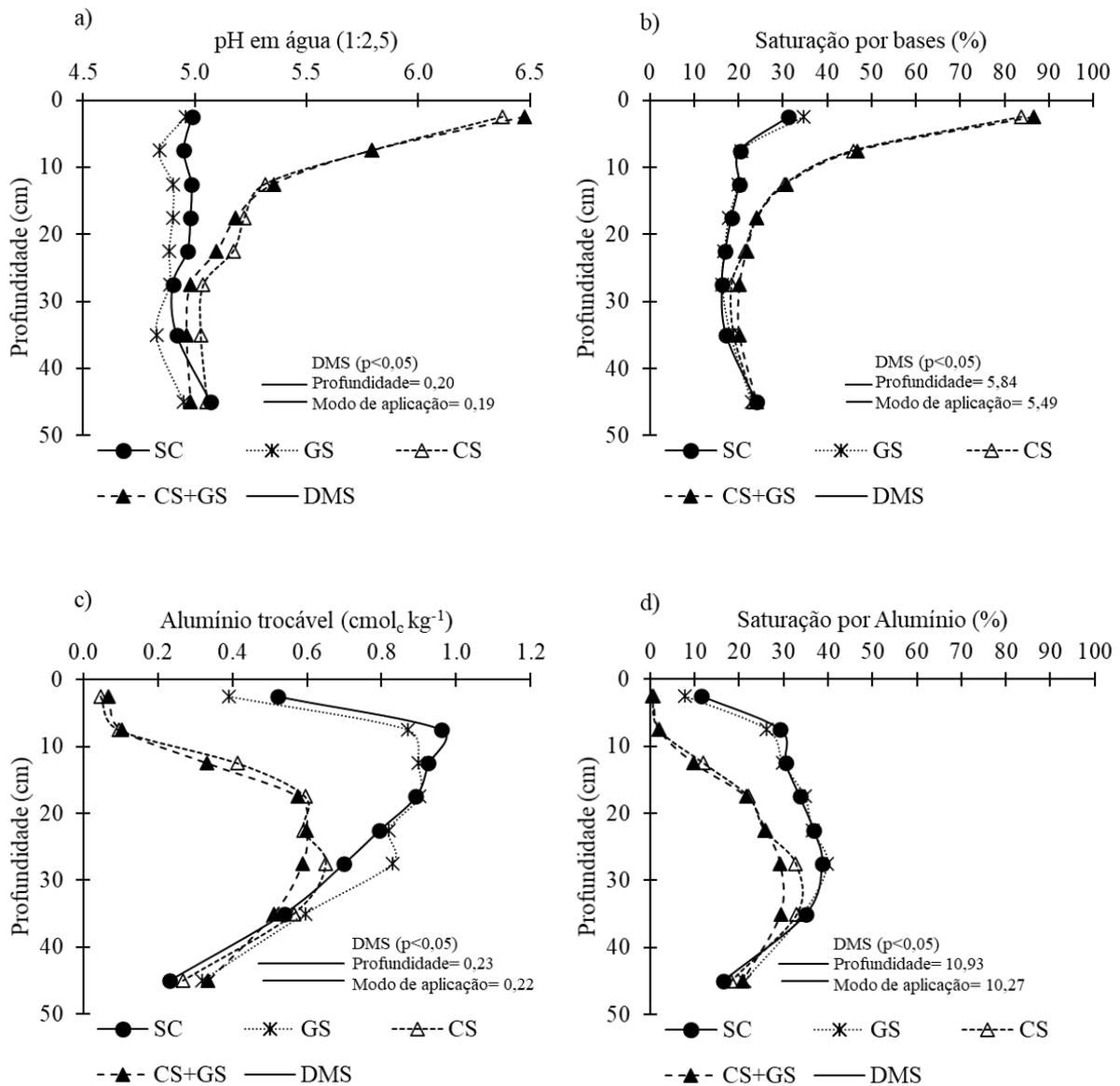


Figura 5 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c) e saturação por alumínio (d) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), com reaplicação superficial de gesso agrícola (GS), com reaplicação superficial apenas de calcário (CS) e com aplicação superficial de calcário e gesso agrícola (CS+GS). DMS = diferença mínima significativa.



O tratamento GS não alterou o teor de Al e a *m* no solo de nenhuma camada amostrada no perfil quando comparado ao tratamento SC (Figura 5c e 5d). Nos tratamentos que não foi reaplicado corretivo (SC e GS), os menores teores de Al trocável ocorreram na camada 40-50 cm (0,23 e 0,32 cmol_c kg⁻¹, respectivamente), e os maiores teores no solo das camadas entre 5 e 30 cm (valores médios de 0,85 e 0,86 cmol_c kg⁻¹, respectivamente). Nesses tratamentos, os

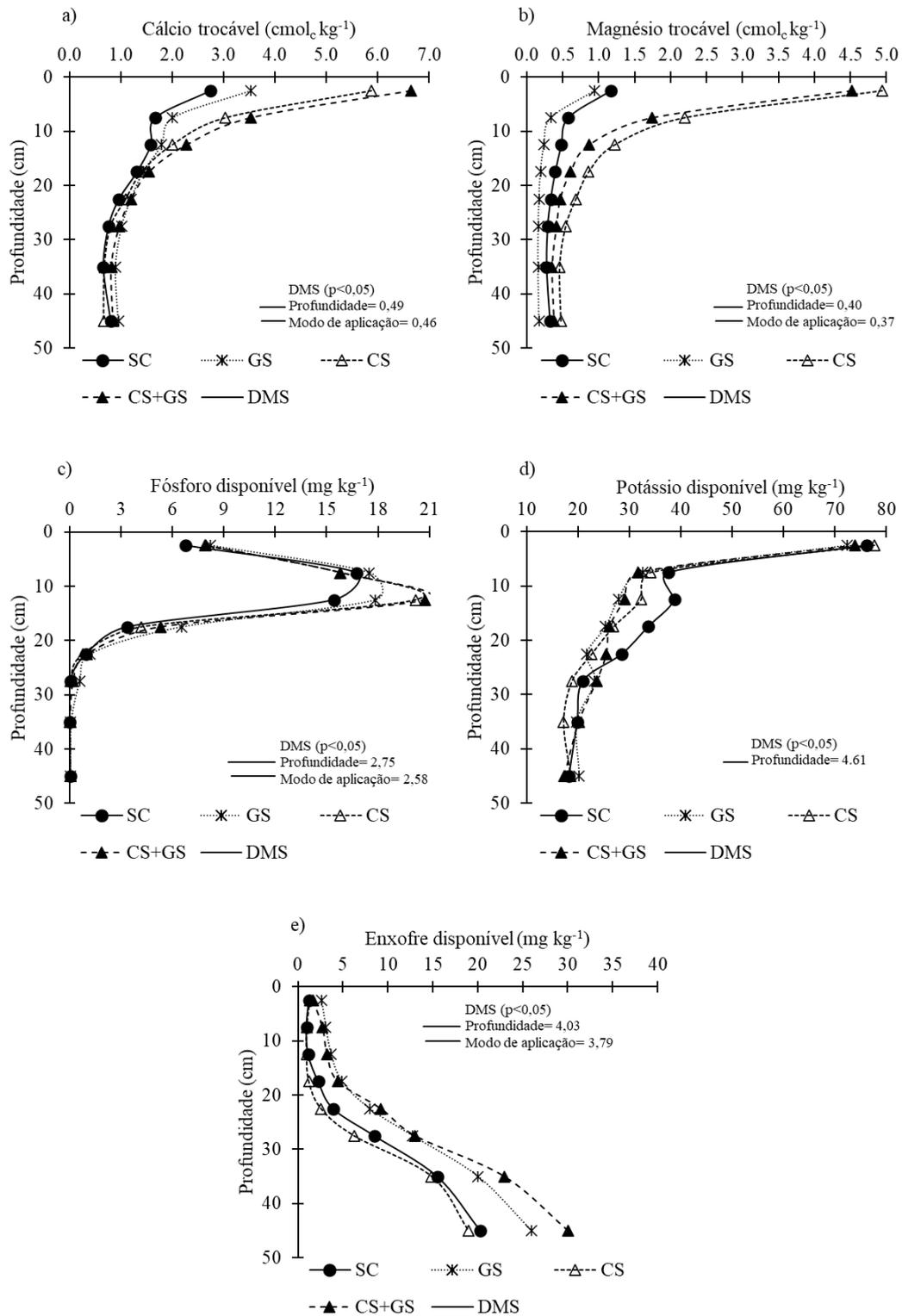
menores teores de m ocorreram no solo da camada superficial, com valores de 11 e 8%, nos tratamentos SC e GS, respectivamente. A reaplicação superficial de calcário alterou o teor de Al até 20 cm de profundidade e a m no solo até 25 cm de profundidade quando comparado ao tratamento SC. Nessas camadas, os maiores teores de Al trocável (entre 0,52 e 0,96 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) e m (entre 11 e 37%) foram sempre observados no tratamento SC. Nos tratamentos com reaplicação de corretivo (CS e CS+GS), os menores teores de Al ocorreram no solo das camadas até 10 cm de profundidade, com valores médios de 0,07 e 0,09 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente, e os maiores teores no solo das camadas entre 15 e 40 cm, com valores médios de 0,60 e 0,57 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente. Nesses tratamentos, os menores teores de m ocorreram no solo das camadas até 10 cm de profundidade, com teores menores que 2%.

O tratamento GS alterou o teor de Ca apenas no solo da camada superficial (0-5 cm), com teor de Ca de 3,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, quando comparado ao tratamento SC, que apresentou teor de Ca de 2,7 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Figura 6a). O tratamento CS aumentou os teores de Ca no solo até 10 cm de profundidade, e quando o gesso foi aplicado associado (CS+GS), os teores de Ca foram maiores até 15 cm, quando comparado a não aplicação de calcário. O maior teor de Ca da camada superficial, de 6,6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, ocorreu no tratamento CS+GS. Observou-se diminuição estatisticamente significativa desse nutriente no solo em todos tratamentos à medida que se aprofunda no perfil do solo.

O tratamento GS não alterou o teor de Mg do solo em nenhuma camada do perfil amostrada quando comparado ao tratamento SC (Figura 6b). Nos tratamentos sem reaplicação do corretivo (SC e GS), o solo da camada superficial já continha maiores teores de Mg (1,2 e 0,9 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente) que o solo das demais camadas (teores médios de 0,4 e 0,2 $\text{cmol}_c \text{Mg kg}^{-1}$). O tratamento CS aumentou os teores de Mg no solo até 20 cm de profundidade, e quando o gesso foi aplicado associado ao calcário (CS+GS), os teores de Mg foram maiores até 15 cm, quando comparado a não aplicação de calcário. O maior teor de Mg foi detectado no solo da camada superficial, de 4,9 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, no tratamento CS.

Em decorrência da aplicação dos fertilizantes fosfatados solúveis no sulco de semeadura ($\pm 7-12$ cm), o solo das camadas entre 5 e 15 cm possui maior dessortividade de P (Figura 6c). O solo das camadas abaixo dessa faixa tem grande carência de P disponível, não estando adequado ao bom desenvolvimento das plantas, inclusive com apenas 1,0 mg kg^{-1} de P disponível no solo abaixo dos 20 cm. O tratamento CS+GS não alterou o teor de P extraído pelo método Mehlich-1 quando comparado ao tratamento CS. A aplicação de calcário em superfície (CS e CS+GS) aumentou a quantidade de P extraído do solo da camada 15-20 cm quando comparada ao tratamento SC.

Figura 6 – Teores de cálcio (a) e de magnésio (b) trocáveis, de fósforo (c), de potássio (d) e de enxofre (e) disponíveis determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), com reaplicação superficial apenas de gesso agrícola (GS), com reaplicação superficial apenas de calcário (CS) e com aplicação superficial de calcário e gesso agrícola (CS+GS). DMS = diferença mínima significativa.



A reaplicação de calcário e/ou gesso agrícola não alterou o conteúdo de K do solo de nenhuma camada amostrada (Figura 6d). Os maiores teores de K foram observados no solo da camada superficial (74 mg kg^{-1}), decrescendo com o aumento da profundidade. Os valores de K disponíveis estão muito abaixo do nível de suficiência para as plantas.

Os solos que não receberam adição de gesso (SC e CS) possuem teores de S muito baixos, especialmente, na camada superficial (0-25 cm - valores médios de 1,9 e $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$ para SC e CS, respectivamente) (Figura 6e). Mesmo com aplicação de gesso, tratamentos GS e CS+GS, os teores de S extraídos pelo fosfato de cálcio do solo não foram alterados até 20 cm de profundidade. Somente no solo abaixo de 20 cm de profundidade é que o S aplicado na forma de gesso agrícola foi retido pelos coloides. Nos tratamentos GS e CS+GS, foi observado aumento dos teores de S com o aumento da profundidade, com teores médios de $8,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo da camada 20-25 cm para 26 mg kg^{-1} no solo da camada 40-50 cm.

6.3 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO APÓS REINÍCIO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO

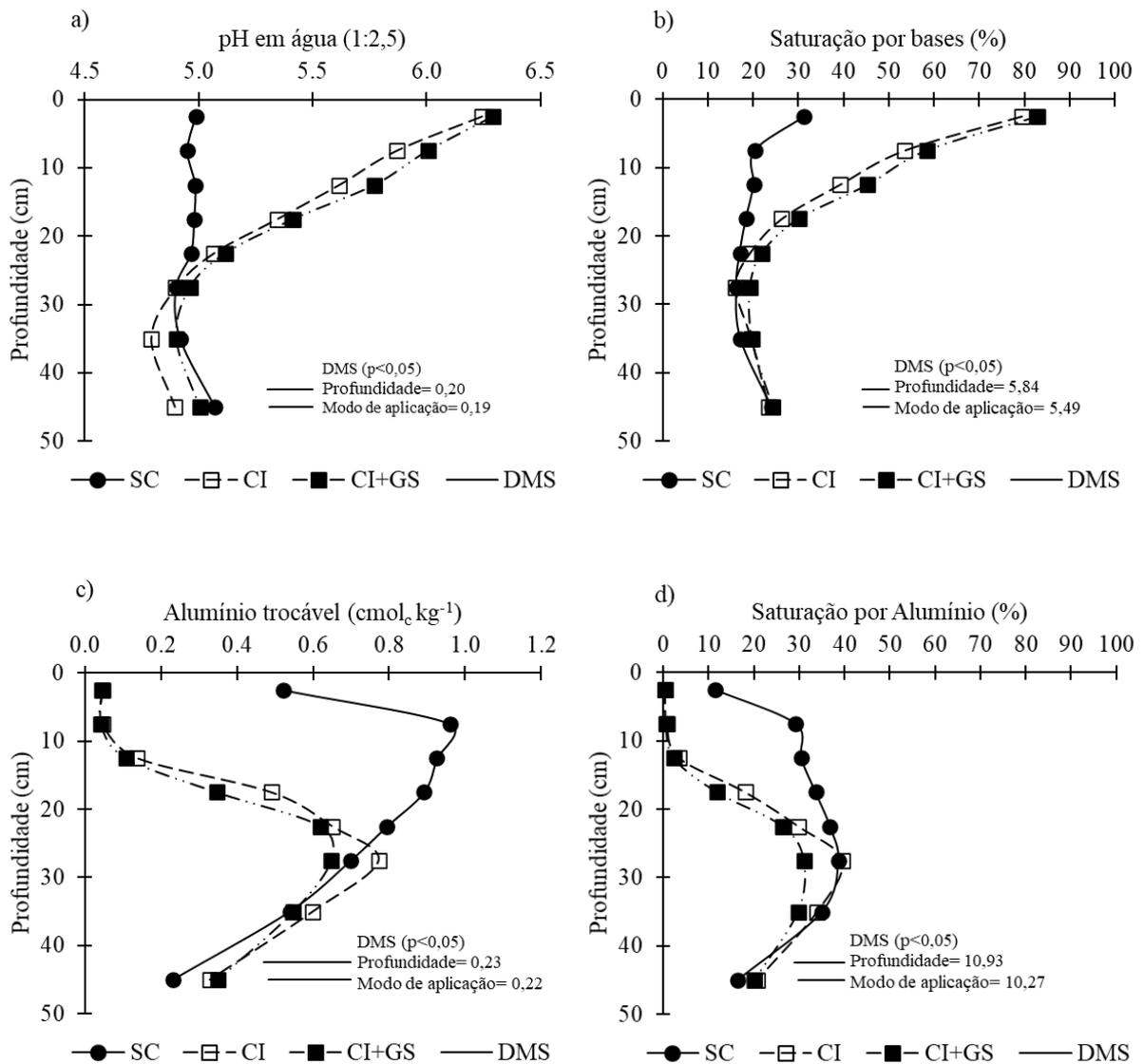
Os tratamentos CI e CI+GS não apresentaram diferença estatística entre si para os valores de pH do solo em nenhuma camada amostrada (Figura 7a). Nesses tratamentos houve aumento do pH do solo até 20 cm de profundidade quando comparado ao tratamento SC. Mesmo com incorporação do corretivo, os maiores valores de pH foram observados no solo da camada superficial (6,3), decrescendo para 5,1 no solo da camada 20-25 cm e para valores inferiores a 5,0 abaixo dessa camada.

Similarmente ao observado para a acidez ativa, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos CI e CI+GS para os valores de V no solo de nenhuma camada amostrada (Figura 7b). Nesses tratamentos, a V do solo foi alterada até 20 cm de profundidade em relação ao SC. Os maiores valores de V foram observados no solo dos tratamentos que receberam reaplicação do corretivo de forma incorporada (CI e CI+GS), com valores médios de V de 81% no solo da camada superficial (0-5 cm), decrescendo até 28% no solo da camada 15-20 cm e à valores inferiores a 24% no solo abaixo dessa camada.

Similarmente ao observado para a acidez ativa e V, o tratamento CI+GS não alterou os valores de Al trocável e *m* no solo de nenhuma camada amostrada no perfil quando comparado ao tratamento CI (Figura 7c e 7d). Os teores de Al e *m* do solo das camadas entre 0 e 20 cm de profundidade foram dependentes dos tratamentos. Nos tratamentos com aplicação de corretivo incorporado (CI e CI+GS), os menores teores de Al trocável ocorreram no solo das camadas de 0 a 15 cm, com valores médios de 0,08 e $0,07 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente, e os maiores teores

no solo das camadas de 20 a 40 cm, com valores médios de 0,67 e 0,61 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente. Nesses tratamentos, os menores teores de m ocorreram no solo das camadas até 15 cm de profundidade, com teores menores que 4%.

Figura 7 – Valores de pH em água (a), saturação por bases (b), alumínio trocável (c) e saturação por alumínio (d) determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), reinício do sistema plantio direto apenas com incorporação de calcário (CI) e reinício do sistema plantio direto com incorporação de calcário associado a aplicação superficial de gesso agrícola (CI+GS). DMS = diferença mínima significativa.



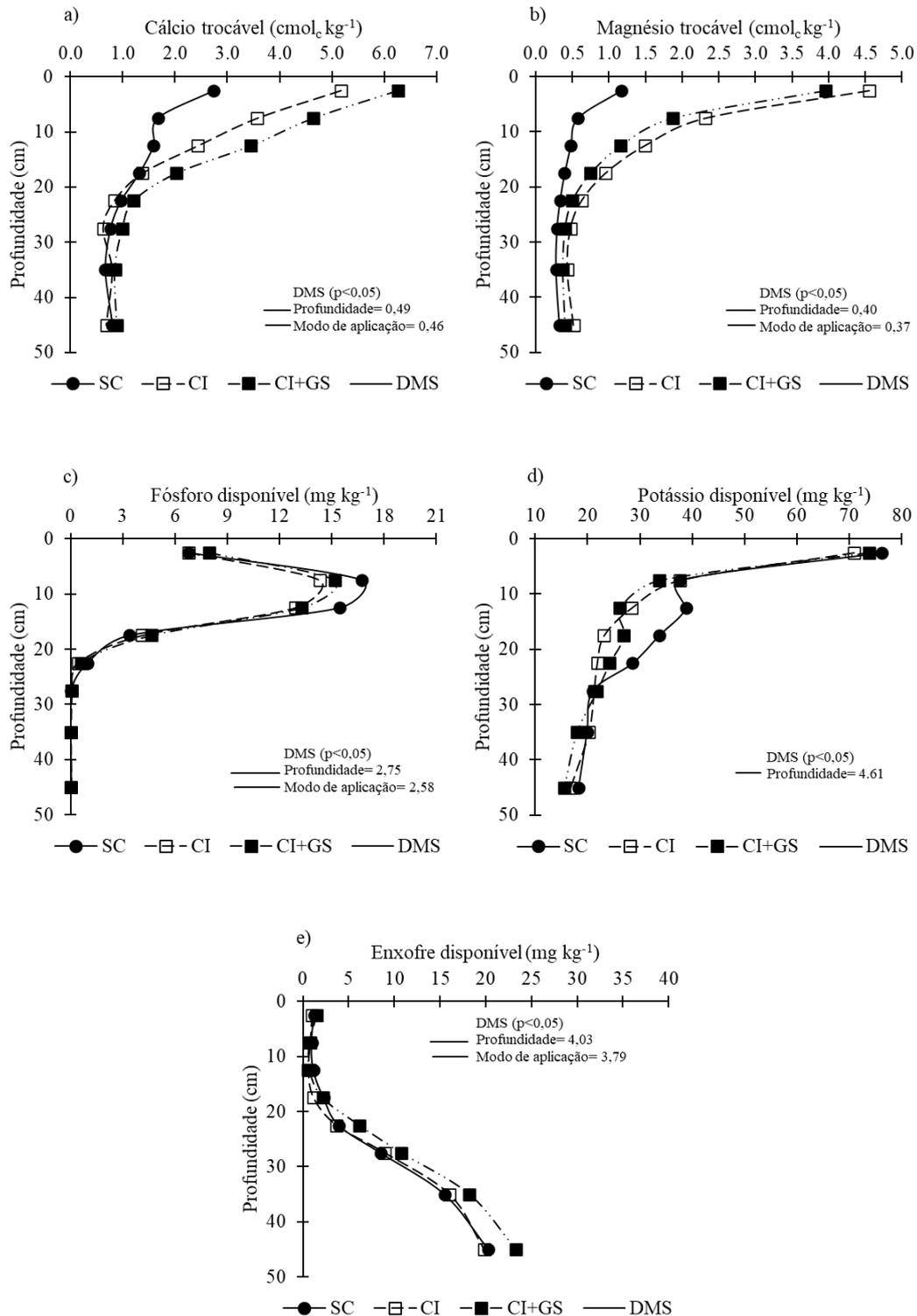
O tratamento CI alterou os teores de Ca do solo até 15 cm de profundidade, enquanto o tratamento CI+GS expressou as diferenças até 20 cm, comparado ao SC (Figura 8a). Os maiores teores de Ca foram observados no tratamento CI+GS no solo das camadas até 20 cm de profundidade, variando de $6,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no solo da camada superficial a $2,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no solo da camada 15-20 cm. Os maiores teores de Ca foram observados no solo da camada superficial, $2,7$, $5,2$ e $6,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ nos tratamentos SC, CI, CI+GS, respectivamente, e os menores a partir de 20 cm de profundidade, inferiores a $1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

O tratamento CI+GS diminuiu os teores de Mg do solo até 10 cm de profundidade, quando comparada ao tratamento CI (Figura 8b). Os teores de Mg foram maiores no solo das camadas até 20 cm de profundidade no tratamento CI, e até 15 cm no tratamento CI+GS, em relação ao tratamento SC. Nessas camadas, o maior teor de Mg foi observado no solo da camada superficial, de $4,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, no tratamento CI. Os maiores teores de Mg foram sempre observados no solo da camada superficial, decrescendo com o aumento da profundidade.

Similarmente ao observado nos tratamentos com reaplicação superficial do corretivo, associado ou não ao uso do gesso (CS e CS+GS), a localização dos fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura possibilitou incremento na disponibilidade de P no solo no entorno da profundidade de aplicação (Figura 8c). Ademais, a incorporação do corretivo teve efeitos desprezíveis na disponibilidade de P quando comparada a reaplicação superficial e mesmo sem a reaplicação do corretivo. Os teores de P disponíveis no solo abaixo dos 20 cm é similar ao bioma natural e está abaixo dos valores de referência considerados como adequados.

A reaplicação de calcário e/ou gesso agrícola não alterou o conteúdo de K disponível do solo, que continua abaixo dos valores considerados adequados (Figura 8d). A incorporação de calcário, independente da aplicação de gesso agrícola (tratamentos CI e CI+GS), não alterou os teores de S do solo em nenhuma camada amostrada quando comparado ao tratamento SC (Figura 8e). O solo das camadas abaixo de 20 cm acumulou parte do S aplicado na superfície, cujos valores incrementaram de $6,2 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo da camada 20-25 cm para $23,3 \text{ mg kg}^{-1}$ no solo da camada 40-50 cm.

Figura 8 – Teores de cálcio (a) e de magnésio (b) trocáveis, de fósforo (c), de potássio (d) e de enxofre (e) disponíveis determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manutenção do sistema plantio direto sem reaplicação de calcário (SC), reinício do sistema plantio direto apenas com incorporação de calcário (CI) e reinício do sistema plantio direto com incorporação de calcário associado a aplicação superficial de gesso agrícola (CI+GS). DMS = diferença mínima significativa.



6.4 RENDIMENTO DAS CULTURAS

A aplicação de gesso não incrementou as produtividades das culturas da soja e do milho em nenhum dos sete cultivos sucessivos, mesmo que os teores de S estivessem muito abaixo dos níveis críticos (Tabela 4). O solo cultivado durante 25 anos sob SCC, com constantes reaplicações de corretivos da acidez, seguido de onze anos de SPD sem reaplicação desse insumo (SC), ainda não expressou toxidez de Al ou deficiência de Ca e Mg suficientes para afetar a produtividade das culturas de soja e milho.

Tabela 4 – Produtividade acumulada e média de cada tratamento e produtividade média anual de soja e milho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).

Ano de cultivo	Tratamentos						Média ^a
	SC	GS	CS	CS+GS	CI	CI+GS	
..... Produtividade de soja (kg ha ⁻¹)							
2012/2013	3.257	3.423	3.483	3.605	3.563	3.788	3.520 d
2013/2014	3.451	3.638	3.639	3.703	3.606	3.865	3.650 d
2014/2015	3.556	3.544	3.747	3.727	3.643	3.839	3.676 d
2015/2016	4.219	4.181	4.365	4.323	4.164	4.174	4.238 c
2016/2017	4.113	4.096	4.354	4.482	4.511	4.426	4.330 c
2017/2018	4.936	5.055	5.143	5.121	5.451	5.338	5.174 b
2018/2019	5.226	5.218	5.562	5.455	5.449	5.574	5.414 a
Média^b	4.108 C	4.165 BC	4.328 AB	4.345 AB	4.331 AB	4.429 A	-
Acumulado	28.757 C	29.154 BC	30.293 AB	30.415 AB	30.387 AB	31.004 A	-
..... Produtividade de milho (kg ha ⁻¹)							
2013	4.591	4.834	4.686	4.784	4.953	4.866	4.786 e
2014	8.671	8.780	8.902	8.410	8.868	8.690	8.720 ab
2015	7.505	7.309	7.847	7.672	7.814	7.976	7.687 c
2016	8.026	8.081	8.529	8.557	8.401	8.906	8.417 d
2017	6.160	6.731	6.388	6.611	6.684	6.877	6.575 d
2018	5.953	6.300	6.424	6.459	6.670	6.535	6.390 d
2019	8.580	8.724	9.343	8.862	8.921	9.683	9.019 a
Média^b	7.069 B	7.251 AB	7.446 AB	7.336 AB	7.473 AB	7.648 A	-
Acumulado	49.485 B	50.760 AB	52.119 AB	51.355 AB	52.312 AB	53.534 A	-

^a Valores na coluna representam a média das repetições dos seis tratamentos (n = 30). ^b Valores na linha representam a média das repetições de sete anos de cultivo (n = 35). Os valores representam a média de cinco repetições (n = 5). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A produtividade média da soja cultivada de 2012 a 2019 no tratamento SC foi de 4.108 kg ha⁻¹, significativamente inferior aos tratamentos que receberam reaplicação do corretivo

(4.361 kg ha⁻¹). Similarmente, a produtividade média de milho obtida sem a reaplicação do corretivo da acidez (SC) foi de 7.069 kg ha⁻¹, diferindo estatisticamente apenas do tratamento CI+GS (7.648 kg ha⁻¹).

As maiores produções acumuladas de grãos de soja (sete anos) foram observadas nos tratamentos CS, CS+GS, CI e CI+GS (média de 30.525 kg ha⁻¹), sendo superior ao tratamento SC (28.757 kg ha⁻¹) (Tabela 4). Similarmente, a produtividade acumulada de milho foi superior no tratamento CI+GS (53.534 kg ha⁻¹) quando comparado ao tratamento SC (49.485 kg ha⁻¹).

A maior produtividade média de soja foi observada no ano de 2018/2019 (5.414 kg ha⁻¹) e a menor foi a de 2012/2013 (3.520 kg ha⁻¹), não diferindo das safras de 2013/2014 e 2014/2015 (Tabela 4). A safra de cultivo com maior produtividade de milho foi a de 2018/2019 (9.019 kg ha⁻¹), não diferindo da safra de 2013/2014, e a safra de menor produtividade foi a safra de 2012/2013 (4.786 kg ha⁻¹).

7 DISCUSSÃO

A interpretação dos atributos químicos da acidez do solo e da disponibilidade de nutrientes pode ser feita de duas maneiras diferentes (KAMINSKI et al., 2005). O mais comum é a comparação por métodos estatísticos, assumindo a diferença significativa entre as propriedades do solo observadas nos tratamentos, independentemente da relevância agrônômica dessa diferença. Outra maneira é considerar limites críticos para a resposta da produtividade das culturas, que normalmente são estabelecidos por ensaios de correlação e calibração para cada região. O Estado do Mato Grosso segue a recomendação oficial de correção do solo e da adubação estabelecida para os solos do Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004), que define os limites críticos para o crescimento e rendimento das plantas com base em vários anos de experimentação agrícola (Anexo A). Com base nisso, neste estudo, além da interpretação estatística, serão utilizados esses limiares agrônômicos para interpretar os resultados.

A avaliação da magnitude do processo de reacidificação do solo pode ser feita comparando-se as condições químicas do solo no momento da implantação do experimento (Tabela 2) com o solo do tratamento sem reaplicação de calcário (SC) (Figura 4). A reacidificação do solo ocorre de forma lenta, pois nos últimos sete anos, o solo da camada 0-20 cm teve diminuição de apenas 0,3 unidades de pH e 13 pontos percentuais de V e incremento de 3,9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 0,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e 16 pontos percentuais nos valores de $\text{H}^0+\text{Al}^{3+}$, Al trocável e m , respectivamente. Além disso, o solo sob CN apresenta valores de pH e V de 0,8 unidades e 17 pontos percentuais a menos, respectivamente, bem como 3,7 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 1,4 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e 52 pontos percentuais a mais de $\text{H}^0+\text{Al}^{3+}$, Al trocável e m , respectivamente, quando comparado ao solo cuja acidez natural foi corrigida a 36 anos e é mantida a 11 anos sem reaplicação de corretivo (tratamento SC) (Figura 4).

Esse comportamento indica que o solo não retornou ao seu estado de acidez natural após mais de uma década da última intervenção no solo (de 2008 a 2019) e a mais de três décadas da correção da acidez natural (de 1983 a 2019). Isso demonstra que o processo de reacidificação do solo está ocorrendo de maneira lenta. Esses resultados corroboram com Barrow (1999), que afirma que os distúrbios causados pela calagem e a magnitude do processo de reacidificação dificilmente fará com que os níveis de acidez do solo retornem à sua condição inicial, sem a adição de corretivo. Achados semelhantes foram encontrados por Rheinheimer et al. (2018b) em estudo avaliando o efeito residual do calcário em solo de textura franco arenoso (14% de argila), cultivados desde 1988 sob SPD. Esses autores verificaram que, mesmo após 18 e 24

anos da última aplicação do calcário, o pH do solo ainda era maior do que o observado no solo da área de vegetação natural até a profundidade de 70 cm. Além disso, o solo que recebeu aplicação de corretivo da acidez apresentava menor valor de H^0+Al^{3+} no solo da camada 0-60 cm quando comparado ao solo da área de vegetação natural.

A reacidificação do solo ocorre de forma lenta pois, após a correção da acidez potencial do solo e a consequente neutralização do Al^{3+} do solo, ocorre primeiro a liberação de prótons na solução do solo, provenientes principalmente da água da chuva. Além disso, em menor intensidade, a reacidificação do solo ocorre pela deposição de fertilizantes que produzem íons H^+ no processo de dissolução, e também pela absorção de cátions pelas culturas, e consequente liberação de quantidades estequiométricas iguais de H^+ (GOULDING, 2016). Assim, o processo de reacidificação ocorre a partir da superfície do solo, primeiramente com a redução dos valores de pH devido a liberação de prótons na solução do solo, mas não necessariamente o aparecimento de Al^{3+} na solução do solo. O reaparecimento do Al^{3+} no solo ocorre mais lentamente e em baixas quantidades. Dessa forma, a reaplicação superficial de calcário é suficiente para corrigir a reacidificação do solo, tornando dispensável a incorporação do corretivo da acidez nestes casos.

Os efeitos da reaplicação de calcário em superfície foram mais intensos no solo da camada superficial, pois quando toda a dose de calcário é aplicada sobre a superfície do solo, restringe a solubilização e dissociação do corretivo (JORIS et al., 2013). Além disso, a calagem em superfície é relativamente lenta na diminuição da acidez potencial em subsuperfície (TANG et al., 2003) devido à baixa solubilidade do corretivo da acidez e dos produtos de sua reação no solo (RAMPIM et al., 2011). O aumento do pH do solo na superfície pode acelerar a velocidade com que o HCO_3^- , acompanhado de Ca e Mg, movimenta-se para o subsolo (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Entretanto, os efeitos da calagem só ocorrem em profundidade após o pH na zona de dissolução do calcário ter atingido valores de 5,2 a 5,5 (RHEINHEIMER et al., 2000b). Desta forma, enquanto existirem fontes de prótons, a reação de neutralização da acidez fica limitada ao solo no entorno das partículas de calcário, retardando o efeito na subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000b).

Em condições de solo e clima semelhantes, Alleoni et al. (2005) verificaram que a calagem superficial ($7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) alterou os atributos da acidez do solo da camada 0-5 cm após seis meses da aplicação de calcário e após 30 meses os efeitos se estenderam até 10 cm de profundidade. No presente estudo, após sete anos da reaplicação do corretivo da acidez em superfície, foram observadas alterações nos atributos químicos do solo, com aumento do pH e da V e redução do teor de Al e *m*, sem, no entanto, sua neutralização total, até aproximadamente

25 cm de profundidade. A presença de canais contínuos, criados pela fauna do solo e decomposição de raízes, favorecido pelo SPD, facilitam a infiltração de água e o arraste de partículas de calcário aplicado em superfície (CALEGARI et al., 2013; RHEINHEIMER et al., 2000b), promovendo a alteração dos atributos da acidez em maiores profundidades. O volume de macroporos e a conexão entre eles é maior no SPD quando comparado aos sistemas que utilizam o revolvimento do solo por grades ou arados (SCHAEFER et al., 2001). Além disso, alguns solos intemperizados, como os Latossolos, podem apresentar caráter retrátil quando expostos à períodos de seca, criando fendas verticais pronunciadas (TESTONI et al., 2017). Também, vale destacar que a área onde o estudo está localizado já havia sido cultivada por décadas sob SCC com aplicação de calcário a doses desconhecidas antes da instalação do experimento e, portanto, não se trata mais de acidez natural.

Os sistemas de recomendação de calagem em vigor no Brasil não recomendam incorporar corretivo da acidez em solos cuja acidez potencial tenha sido corrigida previamente com incorporação do corretivo e não exista restrições em subsuperfície. A incorporação do corretivo da acidez resultou em efeito significativo na correção da acidez do solo até a profundidade de 20 cm, com pouca diferença na distribuição da m no perfil do solo comparativamente à aplicação superficial. Entretanto, os efeitos da calagem incorporada ocorreram de forma mais homogênea na camada arável do solo (0-20 cm). Para neutralizar a acidez do solo em camadas mais profundas, as partículas do calcário ou os produtos da sua dissociação devem ser movidos para baixo no perfil do solo (RHEINHEIMER et al., 2000b). Com o revolvimento do solo e a incorporação do corretivo da acidez, o aumento do pH e da V e a neutralização do Al ocorrem no solo da camada mobilizada, além do aumento dos teores de cátions básicos fornecidos pelo corretivo. Além disso, os menores valores de m observados no solo dessas camadas está relacionado à elevação do pH do solo a valores maiores que 5,5, que provocam a precipitação do Al^{3+} da solução do solo em formas não tóxicas para as plantas (TIRITAN et al., 2016).

Os efeitos da incorporação do corretivo da acidez foram limitados ao solo da camada mobilizada no momento da incorporação do corretivo (0-20 cm), enquanto que a calagem superficial alterou os atributos da acidez do solo até 25 cm de profundidade. Dessa forma, a calagem incorporada não aumenta a profundidade do perfil do solo corrigido, pois, na incorporação do corretivo com uso de grades aradoras no início do experimento, pode ter ocorrido a ruptura dos poros, diminuindo o transporte de gás, água e solutos para as camadas mais profundas do solo (JARVIS; LARSBO; KOESTEL, 2017; MARTÍNEZ et al., 2016), consequentemente, reduzindo os possíveis efeitos da ação do corretivo da acidez em maiores

profundidades. Além disso, o revolvimento do solo para incorporação do corretivo da acidez promove a diluição do corretivo em um volume maior de solo (0-20 cm), o que pode ter diminuído o efeito da frente alcalinizante em profundidade (KAMINSKI et al., 2005; MOREIRA et al., 2001; RHEINHEIMER et al., 2018a).

Dessa forma, percebe-se que a incorporação do corretivo da acidez promove uma melhoria mais acentuada nas condições de pH para as culturas e reduz o Al tóxico no solo da camada mobilizada em relação a reaplicação superficial do corretivo. Comportamento semelhante foi observado por Rheinheimer et al. (2018a) em estudo envolvendo a aplicação em superfície e incorporada do calcário visando elevar o pH a 6,0 (17 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico) no momento da correção da acidez potencial original de um Argissolo de textura franco arenosa. Esses autores verificaram que após 18 anos a incorporação do calcário resultou em menores valores de pH em água, Al e V no solo das camadas superficiais; entretanto, no solo das camadas entre 10 e 25 cm, essa prática de manejo manteve melhor ambiente químico para o desenvolvimento radicular das plantas quando comparado a calagem superficial. Por outro lado, nesse mesmo trabalho, também foi identificado que a acidez do solo abaixo de 30 cm de profundidade parecia ser menor quando o calcário foi aplicado em superfície sem o revolvimento do solo.

Considerando os limites críticos dos atributos da acidez em solos argilosos, a reaplicação de calcário em superfície resultou em valores de pH e V do solo adequados (pH= 5,6 a 6,3 e V > 36%) até 10 cm de profundidade, enquanto que a incorporação do calcário resultou em valores adequados até 15 cm de profundidade (SOUSA; LOBATO, 2004). A *m* foi considerada adequada (*m* < 20%) até 15 cm com a reaplicação do corretivo de forma superficial e até 20 cm com a incorporação do corretivo (SOUSA; LOBATO, 2004). Dessa forma, percebe-se que a incorporação do corretivo da acidez proporcionou um ambiente favorável para o desenvolvimento das plantas em um maior volume de solo. Entretanto, a menor acidez do solo nas camadas mais superficiais, e conseqüentemente a menor toxidez do Al, permite que as raízes das plantas cresçam em um ambiente mais favorável. Petry et al., (1994) demonstraram, em estudo com solução nutritiva, que aquelas raízes que crescem inicialmente em ambiente sem a presença de Al tóxico continuam crescendo quase que normalmente ao serem expostas à alta concentração desse elemento (PETRY et al., 1994). No entanto, quando as raízes das plantas têm contato imediato com altos teores de Al em sua fase inicial de crescimento, mesmo que essas atinjam zonas sem a presença do elemento tóxico, não conseguem mais recuperar sua capacidade de expansão e, assim, a produtividade das plantas é afetada severamente (PETRY et al., 1994). Dessa forma, a reaplicação superficial do corretivo da acidez é suficiente para

promover o bom desenvolvimento das plantas. Vale destacar que a baixa toxicidade do Al às plantas só deve ocorrer na ausência de déficit hídrico, uma vez que em condições desfavoráveis de precipitações, a fitotoxicidade do Al^{3+} é intensificada e compromete severamente o crescimento radicular de plantas com pouca tolerância ao Al (CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006).

A produtividade da soja apresentou resposta positiva à reaplicação do corretivo da acidez do solo, independente da forma de reaplicação (aumento de $252 \text{ kg ha ano}^{-1}$). Em contrapartida, o milho respondeu positivamente apenas quando o calcário foi aplicado de forma incorporado e associado ao gesso (aumento de $578 \text{ kg ha ano}^{-1}$) quando comparado ao tratamento SC, mas não diferiu dos tratamentos que receberam calcário. Os prejuízos decorrentes do revolvimento do solo para incorporação do corretivo em SPD consolidado, como por exemplo, redução do teor de carbono do solo e da estabilidade de agregados e por favorecer a erosão do solo, entre outros, é maior que os ganhos com o aumento da produtividade do milho. Concordando com a filosofia da reaplicação do corretivo da acidez em superfície, as respostas em termos de aumento de produtividade são muito baixas, mas pelo menos evita futuras perdas de produtividade. Não há necessidade de incorporar o corretivo da acidez, uma vez que a correção da acidez natural tenha sido feita adequadamente, e tampouco adicionar gesso agrícola ao solo nessas condições.

Vale destacar que o solo que não recebeu reaplicação de corretivo da acidez proporcionou rendimento médio de $4.108 \text{ kg ha ano}^{-1}$ para a soja e de $7.069 \text{ kg ha ano}^{-1}$ para o milho. Esses valores excedem o rendimento médio de soja e milho de segunda safra dos últimos sete anos para o estado do Mato Grosso em cerca de 29 e 25%, respectivamente (CONAB, 2019). A pequena resposta das culturas a reaplicação de corretivo da acidez e a alta produtividade observada no solo sem reaplicação de corretivo são devido ao fato de que os níveis de Ca e Mg do solo estavam adequados e que a m inicial do solo, por volta de 10% na camada 0-20 cm, aumentando para 26% após sete anos de cultivo, não tenha sido suficiente para promover danos significativos às raízes das plantas.

Outros autores também observaram pouco ou nenhum incremento em produtividade de soja e milho em resposta a aplicação de corretivo da acidez. Por exemplo, Moreira et al. (2001) não observaram aumento na produtividade da soja e do milho em resposta a aplicação de calcário em um Latossolo sob clima subtropical e atribuíram esse fato à elevada V inicial do solo (em torno de 50% na camada 0-20 cm), o que foi suficiente para suprir as necessidades nutricionais das plantas. Fontoura et al. (2019) observaram que a calagem superficial aumentou o rendimento de grãos de soja em 9% (aumento de $294 \text{ kg ha ano}^{-1}$), mas não teve efeito sobre

a produtividade do milho em Latossolo de textura argilosa e com acidez moderada, atribuindo a ausência de resposta das culturas aos baixos níveis de Al trocável do solo e aos níveis adequados de Ca e Mg do solo, que também foi observado em nosso estudo.

Mesmo tendo ocorrido pouco incremento na produtividade anual das culturas com a aplicação do corretivo da acidez, a produção acumulada de soja e milho de segunda safra após sete anos de cultivo foi maior quando o corretivo da acidez foi adicionado ao solo, independente da forma de aplicação (cerca de 1.767 e 2.845 kg ha⁻¹ a mais quando comparada ao tratamento sem calagem, respectivamente). Mesmo tendo pouco incremento em produtividade, a resposta das culturas está coerente com as melhorias nos atributos químicos relacionados a acidez, especialmente, na diminuição da *m* e o incremento na disponibilidade Ca, Mg e S no solo.

Dessa forma, uma vez feita a correção da acidez potencial natural não há nenhuma razão para revolvimento do solo para fins de incorporação do corretivo da acidez enquanto as condições adequadas em subsuperfície forem mantidas com o passar do tempo. Mesmo que as respostas em aumento de produtividade das culturas sejam baixas, sempre que houver reacidificação do solo da camada superficial e reaparecer Al trocável, recomenda-se a simples deposição do corretivo da acidez em superfície, e em doses relativamente baixas [1/4 da dose recomendada para elevar o pH do solo a 6,0, como recomendado pela CQFS-RS/SC (2016) para SPD consolidado sem restrições na camada 10-20 cm].

A aplicação de gesso agrícola em superfície, isolado ou associado ao corretivo da acidez, não alterou o pH do solo e a dinâmica do Al, uma vez que o gesso não apresenta poder corretivo da acidez, pois seus produtos de solubilidade não produzem OH⁻ nem consomem H⁺. Ele é apenas uma fonte de Ca²⁺ e SO₄²⁻ às plantas. A aplicação de corretivo da acidez associado ao gesso agrícola resultou em maiores teores de Ca no solo em maiores profundidades se comparado a aplicação isolada de calcário. A mobilidade do Ca proporcionada pelo uso do gesso deve-se ao efeito do SO₄²⁻ em anular a carga do Ca²⁺, o que leva à formação de um par iônico, evitando assim que o Ca²⁺ se ligue às cargas do solo, facilitando sua descida às camadas mais profundas (NAVA et al., 2012). Assim, os dois íons fornecidos pelo gesso (Ca²⁺ e SO₄²⁻) podem migrar no perfil do solo. A elevação dos níveis de Ca em subsuperfície pode ser importante em períodos de veranico, caso o solo dessas camadas não contenha quantidades adequadas desse nutriente.

No presente estudo, os teores de Ca já estavam em níveis adequados (SOUSA; LOBATO, 2004) e, portanto, não haveria necessidade de adição de gesso. Aliás, houve um desbalanço entre Ca e Mg devido ao deslocamento desses no perfil do solo. A troca de Mg pelo Ca oriundo do gesso nos complexos superficiais é bem documentado na literatura (CAIRES et

al., 2003, 2006; ERNANI, 2016; FARINA; CHANNON; THIBAUD, 2000b; SORATTO; CRUSCIOL, 2008). Na solução do solo haverá formação do par iônico $MgSO_4^0$ que migra facilmente no perfil. Por exemplo, Costa e Crusciol (2016), em Latossolo de textura argilo arenosa (35% de argila), verificaram percolação de Mg após 60 meses devido a aplicação superficial de gesso agrícola combinada ou não da aplicação de calcário em superfície.

Grande parte do SO_4^{2-} aportado pelo gesso poderá migrar no perfil do solo. O SO_4^{2-} forma complexos superficiais com baixa energia de ligação com grupos funcionais aluminol da caulinita e Fe/Al/Mn-OH dos óxidos. Aliado a isso, o aumento do pH do solo devido à calagem, ao desprotonar os grupos funcionais, aumenta a energia de ligação dos cátions estruturantes dos argilominerais e óxidos, dificultado ou até impedindo a troca de ligantes. As altas precipitações, aliadas à alta solubilidade do SO_4^{2-} , podem promover a percolação do SO_4^{2-} para camadas mais profundas, ou até promover a lixiviação a ponto de sair do sistema explorado pelas raízes (OSÓRIO FILHO et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2005; TIECHER et al., 2012a, 2013). Caires et al. (2006) verificaram um aumento nos níveis de SO_4^{2-} do solo em profundidades de até 80 cm com aplicação superficial de gesso agrícola (3, 6 e 9 $Mg\ ha^{-1}$) após 53 meses em um Latossolo argiloso (58% de argila), e apenas uma pequena fração foi mantida no solo da camada 0-20 cm. Além disso, esses autores explicam que a retenção do SO_4^{2-} no solo de camadas mais profundas ocorre devido a maior acidez do solo em subsuperfície.

No presente estudo, a ausência de respostas das culturas à aplicação de gesso agrícola pode ter ocorrido devido aos teores de Ca e S do solo estarem em níveis considerados adequados (SOUSA; LOBATO, 2004), suficientes para suprir a necessidade das culturas, mesmo sem nenhuma aplicação de fonte desse nutriente. Alguns estudos apontaram aumento de rendimento das culturas pela aplicação de gesso agrícola pelo simples fato de fornecer S às plantas (PIAS et al., 2019), enquanto que outros estudos não encontraram correlação entre o S disponível no solo e o rendimento de grãos das culturas (LUCAS et al., 2013; OSÓRIO FILHO et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2005; TIECHER et al., 2012a, 2013). Entretanto, compilando dados da literatura, Pias et al. (2019) observaram que o principal fator que rege a resposta das culturas à fertilização com S nos solos brasileiros sob SPD é o teor de S disponível do solo. Esses autores observaram que em 50% das safras consideradas no estudo, a aplicação de S resultou em aumento nos rendimentos quando os teores de S do solo se encontravam abaixo do nível crítico (ou seja, 7,5 $mg\ S\ dm^{-3}$ extraído por fosfato de cálcio no solo da camada 0-20 cm). Em nosso estudo, além do fato dos teores de S disponível do solo no início do experimento estar em nível considerado adequado (10 $mg\ kg^{-1}$ no solo da camada 0-40 cm – SOUSA; LOBATO, 2004), a aplicação anual de superfosfato simples neste estudo (que apresenta S em sua composição)

como fonte de P, especialmente nos tratamentos que não receberam aplicação de gesso agrícola, pode ter fornecido quantidades suficientes de S às plantas que, conseqüentemente, não responderam à aplicação desse insumo.

As maiores concentrações de K observadas na superfície do solo ocorreram devido às aplicações de fertilizantes potássicos sobre a superfície, indicando que o K apresenta baixa mobilidade no solo, elevando os teores apenas no solo da camada superficial. Três fatores podem ser ponderados quanto a essa prática. Primeiro, está sendo aplicado fertilizante potássico em superfície quando na realidade há carência desse nutriente no solo abaixo dos 5 cm de profundidade. Segundo, está havendo empobrecimento do solo das camadas inferiores e, com certeza, parte do fertilizante aplicado na superfície não está sendo absorvido pelas culturas e até pode estar havendo transferência pelo escoamento superficial. Por fim, os fertilizantes potássicos devem ser aplicados no momento da semeadura e não antecipado ou retardado. Há fortes indícios de que a produtividade das culturas esteja sendo limitada por esses três fatores e não por problemas de acidez do solo.

A aplicação do corretivo da acidez e do gesso agrícola não tiveram efeitos na disponibilidade de P do solo. A massa de solo abaixo da zona de aplicação está severamente carente nesse nutriente. A correção da carência de P deveria ter sido feita há 36 anos, no momento da conversão do bioma Cerrado para transformá-lo em um agroecossistema produtor de grãos. No último revolvimento do solo no SCC, antecedendo a adoção do SPD, além da correção da acidez potencial residual do período de revolvimento, deveria ter sido incorporado fertilizantes fosfatados e potássicos para que pelo menos o solo da camada 0-20 cm tivesse teores disponíveis acima do nível crítico (6 e 80 mg dm⁻³, respectivamente – SOUSA; LOBATO, 2004). Não há solução sem revolvimento do solo para incorporação do fertilizante fosfatado. A aplicação do fertilizante fosfatado na linha de semeadura contribui em parte para o aumento da disponibilidade de P no solo da camada 0-20 cm. Houve incremento dos teores disponíveis de P no solo do entorno da zona de dissolução dos grânulos (8-15 cm), independente da aplicação de corretivo e/ou gesso. Dessa forma, ocorre a saturação dos locais mais ávidos por P, resultando em acúmulo de P em formas mais lábeis (TIECHER et al., 2012b), mas cabe ressaltar que esta prática poderá resultar em altíssima variabilidade espacial na disponibilidade do P, tanto vertical quanto horizontal. A combinação da deficiência de P abaixo da zona de aplicação, com a deficiência de K severa no solo abaixo dos 5 cm pode ser o principal fator limitante da produtividade das culturas, em especial, em anos com restrições hídricas.

8 CONCLUSÃO

A comparação dos atributos químicos relacionados a acidez do solo sob bioma natural com àquele transformado em sistema agrícola há 36 anos e sem reaplicação de corretivo há mais de uma década, evidencia que o processo de reacidificação do solo é lento.

A reaplicação superficial de calcário no solo diminuiu a saturação por alumínio até 25 cm de profundidade, sem, no entanto, a sua neutralização total e se mostrou suficiente para manter níveis adequados dos atributos da acidez e da disponibilidade de nutrientes do solo, uma vez que a correção do solo no momento da implantação do sistema plantio direto tenha sido realizado de forma adequada. A incorporação do corretivo da acidez alterou os atributos da acidez do solo de forma mais homogênea na camada arável do solo (0-20 cm), com efeitos restritos ao solo da camada mobilizada. Entretanto, não resultou em grandes benefícios relacionados a melhoria nos atributos da acidez do solo quando comparada a aplicação superficial de calcário. Desta forma, somente em casos de restrições de produtividade das culturas por limitações físicas e químicas do solo em subsuperfície (abaixo de 10 cm) é que se deve levar em consideração a possibilidade do revolvimento do solo com incorporação de corretivo da acidez e de fertilizantes fosfatados e potássicos.

A aplicação de gesso agrícola não alterou os atributos da acidez do solo e a dinâmica do alumínio no perfil do solo. A baixa saturação por alumínio, associado aos níveis adequados de cálcio e magnésio do solo e a aplicação de fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura foi suficiente para promover um bom estado nutricional das plantas, conseqüentemente, sem resposta sobre a produtividade das culturas.

A produtividade da soja apresentou resposta positiva à reaplicação do corretivo da acidez do solo, independente da forma de reaplicação (aumento de 252 kg ha ano⁻¹). O milho respondeu positivamente apenas quando o calcário foi aplicado de forma incorporado e associado ao gesso (aumento de 578 kg ha ano⁻¹) comparado a ausência de aplicação de calcário, mas não diferiu dos tratamentos que receberam calcário. As respostas em termos de aumento de produtividade são baixas, mas pelo menos a aplicação do corretivo da acidez evita futuras perdas de produtividade. Os prejuízos decorrentes do revolvimento do solo para incorporação do corretivo em SPD, como por exemplo, redução do teor de carbono do solo e da estabilidade de agregados e por favorecer a erosão do solo, entre outros, é maior que os ganhos com o aumento da produtividade do milho. Não há necessidade de incorporar o corretivo da acidez, uma vez que a correção da acidez natural tenha sido feita adequadamente, e tampouco adicionar gesso agrícola ao solo nessas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L. F. R.; 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 923–934. 2005. D.O.I.:10.1590/S0100-06832005000600010

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 359–367. 2004.

ANGHINONI, I.; SALET, L. R. **Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto**. In: NUERNBERG, N. J. *Plantio Direto: conceitos, fundamentos e práticas culturais*. Lages: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul. 1997.

ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M.-H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes — A review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 1, p. 1–9. 2013. D.O.I.:10.1007/s13765-012-2314-z

BARROW, N. J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. **Soil Research**, v. 37, n. 5, p. 787. 1999. D.O.I.:10.1071/SR98115

BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 137, n. 1–2, p. 47–58. 2010. D.O.I.:10.1016/J.AGEE.2010.02.003

BUSTAMANTE, M. et al. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl, p. 655–671. 2012. D.O.I.:10.1590/S1519-69842012000400005

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275–286. 2003. D.O.I.:10.1590/S0100-06832003000200008

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370–379. 2006. D.O.I.:10.1590/S0103-90162006000400008

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. . Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 3–12. 2006. D.O.I.:10.1016/j.still.2005.06.006

CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39. 2013. D.O.I.:10.1016/j.still.2013.05.009

CARVALHO, J. L. N. et al. Conversion of cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: carbon stocks and soil fertility. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 2, p. 233–241. 2009. D.O.I.:10.1590/S0103-90162009000200013

CASSIOLATO, M. E. et al. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 43, n. 5, p. 533–536. 2000. D.O.I.:10.1590/s1516-89132000000500014

CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. 1999.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:1055-1064. 2002.

COCHRANE, T. T.; AZEVEDO, L. **As savanas do trópico sul-americano; uma visão geral dos seus recursos de clima e solo para desenvolvimento agrotecnológico baseada no inventário computadorizado de sistemas de terra do CIAT/EMBRAPA**. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO. Anais. Brasília, DF: Savanas: alimento e energia. Planaltina, Embrapa/CPAC. 1988.

COLEMAN, N. T.; THOMAS, G. W. **The Basic Chemistry of Soil Acidity**. The Basic In: PEARSON, R. W.; ADAMS, F. (Ed.). Soil acidity and liming. Madison: American Society of Agronomy. 1967.

CONAB. **Série Histórica das Safras**. 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>>. Acesso em: 12 out. 2020.

CORBEELS, M. et al. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. **Global Change Biology**, v. 12, n. 9, p. 1773–1787. 2006. D.O.I.:10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x

COSTA, C. H. M. DA; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119–132. 2016. D.O.I.:10.1016/j.eja.2015.12.001

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11º ed. 2016.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Annual crop rotation of tropical pastures with no-till soil as affected by lime surface application. **European Journal of Agronomy**, v. 80, p. 88–104. 2016. D.O.I.:10.1016/J.EJA.2016.07.002

DIAS, F. P. M. et al. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 177, p. 180–188. 2019. D.O.I.:10.1016/j.catena.2019.02.016

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. infoteca.cnptia.embrapa.br, p. 574, 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. p. 353. 2018.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. p. 256. 2016.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Chapter 7 Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**. Academic Press, v. 99p. 345–399. 2008.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**. p. 221–275. 2014.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity I. Long-Term Growth Effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 646–651. 2000a. D.O.I.:10.2136/sssaj2000.642646x

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity II. Long-Term Soil Effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 652–658. 2000b. D.O.I.:10.2136/sssaj2000.642652x

FEBRAPDP. **Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação**. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/area-de-pd>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042. 2011. D.O.I.:10.1590/S1413-70542011000600001

FRANCHINI, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 357–360. 2001. D.O.I.:10.1590/S0103-90162001000200020

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 3, p. 390–399. 2016. D.O.I.:10.1111/sum.12270

GRECCHI, R. C. et al. Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion. **Applied Geography**, v. 55, p. 300–312. 2014. D.O.I.:10.1016/J.APGEOG.2014.09.014

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, n. 3, p. 183–195. 2008. D.O.I.:10.1590/S1677-04202008000300003

HIRADATE, S. Speciation of aluminum in soil environments. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, n. 3, p. 303–314. 2004. D.O.I.:10.1080/00380768.2004.10408483

HOFFMANN, L. V. et al. Cotton Production in Brazil and Other South American Countries. In: **Cotton Production**. Wiley, p. 277–295. 2019.

HUNKE, P. et al. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 31–43. 2015. D.O.I.:10.1016/j.geodrs.2014.12.001

IMEA. **Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária**. 2019.

INAGAKI, T. M. et al. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156–165. 2016. D.O.I.:10.1016/J.AGEE.2016.06.034

JARVIS, N.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**, v. 287, p. 71–79. 2017. D.O.I.:10.1016/j.geoderma.2016.06.026

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424. 2013. D.O.I.:10.1007/s11104-012-1413-2

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 68–77. 2016. D.O.I.:10.1016/J.STILL.2016.04.009

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580. 2005. D.O.I.:10.1590/S0100-06832005000400010

KAMINSKI, J. et al. **Acidez e calagem em solos do Sul do Brasil: aspectos históricos e perspectivas futuras**. Tópicos em Ciência do Solo. p. 307–332. 2007.

LEPSCH, I. F. Cerrado. In: **Encyclopedia of Soil Science, Third Edition**. CRC Press, p. 345–347. 2016.

LI, G. D. et al. 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. 2019. D.O.I.:10.1016/J.GEODERMA.2018.12.003

LUCAS, F. T. et al. Produtividade e qualidade de grãos de canola em função da adubação nitrogenada e sulfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6Sup11, p. 3205. 2013. D.O.I.:10.5433/1679-0359.2013v34n6Sup11p3205

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed., rev ed. 1997.

MARTÍNEZ, I. et al. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 163, p. 130–140. 2016. D.O.I.:10.1016/j.still.2016.05.020

MENDES, I. C. et al. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. In book: **Managing soil health for sustainable agriculture**. p. 379–415. 2018. DOI: 10.19103/AS.2017.0033.35

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of Plant Residues on the Mobility of Surface Applied Lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 45, n. 3, p. 251–256. 2002. D.O.I.:10.1590/S1516-89132002000300001

MOREIRA, S. G. et al. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 71–81. 2001. D.O.I.:10.1590/S0100-06832001000100008

MURPHY, J. .; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, n. C, p. 31–36. 1962. D.O.I.:10.1016/S0003-2670(00)88444-5

NAVA, G. et al. Soil composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 215–222. 2012. D.O.I.:10.1590/S0100-06832012000100022

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 2, p. 409–416, 2010. D.O.I.:10.1590/s0100-06832010000200014

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:475-483, 2006 2006.

OSÓRIO FILHO, B. D. et al. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 37, n. 3, p. 712–719. 2007. D.O.I.:10.1590/S0103-84782007000300017

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual Paraná.** 2017.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 885–895, 2001.

PETRY, C. et al. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: I. Efeitos no sistema radicular, na absorção de fósforo e cálcio e no acúmulo de massa seca. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 18, p. 63–68, 1994.

PIAS, O. H. D. C. et al. Crop yield responses to sulfur fertilization in brazilian no-till soils: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 43, 2019. D.O.I.:10.1590/18069657rbcS20180078

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1687–1698, out. 2011. D.O.I.:10.1590/S0100-06832011000500023

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T. **Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos.** In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Ed.). Cerrado: ambiente e flora., Planaltina: Embrapa-CPAC. 1998.

RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 263–268. 2000a. D.O.I.:10.1590/S0103-84782000000200011

RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 562–569. 2005. D.O.I.:10.1590/S0103-84782005000300011

RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222–231. 2018a. D.O.I.:10.1016/j.still.2018.03.014

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805. 2000b. D.O.I.:10.1590/s0100-06832000000400012

RHEINHEIMER, D. S. et al. 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. 2018b. D.O.I.:10.1016/j.geoderma.2017.10.024

SANO, E. E. et al. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153–156. 2008. D.O.I.:10.1590/S0100-204X2008000100020

SANO, E. E. et al. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, n. 1–4, p. 113–124. 2010. D.O.I.:10.1007/s10661-009-0988-4

SANTOS, A. DOS et al. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, p. 126090. 2020. D.O.I.:10.1016/j.eja.2020.126090

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 765–769. 2001. D.O.I.:10.1590/S0100-06832001000300026

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Profundidade de amostragem do solo sob plantio direto para avaliação de características químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:157-162. 2002.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 675–688. 2008. D.O.I.:10.1590/S0100-06832008000200022

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. 2004.

SUMNER, M. E.; YAMADA, T. Farming with acidity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 15–18, p. 2467–2496, 2002. D.O.I.:10.1081/CSS-120014461

TANG, C. et al. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field Crops Research**, v. 80, n. 3, p. 235–244. 2003. D.O.I.:10.1016/S0378-4290(02)00192-2

TEDESCO, M. J. A. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2° ed. (Boletim Técnico, 5), Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TESTONI, S. A. et al. Clay mineralogy of Brazilian Oxisols with shrinkage properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 41:e0160487. 2017. D.O.I.:10.1590/18069657rbcS20160487

TIECHER, T. et al. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. **Bragantia**, v. v. 71, p. 518–527, 2012a.

TIECHER, T. et al. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282. 2012b. D.O.I.:10.1590/S0100-06832012000100028

TIECHER, T. et al. Respostas de culturas à adubação sulfatada e deposição de enxofre atmosférico. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 420–427. 2013. D.O.I.:10.1590/S0034-737X2013000300016

TIRITAN, C. S. et al. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 437–447. 2016. D.O.I.:10.1016/j.still.2015.06.012

VARGAS, J. P. R. DE et al. 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. D.O.I.:10.1016/J.STILL.2018.08.014

VIEIRA FONTOURA, S. M. et al. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27–41. 2019. D.O.I.:10.1016/j.still.2019.05.005

VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Influence of Phosphorus and Carbon on Soil Microbial Activity in a Savannah Agroecosystem of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 9, p. 1291–1302, maio 2012. D.O.I.:10.1080/00103624.2012.666304

VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Land Use Impact on Microbial and Biochemical Indicators in Agroecosystems of the Brazilian Cerrado. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 1, p. 0-8. 2013. D.O.I.:10.2136/vzj2012.0027

VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 74, p. 182–190. 2017. D.O.I.:10.1016/J.ECOLIND.2016.11.020

VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 129–143, 2005. D.O.I.:10.1590/S1677-04202005000100011

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, v. 171, n. 1, p. 1–15. 1995. D.O.I.:10.1007/BF00009558

WILCKE, W.; LILIENFEIN, J. Nutrient Leaching in Oxisols Under Native and Managed Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1152, 2005. D.O.I.:10.2136/sssaj2004.0350

YAMADA, T. The Cerrado of Brazil: A Success Story of Production on Acid Soils. **Soil Science & Plant Nutrition**, 51:5, 617-620. 2010. D.O.I.:10.1111/j.1747-0765.2005.tb00076.x

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Liming and Ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 2, p. 190–203. 2008. D.O.I.:10.1590/S0103-90162008000200013

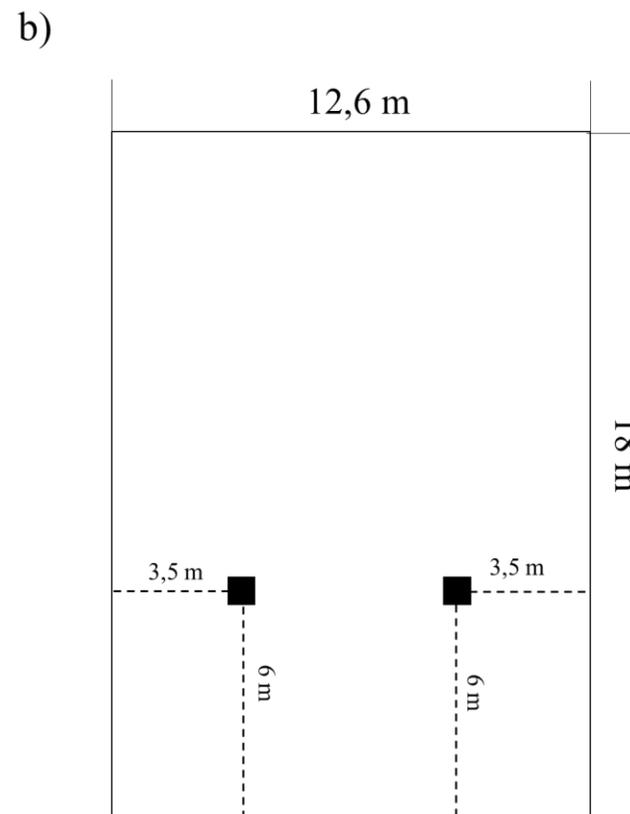
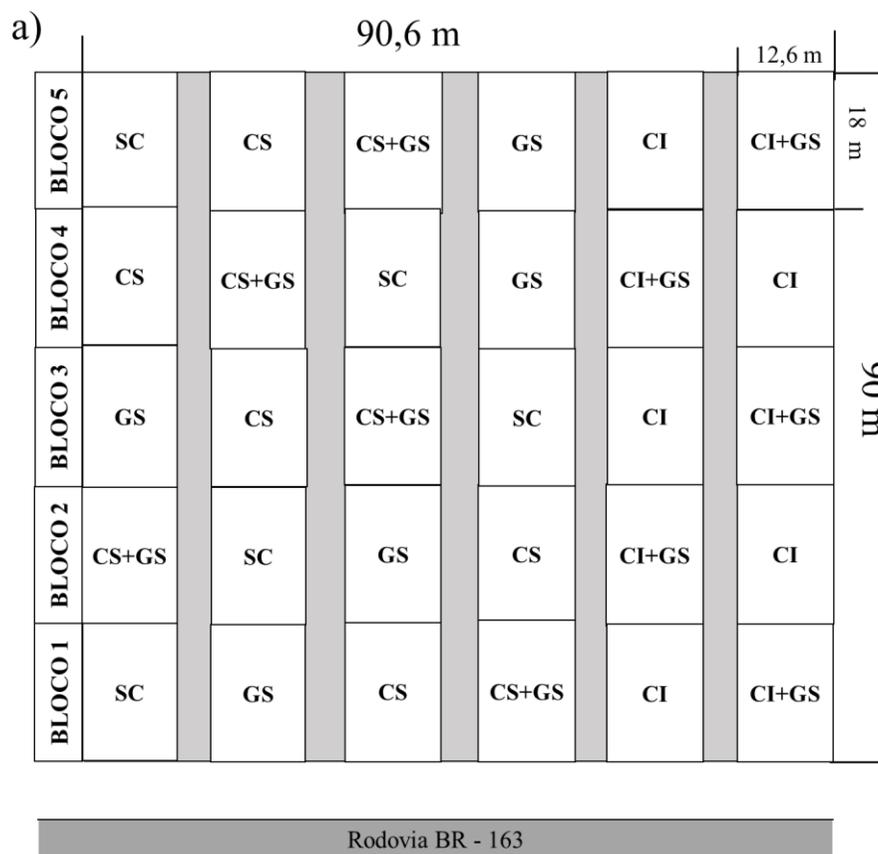
ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 128–137. 2015. D.O.I.:10.1590/1983-40632015v4530301

ZHOU, G. et al. Biotechnological Solutions for Enhancing the Aluminium Resistance of Crop Plants. In: **Abiotic Stress in Plants - Mechanisms and Adaptations**. p. 428. 2011.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, p. 257–262, 1999. D.O.I.:10.1590/S1516-89131999000200016

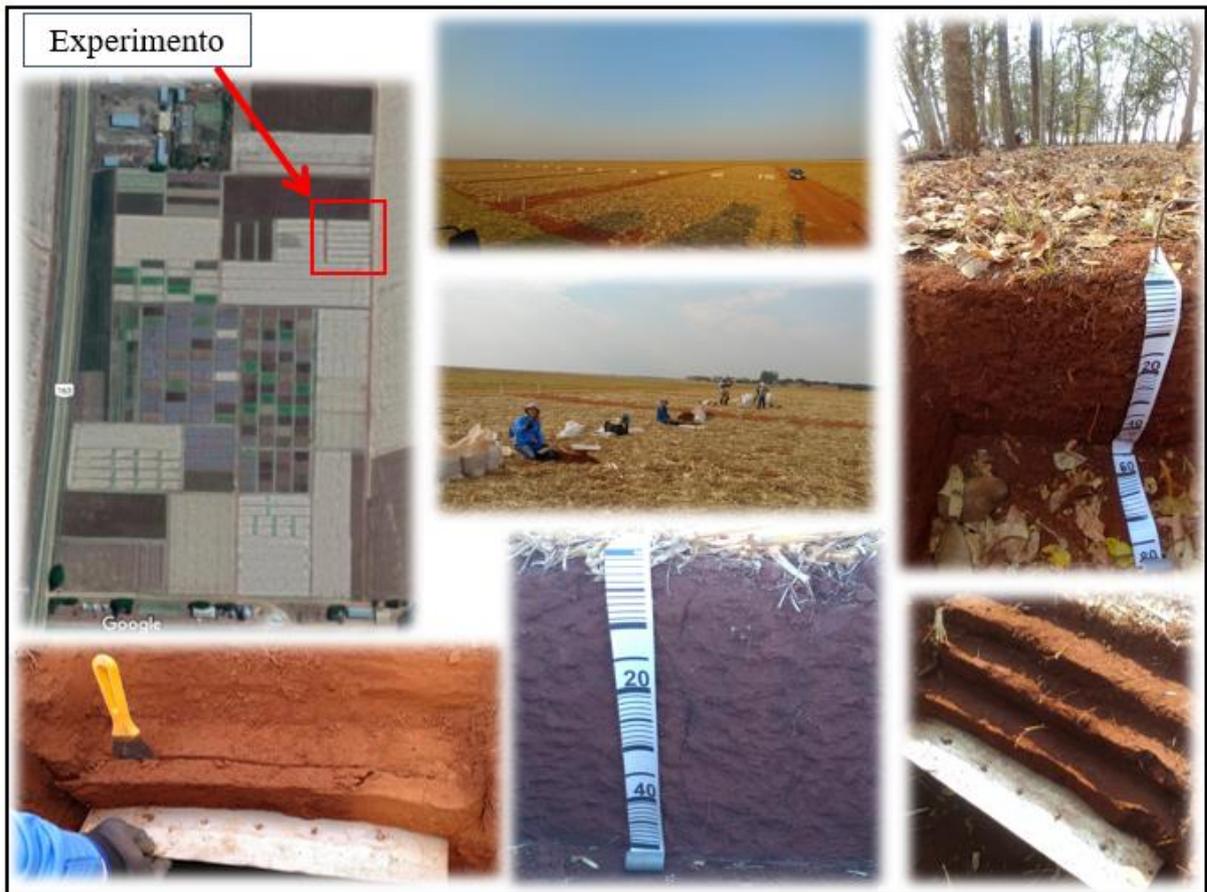
APÊNDICE A – CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL

Croqui da área experimental indicando os tratamentos (SC = sem calagem, GS = gesso superficial, CS = calagem superficial, CS+GS = calagem superficial + gesso superficial, CI = calagem incorporada, CI+GS = calagem incorporada + gesso superficial) distribuídos nas parcelas experimentais (a) e indicação dos pontos de coleta de solo das parcelas experimentais (b).



APÊNDICE B – IMAGENS DO EXPERIMENTO E DA COLETA DE SOLO

Visão geral da área experimental e da área sob vegetação natural do cerrado (CN) e imagens da coleta de solo realizada no experimento sob plantio direto de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).



APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações sobre os atributos químicos do solo após análise de variância (ANOVA) e o coeficiente de variação.

Variável	Tratamento (T)	Profundidade (P)	T x P	CV T (%)	CV P (%)	CV TxP (%)
Acidez ativa						
pH do solo (1:2,5)	***	***	***	4,7	3,6	2,0
Acidez potencial e seus determinantes						
Acidez potencial (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	17,3	9,0	7,6
Alumínio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	55,6	37,8	24,7
Matéria orgânica do solo (%)	***	***	***	7,0	5,4	4,9
Nutrientes adicionados com calcário e gesso						
Cálcio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	30,2	20,9	13,0
Magnésio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	38,7	18,6	20,5
Enxofre disponível (mg kg ⁻¹)	***	***	***	59,6	31,6	25,8
Parâmetros químicos estimados						
Soma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	30,0	18,1	13,7
CTC _{efetiva} (cmol _c kg ⁻¹)	***	***	***	21,5	12,1	11,2
CTC _{pH 7,0} (cmol _c kg ⁻¹)	ns	***	ns	11,6	5,7	5,6
Saturação por alumínio (%)	***	***	***	63,8	42,8	26,5
Saturação por bases (%)	***	***	***	28,5	15,9	9,9
P e K						
Fósforo disponível (mg kg ⁻¹)	***	***	***	25,7	28,4	24,6
Potássio disponível (mg kg ⁻¹)	ns	***	ns	31,1	17,5	15,3
Cu e Zn						
Cobre disponível (mg kg ⁻¹)	**	***	***	30,5	26,8	18,3
Zn disponível (mg kg ⁻¹)	*	***	ns	37,4	22,0	25,4

ns = não significativo; * significativo a P < 0,05; ** significativo a P < 0,01; *** significativo a P < 0,001; CV T = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental de tratamento; CV P = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental de profundidade; CV TxP = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental da interação entre tratamento e profundidade.

Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações sobre os rendimentos das culturas após análise de variância (ANOVA) e o coeficiente de variação.

Variável	Tratamento (T)	Ano (A)	T x A	CV T (%)	CV A (%)	CV TxA (%)
Soja (kg ha ⁻¹)	***	***	ns	5,8	5,4	4,7
Milho (kg ha ⁻¹)	*	***	ns	8,9	5,6	6,2
Soja acumulada (kg ha ⁻¹)	***	-	-	2,2	-	-
Milho acumulada (kg ha ⁻¹)	*	-	-	3,4	-	-

ns = não significativo; * significativo a P < 0,05; ** significativo a P < 0,01; *** significativo a P < 0,001; CV T = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental de tratamento; CV A = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental de ano de cultivo; CV TxA = coeficiente de variação da estimativa do erro experimental da interação entre tratamento e ano de cultivo.

APÊNDICE D – RESULTADOS

Valores de pH em água, acidez potencial (H^0+Al^{3+}), alumínio trocável, saturação por alumínio e por bases determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).

Camada (cm)	Tratamentos					
	SC	GS	CS	CS+GS	CI	CI+GS
..... pH em água (1:2,5)						
0-5	4,99 aC	4,96 aC	6,38 aAB	6,48 aA	6,24 aB	6,29 aAB
5-10	4,95 aC	4,84 aC	5,79 bB	5,79 bB	5,87 bAB	6,01 bA
10-15	4,99 aC	4,90 aC	5,31 cB	5,35 cB	5,62 cA	5,77 cA
15-20	4,98 aC	4,90 aC	5,22 cdB	5,18 cdB	5,34 dAB	5,42 dA
20-25	4,97 aBC	4,89 aC	5,17 cdA	5,10 deAB	5,07 eABC	5,12 eAB
25-30	4,90 aA	4,89 aA	5,04 dA	4,98 eA	4,90 efA	4,96 efA
30-40	4,92 aAB	4,83 aB	5,03 dA	4,96 eAB	4,79 fB	4,90 fAB
40-50	5,07 aA	4,95 aA	5,05 dA	4,98 eA	4,89 efA	5,00 efA
..... H^0+Al^{3+} (cmolc kg ⁻¹)						
0-5	9,0 aA	8,8 abA	2,1 eB	1,8 fB	2,6 eB	2,1 fB
5-10	9,2 aA	9,4 aA	6,3 bB	6,1 cB	5,2 cC	4,7 deC
10-15	8,6 abA	8,5 bcA	7,6 aB	7,3 aB	6,2 aC	5,6 bcC
15-20	7,9 bA	7,9 cdAB	7,3 aABC	7,1 abBC	6,8 aC	6,5 aC
20-25	6,7 cAB	7,1 deA	6,7 abAB	6,3 bcB	6,5 aAB	6,3 abB
25-30	5,7 dA	6,5 eA	6,1 bA	5,8 cdA	6,2 abA	6,0 abcA
30-40	4,8 eA	5,2 fA	5,0 cA	4,9 deA	5,3 bcA	5,2 cdA
40-50	3,7 fA	4,1 gA	4,0 dA	4,1 eA	4,1 dA	4,2 eA
..... Alumínio trocável (cmolc kg ⁻¹)						
0-5	0,52 cA	0,39 cdA	0,05 dB	0,07 dB	0,04 eB	0,05 cB
5-10	0,96 aA	0,87 aA	0,09 dB	0,10 cdB	0,05 eB	0,04 cB
10-15	0,93 abA	0,90 aA	0,41 bcB	0,33 bcBC	0,14 deCD	0,11 cD
15-20	0,89 abA	0,90 aA	0,60 abB	0,57 aB	0,49 bcBC	0,35 bC
20-25	0,79 abAB	0,82 abA	0,59 abB	0,60 aB	0,65 abAB	0,62 aAB
25-30	0,70 bcAB	0,83 aA	0,65 aAB	0,59 aB	0,77 aAB	0,65 aAB
30-40	0,54 cA	0,60 bcA	0,57 abA	0,51 abA	0,60 abA	0,55 abA
40-50	0,23 dA	0,32 dA	0,27 cdA	0,34 bA	0,33 cdA	0,35 bA
..... Saturação por alumínio (%)						
0-5	11 bA	8 dAB	0 eB	1 bB	0 dB	0 dB
5-10	29 aA	26 bcA	2 deB	2 bB	1 dB	1 dB
10-15	30 aA	30 abcA	12 cdB	10 bB	4 dB	2 cdB
15-20	34 aA	35 abA	22 abcB	22 aB	18 cB	12 bcB
20-25	37 aA	36 abAB	26 abC	26 aC	30 abABC	26 aBC
25-30	39 aAB	40 aA	33 aAB	29 aB	39 aAB	31 aAB
30-40	35 aA	34 abA	33 aA	29 aA	34 aA	30 aA
40-50	16 bA	21 cA	18 bcA	21 aA	21 bcA	20 abA
..... Saturação por bases (%)						
0-5	31 aC	35 aC	84 aAB	86 aA	79 aB	83 aAB
5-10	20 bcC	21 bcC	46 bB	47 bB	54 bA	58 bA
10-15	20 bcD	20 bcD	30 cC	31 cC	39 cB	45 cA
15-20	18 bcC	18 bcC	24 dB	24 dB	26 dAB	30 dA
20-25	17 cA	17 cA	21 dA	22 dA	19 efA	22 eA
25-30	16 cA	16 cA	19 dA	20 dA	16 fA	19 eA
30-40	17 cA	18 bcA	19 dA	20 dA	20 efA	20 eA
40-50	24 bA	23 bA	24 dA	24 dA	23 deA	24 deA

Os valores representam a média de cinco repetições (n=5). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Valores de cálcio e de magnésio trocáveis e de fósforo, de potássio e de enxofre disponíveis determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).

Camada (cm)	Tratamentos						Média ^a
	SC	GS	CS	CS+GS	CI	CI+GS	
..... Cálcio trocável (cmol _c kg ⁻¹)							
0-5	2,7 aE	3,5 aD	5,9 aB	6,6 aA	5,2 aC	6,3 aAB	-
5-10	1,7 bD	2,0 bD	3,0 bC	3,5 bB	3,6 bB	4,6 bA	-
10-15	1,6 bC	1,8 bcC	2,0 cBC	2,3 cB	2,4 cB	3,5 cA	-
15-20	1,3 bcB	1,4 cdB	1,4 dB	1,5 dB	1,4 dB	2,0 dA	-
20-25	1,0 cdA	1,2 deA	1,1 deA	1,2 deA	0,8 eA	1,2 eA	-
25-30	0,8 dA	1,0 deA	0,8 eA	1,0 eA	0,6 eA	1,0 eA	-
30-40	0,7 dA	0,9 eA	0,7 eA	0,8 eA	0,8 eA	0,9 eA	-
40-50	0,8 dA	1,0 deA	0,7 eA	0,9 eA	0,7 eA	0,9 eA	-
..... Magnésio trocável (cmol _c kg ⁻¹)							
0-5	1,2 aD	0,9 aD	4,9 aA	4,5 aB	4,6 aB	4,0 aC	-
5-10	0,6 bD	0,3 bD	2,2 bAB	1,7 bC	2,3 bA	1,9 bBC	-
10-15	0,5 bC	0,2 bC	1,2 cAB	0,9 cB	1,5 cA	1,2 cAB	-
15-20	0,4 bBC	0,2 bC	0,9 cdA	0,6 cdAB	1,0 dA	0,7 dAB	-
20-25	0,3 bAB	0,2 bB	0,7 deA	0,5 dAB	0,6 deA	0,5 dAB	-
25-30	0,3 bAB	0,2 bB	0,5 deA	0,4 dAB	0,5 eAB	0,4 dAB	-
30-40	0,3 bA	0,2 bA	0,5 eA	0,4 dA	0,4 eA	0,4 dA	-
40-50	0,3 bA	0,2 bA	0,5 deA	0,4 dA	0,5 eA	0,4 dA	-
..... Fósforo disponível (mg kg ⁻¹)							
0-5	6,8 bA	8,2 bA	7,9 cA	7,9 cA	6,8 bA	8,0 bA	-
5-10	16,7 aAB	17,5 aA	15,8 bAB	15,8 bAB	14,3 aB	15,2 aAB	-
10-15	15,4 aCD	17,8 aBC	20,2 aAB	20,7 aA	12,9 aD	13,3 aD	-
15-20	3,4 cB	6,5 bA	4,2 dAB	5,3 cAB	4,1 bAB	4,7 cAB	-
20-25	1,0 cdA	1,2 cA	0,8 eA	1,0 dA	0,4 cA	0,6 dA	-
25-30	0,0 dA	0,6 cA	0,1 eA	0,2 dA	0,1 cA	0,1 dA	-
30-40	0,0 dA	0,1 cA	0,0 eA	0,0 dA	0,0 cA	0,0 dA	-
40-50	0,0 dA	0,0 cA	0,0 eA	0,0 dA	0,0 cA	0,0 dA	-
..... Potássio disponível (mg kg ⁻¹)							
0-5	76	72	78	74	71	74	74 a
5-10	38	33	34	32	38	34	35 b
10-15	39	28	32	29	28	26	30 bc
15-20	34	25	27	26	23	27	27 cd
20-25	29	22	23	26	22	24	24 de
25-30	21	23	19	24	21	22	22 ef
30-40	20	20	17	20	20	18	19 f
40-50	18	20	19	17	17	15	18 f
..... Enxofre disponível (mg kg ⁻¹)							
0-5	1,2 dA	2,6 eA	1,3 dA	1,7 dA	1,0 cA	1,5 eA	-
5-10	1,0 dA	3,1 eA	1,0 dA	2,7 dA	0,8 cA	0,7 eA	-
10-15	1,2 dA	3,7 eA	1,0 dA	3,2 dA	0,6 cA	0,7 eA	-
15-20	2,3 dA	4,9 deA	1,2 dA	4,4 dA	1,1 cA	2,2 eA	-
20-25	3,9 dB	8,0 dA	2,6 cdB	9,2 cA	3,7 cB	6,2 dAB	-
25-30	8,5 cBC	12,8 cA	6,3 cC	13,0 cA	9,0 bBC	10,8 cAB	-
30-40	15,5 bC	20,1 bAB	14,9 bC	22,9 bA	16,0 aC	18,2 bBC	-
40-50	20,3 aCD	26,0 aB	18,9 aD	30,0 aA	19,8 aCD	23,3 aBC	-

Os valores representam a média de cinco repetições (n=5). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Valores de cobre e de zinco disponíveis e de matéria orgânica do solo determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).

Camada (cm)	Tratamentos						Média ^a
	SC	GS	CS	CS+GS	CI	CI+GS	
..... Cu disponível (mg kg ⁻¹)							
0-5	1,7 bA	1,7 aA	1,1 bB	1,1 bcB	1,4 bB	1,4 bB	-
5-10	2,4 aA	2,0 aB	1,8 aAB	1,7 aC	1,8 aAB	1,8 aAB	-
10-15	1,8 bA	1,8 aA	1,5 aAB	1,3 bBC	1,1 bC	1,4 bBC	-
15-20	1,0 cA	0,8 bAB	1,0 bcA	0,8 cdAB	0,7 cB	0,7 cAB	-
20-25	0,6 cdA	0,6 bA	0,7 cdA	0,6 deA	0,6 cA	0,6 cA	-
25-30	0,5 dA	0,5 bA	0,6 dA	0,6 deA	0,5 cA	0,6 cA	-
30-40	0,5 dA	0,5 bA	0,5 dA	0,5 eA	0,5 cA	0,5 cA	-
40-50	0,4 dA	0,5 bA	0,5 dA	0,5 eA	0,4 cA	0,5 cA	-
..... Zn disponível (mg kg ⁻¹)							
0-5	9,4	8,9	9,5	8,9	8,6	9,8	9,2 a
5-10	7,9	7,0	8,1	7,2	7,5	7,8	7,6 b
10-15	6,7	6,6	6,9	6,2	5,0	6,2	6,3 c
15-20	3,3	4,1	3,2	2,5	1,4	2,0	2,7 d
20-25	0,9	2,0	1,1	0,9	0,3	0,4	1,0 e
25-30	0,4	1,3	0,5	0,4	0,2	0,4	0,5 ef
30-40	0,1	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2 f
40-50	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1 f
Média^b	3,6 AB	3,8 A	3,7 AB	3,3 AB	2,9 B	3,3 AB	
..... Matéria orgânica do solo (%)							
0-5	4,3 aAB	4,3 aA	4,2 aAB	4,3 aA	4,0 aC	4,1 aBC	-
5-10	3,4 bA	3,4 bA	3,3 bA	3,3 bA	3,2 bA	3,3 bA	-
10-15	3,0 cA	3,0 cA	2,9 cA	2,9 cA	2,8 cA	2,9 cA	-
15-20	2,7 dA	2,6 dA	2,7 cdA	2,5 dA	2,6 cA	2,7 cA	-
20-25	2,2 eB	2,6 dA	2,5 dA	2,2 eB	2,2 dB	2,3 dAB	-
25-30	1,8 fC	2,2 eA	2,1 eAB	1,9 fBC	1,9 eBC	1,9 eBC	-
30-40	1,5 gC	1,8 fAB	1,8 fA	1,6 gBC	1,6 fBC	1,6 fABC	-
40-50	1,2 gA	1,3 gA	1,4 gA	1,3 hA	1,3 gA	1,4 fA	-

^a Valores na coluna representam a média das repetições de seis tratamentos (n = 30). ^b Valores na linha representam a média das repetições de oito profundidades (n = 40). Os valores representam a média de cinco repetições (n = 5). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05). Cu e Zn disponível extraídos por Mehlich-1 e matéria orgânica do solo extraído por digestão sulfocrômica e determinado por titulometria.

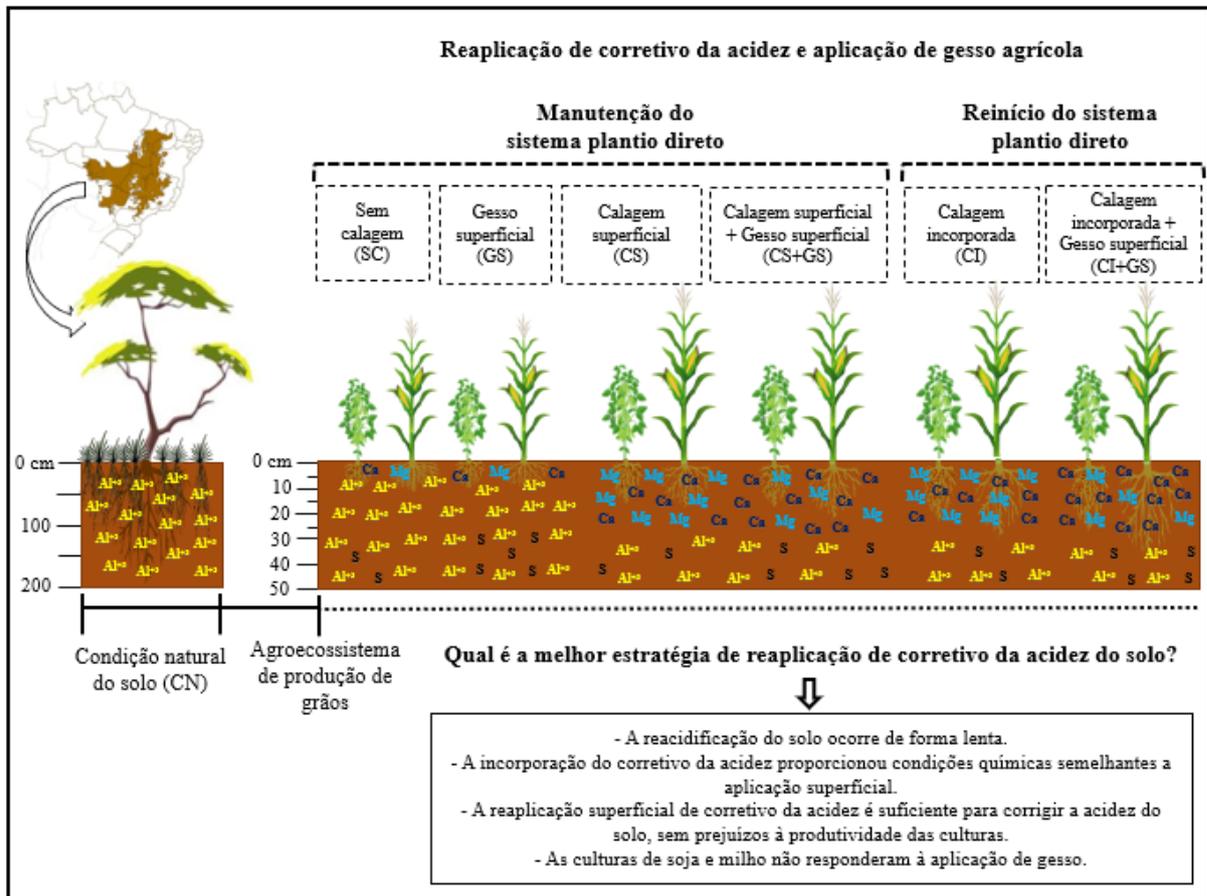
Valores de soma de bases, capacidade de troca de cátions efetiva e potencial determinados no perfil de um Latossolo Vermelho após sete anos de manejo sob plantio direto e aplicação de seis tratamentos e duas estratégias de manejo da calagem: sem calagem (SC), gesso superficial (GS), calcário superficial (CS), calcário e gesso superficial (CS+GS), calcário incorporado (CI) e calcário incorporado + gesso superficial (CI+GS).

Camada (cm)	Tratamentos						Média ^a
	SC	GS	CS	CS+GS	CI	CI+GS	
..... Soma de bases (cmol _c kg ⁻¹)							
0-5	4,1 aD	4,7 aD	11,1 aAB	11,4 aA	9,9 aC	10,4 aBC	-
5-10	2,4 bC	2,4 bC	5,3 bB	5,4 bB	6,0 bAB	6,6 bA	-
10-15	2,2 bcD	2,1 bcD	3,3 cBC	3,2 cC	4,0 cAB	4,7 cA	-
15-20	1,8 bcdB	1,7 bcdB	2,4 dAB	2,2 dAB	2,4 dAB	2,9 dA	-
20-25	1,4 cdeA	1,4 cdA	1,9 deA	1,8 deA	1,5 eA	1,8 eA	-
25-30	1,1 deA	1,3 dA	1,4 eA	1,5 deA	1,2 eA	1,5 eA	-
30-40	1,0 eA	1,1 dA	1,2 eA	1,2 eA	1,3 eA	1,3 eA	-
40-50	1,2 deA	1,2 dA	1,2 eA	1,3 eA	1,3 eA	1,3 eA	-
..... CTC _{efetiva} (cmol _c kg ⁻¹)							
0-5	4,6 aD	5,1 aD	11,1 aAB	11,5 aA	10,0 aC	10,5 aBC	-
5-10	3,3 bC	3,3 bC	5,4 bB	5,5 bB	6,0 bAB	6,7 bA	-
10-15	3,1 bCD	3,0 bcD	3,7 cBC	3,6 cBCD	4,2 cAB	4,8 cA	-
15-20	2,7 bcA	2,6 bcdA	3,0 dA	2,8 cdA	2,9 dA	3,2 dA	-
20-25	2,2 cdA	2,3 cdeA	2,4 deA	2,3 deA	2,2 deA	2,4 eA	-
25-30	1,8 dA	2,1 deA	2,1 efA	2,1 deA	1,9 eA	2,1 eA	-
30-40	1,5 dA	1,7 eA	1,8 efA	1,7 eA	1,9 eA	1,8 eA	-
40-50	1,4 dA	1,5 eA	1,5 fA	1,6 eA	1,6 eA	1,7 eA	-
..... CTC _{pH7,0} (cmol _c kg ⁻¹)							
0-5	13,2	13,5	13,2	13,2	12,5	12,6	13,0 a
5-10	11,6	11,9	11,6	11,5	11,2	11,3	11,5 b
10-15	10,8	10,6	10,9	10,5	10,2	10,3	10,6 c
15-20	9,8	9,6	9,7	9,3	9,2	9,4	9,5 d
20-25	8,1	8,6	8,6	8,1	8,1	8,1	8,2 e
25-30	6,8	7,8	7,5	7,3	7,3	7,5	7,4 f
30-40	5,8	6,3	6,2	6,2	6,6	6,5	6,3 g
40-50	4,9	5,3	5,2	5,4	5,4	5,6	5,3 h

^a Valores na coluna representam a média das repetições de seis tratamentos (n = 30). Os valores representam a média de cinco repetições (n = 5). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e letra maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

APÊNDICE E – RESUMO GRÁFICO

Esquema do experimento com reaplicação de corretivo da acidez e gesso agrícola no solo em sistema plantio direto.



ANEXO A – FAIXAS DE INTERPRETAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Faixas de interpretação estabelecidas para os solos do Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004) para culturas anuais na camada de 0 a 20 cm.

Faixa	pH ⁽¹⁾	V ⁽²⁾	<i>m</i>	MOS	Al ⁽³⁾	Ca	Mg	P ⁽⁴⁾	K ⁽⁵⁾
Agronômica	 % % % cmol _c kg ⁻¹ cmol _c kg ⁻¹ mg kg ⁻¹ mg kg ⁻¹ mg kg ⁻¹
Muito baixo	-	-	-	-	-	-	-	0 a 2,0	-
Baixo	≤ 5,1	≤ 20	< 20	< 2,8	< 0,5	< 1,5	< 0,5	2,1 a 3,0	< 25
Médio	5,2 a 5,5	21 a 35	-	2,8 a 3,5	0,5 a 1,5	-	-	3,1 a 4,0	26 a 50
Adequado	5,6 a 6,3	36 a 60	-	3,6 a 5,2	-	1,5 a 7,0	0,5 a 2,0	4,1 a 6,0	51 a 80
Alto	6,4 a 6,6	61 a 70	20 a 60	> 5,2	> 1,5	> 7,0	> 2,0	> 6,0	> 80
Muito alto	≥ 6,7	≥ 71	> 60	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ pH em água na proporção solo:água de 1:2,5; ⁽²⁾ V = Saturação por bases; *m* = Saturação por alumínio; MOS = Matéria orgânica do solo; Al = Alumínio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; P = Fósforo; K = Potássio; ⁽³⁾ A faixa de interpretação para os teores de alumínio trocável foram obtidos de Villar (2007); ⁽⁴⁾ Fósforo extraído por Mehlich-1 e valores de referência para solos com teor de argila maior que 60% e cultivados em sequeiro; e ⁽⁵⁾ Potássio extraído por Mehlich-1 e valores de referência para solos com CTC pH_{7,0} maiores que 4,0 cmol_c dm⁻³.