

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

JAQUELINE GAIO SPRICIGO

RESIDUALIDADE DA FORMA E DO MODO DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO
SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DE CULTURAS

Santa Maria - RS

2021

JAQUELINE GAIO SPRICIGO

RESIDUALIDADE DA FORMA E DO MODO DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO
SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DE CULTURAS

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Ciência
do solo, da Universidade Federal de Santa
Maria, como requisito à obtenção de título
de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria -RS

2021

SPRICIGO, Jaqueline Gaio

Residualidade da Forma e do Modo de Aplicação de Calcário Sobre Atributos Químicos do Solo e de Culturas. Jaqueline Gaio SPRICIGO. – Universidade Federal de Santa Maria. 2021

68 folhas

Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-graduação em Ciência do solo, Santa Maria, 18 de junho de 2021.

Palavra chave: Calcário. Sistema radicular. Produtividade.

1. Título

JAQUELINE GAIO SPRICIGO

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E RESPOSTA DA SOJA 25 ANOS APÓS O
REVOLVIMENTO PARA CORREÇÃO DA ACIDEZ

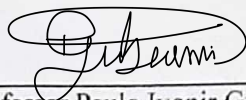
Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Ciência do Solo da
Universidade Federal de Santa Maria como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Ciência do Solo

Aprovada em

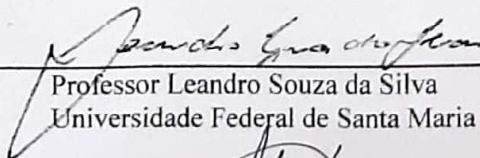
BANCA EXAMINADORA



Professor Danilo Rheinheimer dos Santos
Universidade Federal de Santa Maria – RS
Orientador



Professor Paulo Ivonir Gubiani
Universidade Federal de Santa Maria – RS
Co-orientador



Professor Leandro Souza da Silva
Universidade Federal de Santa Maria – RS



Professor Jimmy Walter Rasche Alvarez
Universidad Nacional de Asunción - Paraguai

Dedico este trabalho a Deus, responsável por meu destino e suporte em momentos de angústia, aos meus pais Terezinha e Lauso Spricigo fonte do meu conhecimento e coragem, e aos meus irmãos Jussara Gaio Spricigo e Natan Z. Gaio Spricigo pela amizade e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Diante da presente dissertação, quero deixar meus sinceros agradecimentos a tudo e todos que de alguma forma participaram dessa conquista.

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais Lauso Gilmar Spricigo e Terezinha Gaio Spricigo que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo dessa trajetória e nunca mediram os esforços investidos em minha educação, e aos meus irmãos Jussara Gaio Spricigo e Natan Spricigo pela amizade, compreensão e dedicação sempre. A vocês minha infinita gratidão.

Ao meu orientador professor Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos pelo tempo disponibilizado a fim de compartilhar seu conhecimento pautado por um rigoroso nível científico.

Ao Co-orientador professor Dr. Paulo Ivonir Gubiani pelo apoio, orientações, confiança e disponibilidade durante o mestrado e na execução do projeto.

Aos colegas do laboratório de química e fertilidade do solo, especialmente ao grupo de pesquisa André Somavilla, Andressa Pinto dos Santos, Deonilce Retka, Gracieli Fernandes, Jocelina Vargas, Letícia Moro e Rodrigo Knevitiz e os alunos de iniciação científica que ajudaram na condução do experimento em campo e análises laboratoriais e foram fundamentais para conclusão do projeto.

A Universidade Federal de Santa Maria e o Programa de Pós Graduação em ciência do solo pela oportunidade de aperfeiçoamento gratuito e de primazia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado.

Ao laboratório de Física do Solo e ao Departamento de Agrobiologia pela disponibilidade de espaço e equipamentos para análises.

Gratidão por todo conhecimento, sabedoria e evolução pessoal e profissional adquirido nessa trajetória.

“Alimente o solo e deixe que o solo alimente as plantas”.

Prof. William A. Albrecht, Ph.D.

RESUMO

Um solo considerado de boa qualidade deve possibilitar o crescimento radicular isento de restrições quanto a atributos químicos, físicos e biológicos e propiciar maior volume de solo explorado. O sistema plantio direto deve ter seus atributos constantemente monitorados a fim de prever futuras restrições ao crescimento radicular. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar como os atributos químicos dos solos atuais se relacionam com a calagem e revolvimento do solo feito há 25 anos para correção da acidez potencial natural na transformação do bioma Pampa em área de produção de forragens e grãos de sequeiro. O estudo foi realizado em um Argissolo Acinzentado distrófico plúntico. O delineamento experimental foi blocos ao acaso e parcelas subdivididas, com quatro repetições. A parcela constitui os modos de aplicação de calcário, superficial e incorporado. As subparcelas consistiram de doses de calcário (0,0; 8,5 e 17,0 t ha⁻¹ (metade e total da dose recomendada pela CQFS-RS/SC (1995))). Em 2016 foi realizada a reaplicação do calcário superficialmente. Foi analisado o sistema radicular da soja por meio do comprimento radicular, da área superficial, do volume e do diâmetro médio das raízes. Para a caracterização química do solo foram determinadas a acidez ativa e a potencial e os teores de P e K disponíveis e de Ca, Mg e Al trocáveis. As variáveis foram submetidas à análise de variância (em arranjos bifatorial e trifatorial) e, havendo diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Após 25 anos da aplicação de calcário, superficial e incorporado, ainda persistem os efeitos nos atributos químicos do solo. O uso do calcário proporcionou a neutralização da acidez ativa, acidez potencial, aumento dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ e diminuição do Al³⁺. A reaplicação do calcário manteve os efeitos pronunciados na primeira camada (0-7,5 cm). O efeito da dose foi proporcional à quantidade de calcário aplicado para neutralização da acidez potencial. A cultivar de soja utilizada apresenta tolerância a condições de saturação por alumínio no solo, não afetando negativamente os componentes do sistema radicular e não apresentando diferença na produtividade em função da dose de calcário e modos de aplicação.

Palavras chaves: Calcário. Sistema radicular. Produtividade.

ABSTRACT

A soil considered to be of good quality should allow for root growth without restrictions regarding chemical, physical and biological attributes and provide a greater volume of explored soil. The no-tillage system must have its attributes constantly monitored in order to predict future restrictions on root growth. In this sense, the objective of this work is to evaluate how the chemical attributes of the current soils are related to the liming and soil tillage carried out 25 years ago to correct the potential natural acidity in the transformation of the Pampa biome into a dryland forage and grain production area. The study was carried out in a plintic dystrophic Gray Argisol. The experimental design was randomized blocks and split plots, with four replications. The parcel constitutes the application modes of limestone, superficial and incorporated. The subplots consist of doses of limestone (0.0, 8.5 and 17.0 t ha⁻¹ (half and total of the dose recommended by CQFS-RS/SC (1995))). In 2016, the limestone was re-applied superficially. The soybean root system was analyzed by means of root length, surface area, volume and mean diameter of the roots. For the chemical characterization of the soil, the active and potential acidity and the contents of available P and K and exchangeable Ca, Mg and Al were determined. were subjected to analysis of variance (in two-factor and three-factor arrangements) and, if there were significant differences, the means of treatments were compared by the Tukey test at 5% probability of error. the effects on the chemical attributes of the soil persist. The use of lime provided the neutralization of active acidity, potential acidity, increase in the contents of Ca²⁺ and Mg²⁺ and decrease of Al³⁺. The reapplication of lime maintained the pronounced effects in the first layer (0- 7.5 cm). The dose was proportional to the amount of lime applied to neutralize the potential acidity. The soybean cultivar used is tolerant to conditions of aluminum saturation in the soil, not negatively affecting the components of the root system and showing no difference in productivity as a function of lime dose and application modes.

Keywords: Limestone. Root system. Productivity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características granulométricas e químicas da camada de solo de 0–20 cm antes do estabelecimento do experimento, em 1994.....	33
Tabela 2 -	Dissertações, teses e artigos científicos realizados no experimento.	33
Tabela 3 -	Comprimento radicular, área superficial, diâmetro médio e volume radicular da cultura da soja coletado na linha e na entre linhas em diferentes doses e profundidades com e sem revolvimento.	56

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima do ar, decendiais, na área de realização da pesquisa durante o período de novembro de 2019 a março de 2020. 1º; 2º e 3º = Decêndio de cada mês. Santa Maria, RS. 2020 35
- Figura 2 - Estádios e operações durante o ciclo da soja. A) plantio; B) germinação; C e D) crescimento inicial; E) incidência de plantas daninhas e primeira pulverização com herbicida; F) uma semana após a primeira pulverização; H) aplicação de inseticida; I) floração da soja; J) época de coleta das raízes; K) ocorrência de stress hídrico; L) semana antes da colheita da soja e coleta de solo para análise química. 36
- Figura 3 - A) coleta de raiz, realizada em nove monólitos; B) lavagem das raízes sobre peneira de 1 mm; C) modelo de peneira utilizada para lavar as raízes; D) limpeza final das raízes com pinça 38
- Figura 4 - Valores de saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), acidez potencial (cmolc kg-1) e cálcio e magnésio trocável (cmolc kg-1), na linha e na entrelinha da cultura da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento e sem calcário. 42
- Figura 5- Saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), teores de cálcio e magnésio trocável de um solo coletado na linha e na entrelinha após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente a metade da dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície. 45
- Figura 6- pH em água, alumínio trocável e acidez potencial de um solo coletado na linha e na entre linha após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente a metade da dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície. 46
- Figura 7- Saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), cálcio e magnésio trocável de um solo coletado na linha e na entrelinhas após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente a dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície. 49
- Figura 8- pH em água, alumínio trocável e acidez potencial de um solo coletado na linha e na entrelinhas após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem

	revolvimento, equivalente a dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície.....	50
Figura 9-	pH em água e acidez potencial (cmolc kg-1) das doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja dentro de cada modo de aplicação e em diferentes profundidade.....	52
Figura 10-	Alumínio, cálcio e magnésio trocável das doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja em cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.	53
Figura 11-	Fósforo e potássio nas doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja em dentro de cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.....	54
Figura 12-	Produtividade da cultura da soja 2019/2020, massa seca de forrageira 2019 e massa seca total do mix (aveia preta, aveia branca, centeio, ervilhaca comum) 2020 em função das doses de calcário e modo de aplicação.	59

SUMARIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	HIPÓTESES	20
3.	OBJETIVO	22
3.1	OBJETIVO GERAL	22
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4.	REVISÃO DE LITERATURA	23
4.1	AGROECOSSISTEMA A PARTIR DO CAMPO NATIVO.....	23
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS SOBRE AMBIENTES DE CAMPOS NATURAIS	25
4.3	ALTERAÇÕES DO SOLO CAUSADAS PELA TRANSFORMAÇÃO DOS CAMPOS NATURAIS EM ÁREAS AGRÍCOLAS COM A CALAGEM	25
4.3.1	Alterações químicas	25
4.3.2	Alterações dos atributos do solo no perfil devido às formas de aplicação de corretivo de acidez	28
4.3.3	Desenvolvimento das culturas devido as transformações dos campos naturais em áreas agrícolas com a calagem	30
5.	MATERIAL E MÉTODOS	33
5.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL	33
5.2	ESTUDO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E DO CRESCIMENTO RADICULAR DA SOJA.	35
5.2.1	Coleta de amostras de solo e de raízes da soja	37
5.2.2	Coleta de amostras e análises de atributos químicos do solo	38
5.2.3	Produtividade das culturas	39
5.3	ESTATÍSTICA.....	39
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
6.1	ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO SEM CORREÇÃO DA ACIDEZ POTENCIAL NATURAL.....	40
6.2	ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO DEVIDO A APLICAÇÃO DA METADE DA DOSE DO CORRETIVO PARA ELEVAR PH DO SOLO A 6.....	43

6.3	ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO DEVIDO A APLICAÇÃO DA DOSE TOTAL DO CORRETIVO PARA ELEVAR pH DO SOLO A 6.....	47
6.4	ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO	51
6.5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DA SOJA EM FUNÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO E MODO DE APLICAÇÃO.....	54
6.6	PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO E MODO DE APLICAÇÃO.....	57
7.	CONCLUSÃO	60
	REFERENCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um fator limitante no cultivo de extensas áreas do mundo, o que comumente é corrigido com a aplicação de corretivo da acidez, mármores e calcários, especialmente. Os efeitos positivos da calagem em solos ácidos são bem documentados no Brasil desde os anos 60 do século passado (MOHR, 1960; WIETHÖLTER, 2000). A calagem se tornou uma prática obrigatória para obter elevadas produções, que ao neutralizar os prótons da solução do solo (acidez ativa) desequilibra o sistema forçando a dessorção do alumínio e hidrogênio fracamente adsorvido (acidez potencial), neutralizando-os também (KAMINSKI et al., 2007). Além disso, o aumento do pH da solução do solo afeta direta e indiretamente a disponibilidade dos nutrientes, a população microbiana e, inclusive, o arranjo das partículas e demais propriedades físicas (KAMINSKI et al., 2007).

Em solos de regiões tropicais e subtropicais, o manejo adequado na transformação do bioma natural em agroecossistema deve, obrigatoriamente, envolver a correção da acidez potencial, através da aplicação de mármores ou calcário (RHEINHEIMER et al., 2000). A Comissão de Química e Fertilidade do Solo (QCFS), em seu Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016), recomenda incorporação do corretivo da acidez com lavração e gradagem quando da implantação de sistemas conservacionistas, em especial o sistema plantio direto, de espécies frutíferas e florestais e de pastagens permanentes. Não importa se até então o solo estava sendo cultivado com revolvimento ou estava abrigando biomas naturais; trata-se de oportunidade única para eliminar as restrições químicas do solo, em especial a toxidez de alumínio e, caso haja necessidade, da correção da carência de fósforo. A dose de corretivo recomendada para a maioria das culturas de grão é aquela suficiente para neutralizar a acidez potencial até pH em água 6,0 da massa de solo da camada 0-20 cm. Todas as demais reaplicações de corretivo da acidez, decorrentes da reacidificação do solo, podem e devem ser feitas simplesmente distribuindo-o na superfície do solo e na dose de apenas 25% daquela necessária para elevar o pH do solo a 6,0.

Os efeitos da incorporação do corretivo de acidez na implantação do sistema plantio direto, em especial, quanto às propriedades químicas, são bem conhecidos na literatura (KAMINSKI et al., 2007; WEIRICH NETO et al., 2000; MIOTTO et al., 2019; ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2001). É esperado que o modo de aplicação interfira também nos atributos físicos do solo devido a movimentação do solo pelos implementos (OLIVEIRA;

LIMA; VEBURG, 2015). O revolvimento do solo a partir de um bioma natural, como por exemplo o campo nativo do Bioma Pampa, pode diminuir a qualidade física do solo, com impactos negativos na estabilidade de agregados, na continuidade de poros e na presença de canais de alta atividade biológica (MARCOLAN, 2002), além de acelerar a decomposição da matéria orgânica “nativa”. No entanto, um único revolvimento não é suficiente para que os impactos sejam expressivos em termos de perda de produtividade ou incremento das transferências de água e sedimentos aos mananciais aquáticos (RÓS; HIRATA, 2019). O que se questiona é se os efeitos dessa única mobilização do solo, na implantação de sistemas conservacionistas ou semi-perenes, após longos períodos de cultivo ainda persistem sobre os atributos físicos do solo.

Um solo considerado de boa qualidade deve possibilitar o crescimento radicular isento de restrições quanto os atributos químicos, físicos e biológicos e, conseqüentemente, propiciar às plantas maior volume de solo explorado para garantir maior absorção de água e nutrientes, e sem restrições às trocas gasosas (BORTOLANZA; KLEIN, 2016). O baixo teor de cálcio, e a alta toxicidade de alumínio afetam o crescimento da raiz e a absorção de água e nutrientes pelas plantas, geralmente causando perdas de rendimento das culturas (KAMINSKI et al., 2005; BORTOLUZZI et al., 2014).

A genética determina o padrão de distribuição das raízes, no perfil do solo e o potencial de crescimento, no entanto, a expressão genética é modulada, por exemplo, pelas condições edafoclimáticas (PRADO; NATALE, 2004). Geralmente, as condições do solo induzem níveis de stress na planta que desencadeiam alterações hormonais, para que se adapte buscando melhores zonas de crescimento (BORTOLUZZI et al., 2014). Ausência de restrições físicas, alta e diversa atividade biológica, ausência de elementos tóxicos, em especial o alumínio trivalente, e ótima disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo e cálcio, permitem o crescimento normal do sistema radicular.

Desse modo, manejos conservacionistas de solos, entre eles o sistema plantio direto, devem ter seus atributos constantemente monitorados a fim de prever futuras restrições ao crescimento/desenvolvimento radicular. Especificamente em solos com elevada acidez potencial natural, uma vez corrigida, o monitoramento das alterações nos atributos químicos relativos à reacidificação e à disponibilidade de fósforo e nos atributos físicos ideais às raízes é fundamental à manutenção de altas produtividades.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar como os atributos químicos e físicos do solo atuais se relacionam com a calagem feita com revolvimento do solo

há 25 anos para correção da acidez potencial natural na transformação do bioma Pampa em área de produção de forragens e grãos de sequeiro.

2. HIPÓTESES

Precedendo as hipóteses será apresentado um resumo das premissas para a elaboração das mesmas.

O efeito negativo da acidez do solo já é bem conhecido e estudado em diversos agroecossistemas, principalmente quando se trata da qualidade química do solo e da relação com a produtividade das culturas. A correção da acidez do solo pela aplicação de corretivo (geralmente mármore ou calcário) é a única forma eficaz de resolver o problema, inclusive, aumentando a eficiência de utilização dos fertilizantes adicionados às culturas, especialmente, dos fosfatos solúveis.

Solos ocorrentes nas regiões tropicais e subtropicais são naturalmente ácidos em decorrência de sua idade avançada. A introdução de prótons via água da chuva é o “motor” do processo de intemperização, atuando seletivamente sobre rochas e minerais. Há intensas transformações de minerais primários, exposição de argilominerais pela simples fragmentação e, principalmente, a neoformação de minerais secundários, em especial, de novos argilominerais. Inicialmente ricos em silicatos (2:1), o intemperismo transforma-os em argilominerais 1:1 e 0:1 (óxidos). Conseqüentemente, ocorrerá percolação de elementos químicos, moléculas e até minerais no perfil do solo e sua transferência aos mananciais aquáticos, inclusive, mares e oceanos. Então, a saída de Si, que nunca ocorre na forma de elemento químico livre, mas acompanhado de oxigênios (em tetraedros únicos ou unidos com diferentes quantidades de unidades básicas), e de outros elementos químicos, em especial, do grupo dos metais alcalinos (Na e K, por exemplo) e alcalinos terrosos (Ca e Mg, por exemplo), são conseqüências e não causa do intemperismo e da acidificação do solo.

Ademais, a acidificação do solo é uma das causas do intemperismo e não conseqüência. Evidentemente que a transformação dos minerais primários e, inclusive, dos minerais secundários portadores de alumínio (octaedros), quando a atividade do próton na solução do entorno desses minerais for elevada (valores $> 3,16 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$) haverá liberação de Al^{3+} à solução. Esse íon tem alta densidade de carga e é capaz de fragmentar a molécula de água de sua esfera de coordenação transformando-o, sequencialmente com aumento do pH da solução, em Al-OH^{2+} , Al(OH)_2^+ , Al(OH)_3^0 , entre outras espécies monoméricas, que podem inclusive dar origem a espécies poliméricas, liberando os prótons até então constituindo a molécula de água. Portanto, Al^{3+} é conseqüência do abaixamento do pH e na seqüência é fonte de novos prótons e acelera o processo de acidificação do solo.

Assim, dado que a acidez potencial natural do solo foi corrigida no perfil, a reacidificação do solo ocorre a partir da superfície (zona de contato solo-atmosfera) e de forma lenta, e, dificilmente regressará às condições originais ao longo do tempo. Portanto, a reaplicação do corretivo da acidez pode e deve ser feita simplesmente depositando-o na superfície do solo.

Quanto à produção em solos ácidos, diversas culturas em sistema plantio direto têm apresentado elevadas produtividades em solos com acidez potencial e concentrações de Al^{3+} altas, esse aumento está associada com o aumento de carbono orgânico na camada superficial que forma complexos Al-orgânicos diminuindo a toxicidade do alumínio, a disponibilidade suficiente de cálcio e magnésio no solo e absorção na faixa ideal de nutrientes pela cultura em função de boa disponibilidade hídrica no solo

- (a) Há persistência do efeito residual da calagem na acidez ativa e na acidez potencial mesmo após duas décadas e meia da correção da acidez potencial natural;
- (b) Há continuidade na diminuição do alumínio trocável e na descida de cálcio e magnésio no perfil do solo;
- (c) As plantas de soja têm grande capacidade de tolerância a altas saturações por alumínio em sistema plantio direto

3. OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar como os atributos químicos dos solos atuais se relacionam com a calagem e o revolvimento do solo feito há 25 anos para correção da acidez potencial natural na transformação do bioma Pampa em área de produção de forragens e grãos de sequeiro.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (a) verificar se há persistência do efeito residual da calagem na acidez ativa e na acidez potencial mesmo após duas décadas e meia da correção da acidez potencial natural;
- (b) verificar se há continuidade na diminuição do alumínio trocável e na descida de cálcio e magnésio no perfil do solo;
- (c) analisar se as plantas de soja têm grande capacidade de tolerância a altas saturações por alumínio em sistema plantio direto.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 AGROECOSSISTEMA A PARTIR DO CAMPO NATIVO

No Sul do Brasil, a vegetação com campos nativos é incluída em dois biomas. O bioma Pampa se localiza exclusivamente na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, incluindo praticamente todo Uruguai e um vasto território na Argentina. No RS, ocupava cerca de 63% do território do estado, em uma área de 178 mil quilômetros quadrados (EMBRAPA, 2020). O bioma Mata Atlântica forma um mosaico de campo nativo com florestas na metade norte no Rio Grande do Sul e nos estados de Santa Catarina e Paraná. O campo nativo se define por marcante presença de grandes extensões de terras planas ou levemente onduladas, com arbustos baixos e vegetação rasteira e, por ser ecossistema natural, estava presente na região desde antes da expansão das florestas (GENRO, 2014).

No Pampa gaúcho, o solo é predominantemente arenoso, de baixa capacidade de retenção de água e pobre nutricionalmente. No entanto, dispõe de uma microbiota rizosférica capaz de estimular o desenvolvimento radicular das plantas por meio de mecanismos bioquímicos, favorecendo o crescimento de sua vegetação nativa (KÖNIG et al., 2013). A diversidade vegetal foi estimada em mais de 3000 espécies campestres apenas no estado do Rio Grande do Sul, com grande quantidade de espécies endêmicas e espécies ameaçadas de extinção (OVERBECK et al., 2009).

No entanto, os campos nativos têm enfrentado inúmeras mudanças desde a colonização das terras pelos imigrantes europeus. O bioma Pampa passou por uma modificação temporal de centenas de anos, em que obteve acentuada fragmentação e descaracterização da paisagem natural, em especial depois das últimas duas décadas. Segundo MAPBIOMAS (2019), restam apenas 32,4% da vegetação nativa. A expansão da monocultura da soja, a introdução de culturas florestais e de pastagem exótica atribuíram um novo ecossistema à região: o agroecossistema. (CRUZ; GUADAGNIN, 2010; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020).

O avanço do agroecossistema e o crescimento da agricultura sobre os campos nativos são reflexo da expansão da Revolução Verde no país, com a implantação de uma estrutura produtiva baseada na integração de pacotes tecnológicos da indústria química e mecânica. A compensação econômica do novo sistema passou a ser mais satisfatória que a pecuária

tradicional, uma vez que o mercado regional se difundiu, especialmente com a ligação aos mercados internacionais (CRUZ; GUADAGNIN, 2010).

A expansão no setor de exportação no Brasil instaurou um novo ciclo a partir da década de 1990, sendo que a soja apresentou maior crescimento entre as commodities e, por conseguinte, teve sua área de produção ampliada em todo país (ODERICH; WAQUIL, 2019). No estado do Rio Grande do Sul, a área plantada da cultura da soja cresceu 96,7%, passando de 3,0 milhões de ha para 5,9 milhões de hectares no período de 2000 a 2020. A expansão territorial da soja ocorreu especialmente na metade sul do estado, devido à substituição de pequenas áreas de cultivo já instaladas, principalmente do milho, e sobre os campos naturais (KUPLICH; CAPOANE; COSTA, 2018). Agropecuaristas tradicionais, proprietários de grandes extensões de campo nativo, arrendaram e/ou venderam suas terras para agricultores e empresas produtoras de grãos de sequeiro, especialmente, oriundos do Planalto Central gaúcho.

A introdução da soja transgênica no Brasil em 1997 acelerou a destruição do bioma Pampa. Houve uma combinação perfeita sob ponto de vista unicamente econômico: soja resistente ao glifosato, não necessidade de revolvimento do solo e valorização da soja no mercado internacional. Ainda, a desvalorização da pecuária tradicional e a supervalorização das terras na metade sul do estado, juntamente com a facilidade de arrendamento, somam fatores que trouxeram para a região novos sojicultores com uma racionalidade empresarial, apresentando conduta chave para a mudança agrícola da região (PIZZATO, 2013).

Um dos problemas para resolver na instalação de lavouras a partir do campo nativo é o planejamento ambiental da propriedade. Atualmente está vigente as normas da Lei Federal 12.651/2012 de 25 de maio de 2012 alterada pela Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012, intitulada Lei de Proteção da Vegetação Nativa, também conhecida como “Novo Código Florestal Brasileiro”. A lei abrange normas de proteção florestal de qualquer ecossistema terrestre nativo, incluindo campos, caatinga e cerrado, em que inclui categorias jurídicas para a conservação, tais como as Áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal. Ainda atribui ao proprietário rural a proporção de terras a ser utilizada para produção agrossilvipastoril e a área protegida com vegetação nativa (STEIGLEDER, 2020). No entanto, o Decreto Estadual nº 52.431 de 2015 permitiu declarar campos nativos em uso pastoril como “área rural consolidada por supressão de vegetação nativa com atividades pastoris” (BRANCALION et al., 2016). Essa classificação instiga a conversão de áreas remanescentes de campo nativo para outros usos, principalmente o avanço da soja. Para Kuplich, Capoane e Costa (2018), a não necessidade de licença ambiental para o cultivo da soja, diferentemente

da silvicultura, faz com que as lavouras avancem sobre as áreas de preservação permanente ao longo dos cursos d'água e nascentes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS SOBRE AMBIENTES DE CAMPOS NATURAIS

A região sul brasileira é caracterizada por apresentar solos naturalmente ácido, cujo grau da acidez potencial está relacionado a gênese do solo, pois a ação de fatores (clima, relevo, organismos, material de origem e tempo) e processos (transformação, translocação, adição e remoção) de formação ocorrentes na região tende a formar solos ácidos com o avanço do intemperismo (BOHNEN; MEURER; BASSANI, 2000). Solos ocorrentes no bioma Pampa gaúcho geralmente têm valores de acidez ativa muito elevados ($\text{pH} < 4,7$, em média). Então, certamente haverá Al^{3+} adsorvido aos argilominerálias, óxidos e matéria orgânica. O Al^{3+} é facilmente dessorvível e, portanto, mantém níveis tóxicos na solução de solo ao sistema radicular de plantas exóticas e sensíveis a esse elemento químico. Também, esses solos têm alta saturação por alumínio, equação proposta por Albrecht (1958) e usada até hoje:

$$m(\%) = \frac{\text{Al}^{3+}}{\text{CTC}_{\text{efetiva}}} \times 100, \text{ justamente pela adsorção preferencial do } \text{Al}^{3+} \text{ em relação aos}$$

demais cátions também liberados pelo intemperismo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , especialmente). Essa relação, embora metodológica, pois deve considerar as soluções extratoras, as relações solo / solução extratora, o tempo de agitação e a temperatura padronizadas, é útil para relacionar os níveis no solo com possíveis danos tóxicos às plantas. A quantidade de acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) é dependente da quantidade da fração argila do solo. Solos com textura arenosa não acumulam altos teores de matéria orgânica e, são, portanto, menos tamponados sob ponto de vista do equilíbrio fase sólida – solução do solo (KAMINSKI, 1974).

4.3 ALTERAÇÕES DO SOLO CAUSADAS PELA TRANSFORMAÇÃO DOS CAMPOS NATURAIS EM ÁREAS AGRÍCOLAS COM A CALAGEM

4.3.1 Alterações químicas

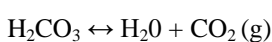
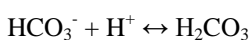
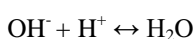
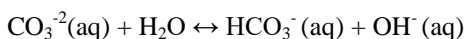
A correção da acidez potencial natural ou reacidificada dos solos se tornou uma prática fundamental para o aumento da produtividade das culturas comerciais, por minimizar

os efeitos da acidez e promover o desenvolvimento das plantas sensíveis a solos ácidos (KAMINSKI et al., 2000). A acidez ativa representa o hidrogênio (H^+) dissociado na solução do solo e é expressa pelo valor de pH. Já a acidez potencial é representada pela quantidade de Al^{+3} e H^0 adsorvidos nos grupos funcionais da fase sólida do solo e que são dessorvíveis a valores pré-estabelecidos de pH do solo. Portanto, a cada valor de pH do solo pré-estabelecido haverá um valor de acidez potencial. O verdadeiro valor de acidez potencial só pode ser determinado pela titulação do solo com uma base. Alternativamente, pode-se estimar o valor do $Al^{+3}+H^0$ por extratores tamponados aos requeridos pH, como por exemplo, acetato de cálcio 0,5 M a pH 7,0 (KAMINSKI et al., 2002) ou de forma mais rápida e prática, usando-se do abaixamento do valor de pH de uma solução tamponada adicionada ao solo (SHOEMAKER et al., 1961). Atualmente, nos laboratórios gaúchos e catarinenses é usada a solução TSM elaborada por Toledo et al. (2012) que foi baseada na solução de Sikora (2006). Finalmente, o Al^{+3} “trocável” é experimentalmente determinado ao ser extraído por um método padronizado: KCl 1 M, relação solução/solo de 20/1, agitação 5 minutos, sem controle de temperatura e decantação natural. Alterando-se o extrator ou qualquer outro parâmetro da técnica, alterar-se-á a quantidade de Al dessorvível, podendo inclusive haver a destruição de minerais portadores desse elemento químico em determinadas condições (CUNHA et al., 2019).

A calagem tem como propósito corrigir a acidez potencial no valor pretendido de pH do solo. E sendo esse valor de pH água ou superior a 5,5, não haverá mais Al^{+3} dessorvíveis para repor àquele que estava presente na solução do solo. O material abundantemente disponível nos estados do Sul do Brasil é o mármore, constituído por composições variáveis de carbonatos de cálcio e de magnésio. Trata-se de uma rocha com baixa porosidade e, portanto, baixíssima solubilidade em água. Por isso, há necessidade de moagem extrema para aumentar a superfície específica e facilitar a sua hidratação. Conforme Kaminski et al, (2007) solubilização do carbonato de cálcio é infinitamente menor do que a acidez potencial, onde:

$CaCO_{3(s)} + H_2O \leftrightarrow Ca^{+2}_{(aq)} + CO_3^{-2}_{(aq)}$, cujo valor de Kps é $10^{-8,4}$, o que equivale a $0,0038 \text{ g CO}_3^{-2} \text{ L}^{-1}$ (Stumm & Morgan, 1996).

A hidrólise do íon CO_3^{-2} ocorrerá significativamente somente na presença de prótons na solução do solo



À medida que a reação do íon CO_3^{-2} com os prótons presentes na solução avança [$\text{CO}_3^{-2}(\text{aq}) + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{HCO}_3^-(\text{aq}) \rightarrow K = 10^{10,3}$ (Stumm & Morgan, 1996)], 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} .

A diminuição da acidez potencial é resultado do aumento da concentração de ânions OH^- no solo, sendo que as OH^- e os HCO_3^- reagem com o H^+ da solução do solo. A diminuição da atividade do próton em solução propicia que o Al^{+3} promova a dissociação do H^+ de uma das moléculas de água de hidratação, formando o íon Al-OH^{+2} . Como consequência, há liberação do próton e esse é instantaneamente neutralizado pelos ânions OH^- e HCO_3^- , dando continuidade à elevação do pH do meio. O Al-OH^{+2} formado tem condições de promover a “quebra” de outra molécula de água de hidratação formando o $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$ e liberando mais um próton, o qual é também neutralizado pelos ânions oriundos da dissociação do mármore. Na sequência, o íon $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$ “quebra” uma terceira molécula de água gerando o $\text{Al}(\text{OH})_3$ e liberando mais um próton, também neutralizado pelos ânions.

Assim, em valores de pH da solução do solo em torno de 5,4-5,5, a concentração de Al^{+3} da solução do solo é próxima de zero e, significa que a desorção de Al^{+3} da fase sólida também é desprezível. Esse princípio é válido para outros elementos químicos com alta reatividade com OH^- e HCO_3^- , essenciais ou não às plantas, tais como Mn^{+2} , Fe^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Cd^{+2} e Pb^{+2} , entre outros. Todos têm sua biodisponibilidade drasticamente diminuídas com a elevação do pH do solo (KAMINSKI et al., 2007). Em conclusão, quanto mais prótons e, principalmente, alumínio foram passíveis de serem deslocados da fase sólida para a solução do solo, maior será a possibilidade de dissociar o mármore; quanto mais mármore for dissociado, força que mais mármore seja solubilizado. Então é o próton quem destrói o mármore. Nenhuma reação dos cátions oriundos da dissociação do mármore (cálcio e magnésio) altera a acidez do solo. Esses são apenas coadjuvantes e ocuparão os grupos funcionais desbloqueados, anteriormente ocupados pelo Al^{+3} , e aqueles “criados” pela dissociação do H^+ .

As alterações na superfície dos argilominerais, óxidos e matéria orgânica provocadas pela reação do corretivo da acidez são extremamente significativas e duradouras (RHEINHEIMER et al., 2000, 2018a e 2018b; KAMINSKI et al., 2000 e 2005; GATIBONI

et al., 2003; VARGAS et al., 2019; BORTOLUZZI et al., 2014). Esses estudos demonstram que, após décadas da aplicação do corretivo, o solo que recebeu calcário ainda manteve os valores de Ca e Mg elevados e o Al menor em comparação com a testemunha. Os impactos da calagem ocorrem de forma que dificilmente a acidez do solo retorna a patamares originais. Assim, uma vez corrigida a acidez potencial em profundidade e seguido com um sistema conservacionista do solo, o efeito residual da calagem é prolongado e a reaplicação do corretivo de acidez tem frequência diminuída (KAMINSKI et al., 2007). Em artigo de Rheinheimer et al (2018), por exemplo, avaliando experimento em que se utilizou doses de calcário e modos de aplicação do corretivo, observou-se que a reacidificação do solo retornou em apenas metade do valor de alumínio trocável e menos de um terço da porção original da acidez potencial após 18 anos da aplicação do calcário. Com a calagem também foram verificadas aumento na atividade microbiana, favorecendo a ação dos microrganismos fixadores de nitrogênio e da ciclagem de nutrientes, liberando, por exemplo P, S e B pela

Decomposição da matéria orgânica, além da melhora da aeração do solo, circulação de água e desenvolvimento do sistema radicular (LOPES; SILVA; GUILHERME, 1990).

4.3.2 Alterações dos atributos do solo no perfil devido às formas de aplicação de corretivo de acidez

Os corretivos da acidez têm baixa solubilidade em água e somente serão dissociados se estiverem em contato com prótons da solução do solo do seu entorno. Então, é inevitável que a correção da acidez potencial original do solo durante as transformações dos biomas naturais em agroecossistemas deve ser feita com incorporação o mais profundo possível, garantindo, ao menos, a neutralização total do Al^{3+} facilmente dessorvível ($pH > 5,5$). Similarmente, caso venha se adotando sistema de preparo do solo com revolvimento e se queira implantar sistemas com culturas perenes/semiperenes ou sistemas de manejos conservacionista com mínimo revolvimento (SPD e todos os manejos intermediários), é altamente recomendado de que a última lavração+gradagem seja aproveitada para incorporar o corretivo da acidez e, caso tenha carência de outros nutrientes, que seja feita correção com fertilizantes concomitantemente a aplicação do corretivo (KAMINSKI et al. 2007).

É por isso que a Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina em seu Manual de Calagem e Adubação (CQFS RS/SC, 2016) recomenda a incorporação do corretivo ao solo até 20 cm revolvendo com aração e gradagem, na dose de 100% para elevar o pH do solo a 6,0, juntamente com outros nutrientes

que são carentes no solo, como por exemplo o fósforo para correção da acidez natural ou no estabelecimento de um novo sistema produtivo conservacionista. Por outro lado, quando ocorre a reacidificação do solo em sistemas conservacionistas e sistemas com plantas perenes/semiperenes, não haverá necessidade de revolvimento do solo para correção da acidez reacidificada. A recomendação no Manual para este cenário é aplicar o corretivo de acidez na superfície do solo, pois a reacidificação ocorre a partir da superfície, principalmente pelos prótons da água da chuva.

Por essa acepção, é impensável iniciar sistema de produção agropecuária em áreas do bioma Cerrado, por exemplo, simplesmente depositando o corretivo na superfície do solo. Nenhum pesquisador sequer comenta essa hipótese. Então, por que ainda persiste a ideia por partes de técnicos de campo de que é possível destruir o bioma Pampa, convertendo-o em monocultivos de soja com aplicação de herbicidas, inclusive alguns proibidos nos países desenvolvidos e até classificados como cancerígenos, e que é nefasto ambientalmente o revolvimento único do solo para correção da enorme acidez natural do solo no perfil?

Em estudo feito por Miotto et al. (2019), avaliando o experimento após 44 meses da correção da acidez com calcário incorporado ao solo, observou-se que a calagem reduziu efetivamente a atividade do alumínio solução do solo até 20 cm de profundidade. Quando o calcário foi aplicado em superfície, ocorreu o surgimento de espécies de alumínio complexados com ligantes orgânicos, determinando menor atividade do Al^{3+} na solução do solo até uma profundidade de 10 cm, sendo esta que esta condição proporcionou sensibilidade a toxicidade de alumínio pela cultura da canola.

A adição pela primeira vez de corretivo da acidez sobre bioma natural destruído pela aplicação de herbicidas tem reatividade extremamente restrita ao solo em contato com as partículas do corretivo. As reações de neutralização dos prótons da solução do solo são limitadas pelo distanciamento entre as partículas do corretivo e a própria solução do solo. Portanto, não se pode esperar que haja neutralização do Al^{3+} do solo em profundidade apenas alguns meses após a calagem, como é observado quando da homogeneização do corretivo em todo volume de solo da camada 0-20 cm, por exemplo. Nesse caso, em menos de um mês (com ótima umidade do solo) já não haverá mais esse elemento em níveis tóxicos às plantas; e em menos de seis meses, o valor de pH atingirá aquele planejado, geralmente 6,0 para a maioria das culturas comerciais. O efeito residual é, portanto, função da dificuldade de reacidificação e não na presença de partículas do corretivo que ainda não reagiram.

A progressão da correção da acidez potencial no solo no perfil é limitada pelo tempo, pela granulometria do corretivo, pelas condições físicas do solo – em especial pelos

macroporos e sua continuidade - e pelo balanço hídrico, entre outras (KAMINSKI et al., 2007). Exemplo extremamente didático da reatividade temporal e alterações no solo do perfil devido à incorporação ou não do corretivo da acidez na conversão do bioma Pampa a sistema de produção de forragens e grãos de sequeiro foi publicado por Rheinheimer et al. (2000). Mesmo com a aplicação de 17 Mg ha^{-1} de mármore dolomítico finamente moído e com PRNT corrigido para 100% na superfície do solo, quatro anos após ainda persistiram altas saturações por alumínio (m) no solo. O solo das camadas 5-10 e 10-15 cm mantinham de 43 e 57% aos seis meses após aplicação; 25 e 54%, 10 e 41% e 2 e 41% aos 18, 36 e 48 meses após aplicação do corretivo da acidez. Em contrapartida, quando mármore foi homogeneizado com todo volume de solo da camada 0-15 cm, os valores de m já aos seis meses eram menores do que 20% e foram praticamente zerados a partir dos 36 meses.

Portanto, a correção do solo em subsuperfície só irá ocorrer quando o pH do solo na camada superficial atingir 5,5 (RHEINHEIMER et al., 2000). Amaral e Anghinoni (2001) constataram que o principal mecanismo de correção da acidez do solo em subsuperfície quando da aplicação do corretivo na superfície sem revolvimento é a movimentação vertical de partículas finas. Outros autores, usando-se de doses irreais de resíduos de plantas depositados na superfície de vasos em casa de vegetação juntamente com o corretivo da acidez, alertam para a contribuição de ânions orgânicos na diminuição dos valores de m e da atividade do Al em solução, os quais complexariam alguns átomos de Ca^{+2} e Mg^{+2} , acompanhantes dos corretivos, na superfície e migrariam no perfil. Ao entrarem em contato com solução do solo rica em Al^{+3} haveria a troca daqueles cátions por esse e aliviando a sua toxicidade às plantas (MIYAZAWA et al., 1993).

Apesar de estudos como o de Caires, Barth e Garbuio (2006) e Tiritan et al. (2016) que defendem que a calagem superficial apresenta migração e o efeito do corretivo em profundidade, para a correção da acidez natural nas camadas em profundidade com a calagem aplicada em superfície não é consensual na comunidade científica, uma vez que a uma grande maioria dos solos cultivados sob sistema plantio direto apresenta elevada saturação por alumínio na camada de maior desenvolvimento do sistema radicular (RHEINHEIMER et al., 2018).

4.3.3 Desenvolvimento das culturas devido as transformações dos campos naturais em áreas agrícolas com a calagem

A correção do solo obtém notáveis retorno no aumento da produtividade de diversas culturas, tornando-se umas das práticas mais rentáveis e econômicas, por minimizar os efeitos deletérios do alumínio e melhorar as propriedades químicas da camada arável dos solos (RAIJ, 1991). Uma vez que o desenvolvimento das culturas está diretamente relacionado aos atributos químicos do solo, sobretudo pela presença de bases trocáveis no ambiente radicular (PESSONI, 2012).

Conforme mencionado por Yang, Rao e Horst (2013) a toxicidade do alumínio limita a produção das culturas em especial em subsolos ácidos, diminuindo a resistência à seca e o uso de nutrientes do subsolo. Os efeitos danosos às raízes das culturas são influenciados pela dimensão que a planta vai necessitar do subsolo para buscar água e nutrientes, fazendo com que quando haja umidade na camada de solo superficial as plantas conseguem se desenvolver suficientemente, enquanto em estação seca necessitam buscar em subsuperfície (YANG; RAO; HORST, 2013). Deste modo, a correção da acidez no subsolo pode favorecer o crescimento da raiz em subsuperfície diminuindo o stress hídrico nas plantas na estação seca (CRUSCIOL et al., 2016).

Estudos comprovam que diversas culturas podem alcançar elevadas produções em solos ácidos (CAIRES et al., 2005; CAIRES et al., 2008; MOREIRA et al., 2001). Morreira et al. (2001) estudando tempos de cultivo sob sistema de semeadura direta e doses de calcário observou que as produções de grãos de milho e soja não foram influenciadas pela calagem em nenhum tempo de cultivo. Também Caires et al. (2008) aplicando calcário dolomítico superficial aumentou os teores de cálcio e magnésio nas raízes e nas folhas da soja, no entanto, a produção da soja não foi influenciada pela calagem justificando a causa na baixa toxicidade do Al e pôr o crescimento radicular ser estimulado por condições de stress de acidez do solo no sistema plantio direto.

Todavia, são encontrados resultados positivos com a correção do solo, Corrêa et al. (2008) relata incrementos no crescimento do sistema radicular, no desenvolvimento da parte aérea e na produtividade da aveia preta com a aplicação superficial do corretivo de acidez. As taxas de calcário também aumentaram o rendimento de matéria seca da forragem, a concentração de proteína bruta e a produção estimada de carne durante o inverno / primavera (CRUSCIOL et al., 2016). Joris et al. (2012) obteve resultados de aumento de produção de grãos de milho e soja com o alívio da acidez do solo, observando benefícios mais pronunciados em genótipos sensíveis ao Al sob estresse hídrico.

Entre as cultivares e variedades de plantas os efeitos da acidez do solo se comportam de maneira diferenciada no desenvolvimento da mesma (SOUSA et al., 2007). De acordo

com Cravo, Smyth e Brasil (2012) os resultados distintos na produtividade entre as culturas sobre o nível de tolerância à acidez do solo e a calagem precisam ser estudados para aproveitamento racional dos corretivos de acidez.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A presente dissertação de mestrado foi elaborada usando um experimento de longa duração localizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, Rio Grande do Sul (RS). O clima predominante na região é Cfa (subtropical úmido sem estiagens), segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.769 mm e temperatura média anual de 19,2°C.

A área experimental era originalmente ocupada com vegetação típica do Bioma Pampa até 1994. O solo é classificado como Argissolo Acinzentado distrófico plúntico, segundo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al. 2018). As características químicas e granulométricas do solo da camada 0-20 cm estão na tabela 1.

Tabela 1 - Características granulométricas e químicas da camada de solo de 0–20 cm antes do estabelecimento do experimento, em 1994.

pH água	SMP	M.O. g dm ⁻³	Al troçável	H + Al	Ca + Mg troçáveis cmol _c dm ⁻³	CTC	CTC pH7,0	m	V %	P mg dm ⁻³	K
4,4	4,5	37,0	3,3	24,4	3,7	7,1	28,2	46	14	2,3	54
	Argila				Silte				Areia		
		190			260				550		

Fonte: Edilceu João da Silva Santos (1994)

O experimento foi instalado em outubro de 1994, em delineamento blocos ao acaso (quatro repetições) com parcelas subdivididas. As parcelas foram dispostas em faixas e nelas foram alocados os modos de aplicação de calcário, superficial e incorporado. As subparcelas receberam diferentes doses de calcário: testemunha sem calcário; 8 t ha⁻¹ (2 t ha⁻¹ na instalação mais três reaplicações em superfície de 2 t ha⁻¹ a cada 2 anos (1996, 1998 e 2000)); 8,5 e 17,0 t ha⁻¹ (metade e total da dose recomendada pela CQFS-RS/SC (1995), respectivamente). O revolvimento do solo foi feito com arado de disco na profundidade de 15 cm, seguida de duas gradagens. Em sequência, adotou-se sistema plantio direto em toda área do experimento.

Em 13 de dezembro de 2016 foi realizada uma reaplicação de calcário para corrigir a reacidificação do solo. A dose reaplicada foi estimada pelo índice SMP no solo da camada de

0-10 cm. Usou-se o tratamento que havia recebido a dose adequada para corrigir acidez potencial até pH 6,0 (tratamento 17 Mg ha⁻¹ incorporado) para definir dose de reaplicação. A dose estimada pelo SMP em 2016 foi de 6,4 t ha⁻¹; então, reaplicaram-se 0,0; 1,6; 3,2 e 6,4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico apenas depositando-o na superfície, sem revolvimento, inclusive nos tratamentos que o solo havia sido revolvido em 1994.

Desde o primeiro cultivo efetivado em 1994 até 2019 foi usado no outono/inverno consórcio de espécies forrageiras (azevém e trevo vesiculoso), exceto em 2017 em que se cultivou trigo. Na primavera/verão foram cultivados soja (95/96; 97/98; 98/99; 03/04; 13/14), milho (safras 94/95; 96/97; 99/00; 00/01; 01/02; 02/03), milho (07/08; 08/09; 15/16) e capim sudão (17/18). Nas safras 04/05, 05/06; 09/10; 10/11; 11/12; 12/13; 14/15; 16/17; 18/19 foram mantidas em pousio no período de primavera e verão.

Até o presente momento, o experimento foi usado para as seguintes dissertações, teses e artigos científicos (tabela 2):

Tabela 2 - Dissertações, teses e artigos científicos realizados no experimento.

Teses e Dissertações		
Aplicação de calcário em solos arenosos sob sistema plantio direto e campo nativo. Mestrado, UFSM.	Santos, E.J.S. 1997	Dissertação
Até quanto em profundidade migra o efeito do calcário? Mestrado, UFSM.	Gonzatto, R. 2014	Dissertação
Alterações mineralógicas causadas pelas atividades antrópicas. Doutorado, UFRGS.	Chaves, E. 2020	Tese
Artigo científico		
Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural	Rheinheimer et al. 2000	
Resposta de culturas à aplicação de calcário em superfície ou incorporado ao solo em campo nativo	Kaminski et al; 2000	
Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural	Kaminski et al; 2005	
Efeito da calagem na relação entre solo e água	Bortoluzzi et al; 2008	
Aggregation of subtropical soil under liming: a study using laser diffraction	Bortoluzzi et al; 2010	
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 <i>Campos</i>	Rheinheimer et al. 2018	

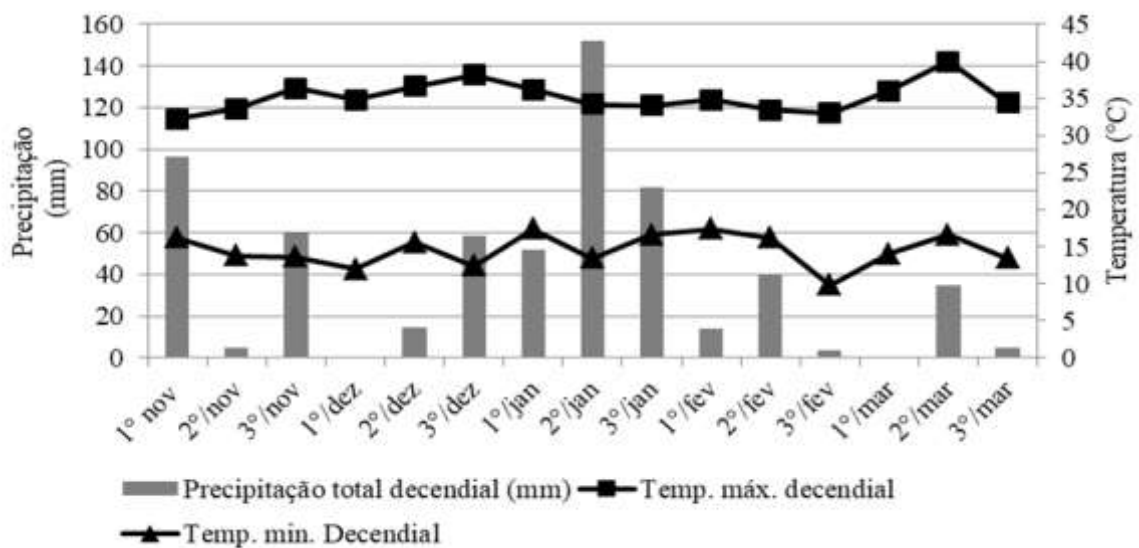
Fonte: A Autora.

5.2 ESTUDO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E DO CRESCIMENTO RADICULAR DA SOJA.

O presente estudo foi realizado durante o cultivo de soja da safra de 2019/2020, após 25 anos da implantação do experimento. Foram utilizados seis tratamentos, sendo as doses 0,0; 8,5 e 17,0 t ha⁻¹ nas duas formas iniciais de aplicação do corretivo da acidez (superficial e incorporada), com três repetições.

Os dados de precipitação e temperatura (Figura 1) medidos durante o período do estudo foram obtidos da estação meteorológica de Santa Maria, RS, interligada com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a uma distância de 1,5 km da área experimental.

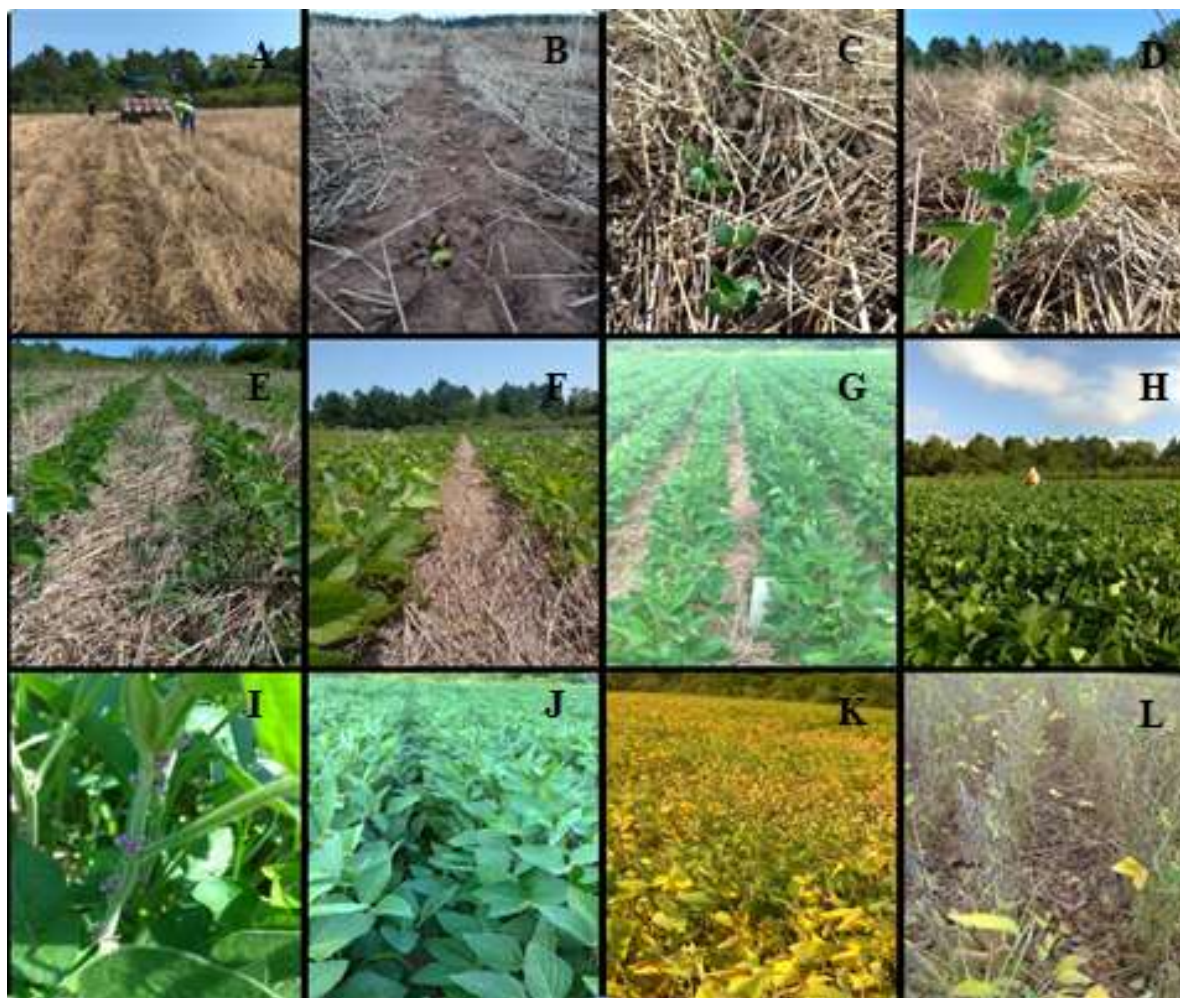
Figura 1 - Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima do ar, decendiais, na área de realização da pesquisa durante o período de novembro de 2019 a março de 2020. 1°; 2° e 3° = Decêndio de cada mês. Santa Maria, RS. 2020



Fonte: A autora. Elaborado com dados do Instituto Nacional de Meteorologia, estação A803 Santa Maria-RS.

Em 21 de outubro de 2019, realizou-se a coleta da forrageira de outono/inverno (predominância de azevém por ressemeadura natural). No mesmo dia, as plantas foram dessecadas com o princípio ativo Saflufenacil na dose de 35g do produto por hectare. Vinte e sete dias após, devido a permanência das plantas infestantes no local do estudo, foi aplicado o herbicida, contendo princípio ativo Dibrometo de diquate (748g) e Diquate (400g).

Figura 2 - Estádios e operações durante o ciclo da soja. A) plantio; B) germinação; C e D) crescimento inicial; E) incidência de plantas daninhas e primeira pulverização com herbicida; F) uma semana após a primeira pulverização; H) aplicação de inseticida; I) floração da soja; J) época de coleta das raízes; K) ocorrência de stress hídrico; L) semana antes da colheita da soja e coleta de solo para análise química.



Fonte: A autora.

A semeadura da cultura da soja ocorreu no dia 21 de novembro de 2019, seguindo o zoneamento agrícola para o estado do Rio Grande do Sul (MAPA, 2019). A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax Elite 5855RSF IPro, sendo as sementes já tratadas com fungicida. Posteriormente, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium* na dose de 2 ml do produto por quilograma de semente. A semeadura foi realizada utilizando uma semeadora-adubadora de parcela, com espaçamento entre linhas de 0,50 m e 12 sementes por metro linear, totalizando uma população inicial 240.000 plantas ha⁻¹. A adubação constou da adição na linha de semeadura de 0-60-60 kg de N, P₂O₅ e K₂O ha⁻¹, respectivamente, ajustando-se em valores de reposição dos nutrientes menores do que a estabelecida pela CQFS RS/SC (2016).

Aos 25 dias após a semeadura foram aplicados 900 g do princípio ativo glifosato por hectare para controle de plantas infestantes. Aos 50 dias após a semeadura foi realizada capina manual para eliminar a grande população de corda-de-viola (*Ipomoea sp*) que havia emergido. No final do estágio vegetativo foi realizada aplicação de inseticida, Tiametoxam (28,2 g) e Tiametoxam (21,2 g) por hectare, para controle de percevejo (Figura 2).

Após a colheita da soja, em 18 de maio de 2020, foi semeado mix de espécies forrageiras (25 kg ha⁻¹ de aveia preta, 20 kg ha⁻¹ de aveia branca, 3 kg ha⁻¹ de centeio e 20 kg ha⁻¹ de ervilhaca comum, além da ressemeadura natural do azevém). A semeadura foi feita em linhas de 17 cm de espaçamento, sem adição de nutrientes. Aos 36 dias após a semeadura foi adicionado em cobertura 100 kg de N por hectare, na forma de ureia.

5.2.1 Coleta de amostras de solo e de raízes da soja

As raízes da soja, no estágio R2, foram coletadas em fevereiro de 2020. Abriu-se uma trincheira por parcela, perpendicular à linha de semeadura. A coleta foi feita em três camadas: 0,0 -7,5 cm; 7,5-15 cm e 15-22,5 cm. Em cada camada, monólitos com área de 15 x 22,5 cm e 7,5 cm de altura foram coletados na linha de semeadura (coincidindo com o centro do monólito), na entrelinha à direita e na entrelinha à esquerda. Assim, nove monólitos foram coletados por parcela (3 camadas x três posições). Em seguida, as raízes foram separadas do solo dos monólitos com lavagem com água corrente sobre uma peneira de malha de 1,0 mm. Posteriormente, realizou-se limpeza mais acurada com auxílio de pinças, separando as impurezas e os nódulos fixadores de N. As raízes foram acondicionadas em potes contendo solução de álcool 70% e em local refrigerado (Figura 3).

Imagens digitais das raízes foram feitas com um scanner óptico EPSON Expression 11000, com resolução de 600DPI, e registradas pelo Software WinRhizo Pro 2013. As raízes foram posicionadas em uma fina camada de água de forma que as mesmas não ficassem sobrepostas. O comprimento total, a área superficial, volume e o diâmetro médio (mm) das raízes foram calculados após a digitalização. Tendo conhecimento do volume do monólito, os parâmetros obtidos através das imagens digitalizadas foram convertidos em unidade de volume de solo.

Figura 3 - A) coleta de raiz, realizada em nove monólitos; B) lavagem das raízes sobre peneira de 1 mm; C) modelo de peneira utilizada para lavar as raízes; D) limpeza final das raízes com pinça



Fonte: A autora.

5.2.2 Coleta de amostras e análises de atributos químicos do solo

A trincheira aberta para a coleta de raízes da soja também foi usada para coletar solo para as análises químicas. O solo foi coletado nas mesmas três camadas (0,0 -7,5 cm; 7,5-15 cm e 15-22,5 cm) e três posições (central, entrelinhas à direita e à esquerda da linha de soja) onde foram coletadas as raízes da soja. O solo foi seco em estufa com circulação forçada de ar ($\pm 55^{\circ}\text{C}$). Após seco o solo foi moído e peneirado em uma malha de 2 mm.

A acidez ativa (pH em água) foi realizada conforme a metodologia de Tedesco et al. (1995). A acidez potencial foi estimada pela equação proposta por Kaminski et al. (2002) usando a solução TSM conforme método proposto por Toledo et al. (2012) em substituição ao

valor do SMP na equação. Usou-se a solução de KCl 1,0 mol L⁻¹ (Tedesco et al., 1995) para extrair Al, Ca e Mg. A quantidade de Al extraída foi medida por titulação utilizando solução de NaOH 0,0125 mol L⁻¹ e as quantidades de Ca e Mg foram medidas por espectrofotometria de absorção atômica

Os teores “disponíveis” de fósforo e potássio foram estimados pelo método de Mehlich-1 (Mehlich, 1953 - adaptado por Tedesco et al., 1995). A quantificação do teor de fósforo foi feita pelo método proposto por Murphy & Riley (1962), enquanto que o K foi quantificado por espectrofotômetro de emissão de chama.

5.2.3 Produtividade das culturas

5.2.3.1 Massa seca de forragem outono/inverno de 2019

A produtividade de massa seca de forrageiras hibernais foi estimada a partir da coleta das plantas em área de 0,25 m². As plantas foram secas em estufas de ar forçado a 60°C de temperatura.

5.2.3.2 Produtividade da soja – safra 2019-20

A produtividade da soja foi estimada a partir da colheita de 3 linhas de 4 metros lineares por parcela. As plantas foram colhidas inteiras e trilhadas em debulhadora mecânica acoplada em trator agrícola. A soja trilhada foi limpa, medida a massa de grão e determinada à umidade em determinador eletrônico e a produtividade foi expressa a 13% de umidade.

5.2.3.3 Massa seca do mix de forrageiras outono/inverno 2020

A produtividade de massa seca do mix forrageiro foi estimada a partir da coleta das plantas em uma área de 6 m² por parcela. As plantas foram separadas em três grupos: (a) aveia branca + aveia preta + centeio; (b) ervilhaca e (c) azevém. As plantas foram secas em estufas de ar forçado a 60°C de temperatura. A massa seca foi quantificada separadamente nos três conjuntos de plantas.

5.3

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área de estudo era um fragmento do bioma Pampa localizado em posição muito próxima a várzea. No entanto, o solo tinha elevadíssima acidez potencial, altíssimos teores de Al^{3+} facilmente dessorvível e baixas quantidades de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ dessorvíveis (Tabela 1). Então, para elevar o pH do solo da camada 0-20 cm eram necessárias 17 Mg ha^{-1} de corretivo de acidez com PRNT 100% (CQFS-RS/SC, 1995). Desde 1994, quando o bioma natural foi destruído e transformado em sistema de produção de forragens e grãos, as alterações nos atributos químicos e a produtividade das culturas vêm sendo monitoradas. Após 25 anos, os resultados da presente dissertação de mestrado serão discutidos nos seguintes tópicos:

- Alterações dos atributos químicos em solo sem correção da acidez potencial;
- Alterações dos atributos químicos em solo devido a aplicação da metade da dose do corretivo para elevar pH do solo a 6;
- Alterações dos atributos químicos do solo em função da aplicação de doses de calcário
- Desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja em função de doses de calcário e modo de aplicação;
- Produtividade das culturas em função da aplicação de doses de calcário e modo de aplicação.

6.1 ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO SEM CORREÇÃO DA ACIDEZ POTENCIAL NATURAL

Nas Figuras 7 é possível observar a saturação por bases, saturação por Al, acidez potencial, cálcio e magnésio trocável até 22,5 cm de profundidade com o revolvimento ou não do solo. O tratamento testemunha que nunca recebeu aplicação calcário, por mais que procedeu-se com todas as demais práticas agronômicas, o solo manteve uma média de saturação por bases na camada cultivável (0-7,5 cm) de 11%, saturação por alumínio em aproximadamente 62% e soma de $\text{Ca}+\text{Mg}$ em $2,3 \text{ cmolc kg}^{-1}$ nos dois manejos do solo. Na camada de 7,5-15 e 15-22,5 cm atingiu respectivamente 7,6% e 4,7% de saturação por bases, 72% e 82% de saturação por Al e 1,8 e $1,5 \text{ cmolc kg}^{-1}$ da soma dos cátions $\text{Ca}+\text{Mg}$ trocável.

Com relação ao solo do campo nativo do experimento antes da implantação do experimento, o tratamento testemunha continua com alta acidez ativa, altíssima acidez potencial e enormes quantidades Al^{3+} dessorvível, exatamente como era nos tempos de bioma natural (Tabela 1).

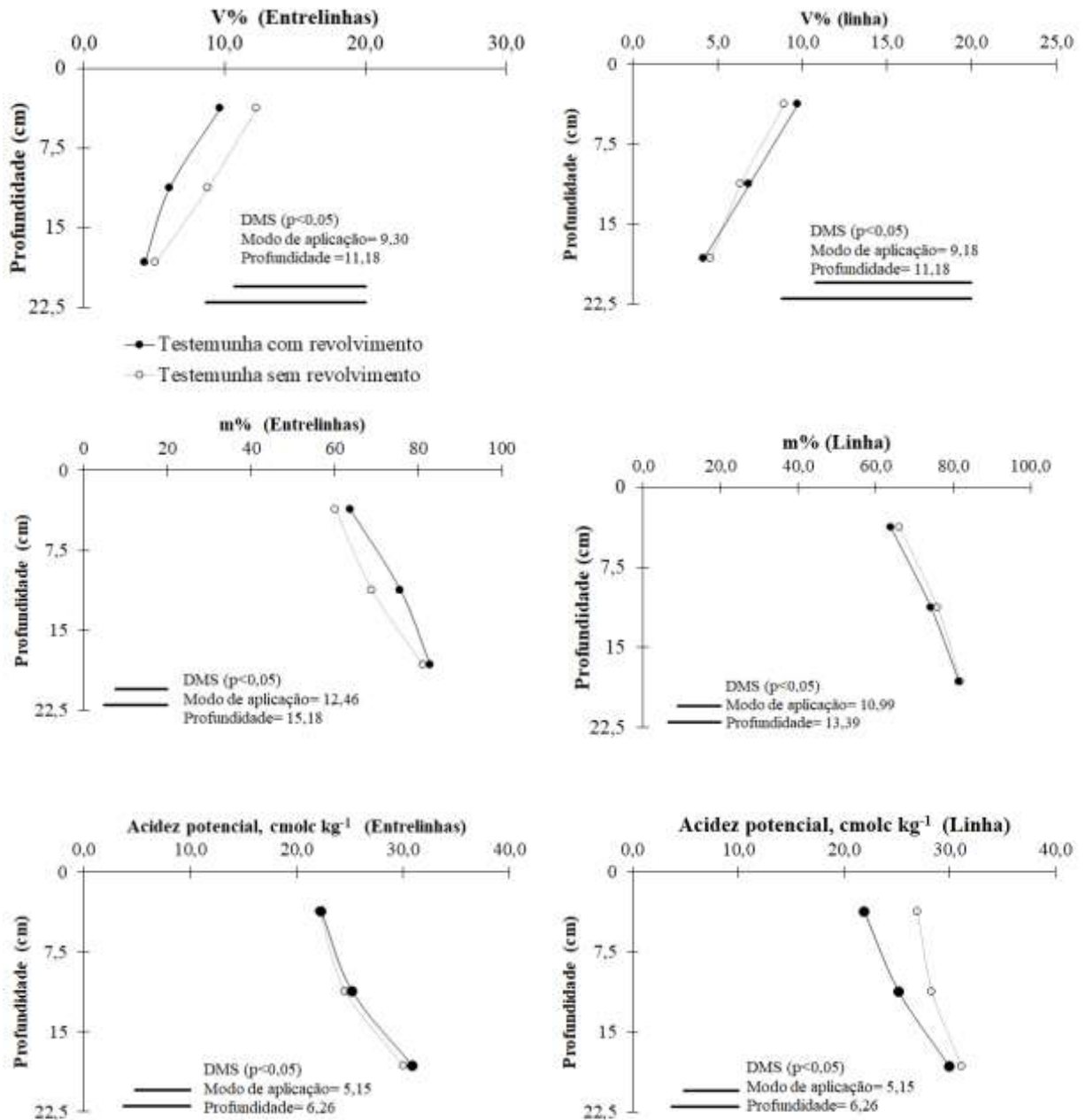
A homogeneização do solo da camada 0-15/20 cm pela lavração e gradagem realizada há mais de 25 anos não alterou os valores da acidez ativa, da acidez potencial e dos teores de Al^{3+} , Ca^{+2} e Mg^{+2} dessorvíveis do solo no perfil. Dessa forma, uma única mobilização do solo, como é o caso desse estudo, não teve diferença significativa nos atributos químicos do solo avaliados após os 25 anos de cultivo. Assim, a destruição do bioma natural, com ou sem revolvimento do solo, transformando-o em sistema de produção de forrageiras exóticas (azevém, aveia, trevos, ervilhaca, entre outras) e culturas produtoras de grãos (milho, soja, trigo e milho) não altera os componentes da acidez do solo ao longo prazo.

O Tratamento sem adição de calcário segue padrão de distribuição dos atributos relacionados à acidez do solo no perfil: valores extremamente elevados de acidez potencial e m, crescentes à medida que se aprofunda no perfil; baixíssimos valores absolutos de Ca^{+2} e Mg^{+2} e, conseqüentemente, baixíssimos valores de saturação da $\text{CTC}_{7,0}$ por cátions (V) (Figura 7). Como já citado por Vargas et al., (2019) esse modelo de distribuição é típico de solos ocorrendo em regiões subtropicais e sob biomas naturais. Com o sistema de cultivo de plantio direto e com manutenção de cobertura do solo faz com que ocorre um aumento de matéria orgânica do solo nas camadas superficiais contribuindo para a amenizar o alumínio (Alleoni et al., 2010), mantendo a acidez potencial e saturação por alumínio em níveis mais baixos nas camadas superficiais em relação com o restante do perfil.

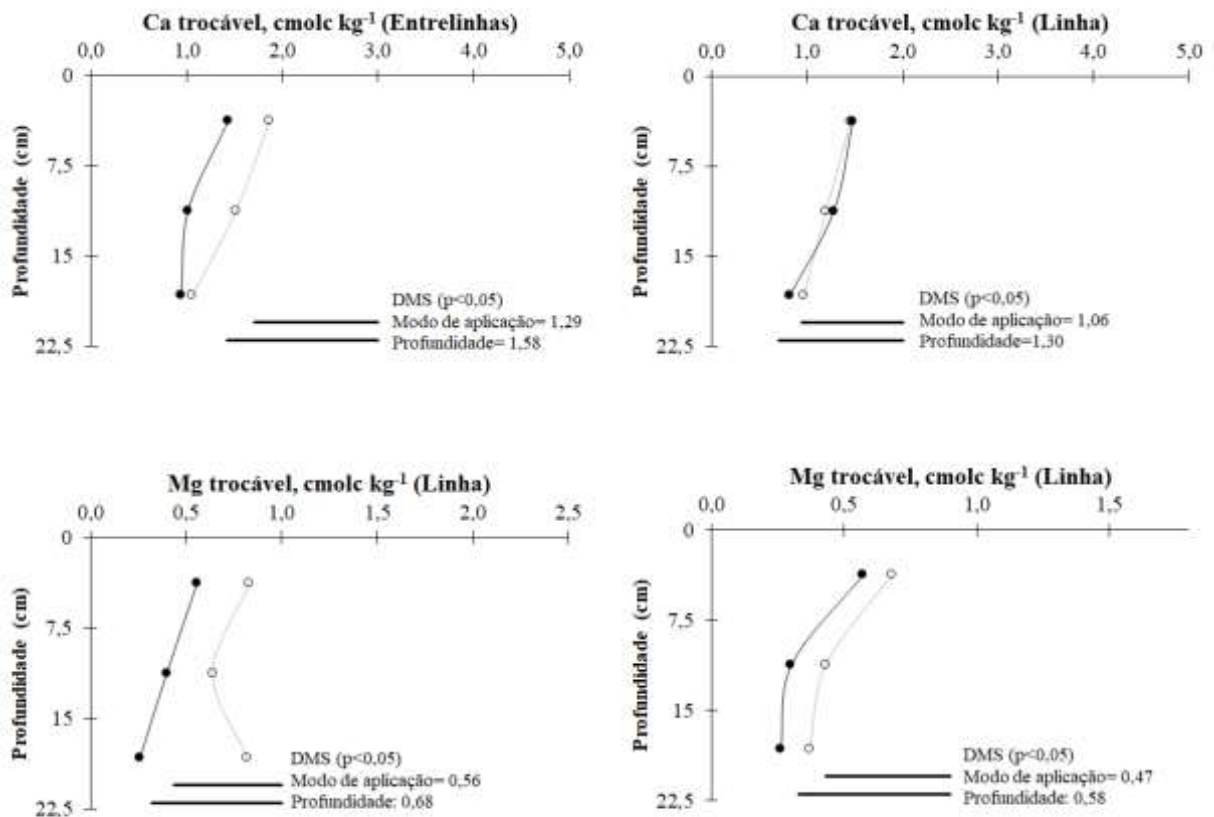
Não há influência da coleta na linha de semeadura ou entrelinha nos atributos químicos do solo.

Figura 4 - Valores de saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), acidez potencial (cmolc kg⁻¹) e cálcio e magnésio trocável (cmolc kg⁻¹), na linha e na entrelinha da cultura da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento e sem calcário.

(Continua)



(Conclusão)



Fonte: A Autora.

6.2 ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO DEVIDO A APLICAÇÃO DA METADE DA DOSE DO CORRETIVO PARA ELEVAR PH DO SOLO A 6

A incorporação da metade da dose de corretivo da acidez do solo para elevar o pH do solo a 6 (CQFS-RS/SC, 1995), incorporada há 25 anos atrás e com uma reaplicação superficial há seis anos, quando comparada com o tratamento testemunha, a m do solo diminuiu até a máxima profundidade amostrada (22,5 cm). No entanto, ainda há 10, 45 e 50 % de Al³⁺ bloqueando os grupos funcionais superficiais (CTC_{efetiva}) (Figura 10).

Os valores de V estão aquém dos 65% recomendados para as culturas de grãos (48, 22 e 18%, respectivamente para o solo das camadas 0-7,5; 7,5-15 e 15-22,5 cm). Os menores valores de m, maiores de V, cálcio, magnésio e de pH no solo da camada superficial provavelmente se devem a reaplicação superficial da meia dose do corretivo da acidez efetuada em 13/12/2016 (38 meses atrás), criando um gradiente similar ao tratamento que o

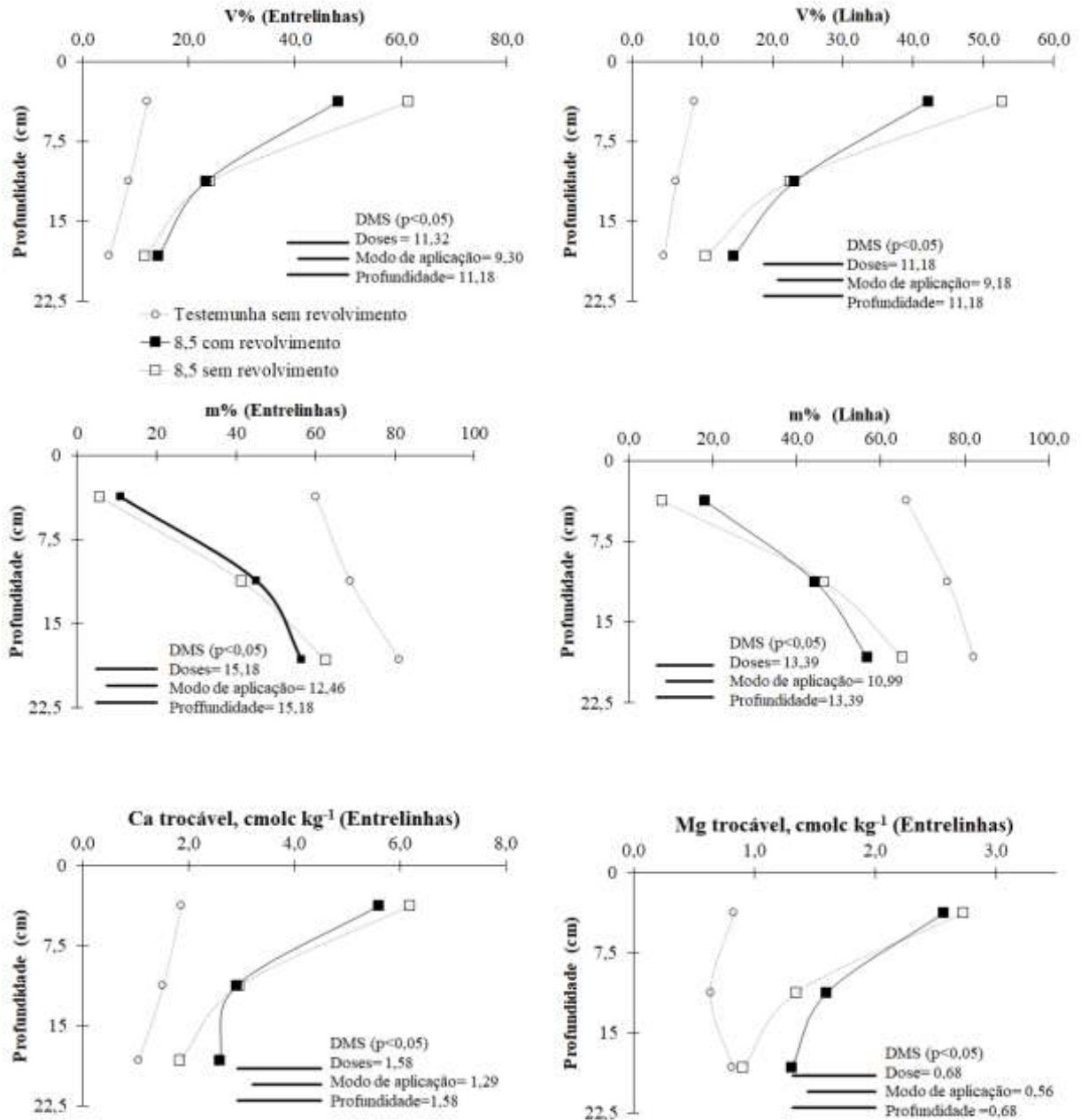
solo nunca havia sido revolvido (Figuras 9 e 10). Em que a medida que acontece a neutralização do H^+ a partir da superfície, os sítios de troca dos colóides vão sendo ocupados pelos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} , aumentando a saturação de bases do complexo de troca do solo (BOHNEN; MEURER; BISANI, 2000), se formando uma nova frente de neutralização a partir da superfície.

A simples deposição na superfície do solo da metade da dose de corretivo da acidez do solo para elevar o pH do solo até 6 há 25 anos (outubro de 1994) e a reaplicação realizada há 38 meses (dezembro de 2016) ainda não foi suficiente para neutralizar todo Al^{3+} facilmente dessorvível ou para elevar a V acima dos 65%, mesmo no solo superficial – camada 0-7,5 cm (Figura 9). Além disso, novamente não se constatou diferenças estatísticas nos atributos relacionados à acidez entre solo coletado na linha de semeadura ou nas entrelinhas da cultura da soja.

Na aplicação da metade da dose recomendada pela CQFS-RS/SC, (1995), tanto na aplicação incorporado como na aplicação de calcário superficial, os valores estão inferiores aos considerados ideais para o desenvolvimento das culturas, com presença do alumínio retido na superfície dos colóides e saturação por bases inferior do considerado adequado para o desenvolvimento das culturas de grão. No entanto, a reacidificação do solo ao longo do tempo não chegou a patamares das do solo original, mesmo se considerar uma reaplicação superficial de calcário.

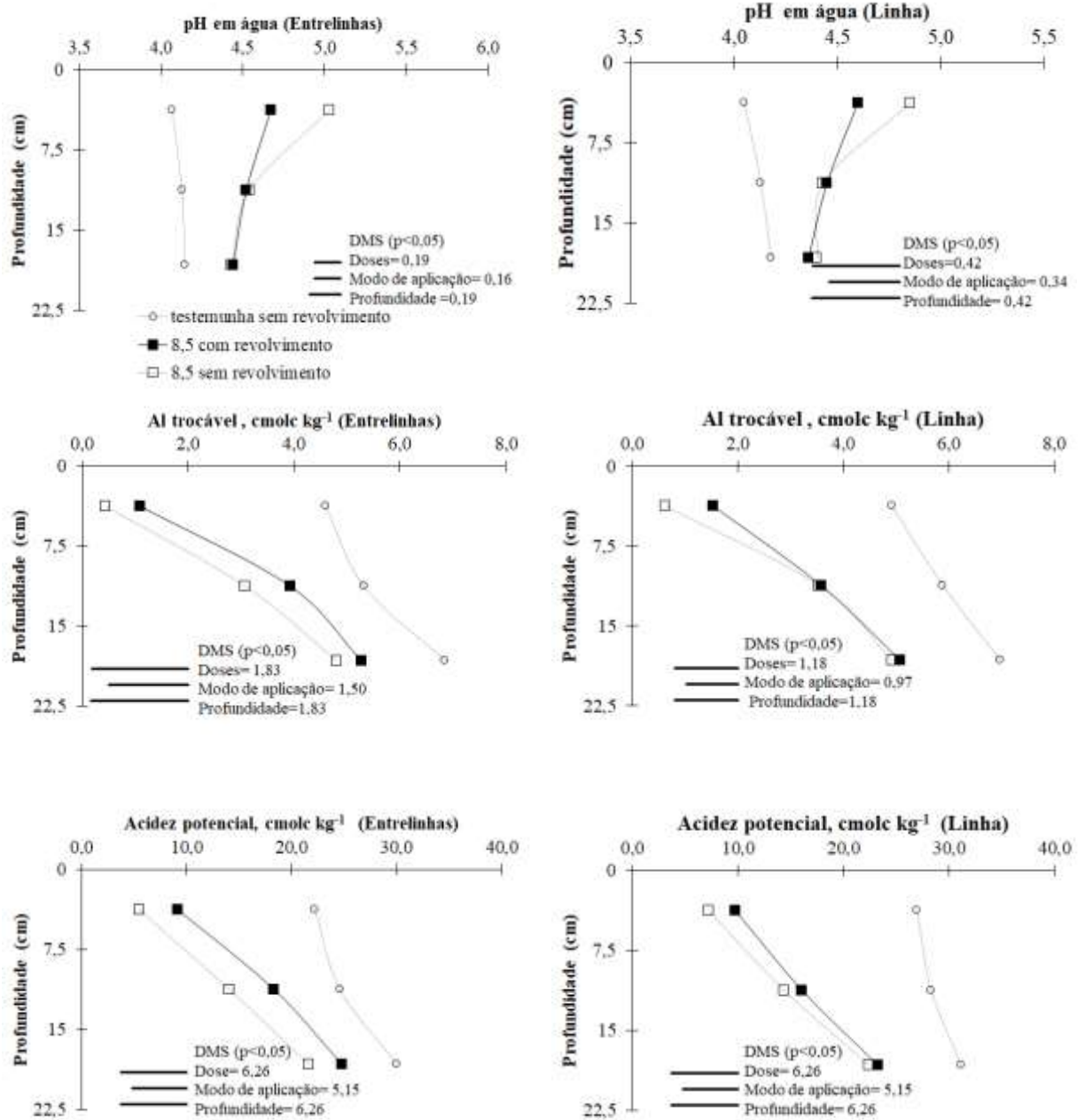
Dessa forma, como já citado por Rheinheimer et al. (2018b) quando aplicado a metade da dose recomendada o efeito da saturação por alumínio, saturação por bases, pH em água, cálcio e o magnésio foi equivalente à fração de acidez potencial neutralizada. Também provou que o calcário incorporação na metade da dose recomendada resultou em melhores resultados em subsuperfície, assim a incorporação do calcário é mais eficiente no alívio da acidez em comparação da testemunha e se mantém por um longo período após a aplicação.

Figura 5- Saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), teores de cálcio e magnésio trocável de um solo coletado na linha e na entrelinha após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente à metade da dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície.



Fonte: A Autora.

Figura 6- pH em água, alumínio trocável e acidez potencial de um solo coletado na linha e na entre linha após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente à metade da dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície.



Fonte: A Autora

6.3 ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO DEVIDO A APLICAÇÃO DA DOSE TOTAL DO CORRETIVO PARA ELEVAR PH DO SOLO A 6

O uso da dose integral de corretivo da acidez para elevar o pH a 6 (CQFS - RS/SC, 1995), com homogeneização com todo volume do solo da camada 0-15/20 cm em 1994 e a reaplicação de $6,4 \text{ t ha}^{-1}$ em superfície em 2016, manteve quase zero o valor de m no solo da camada 0 - 7,5 cm e em valores menores que 20% no solo da camada 15 - 22,5 cm. A frente de neutralização da acidez a partir da incorporação do calcário condicionou a diminuição de 75% de m em relação ao solo sem aplicação de calcário na camada de 15-22,5 cm (Figura 12). Ademais, o valor de V manteve a melhor condição para cultivo das plantas até maiores profundidades, contendo 65%, 58% e 40% para o solo das camadas 0-7,5; 7,5-15 e 15-22,5 cm, respectivamente.

A melhor condição do solo na camada superficial (0-7,5 cm) é possivelmente devida a reaplicação do calcário em superfície em 2016 (38 meses); contudo, os bons resultados dos atributos químicos no perfil do solo até 22,5 cm se devem ao solo ter condicionado os efeitos da calagem devido incorporação realizada há 25 anos.

Os valores da acidez potencial quando incorporado o calcário se apresentam homogêneos no perfil do solo (5, 7 e 10 cmolc kg^{-1} respectivamente para o solo das camadas 0-7,5; 7,5-15 e 15-22,5 cm). Após 4 anos da reaplicação, mesmo com a dose considerada adequada o pH não alcançou o recomendado para as principais culturas comerciais de grãos. Apesar dos valores estarem em patamares que indicariam uma reaplicação do corretivo de acidez, outros atributos permanecem relativamente altos, isso porque mesmo que ocorra o abaixamento do pH, não há tempo suficiente de exposição para que haja liberação de Al^{3+} e percolação de cálcio e magnésio.

Quanto à dose integral de calcário foi simplesmente depositada sobre vegetação do campo natural dessecada em 1994, com reaplicação em 2016, o solo da camada 0 - 7,5 cm mantém valores de V adequados para o cultivo, possibilitando o desenvolvimento das espécies sensíveis ao Al^{3+} e responsivas a elevação do pH ($V > 65\%$). Ainda, pelo aumento do pH do solo, não tem mais tanto alumínio facilmente dessorvível, associado com a diminuição da acidez potencial do solo, a elevação do pH e dos teores de cálcio e magnésio (Figura 12). No entanto, o solo da subsuperfície ainda guarda muitos traços do solo natural: os valores de $V\%$ diminuíram de 65% na superfície para 25% e 18% no solo das camadas de 7,5-15 e 15-22,5 respectivamente. Logicamente, os valores de m e da acidez potencial aumentam em

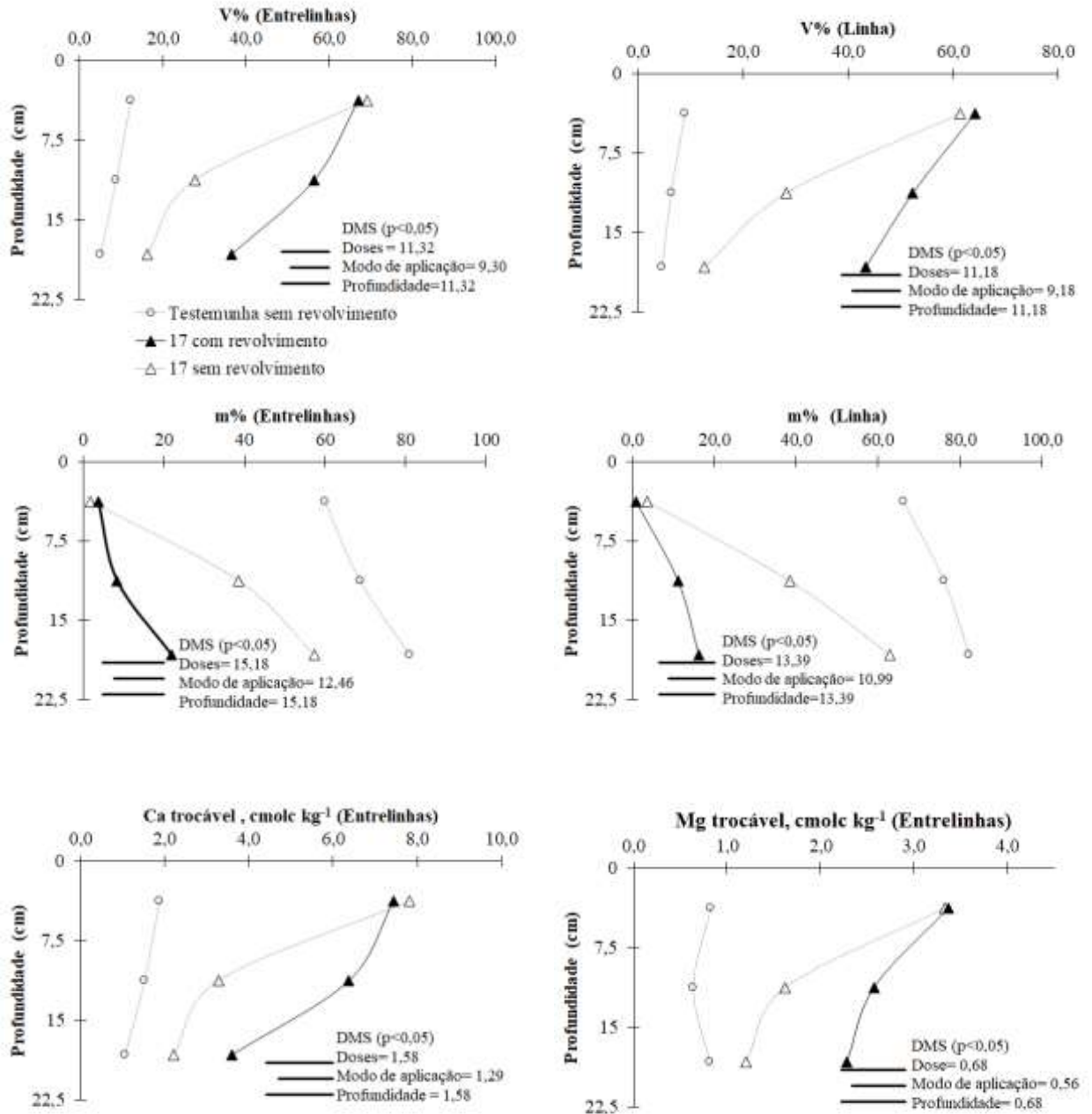
profundidade, indicando resquícios da acidez natural, incluindo os 23,33 cmolc kg⁻¹ de acidez potencial e 60% de m na camada de 15-22,5 cm (Figura 12 e 13).

A deposição superficial faz com que ocorra um acúmulo de Ca²⁺ e Mg²⁺ na camada superficial aumentando a saturação por bases. A migração dos cátions (Ca, Mg, e K) e do fósforo para a subsuperfície é lenta, assim em sistema plantio direto eles se acumulam nos primeiros centímetros do solo (Kaminski et al, 2007), a neutralização da acidez em subsuperfície ocorre por meio do movimento declinante das partículas finas de calcário por ductos porosos ou por fluxo de massa de ânions básicos (AMARAL; ANGHINONI, 2001).

Os melhores benefícios ao solo são alcançados com uma distribuição uniforme do corretivo de acidez nas camadas de maior desenvolvimento radicular, dado que o material é pouco solúvel e a dissolução do calcário é limitada a região ao redor do grânulo (VAN RAIJ et al.,1983). A homogeneização do calcário causa aumento dos teores de Ca³⁺ e Mg³⁺, abrangendo a área de maximiza a absorção desses nutrientes pelo sistema radicular, juntamente neutralizando o Al³⁺ trocável em profundidade favorecendo o crescimento das raízes e, conseqüentemente, a produtividade de culturas sensíveis (VARGAS et al., 2019).

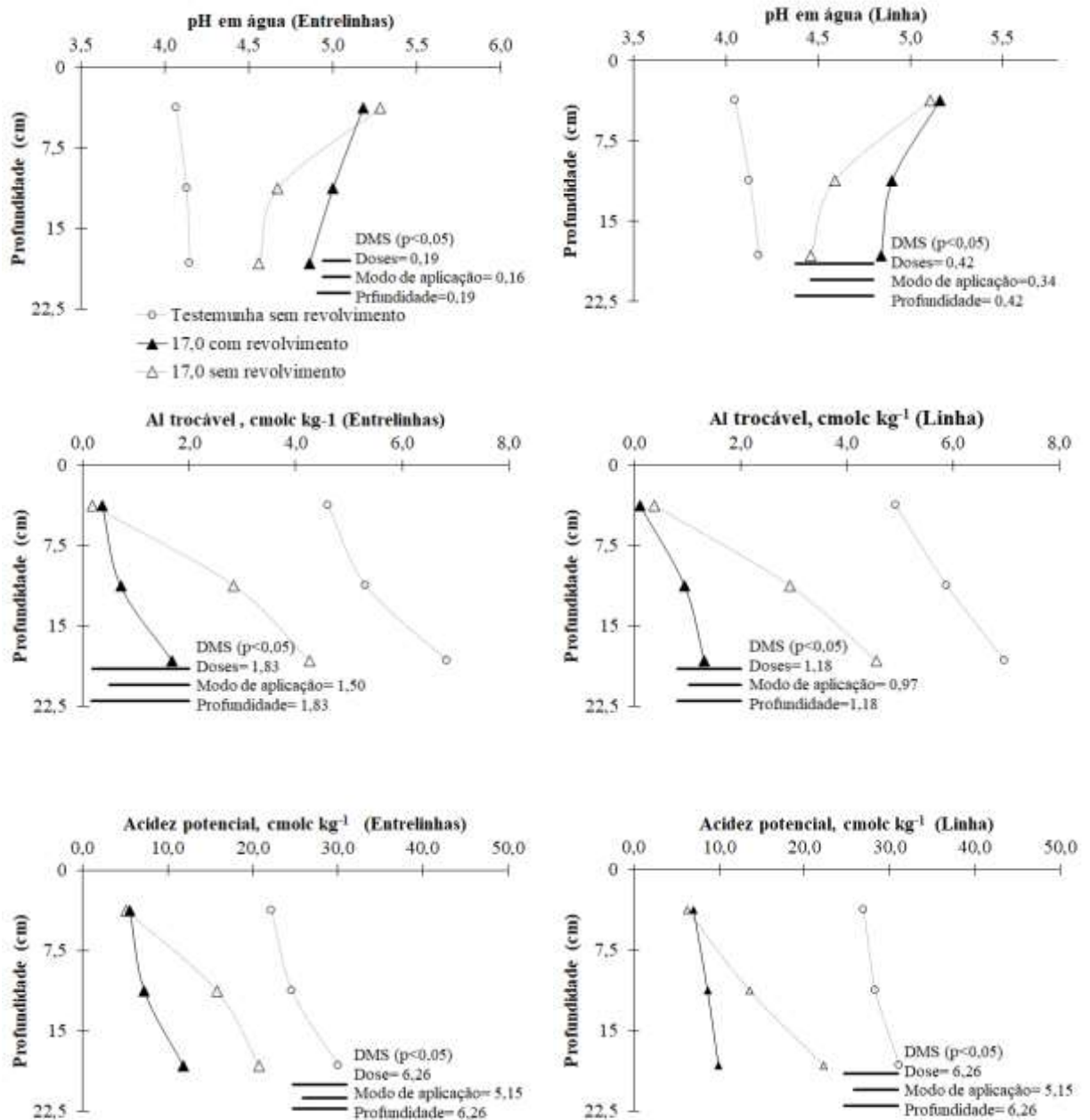
Em experimento feito por Miotto et al. (2019) após 44 meses que se realizou a correção da acidez com calcário incorporado ao solo, observou-se que reduziu efetivamente a atividade do alumínio solução do solo até 20 cm de profundidade. Já quando aplicado o calcário em superfície ocorreu o surgimento de espécies de alumínio complexados com ligantes orgânicos determinando menor atividade do Al³⁺ na solução do solo até uma profundidade de 10 cm, existindo esse resultado, mostra sensibilidade para a cultura da canola a toxicidade de alumínio.

Figura 7- Saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), cálcio e magnésio trocável de um solo coletado na linha e na entrelinhas após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente a dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície.



Fonte: A Autora.

Figura 8- pH em água, alumínio trocável e acidez potencial de um solo coletado na linha e na entrelinhas após a colheita da soja em diferentes profundidades com e sem revolvimento, equivalente a dose recomendada pela CQFS - RS/SC, mais uma reaplicação em superfície.



Fonte: A Autora

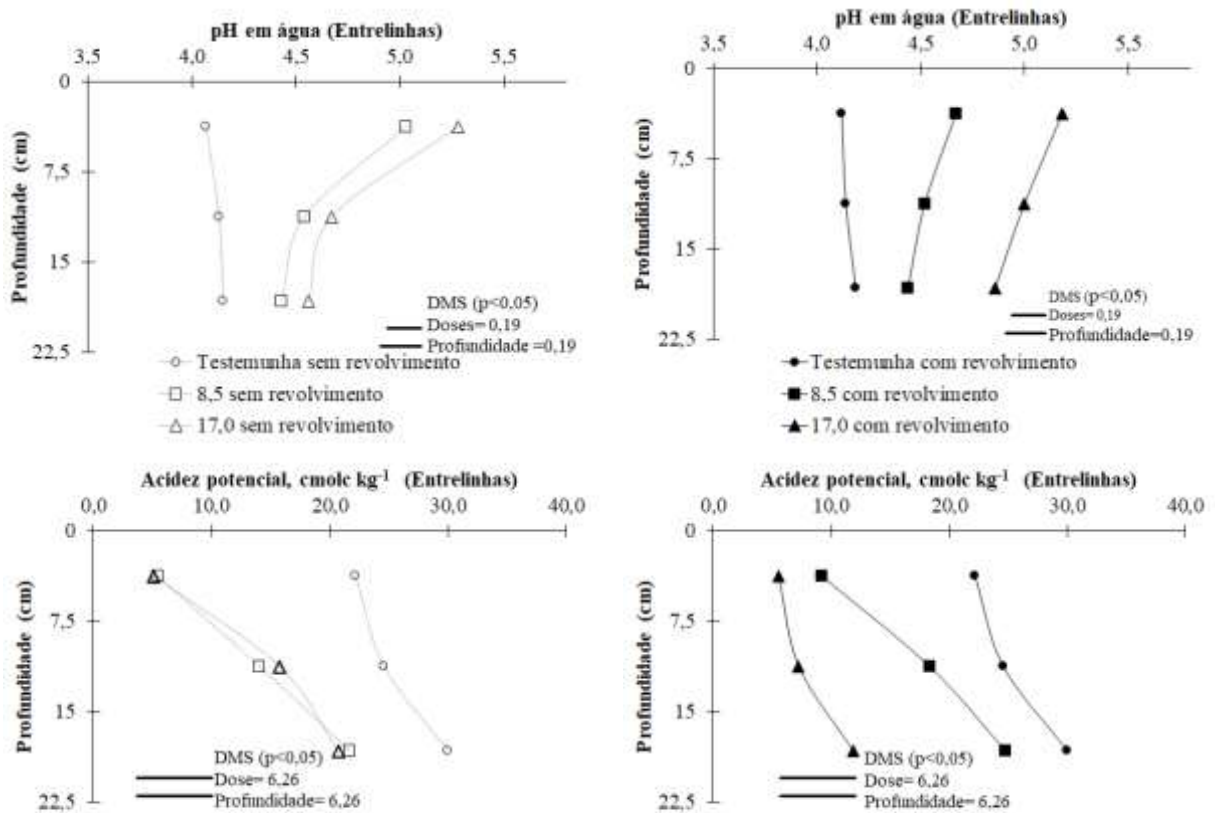
6.4 ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO

Quanto aos efeitos das doses, comparando-as no solo que foi incorporado calcário e no solo que foi aplicado superficialmente, constata-se que o pH apresentou o efeito crescente conforme o aumento das doses. Como era o esperado, a dose mais alta de calcário reduziu a acidez do solo nos dois modos de aplicação, aumentando o pH em água e reduzindo a acidez potencial (H+Al) (Figura 15).

Os tratamentos que receberam a aplicação superficial na instalação do experimento apresentaram maior pH do solo na camada superficial (0-7,5 cm) em relação ao que foi incorporado no início do sistema; no entanto, também apresentaram maior contraste em relação às subcamadas nas duas doses.

Quando foi incorporado o calcário no início do sistema conservacionista ocorreu diferença significativa para o pH e H+Al entre as doses (0, 8,5 e 17 t ha⁻¹) em todas as profundidades, conferindo maior homogeneidade e maior efeito do corretivo em profundidade. Já na aplicação superficial, as doses de 8,5 t ha⁻¹ e 17 t ha⁻¹ não apresentaram diferença significativa em subsuperfície (7,5-15 e 15-22,5 cm) para a acidez ativa e acidez potencial. Para o alumínio trocável quando aplicado o calcário superficial tanto na dose de 8,5 e 17 t ha⁻¹ o alumínio trocável praticamente zerou na camada superficial, no entanto a neutralização em subsuperfície foi menor, devido a sua baixa solubilidade do material e lenta descida no perfil.

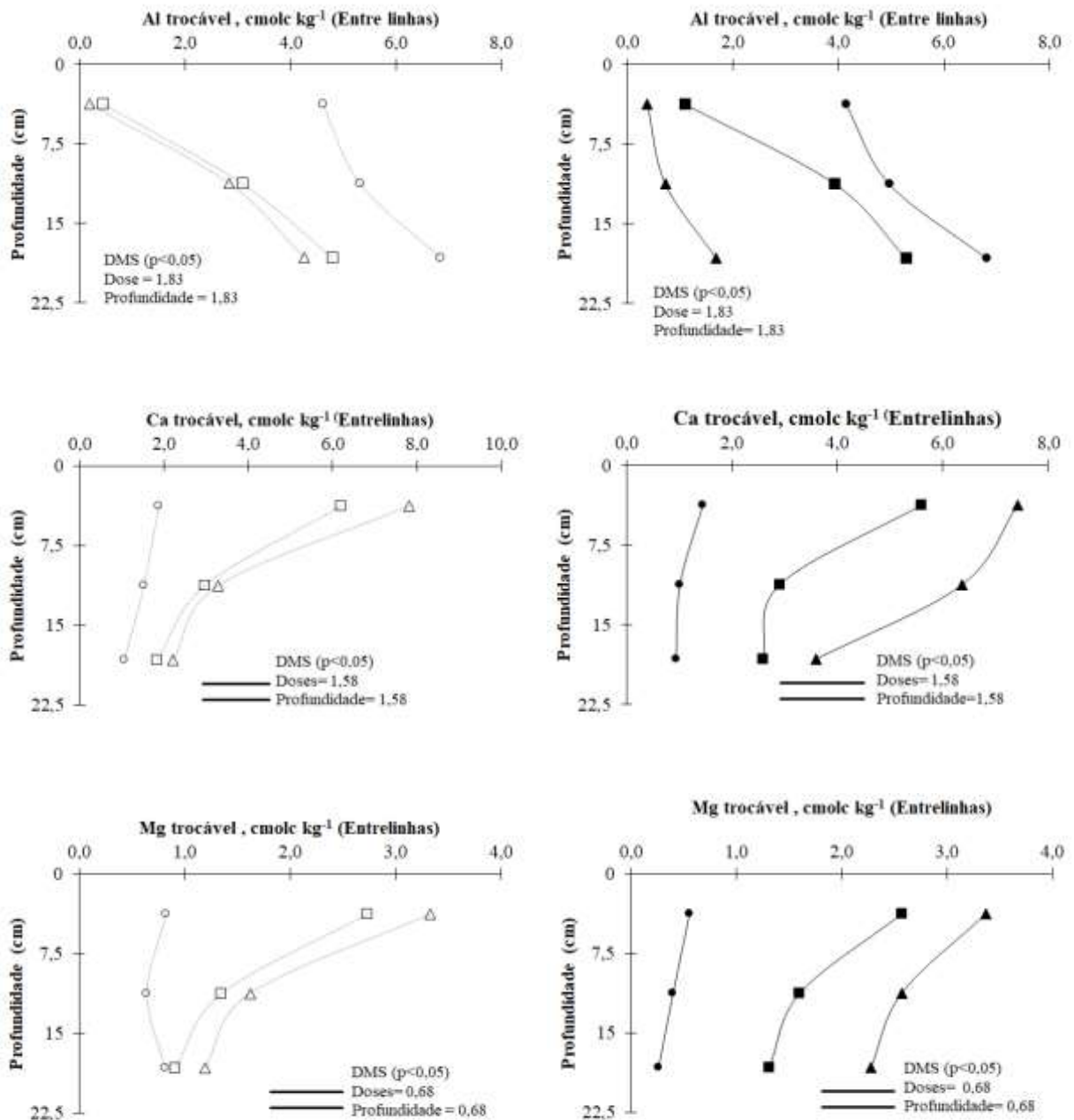
Figura 9- pH em água e acidez potencial (cmolc kg⁻¹) das doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja dentro de cada modo de aplicação e em diferentes profundidade



Fonte: A Autora.

Os resultados de Ca e Mg foram similares, sendo diretamente proporcional à quantidade de calcário aplicada. As doses no modo com aplicação em superfície apresentaram maiores valores de cálcio e magnésio na camada de 0-7,5 cm; no entanto, ocorreu uma redução em subsuperfície (7,5-15 cm), sendo que na dose de 8,5 t ha⁻¹ reduziu 52% para Ca e 50% para Mg e na dose de 17 t ha⁻¹ teve uma redução de 58% e 51% para Ca e Mg, respectivamente (Figura 16). Para a o modo de aplicação incorporado, a dose de 8,5 t ha⁻¹ apresentou 1,09 cmolc kg⁻¹ de alumínio trocável na camada superficial aumentando o teor em profundidade (Figura 19), enquanto que a dose 17 t ha⁻¹ apresentou 0,37 cmolc kg⁻¹ de alumínio trocável, valor considerado não tóxico às plantas de acordo com Malavolta (1980).

Figura 10- Alumínio, cálcio e magnésio trocável das doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja em cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.

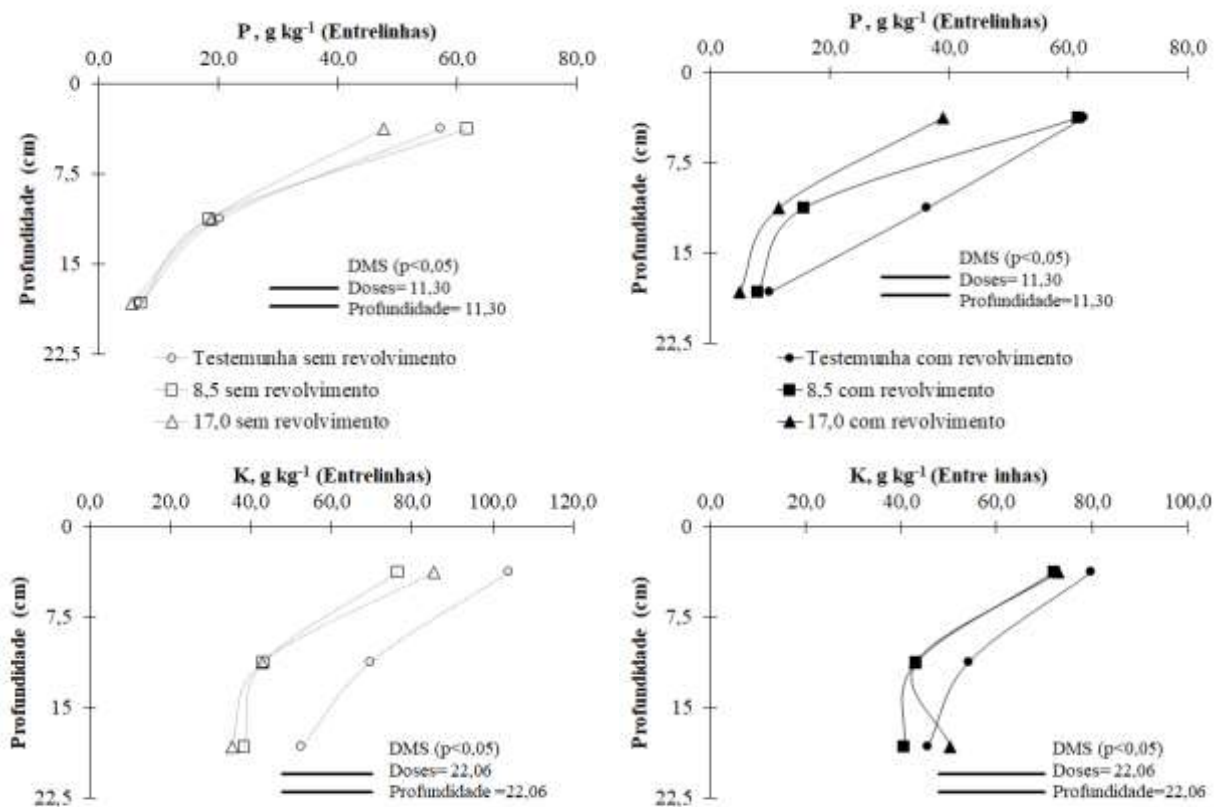


Fonte: A Autora.

A aplicação de calcário não gerou impacto nos teores de fósforo e potássio, inibindo diferença para doses e modo de aplicação do calcário no início do SPD. A fertilização no experimento desses elementos sempre ocorreu com a incorporação na linha de semeadura, o que colaborou para o aprofundamento dos elementos no perfil do solo. Assim, como era esperado, tem-se diferença significativa dos elementos P e K entre as camadas analisadas,

sendo que na primeira camada (0-7,5 cm) os valores são considerados altos segundo o manual de CQFS, RS/SC (2016). Os valores variaram de aproximadamente 50, 20 e 5 g kg⁻¹ de fósforo e 80, 50 e 40 g kg⁻¹ de potássio para as profundidades de 0-7,5, 7,5-15 e 15-22,5 cm, respectivamente (Figura 17).

Figura 11- Fósforo e potássio nas doses de calcário de um solo coletado na entrelinhas após a colheita da soja em dentro de cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.



Fonte: A Autora.

6.5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DA SOJA EM FUNÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO E MODO DE APLICAÇÃO

Quanto ao comprimento radicular e a área superficial da raiz, constata-se que ocorreu diferença significativa em profundidade, tanto para coleta na linha como na entrelinha nos dois sistemas de manejo. Para o tratamento sem calcário, nos dois sistemas de manejo ocorreu diferença significativa entre as camadas, sendo que a camada de 0-7,5 cm foi onde se

concentrou o maior número de raízes. Na dose 17 t ha^{-1} com a incorporação do calcário houve maior homogeneidade entre as camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm em que não apresentou diferença significativa (Tabela 5). A maior atividade radicular disposta neste local pode estar relacionada às condições hídricas ideais para período de desenvolvimento da cultura, até o início do estágio reprodutivo que foi coletado as raízes, ligado ao fato que essa posição recebe a deposição de fertilizantes (BARRIOS et al., 2006),

Para as variáveis de comprimento radicular e área superficial ocorreu diferença significativa para doses de calcário na camada de 0-7,5 cm para os dois modos de aplicação de calcário (incorporado e superficial), sendo que, quanto maior a dose de calcário, as variáveis analisadas apresentaram os menores valores de comprimento radicular e área superficial, demonstrando que a não aplicação de calcário apresentou melhor resposta. No entanto, as variáveis da química do solo mostraram melhorias na fertilidade do solo com a calagem e diminuição da saturação por alumínio (Tabela 3). Com esses resultados podem evidenciar que a cultivar de soja usada apresenta resistência a solos ácidos em sistema plantio direto em condições hídricas adequadas.

A falta de resposta da calagem na cultura da soja pode ser justificado pela formação de complexos Al-orgânicos que resultaram na diminuição da toxicidade do alumínio nas raízes (CAIRES et al. 2008). O manejo adequado do sistema conservacionista auxilia no acúmulo de carbono orgânico no solo, que desempenha o aumento na disponibilidade de nutrientes e a redução da toxicidade de Al^{+3} trocável, até mesmo em solos ácidos (RHEINHEMER et al., 2018b).

O crescimento radicular no tratamento testemunha na cultura da soja pode ter sido estimulado pelo estresse de acidez do solo. Conforme Kochian et al. (2015) sobre o stress do alumínio, a exsudação das raízes para a rizosfera de ácidos orgânicos, por exemplo, malato, citrato e oxalato, é um fator de importância para a resistência das plantas, esses ácidos conseguem fazer a quelatação com as moléculas de Al^{+3} , convertendo o alumínio tóxico por moléculas não tóxicas.

Em particular da cultura da soja, decorre que o ácido orgânico que confere melhor resistência à toxicidade de alumínio é o citrato. Assim pode ocorrer o acúmulo de células na coifa da raiz, resultante da secreção de mucilagem, onde esse material irá se ligar com o alumínio, proporcionando maior proteção, impedindo a absorção do alumínio pelas plantas (CAI et al. 2011).

No diâmetro médio das raízes de soja não houve diferença entre os tratamentos e a profundidade. Já o volume radicular apresentou diferença em profundidade, em que a camada

de 0 - 7,5 foi a que apresentou maior volume de raiz. A não diferença significativa entre os tratamentos para as variáveis do sistema radicular deve-se às condições climáticas e hídricas ideais no período de germinação até início do enchimento de grão facilitando o desenvolvimento radicular, ainda por ser variáveis que apresentam alto coeficiente de variação.

Tabela 3 - Comprimento radicular, área superficial, diâmetro médio e volume radicular da cultura da soja coletado na linha e na entre linhas em diferentes doses e profundidades com e sem revolvimento.

(Continua)

Doses de calcário (t ha ⁻¹)	0,0	8,5	17	0	8,5	17
	Entre linhas			Linha		
Modo de Aplicação	Comprimento radicular (cm cm ⁻³)					
	0-7,5 cm					
Superficial	7,53 Aa*	4,94 Ab	6,15 Aab	8,14 Aa	5,78 Aab	5,32 Ab
Incorporado	8,18 Aa	5,27 Aab	4,49 Ab	7,42 Aa	4,62 Ab	6,10 Aab
	7,5-15 cm					
Superficial	2,53 Ba	2,02 Ba	2,00 Ba	3,18 Ba	2,92 Aba	4,44 Aba
Incorporado	5,26 Ba	1,82 Ba	1,53 Aa	4,21 Ba	1,99 Aa	3,80 Aba
	15-22,5 cm					
Superficial	1,54 Ba	1,44 Ba	1,22 Ba	1,59 Ba	2,37 Ba	1,72 Ba
Incorporado	1,30 Ba	1,40 Ba	1,36 Ba	2,51 Ba	1,96 Aa	1,66 Ba
CV%	48,9			38,4		
	Área superficial (cm² cm⁻³)					
	0-7,5 cm					
Superficial	1,02 Aa	0,70 Aa	0,79 Aa	1,21 Aa	0,89 Aab	0,82 Ab
Incorporado	1,08 Aa	0,68 Ab	0,61 Ab	1,09 Aa	0,74 Aa	0,91 Aa
	7,5-15 cm					
Superficial	0,37 Ba	0,30 Ba	0,29 Ba	0,48 Ba	0,44 Ba	0,65 Aba
Incorporado	0,37 Ba	0,27 Ba	0,21 Aa	0,63 Ba	0,30 Ba	0,53 Aa
	15-22,5 cm					
Superficial	0,21 Ba	0,21 Ba	0,17 B	0,24 Ba	0,35 Ba	0,26 Ba
Incorporado	0,18 Ba	0,20 Ba	0,19 B	0,35 Ba	0,27 Ba	0,23 Ba
CV%	43,6			34,8		
	Diâmetro médio (mm)					
	0-7,5 cm					
Superficial	0,440	0,459	0,432	0,481	0,494	0,536
Incorporado	0,427	0,416	0,448	0,474	0,519	0,476
	7,5-15 cm					
Superficial	0,469	0,471	0,474	0,481	0,486	0,489
Incorporado	0,455	0,470	0,459	0,477	0,480	0,462
	15-22,5 cm					
Superficial	0,446	0,462	0,456	0,476	0,494	0,479
Incorporado	0,452	0,456	0,448	0,452	0,467	0,448

(Conclusão)						
CV%	7,15			5,00		
Volume radicular (mm³ cm⁻³)						
0-7,5 cm						
Superficial	11,37Aa	9,21Aab	7,5 Ab	16,86 Aa	14,01 Aa	12,76 Aa
Incorporado	12,75Aa	9,01Aab	7,01 Ab	14,72 Aa	12,47 Aa	13,56 Aa
7,5-15 cm						
Superficial	5,73 Ba	4,70 Ba	3,19 ABa	5,89 Ba	5,55 Ba	7,71 Aba
Incorporado	3,59 Ba	2,77 Ba	1,87 Ba	7,60 Ba	3,71 Ba	6,12 Ba
15-22,5 cm						
Superficial	2,71 Ba	2,99 Ba	2,01 Ba	2,93 Ba	4,19 Aa	3,2 Ba
Incorporado	2,11 Ba	2,23 Ba	1,47 Ba	4,11 Ba	3,18 Ba	2,57 Ba
CV%	41,23			33,23		

* (p<0,10). Letras maiúsculas nas colunas dentro de cada modo de aplicação comparam a profundidade dentro de cada dose. Letras minúsculas nas linhas dentro de cada modo de aplicação comparam as doses de calagem.

6.6 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE CALCÁRIO E MODO DE APLICAÇÃO

Os dados de produtividade de grãos de soja da safra de 2019/2020 e de produtividade da massa seca da parte aérea das plantas de cobertura dos anos de 2019 e 2020 são apresentados na figura 21. A soja cultivada nas parcelas cuja acidez do solo foi alterada pela aplicação de corretivo da acidez produziu mais grãos do que quando cultivada em solo com acidez natural. No entanto, não se observou diferenças na produtividade da soja em relação a forma de aplicação do corretivo da acidez. As produtividades da soja nos tratamentos em que solo foi revolvido uma única vez há 25 anos atrás foram de 2,6; 3,00 e 2,8 t ha⁻¹ nos tratamentos 0, 8,5 e 17,0 tha⁻¹, respectivamente. Similarmente, nos tratamentos sem revolvimento único do solo, as produtividades foram de 2,5; 2,8 e 2,8 t ha⁻¹ para as respectivas doses de corretivo.

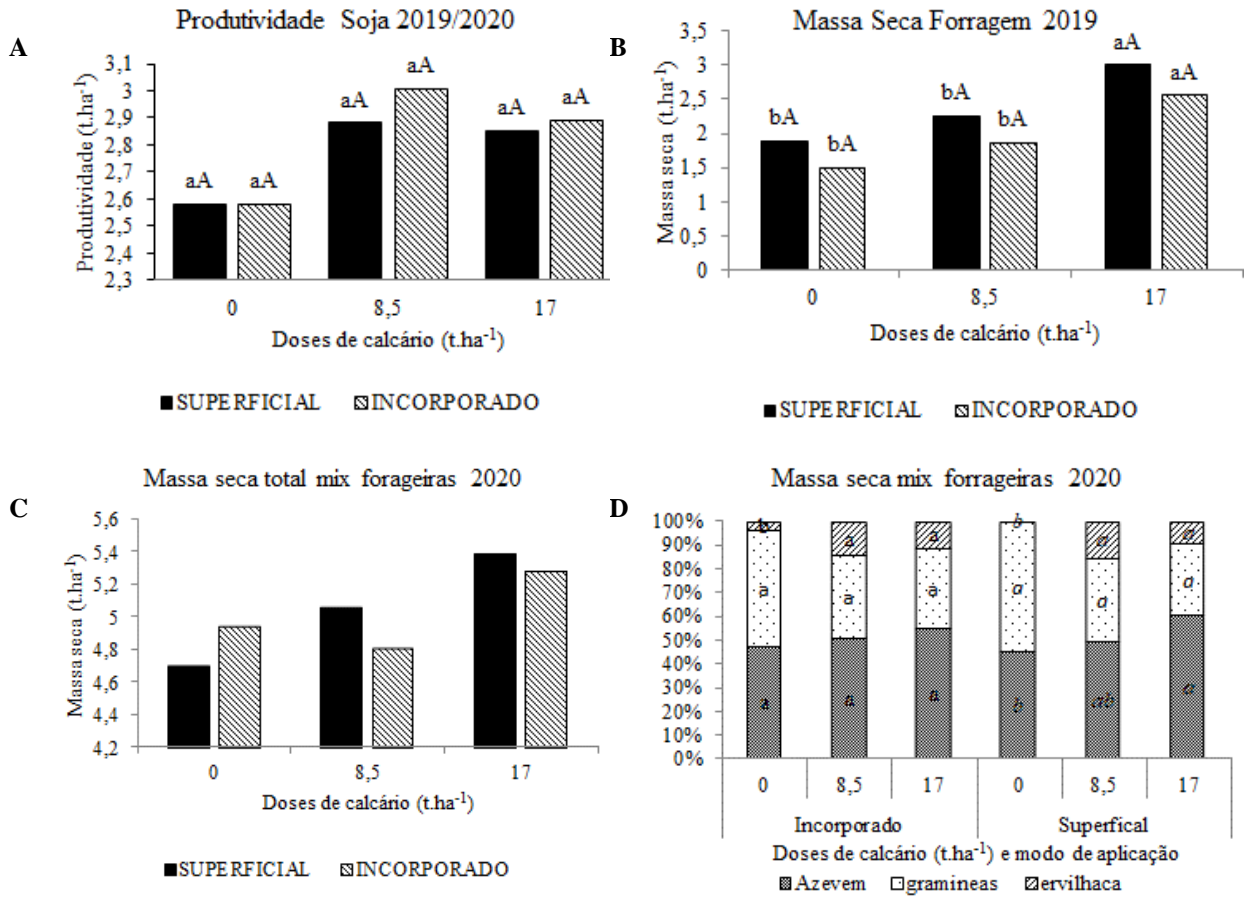
As condições climáticas e hídricas ótimas no período de germinação, desenvolvimento até o enchimento de grãos, foram fundamentais para o desenvolvimento da cultura, expressando o máximo do potencial produtivo mesmo em ambientes com restrições químicas de alta saturação de alumínio, não causando uma diferença significativa na cultura. No entanto, a baixa produtividade da soja nesta safra se deve às severas restrições hídricas ocorridas no final do ciclo, em que forçou, inclusive, a senescência da cultura, causando perda na produtividade.

Caires et al., (2008) utilizando formas de perfis de acidez do solo encontrou elevadas produções de soja no tratamento controle quando não ocorreu restrições hídricas durante o

desenvolvimento da cultura, não sendo correlacionado a produção da soja com o crescimento da raiz. Costa e Crusciol (2016) utilizando calcário e gesso apesar de encontrar diferença na química do solo entre os tratamentos, especialmente para o alumínio e cálcio trocável, nas camadas superficiais e subsuperficiais não encontrou diferença para crescimento e diâmetro radicular, ainda observou que as cultivares de soja cultivadas em anos diferentes apresentaram descrição semelhantes, porém tiveram reações variáveis às propriedades químicas dos solos ácidos.

A massa seca do azevém cultivado no inverno de 2019 não foi afetada com o modo de aplicação do calcário no início do SPD. Para doses, quando o solo foi cultivado com a dose total, a cultura expressou a máxima produtividade com a maior produção de massa seca (Figura 21). A produção de massa seca do mix de plantas de cobertura de inverno de 2020 não apresentou diferença estatisticamente para modo de aplicação e doses de calcário (Figura 21). No entanto, ocorreu diferença dentro de cada cultura do mix. As gramíneas (aveia preta, aveia branca e centeio) apresentaram maior resistência a solos ácidos, em que foi encontrado em maior quantidade nos tratamentos sem adição de calcário. Em contrapartida, a ervilhaca se mostrou sensível à acidez do solo, a parcela testemunha apresentou menor produtividade que o solo em que foi aplicado calcário. O solo corrigido com a dose parcial e total de calcário apresentou maior porcentagem na massa total de azevém e teve grande expressão na cultura da ervilhaca.

Figura 12– Produtividade da cultura da soja 2019/2020, massa seca de forrageira 2019 e massa seca total do mix (aveia preta, aveia branca, centeio, ervilhaca comum) 2020 em função das doses de calcário e modo de aplicação.



Fonte: A Autora.

7. CONCLUSÃO

Após 25 anos da aplicação da primeira aplicação calcário, superficial e incorporado, ainda persistem os efeitos da acidez ativa e na acidez potencial, permanecendo um gradiente de alcalinização a partir da profundidade que foi aplicado o calcário.

Com a reaplicação do calcário aumentou a concentração de cálcio e magnésio e diminuiu o Al^{3+} nas camadas mais superficiais, mantendo a continuidade no restante do perfil proporcional a quantidade de calcário aplicado para neutralização da acidez potencial.

A calagem incorporada e superficial apresentou respostas inconsistentes no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja possivelmente deve que a cultivar estudada apresentou grande capacidade de tolerância a condições de saturação de alumínio do solo em condições hídricas ótimas até início do enchimento de grão.

REFERENCIAS

ALBRECHT, W. A. **Soil Fertility and animal health**. Missouri: University of Missouri, 1958. 192 p.

ALLEONI, L. RF et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, p. 1010-1017, 2010.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação. **Pesq. agropec. bras., Brasília**, v. 36, n. 4, p. 695-702, 2001.

BARRIOS, C. et al. Indicators of soil quality: A South–South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. **Geoderma**, v. 135, p. 248-259, 2006.

BOHNEN, H.; MEURER, E. J.; BISSANI, C. A. Solos Acidos e Solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000.

BORTOLANZA, ; KLEIN,. Soil Chemical and Physical Properties on an Inceptisol after Liming (Surface and Incorporated) Associated with Gypsum Application. **Revista Brasileira de Ciência do**, v. 40, 2016.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, p. 262-271, 2014.

BRANCALION, P. H. S. et al. Análise crítica da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (2012), que substituiu o antigo Código Florestal: atualizações e ações em curso. **Natureza & Conservação**, p. 1-16, 2016.

CAI, M.-Z. et al. Response and tolerance of root border cells to aluminum toxicity in. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 105, p. 966-971, 2011.

CAIRES, E. F. et al. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2008.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 89, p. 3-12, 2006.

CAIRES, E. F.; FERRARI, R. ; MORGANO, M. A. Produtividade e qualidade da soja em função da calagem na superfície em semeadura direta. **Bragantia**, v. 62, p. 283-290, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, CQFS-RS/SC. **Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre -RS: [s.n.], 1995.

CORRÊA, J.C. et al. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1583-1590, 2008.

COSTA, C. H. M.; 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.

CQFS - COMISSÃO DE QUIMÍCA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio grande do Rio grande do Sul e Santa catarina**. POрто Alegre - RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

CRAVO, Manoel da Silva; SMYTH, Thomas Jot; BRASIL, Edilson Carvalho. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-908, 2012.

CRUSCIOL, Carlos AC 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.

CRUZ, R. C.; GUADAGNIN, D. L. Uma Pequena História Ambiental do Pampa: proposta de uma abordagem baseada na relação entre perturbações e mudança. In: COSTA, B. P. D. **A sustentabilidade da Região da Campanha-RS: Práticas e teorias a respeito das relações entre ambiente, sociedade, cultura e políticas públicas**. Santa Maria: UFSM, PPG Geografia e Geociências, Dep. de Geociências, 2010. p. 155-179.

CUNHA, G. O. D. M. et al. Methods of extraction, forms and aluminum toxicity in soybean cultivated in soils with high Al-KCl. **Revista Científica**, v. 47, n. 2, p. 239-255, 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Portal Embrapa**, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/contando-ciencia/bioma-pampa>>. Acesso em: 20 Agosto 2020.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, S. M.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 825-831, 2001.

FERREIRA, D. F. **SisVar (software Estatístico)**: Sistema de análise de variancia para dados balanceados, versão 5.6. Lavras: Dex/Ufla, 2021.

GATIBONI, L. C. et al. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 283-290, 2003.

GENRO, R. D. D. Planícies recheadas de biodiversidade. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 2, p. 11-12, 2014.

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, p. 409-424, 2013.

KAMINSKI, J. Fatores de Acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul. **Dissertação de mestrado em Agronomia - Univerdade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1974.

KAMINSKI, J. et al. Resposta de culturas à aplicação de calcário em superfície ou incorporado ao solo em campo nativo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 4, p. 605-609, 2000.

KAMINSKI, J. et al. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no calculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira Cencia do Solo**, v. 26, p. 1107-1113, 2002.

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, 2005.

KAMINSKI, J. et al. Acidez e calagem no sul do brasil: aspectos históricos e perspectivas. In: _____ **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, 2007. p. 307-332.

KOCHIAN, L. V. et al. Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. **Review in Advance**, v. 11, n. 1, p. 23.1-23.28, 2015.

KÖNIG, F. et al. Bioma Pampa: Interações entre micro-organismos. **Sociedade de Ciências Agrarias de Portugal**, v. 37, n. 1, p. 3-9, 2013.

KUPLICH, T. M.; CAPOANE, V.; COSTA, L. F. F. O Avanço da Soja no Bioma Pampa. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 31, p. 83-100, 2018.

LOPES, A. S.; SILVA, M. D. C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do Solo e Calagem**. Associação Nacional para Difusão de Adubos. São Paulo, p. 22. 1990.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

MAPBIOMAS. Plataforma Brasil Mapbiomas. **Mapbiomas**, 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 11 maio 2021.

MARCOLAN , A.. Atributos físicos e químicos de um argissolo e rendimento de culturas em função do seu revolvimento na reaplicação de calcário no sistema plantio direto, **Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre (RS), 2002.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. Monitoramento do Bioma Pampa, 2020.

MIOTTO, A. et al. Soil acidity and aluminum speciation affected by liming in the conversion of a natural pasture from the Brazilian Campos Biome into no-tillage system for grain production. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 2, p. 138-151, 2019.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de Material Vegetal na Acidez do Solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 17, p. 411-416, 1993.

MOHR, M. Influência da acidez sobre a fertilidade dos solos. s.n.t. (Trabalho apresentado no I Congresso Nacional de Conservação dos Solos, Campinas, 1960), p. 25, 1960.

MORREIRA, 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. **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, p. 71-81, 2001.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

ODERICH, E. H.; WAQUIL, P. D. Municípios dependentes da soja no rio grande do sul: aspectos demográficos e socioeconômicos. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 33, p. 107-112, 2019.

OLIVEIRA, D. M. S.; LIMA, R. P.; VERBURG, E. E. J. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquido suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Capina Grande, v. 19, n. 3, p. 280-285, 2015.

OVERBECK, G. E. et al. Os Campos Sulinos: um bioma negligenciado. In: PILLAR, V. D. P. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 403.

PESSONI, P.. Calagem e gessagem na produtividade da soja e do triticale. **Dissertação Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Gestão de Recursos Agroambientais**, 2012.

PIZZATO, F. Pampa Gaúcho: causas e consequências do expressivo aumento das áreas de soja. **Dissertação (mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Geografia**, Porto Alegre, 2013. 105.

PRADO, R. D. M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 10, p. 1007-1012, 2004.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1991. 343 p.

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, p. 797-805, 2000.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a longterm experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018 A.

RHEINHEIMER, D. 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 & Tillage Research**, v. 180, p. 222-231, 2018 B.

- ROS, A. B.; HIRATA, A. C. S. Soil physical properties and cassava yield under different soil cover managements. **Científica**, v. 47, n. 4, p. 411-418, 2019.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PEAT, P. F. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. **SOIL SCIENCE SOCIETY PROCEEDINGS**, v. 25, p. 274-277, 1961.
- SIKORA, F. J. A Buffer that Mimics the SMP Buffer for Determining Lime Requirement of Soil. **Soil Sci. Soc. Am**, v. 70, p. 474-486, 2006.
- SOUSA, G. M.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 205-274, 2007.
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. ; OLIVEIRA, S. A. Acidez do Solo e sua Correção. In: NOVAES, R. , et al. **Fertilidade do Solo**. 1. ed. Minas Gerais: SBSC, 2007. p. 205-279.
- STEIGLEDER, A. M. A proteção jurídica do Bioma Pampa. In: TEIXEIRA FILHO, A.; WINCKLER, L. T. **Anais do I Congresso sobre o Bioma Pampa**. Pelotas: Editora UFPel, 2020. p. 177-196.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de Solos, Plantas e Outros Materiais**. 2 ed. rev. e ampl. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995.
- 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 & Tillage Research**, v. 155, p. 437-447, 2016.
- TOLEDO, D. A. et al. Tampão Santa Maria (TSM) como alternativa ao tampão SMP para medição da acidez potencial de solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 427-435, 2012.
- VAN RAIJ, B. et al. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. **Bragantia**, v. 42, p. 150-155, 1983.
- VARGAS, J. P. R. et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil & Tillage Research**, v. 185, p. 47-60, 2019.
- WEIRICH NETO, P. H. et al. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 257-261, 2000.
- WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.
- YANG, Zhong-Bao; RAO, Idupulapati Madhusudana; HORST, Walter Johannes. Interaction of aluminium and drought stress on root growth and crop yield on acid soils. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1, p. 3-25, 2013.

APÊNDICES

Apêndice A – Efeitos significativos dos fatores experimentais e suas interações nos atributos relacionados à química do solo e desenvolvimento do sistema radicular coletado na linha da cultura da soja. Resultado da análise de variância ANOVA

Variável	Modo de aplicação (M)	Doses de corretivo (D)	Profundidade (P)	M*D	M*P	D*P	M*D*P
Variáveis da química do solo							
Sat. Bases	NS	**	**	NS	**	**	**
Sat. Alumínio	NS	**	**	**	**	**	**
Acidez potencial	NS	**	**	NS	NS	*	**
pH	NS	**	**	NS	**	**	NS
Cálcio	NS	**	**	*	**	**	NS
Magnésio	NS	**	**	NS	**	**	NS
Alumínio	NS	**	**	NS	**	**	NS
Fósforo	NS	NS	**	NS	NS	NS	*
Potássio	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
Variáveis do sistema radicular da soja							
Comp. Radicular	NS	NS	**	NS	*	*	*
Área superficial	NS	NS	**	NS	*	*	*
Diâmetro médio	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
Volume radicular	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS

NS – Não significativo á 5% e 10% de probabilidade

* Significativo á 10% de probabilidade

** significativo á 5% de probabilidade

Apêndice B - Efeitos significativos dos fatores experimentais e suas interações nos atributos relacionados à química do solo e desenvolvimento do sistema radicular coletado na entrelinha da cultura da soja. Resultado da análise de variância ANOVA

Variável	Modo de aplicação (M)	Doses de corretivo (D)	Profundidade (P)	M*D	M*P	D*P	M*D*P
Variáveis da química do solo							
Sat. Bases	NS	**	**	NS	**	**	**
Sat. Alumínio	NS	**	**	**	**	**	**
Acidez potencial	NS	**	**	NS	NS	*	NS
pH	NS	**	**	NS	**	**	NS
Cálcio	NS	**	**	*	**	**	*
Magnésio	NS	**	**	NS	**	**	NS
Alumínio	NS	**	**	NS	NS	*	NS
Fósforo	NS	**	**	NS	NS	NS	*
Potássio	NS	**	**	NS	NS	NS	NS
Variáveis do sistema radicular da soja							
Comp. radicular	NS	NS	**	NS	*	*	*
Área superficial	NS	NS	**	NS	*	*	*
Diâmetro médio	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
Volume radicular	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS

NS – Não significativo á 5% e 10% de probabilidade

* Significativo á 10% de probabilidade

** significativo á 5% de probabilidade

Apêndice C - Disposição dos tratamentos na área experimental, com faixas no modo de aplicação e aplicação de calcário em 1994 e 2016.

EXPERIMENTO EDILCEU

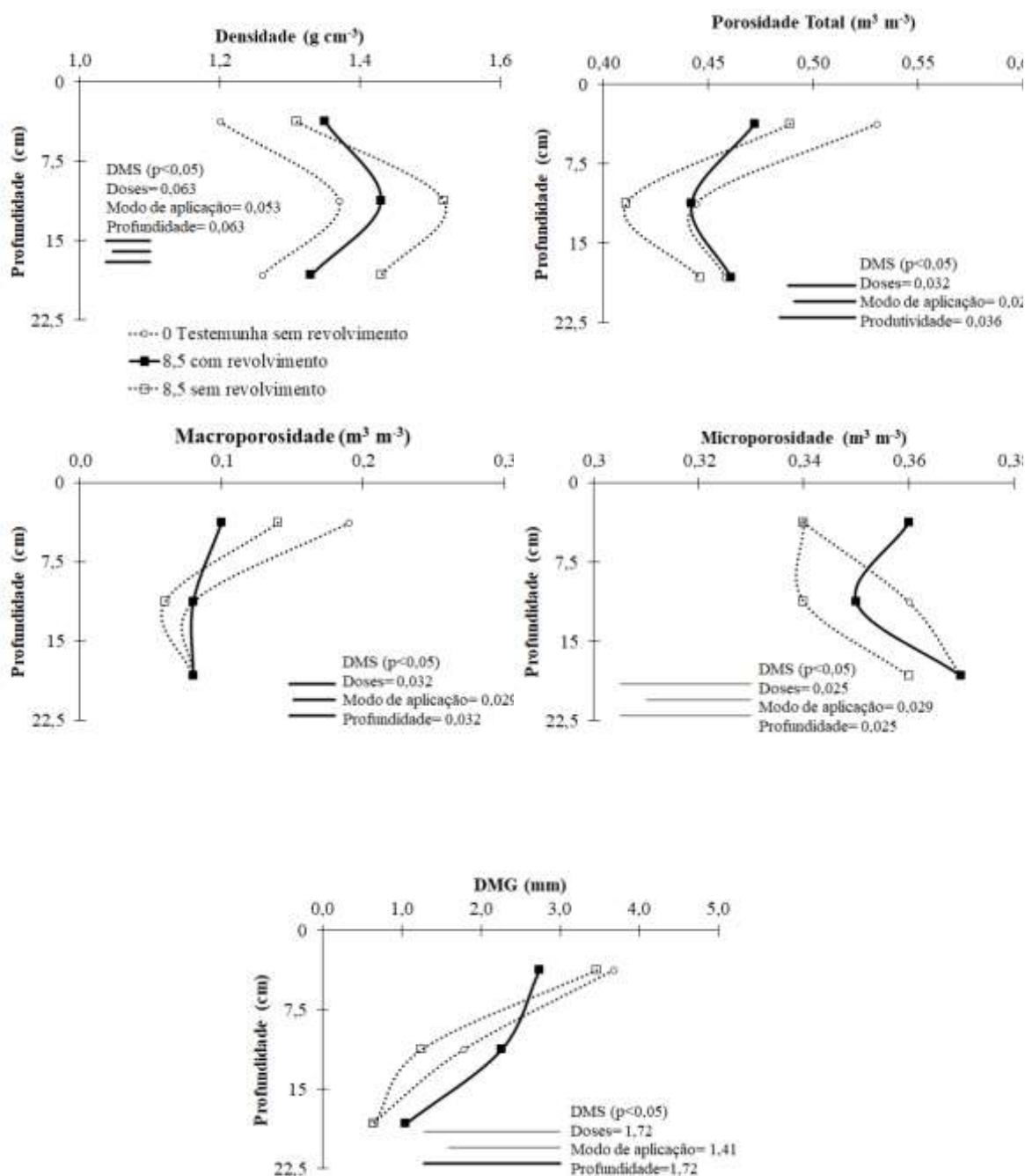
→ NORTE

				12			
∅	1	8,5	2	2+2+2+2 TO	3	17	4
		DIRE					} 6
∅	5	8,5	6	2+2+2+2 CIONAL	7	17	
		CONVEN					
2+2+2+2	9	17	10	8,5 CIONAL	11	∅	12
		CONVEN					
2+2+2+2	13	17	14	8,5 TO	15	∅	16
		DIRE					
8,5	17	2+2+2+2	18	∅ TO	19	17	20
		DIRE					
8,5	21	2+2+2+2	22	∅ CIONAL	23	17	24
		CONVEN					
17	25	8,5	26	2+2+2+2 CIONAL	27	∅	28
		CONVEN					
17	29	8,5	30	2+2+2+2 TO	31	∅	32
		DIRE					

↓
Parcelas perdidas

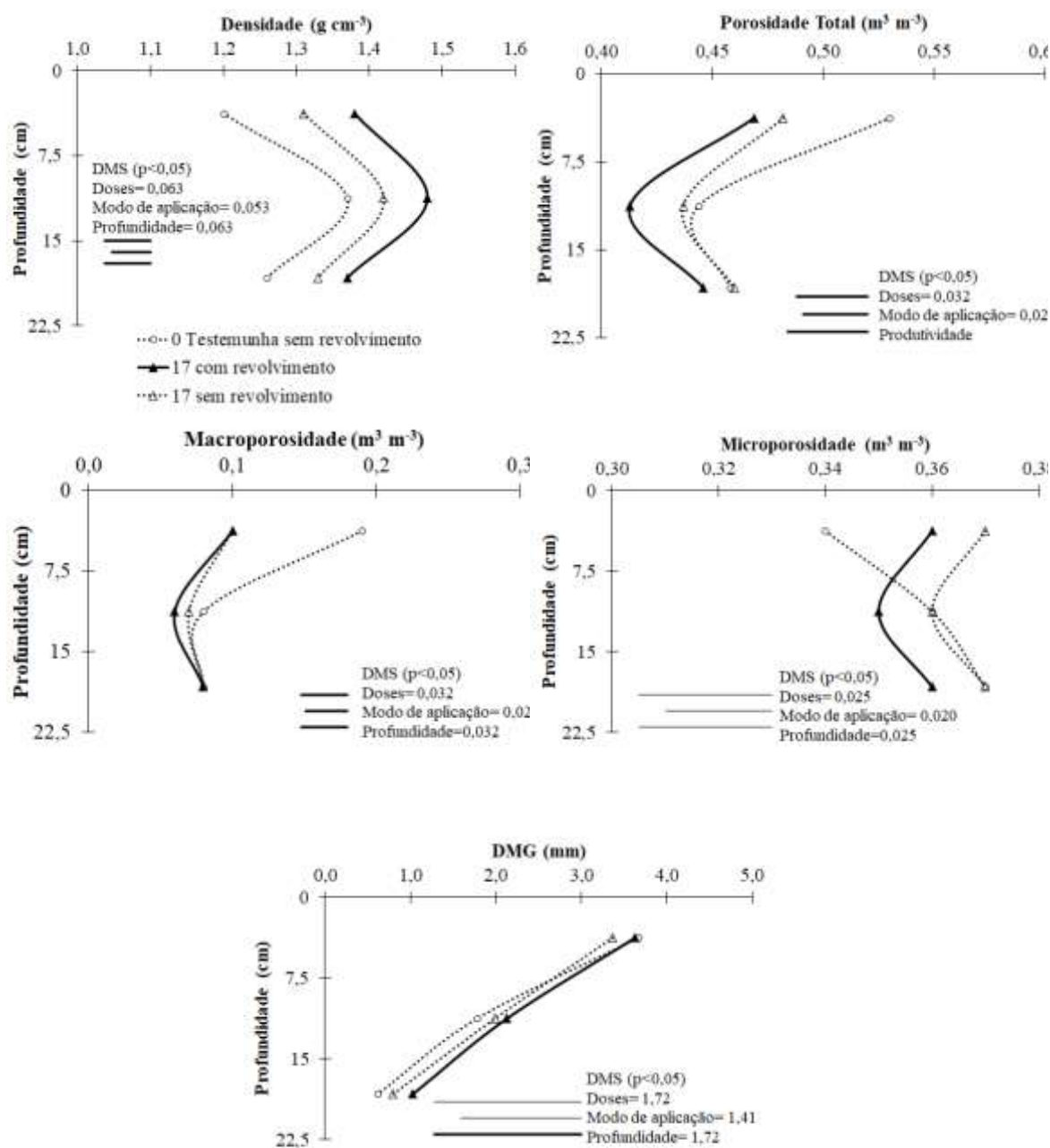
Várzea

Apêndice D - Porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e diâmetro médio geométrico (DMG) em diferentes profundidades após a colheita da soja com e sem revolvimento equivalente a metade da dose recomendada pela CQFS - RS/SC.



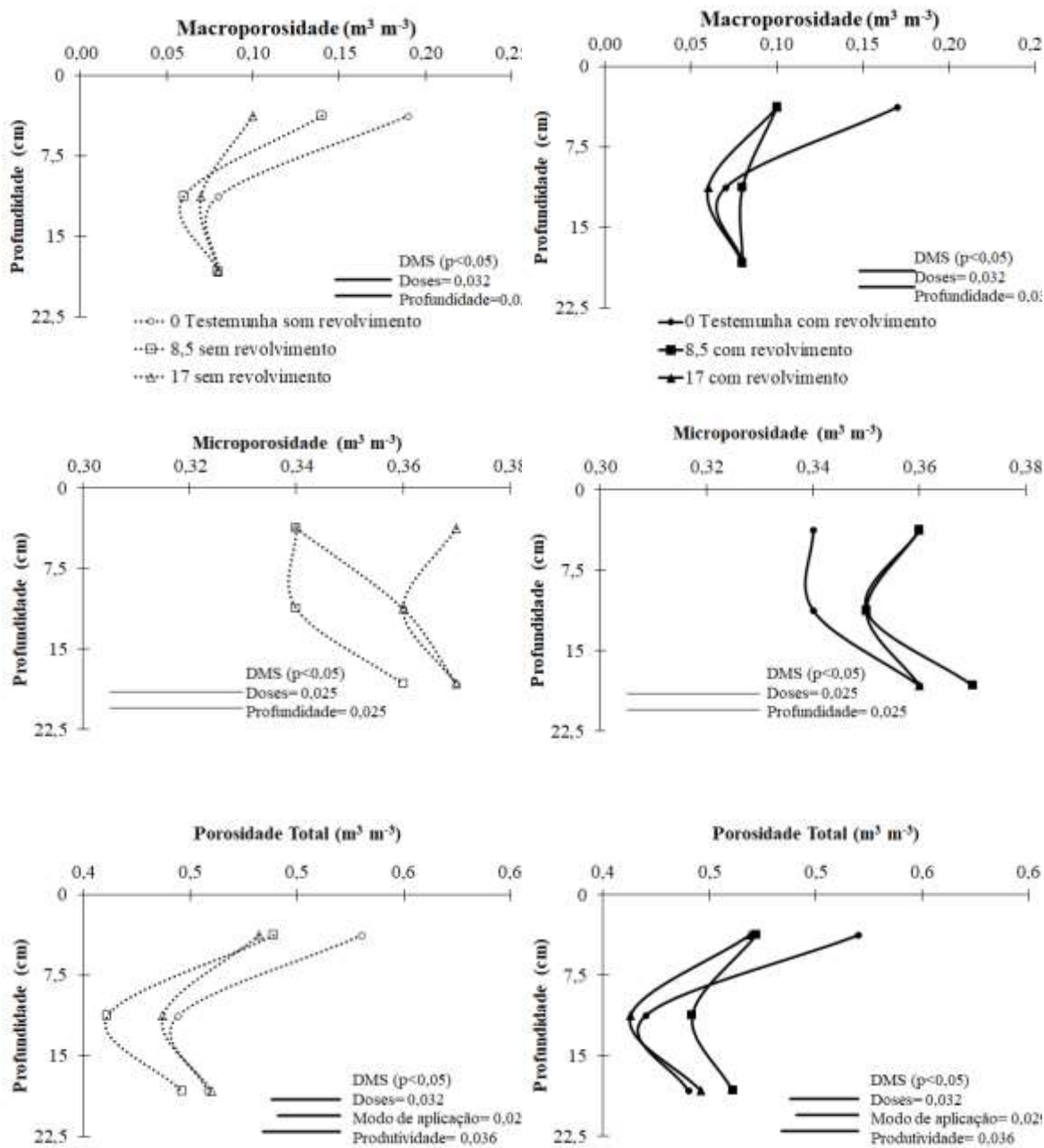
Fonte: A Autora.

Apêndice E - Porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e diâmetro médio geométrico (DMG) de um solo coletado após a colheita da soja em diferentes doses e profundidades com e sem revolvimento equivalente a dose recomendada pela CQFS - RS/SC.



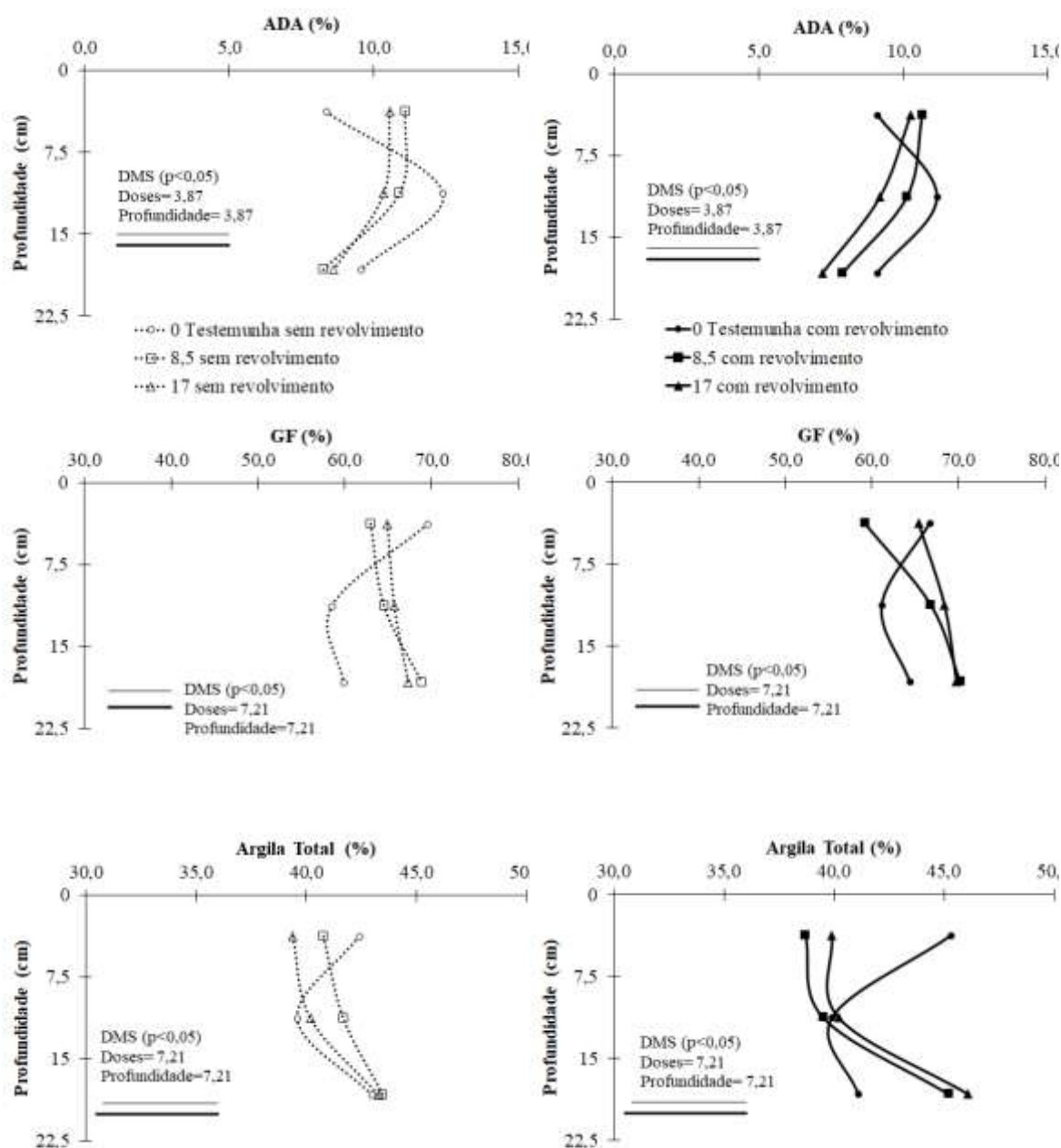
Fonte: A Autora.

Apêndice F - Macroporosidade e microporosidade das doses de calcário de um solo coletado na entre linhas após a colheita da soja em cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.



Fonte: A Autora.

Apêndice G - Argila dispersa em água (ADA) e grau de flocculação (GF) das diferentes doses de calcário de um solo coletado na entre linhas após a colheita da soja em cada modo de aplicação e em diferentes profundidades.



Fonte: A Autora.