

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ESTRATÉGIAS DE CALAGEM E FERTILIZAÇÃO COM FÓSFORO E  
POTÁSSIO: EFEITO NA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ E  
NUTRIENTES NO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

**Kayn Bastiani**  
**(Dissertação de Mestrado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ESTRATÉGIAS DE CALAGEM E FERTILIZAÇÃO COM FÓSFORO E  
POTÁSSIO: EFEITO NA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ E  
NUTRIENTES NO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

KAYN BASTIANI  
Engenheiro-Agrônomo (IFPR)

Dissertação apresentada como um  
dos requisitos à obtenção do Grau  
de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Março de 2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Bastiani, Kayn  
ESTRATÉGIAS DE CALAGEM E FERTILIZAÇÃO COM FÓSFORO E  
POTÁSSIO: EFEITO NA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ E  
NUTRIENTES NO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS / Kayn  
Bastiani. -- 2024.

90 f.

Orientador: Alberto Vasconcellos Inda Júnior.

Coorientador: Jessé Rodrigo Fink.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2024.

1. Correção do solo. 2. Adubação fosfatada. 3.  
Adubação potássica. I. Inda Júnior, Alberto  
Vasconcellos, orient. II. Fink, Jessé Rodrigo,  
coorient. III. Título.

KAYN BASTIANI  
Engenheiro-Agrônomo (IFPR)

## **DISSERTAÇÃO**

submetida como parte dos requisitos

para a obtenção do Grau de

### **MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
Por

ALBERTO VASCONCELLOS INDA  
Orientador-Departamento de  
Solos/UFRGS

JESSÉ RODRIGO FINK  
Co-Orientador – Agronomia/IFPR

TALES TIECHER  
Departamento de Solos/UFRGS

TALES TIECHER  
Coordenador do Programa de Pós-  
graduação em Ciência do Solo

DJALMA EUGÊNIO SCHIMITT  
Centro de Ciências Rurais/UFSC

ANTONIO RAFAEL SÁNCHEZ  
RODRÍGUEZ  
Departamento de Agronomia/  
Universidade de Córdoba

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade de Agronomia

*“A vida não passa de uma piada mal contada. A  
humanidade toda é ridícula. Somos todos completos  
insignificantes. Nosso futuro é a morte, o esquecimento, a  
escuridão e o fim.”*  
*Kayn Bastiani*

*Dedico aos homens mais raros.  
Talvez nenhum deles sequer esteja  
vivo.*

## AGRADECIMENTOS

A meus pais Eliete Souza e Alessandro Figueiró e a minha irmã Kayane Figueiró. Suas palavras de estímulo foram uma fonte vital de motivação, e agradeço por compartilharem comigo essa jornada.

À minha namorada Leticia Grunitzki Deitos, por todo o companheirismo, amizade, amor, compreensão e incentivo, estando sempre ao meu lado me ajudando e apoiando. Você é a luz que ilumina meu caminho.

Aos meus orientadores, Alberto Inda e Jessé Fink, por todo o ensinamento em ciências do solo, suas orientações sábias, pela amizade e por todo o incentivo. Vocês me auxiliam a construir o caminho na área acadêmica e são as referências para mim.

A todos os meus amigos dos Lions. Obrigado pelo companheirismo, lealdade e confiança. Lions Never Die!

A meus colegas do 308, Gustavo Frosi, Dayana Eckert e Diogo Bolzan, pelo auxílio no trabalho, pela amizade de vocês, pelas boas conversas e por todos os momentos de diversão e descontração.

Aos professores e servidores do PPGCS da UFRGS, pelas contribuições que proporcionaram o meu crescimento acadêmico, auxílio no desenvolvimento da pesquisa e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Solos, por todo o auxílio nas análises e todas as conversas.

Aos amigos e colegas que encontrei durante a Pós-Graduação, obrigado por toda amizade, ajuda, conversas acadêmicas.

Ao Instituto Federal do Paraná, a Universidade Federal de Santa Catarina e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela estrutura e recursos que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho e da realização do curso. Bem como aos respectivos representantes que conduziram o experimento, Tales Tiecher, Djalma Schimitt e Jessé Fink, por ceder os dados.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa e a minha permanência no programa.

E por fim, a todos que de alguma maneira contribuíram com a minha formação, meu muito obrigado!

# **ESTRATÉGIAS DE CALAGEM E FERTILIZAÇÃO COM FÓSFORO E POTÁSSIO: EFEITO NA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA ACIDEZ E NUTRIENTES NO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Autor: Kayn Bastiani

Orientador: Prof. Alberto Vasconcellos In da Jr

## **RESUMO**

A fertilidade do solo é um dos principais fatores que interferem na produtividade das culturas. Além da correção da acidez, compreender o comportamento dos nutrientes no solo é crucial para determinar a abordagem ideal na aplicação desses elementos. Este trabalho foi desenvolvido a fim de se obter melhor entendimento sobre os efeitos de diferentes estratégias de aplicação de corretivos de acidez e de fertilizantes fosfatado e potássico na produtividade das culturas e distribuição vertical da acidez e nutrientes no solo. Para tanto, foram desenvolvidos três estudos: i) Estratégias de calagem e correção da acidez de solos em profundidade; ii) Estratégias de calagem e fertilização com K e P: disponibilidade de nutrientes e produtividade de culturas; iii) Estratégias de aplicação de fertilizantes potássicos e fosfatados em solos mineralogicamente distintos. Os experimentos de campo foram instalados em setembro de 2020 em Palmas, Paraná (Latossolo Bruno), Eldorado do Sul, no Rio Grande do Sul (Plintossolo Argilúvico), e Curitiba, Santa Catarina (Cambissolo Háplico), representativas de distintos climas e solos. A aplicação de calcário e dos fertilizantes foi realizada manualmente, com incorporação através da dupla passagem do escarificador ou com grade de disco (nas parcelas com incorporação). A amostragem de solo ocorreu após a colheita das culturas (6 meses após as aplicações dos tratamentos), coletando de maneira estratificada até os 40 cm de profundidade (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30 e 30-40 cm). Realizou-se análises químicas do solo para verificar o comportamento dos nutrientes e o efeito na acidez (pH, H+Al, Al, K e P). O efeito na produtividade das culturas foi avaliado. Os resultados destacam a complexa interação entre a aplicação de calcário, profundidade do solo e tipo de solo na modificação do pH e na redução dos valores de acidez. A interação complexa entre a mineralogia do solo e a mobilidade dos nutrientes foi claramente observada, destacando a importância de considerar tais características na prática agrícola. Dos solos estudados, notadamente o Latossolo Bruno com sua alta adsorção de P, o Cambissolo Háplico sem alterações e o Plintossolo Argilúvico, com menor teor de argila e maior disponibilidade de P, exemplificam a diversidade de respostas aos fertilizantes em função de suas características intrínsecas. A aplicação superficial de nutrientes é mais eficaz na promoção da disponibilidade desses nutrientes na camada superficial do solo, enquanto adubações mais profundas não demonstram benefícios significativos.

Palavras-chave: Adubação fosfatada. Adubação potássica. Correção do solo.

# **LIMING AND FERTILIZATION STRATEGIES WITH PHOSPHORUS AND POTASSIUM: EFFECT ON THE VERTICAL DISTRIBUTION OF ACIDITY AND NUTRIENTS IN THE SOIL AND GRAIN YIELD**

Author: Kayn Bastiani

Adviser: Prof. Alberto Vasconcellos Inda Jr

## **ABSTRACT**

Soil fertility is a major factor influencing crop yield. In addition to acidity correction, understanding nutrient behavior in soil is crucial for determining the optimal approach to applying these elements. This study was conducted to gain a better understanding of the effects of different strategies for applying acidity correctives and phosphorus and potassium fertilizers on crop yield and vertical distribution of acidity and nutrients in the soil. Three studies were conducted: i) Strategies for liming and acidity correction in depth; ii) Liming and fertilization strategies with K and P: nutrient availability and crop yield; iii) Application strategies for potassium and phosphorus fertilizers in mineralogically distinct soils. Field experiments were established in September 2020 in Palmas, Paraná (Oxisol), Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul (Plinthosol), and Curitiba, Santa Catarina (Cambisol), representing different climates and soils. Lime and fertilizer application was done manually, with incorporation through double passage of the scarifier or with a disc harrow (in plots with incorporation). Soil sampling occurred after crop harvest (6 months after treatment application), with stratified sampling up to 40 cm depth (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, and 30-40 cm). Soil chemical analyses were performed to assess nutrient behavior and its effect on acidity (pH, H+Al, Al, K, and P). Crop yield was evaluated. Results highlight the complex interaction between lime application, soil depth, and soil type in modifying pH and reducing acidity values. The complex interaction between soil mineralogy and nutrient mobility was clearly observed, emphasizing the importance of considering such characteristics in agricultural practice. Among the studied soils, notably the Oxisol with its high P adsorption, the Cambisol with no alterations, and the Plinthosol with lower clay content and higher P availability, exemplify the diversity of responses to fertilizers based on their intrinsic characteristics. Surface application of nutrients is more effective in promoting their availability in the surface layer of the soil, while deeper fertilizations do not show significant benefits.

Keywords: Phosphorus fertilization, Potassium fertilization, Soil correction.

## Sumário

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL .....	12
CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
1. Acidez do solo .....	14
2. Estratégias de correção da acidez do solo .....	18
3. Potássio no solo .....	20
6. Relação da mineralogia do solo com a acidez e fertilidade .....	27
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS .....	30
1. Descrição dos locais e dos solos .....	30
2. Delineamento experimental e divisão dos tratamentos .....	32
3. Aplicação do corretivo e fertilizantes .....	32
4. Implantação e manejo das culturas .....	34
5. Amostragem e determinações .....	35
6. Análise de dados .....	37
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
1. Efeito do modo de aplicação de calcário na acidez do solo e na saturação por alumínio .....	39
2. Efeito de diferentes estratégias de aplicação de calcário e P e K na disponibilidade de nutrientes e produtividade de culturas .....	49
2.1 Disponibilidade e distribuição de nutrientes .....	49
2.2 Produtividade das culturas .....	56
3. Diferentes estratégias de correção e manutenção com P e K .....	60
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES .....	66
CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>71</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Caracterização do solo da camada de 0-20 cm antes da instalação dos experimentos em Palmas no estado do Paraná, em Eldorado do Sul no estado do Rio Grande do Sul, e em Curitiba no estado de Santa Catarina.	31
<b>Tabela 2.</b> Doses de corretivo e fertilizantes aplicados para correção de cada solo na implantação dos experimentos e para manutenção das culturas ao longo dos cultivos. ....	34
<b>Tabela 3.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores no pH do solo, na acidez potencial (H+Al) e na saturação por alumínio (m%), como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT). ....	39
<b>Tabela 4.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores no teor de P e K disponível, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).....	50
<b>Tabela 5.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores na produtividade de grãos, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT). ....	56
<b>Tabela 6.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores nos teores de P e K disponíveis, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).....	61

## RELAÇÃO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa com a localização geográfica das cidades onde os experimentos foram instalados. ....	30
<b>Figura 2.</b> Descrição dos solos e das culturas utilizadas nas áreas experimentais.....	31
<b>Figura 3.</b> Difrátograma de raio X para a fração argila dos solos de Palmas, PR (LB), Eldorado do Sul, RS (FT) e Curitiba, SC (CX). KT: caulinita; GB: gibbsita; GT: goethita; HM: hematita; QZ: quartzo; MV: minerais 2:1 e FP: feldspato. ....	37
<b>Figura 4.</b> Valores de pH em água até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná (aos 6 e 18 meses após início do experimento), um Cambissolo Háplico de Curitiba, Santa Catarina (aos 6 e 18 meses após início do experimento) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul (aos 6 e 18 meses após início do experimento), Rio Grande do Sul. ....	41
<b>Figura 5.</b> Valores de acidez potencial (H+Al) até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 e 18 meses após início do experimento. ....	42
<b>Figura 6.</b> Valores de saturação por alumínio (m%) até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 e 18 meses após início do experimento. ....	43
<b>Figura 7.</b> Relação entre os valores de pH em água e saturação por alumínio (m%) até 40 cm de profundidade aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háplico de Curitiba, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul. ....	44
<b>Figura 8.</b> Relação entre os valores de pH em água e saturação de bases (V%) até 40 cm de profundidade aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háplico de Curitiba, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul.....	45
<b>Figura 9.</b> Efeito da aplicação superficial e na linha de semeadura no teor de P disponível até 40 cm de profundidade no Latossolo Bruno de Palmas, PR, aos 6 meses após o início do experimento.....	51
<b>Figura 10.</b> Efeito da aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de P disponível até 40 cm de profundidade no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, RS, aos 6 (a) e aos 18 meses (b) após o início do experimento. A linha vermelha tracejada indica o nível crítico do solo (CQFS – RS/SC, 2016). ....	52
<b>Figura 11.</b> Efeito da interação entre a aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de P disponível no Latossolo Bruno de Palmas, PR, aos 6 meses após o	

início do experimento. A linha vermelha tracejada indica o nível crítico do solo (CQFS – RS/SC, 2016).....	53
<b>Figura 12.</b> Efeito da interação entre a aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de K disponível no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, RS, aos 6 (a) e aos 18 meses (b) após o início do experimento.....	54
<b>Figura 13.</b> Produtividades da cultura da soja cultivada em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), 6 e 18 meses após a calagem, em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) aos 6 e 18 meses após a calagem, em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT) aos 18 meses após a calagem e da cultura do milho em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT) aos 6 meses após a calagem. ....	58
<b>Figura 14.</b> Relação entre rendimento relativo e o pH em água (a) e entre o rendimento relativo e a saturação por alumínio (b) nas camadas 0-10 e 10-20 cm aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háplico de Curitiba, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul. A linha tracejada indica a linha de tendência da regressão, a partir dos tratamentos significativos. ....	59
<b>Figura 15.</b> Teor de potássio (a) e fósforo (b) disponíveis em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, aos 6 meses da implantação, afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade. ....	62
<b>Figura 16.</b> Teor de fósforo disponível em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC, 18 meses após a implantação, afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade. ....	62
<b>Figura 17.</b> Teor de potássio e fósforo disponíveis em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 meses após a implantação (a e b, respectivamente) e aos 18 meses após a implantação (c e d, respectivamente), afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade.....	63

## RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

P – Fósforo

K - Potássio

PCZ – Ponto de Carga zero

SPD – Sistema Plantio Direto

MOS – Matéria Orgânica do Solo

Fe<sub>d</sub> – Ferro ditonito

m% - Saturação por alumínio

V% - Saturação de bases

CTC – Capacidade de troca de cátions

H+Al – Acidez potencial

P<sub>o</sub> – Fósforo orgânico

P<sub>i</sub> – Fósforo inorgânico

P<sub>rem</sub> – Fósforo remanescente

DRX – Difractometria de raios X

2:1HE – Argilominerais 2:1 com hidróxi alumínio nas entrecamadas

EHE – Esmeclita com hidróxi alumínio nas entrecamadas

VHE – Vermiculita com hidróxi alumínio nas entrecamadas

CX – Cambissolo Háplico

FT – Plintossolo Argilúvico

LB – Latossolo Bruno

SPK – Sem aplicação de P e K

CMS - Correção + manutenção em superfície

CML - Correção + manutenção em linha

PKIML - Correção incorporada + manutenção em linha

PKIMS - Correção incorporado + manutenção em superfície

PIKLML - Correção com P incorporado e K na linha + manutenção em linha

KIPLML - Correção com K incorporado e P na linha + manutenção em linha

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura e a produção de grãos desempenham um papel importante na economia brasileira. O Brasil é reconhecido como um dos protagonistas globais na exportação de commodities agrícolas, o que exerce uma influência substancial no panorama econômico nacional através desse setor. Dentre as principais culturas de grãos produzidas, a soja (*Glycine max*), o milho (*Zea mays*) e o trigo (*Triticum aestivum*) são as que apresentam maior relevância. Contudo, embora a expressiva produção de grãos, há a necessidade de melhorar a eficiência, devido à crescente demanda global por alimentos, bem como conciliar essa expansão com a conservação das reservas florestais e a sustentabilidade preconizada na produção agrícola.

A fertilidade do solo é um dos principais fatores que interferem na produtividade das culturas. Para um desenvolvimento adequado, as plantas necessitam de suprimento de nutrientes importantes, como por exemplo os macronutrientes fósforo (P) e potássio (K). Além da disponibilidade de nutrientes, a acidez do solo também é um parâmetro essencial, visto que, além de afetar a dinâmica de elementos no solo, interfere no crescimento radicular. A correção da acidez do solo ocorre através da aplicação de corretivos, como carbonato de cálcio (calcário). A aplicação de calcário tem sido debatida, especialmente em áreas onde o Sistema Plantio Direto (SPD) é amplamente adotado. O SPD, baseado no não revolvimento do solo e na manutenção de cobertura vegetal, traz benefícios como a melhoria da estrutura, a redução da compactação e a otimização da dinâmica hídrica. Nessas áreas, é preconizada a aplicação de calcário na superfície do solo como alternativa viável.

Além da correção da acidez, compreender o comportamento dos nutrientes no solo é crucial para determinar a abordagem ideal na aplicação desses elementos. Tanto o K como o P possuem dinâmicas bastante complexas no solo, envolvendo reações de adsorção/dessorção que afetam as suas disponibilidades. Nesse contexto, a mineralogia do solo exerce um papel fundamental. Em solos pouco intemperizados, os minerais primários podem atuar como fonte de K, enquanto argilominerais do tipo 2:1 podem atuar como drenos de K. Quando muito intemperizados, a presença de óxidos de ferro e alumínio nos solos aumenta a adsorção do P, diminuindo sua disponibilidade.

Assim, estratégias de aplicação dos corretivos e fertilizantes podem ter diferentes eficiências em solos com mineralogias distintas.

Este trabalho foi desenvolvido a fim de se obter melhor entendimento sobre os efeitos de diferentes estratégias de aplicação de corretivos e de fertilizantes sobre o comportamento químico dos nutrientes K e P no solo e o impacto na produtividade das culturas. Para tanto, foram desenvolvidos três estudos: i) Estratégias de calagem e correção da acidez de solos em profundidade; ii) Estratégias de calagem e fertilização com K e P: disponibilidade de nutrientes e produtividade de culturas; iii) Estratégias de aplicação de fertilizantes potássicos e fosfatados em solos mineralogicamente distintos.

## CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO

### 1. Acidez do solo

A acidez do solo foi debatida por décadas na química do solo, muito em função dos efeitos das condições ácidas nas culturas agrícolas (Sparks, 2003; Martins, 2016). Somente a partir da década de 1950 chegamos a conceitos mais semelhantes aos usados atualmente (Low, 1955; Jenny, 1961; Chao & Harward, 1962; Chernov, 1964). Esse esforço em entender a acidez do solo é importante, visto que, solos ácidos representam cerca 30% das terras do globo. Só no Brasil são mais de 70% das terras agrícolas com pH ácido (Rosolem, 1990; Von Uexküll & Mutert, 1995; Quaggio, 2000). Na atualidade, técnicas para corrigir a acidez do solo foram desenvolvidas, permitindo que esses solos naturalmente ácidos passassem a ser mais utilizados. Esses solos são muito frequentes nas principais frentes de expansão das fronteiras agrícolas (Borlaug & Dowsell, 1997; Phalan *et al.*, 2013; Martins, 2016).

Diversos fatores podem contribuir para a acidificação dos solos. Um fator importante para essa característica nos solos brasileiro é o clima, caracterizado por temperatura e regime hídrico favoráveis ao intemperismo das rochas. A importante quantidade de água disponível (Precipitação-Evaporação), aliada a temperaturas elevadas na maioria das regiões, são os principais agentes atuantes no intemperismo das rochas e na formação dos solos (Von Uexküll & Mutert, 1995; Sá, 1993; Sumner & Noble, 2003). Aliado a isso, a decomposição de matéria orgânica e a lixiviação de cátions, como cálcio, magnésio e potássio, contribuem no processo de acidificação (Sá, 1993; Sumner & Noble, 2003). Outro agente influente é a ação antrópica, cujas práticas interferem diretamente em características do solo como a reação ácida. A adição de fertilizantes, o método de preparo e os sistemas de culturas utilizados nas áreas afetam a dinâmica química dos solos cultivados (Martins, 2016).

Nesse sentido, a acidez do solo é considerada uma das características mais importantes do solo. A acidez do solo é dividida em acidez ativa e acidez potencial. A acidez ativa é representada pela atividade de  $H^+$  na solução do solo, comumente associada com a concentração do íon em meio aquoso. Essa associação apresenta boa relação quando as concentrações de  $H^+$  são menores

que 0,1 mol L<sup>-1</sup>, que é o caso dos solos (Bloom *et al.*, 2005; Tiecher, 2015; Martins, 2016). A acidez ativa do solo será maior, quanto maior a quantidade de íons H<sup>+</sup> presentes em uma relação solo:água (1:1), de acordo com a equação 1.

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+] \quad (\text{Equação 1})$$

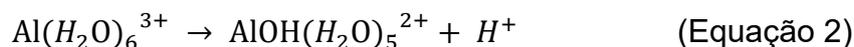
Sendo [H<sup>+</sup>] a concentração de íons H<sup>+</sup>, em mol L<sup>-1</sup>, presentes em solução.

A acidez ativa dos solos brasileiros é variada, de acordo com a região e o tipo de solo, mas no geral o pH está entre 4,0 e 7,5. Entretanto, a grande maioria das culturas de interesse econômica que utilizamos necessita que o pH se encontre em uma faixa mais restrita, entre 5,5 e 6,5 (Tiecher, 2015; Embrapa, 2021).

A acidez potencial é constituída pela soma de todas as fontes de H<sup>+</sup> existentes na fase sólida do solo, principalmente o alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>) e os grupos funcionais orgânicos e inorgânicos, ou seja, ela é proporcional aos teores de Al<sup>3+</sup>, de argila e de matéria orgânica existentes no solo (Ernani, 2008; Novais, 2007 pg. 214; Tiecher, 2015). Via de regra, solos argilosos com argilas de carga variável possuem maior acidez potencial, em comparação a solos arenosos, devido a maior abundância de grupos funcionais e matéria orgânica, por isso são empregadas maiores doses de calcário para a correção da acidez nesses solos (CQFS, 2016). Isso ocorre porque a distribuição do H<sup>+</sup> e do Al<sup>3+</sup> ocorre da mesma forma dos nutrientes, quando a pequena quantidade presente na solução é neutralizada, a fase sólida libera para o meio, como ação tamponante (Tiecher, 2015).

A presença de Al<sup>3+</sup> no solo contribui para acidez potencial porque esse elemento é considerado um cátion ácido, que libera íons H<sup>+</sup> quando hidrolisa a água (Tiecher, 2015; Martins, 2016). A hidrólise da molécula de água ocorre porque o alumínio forma ligação com o oxigênio e, essa interação produz um efeito que polariza as águas de hidratação, quando em meio aquoso. Esse processo de hidrólise faz com que a forma do metal seja alterada, mas ele é dependente do pH do meio. Em condições de acidez elevada a maior concentração de H<sup>+</sup> faz com que a hidrólise não seja favorecida. Contudo, quando ocorre elevação do pH, a diminuição da atividade protônica favorece a hidrólise da água pelo alumínio (Tiecher, 2015; Martins, 2016). A primeira

hidrólise do alumínio e a constante de equilíbrio da reação (25 °C e 0,101 MPa) são descritas nas equações 2 e 3.



$$K_a = \frac{(\text{AlOH}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+})(\text{H}^+)}{(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+})} = pK_a = 5,00 \quad (\text{Equação 3})$$

Quando os valores de pH do solo forem menores do que os valores de  $pK_a$ , o equilíbrio favorece o  $\text{Al}^{3+}$  como espécie dominante. Assim, solos com condições de acidez apresentam predomínio de alumínio trivalente, tóxico para as plantas e que reduzem o crescimento radicular, engrossam as raízes e diminuem a absorção de água e nutrientes das culturas (Taylor, 1987; Arunakumara *et al.*, 2013; Tiecher *et al.*, 2017; Faria *et al.*, 2021). Além disso, esse efeito causa tamponamento do solo, visto que, quando elevamos o pH favorecemos o processo de hidrólise, até que se ultrapasse o  $pK_a$  (Tiecher, 2015).

A matéria orgânica do solo (MOS) e os óxidos de alumínio podem atuar no tamponamento do pH do solo, por apresentarem grupos funcionais que podem ser desprotonados e por conterem  $\text{Al}^{3+}$  complexado ou estrutural, respectivamente. No caso da MOS, ela pode complexar o alumínio trivalente, reduzindo sua atividade e tornando-o indisponível. Esse efeito ocorre quando a acidez do solo é alta, porém quando corrigida a acidez, a MOS pode liberar o  $\text{Al}^{3+}$  complexado (o pH precisa atingir o ponto de dissociação dos grupos funcionais que complexam  $\text{Al}^{3+}$ ), que passa a realizar hidrólise e liberar íons  $\text{H}^+$  (Farina *et al.*, 1980; Hargrove, 1986; Vance *et al.*, 1996; Martins, 2016). O manejo do solo, principalmente em função do revolvimento, pode afetar a forma como o  $\text{Al}^{3+}$  interage com a MOS (Martins, 2016). Ainda, além da MOS apresentar grupos funcionais que podem ser desprotonados e elevar o pH, ela pode liberar ácidos orgânicos para o meio. Ácidos carboxílicos, fenólicos e álcoois terciários podem contribuir com o fenômeno de acidificação (Sousa, 2007).

Os solos em avançado grau de intemperização no sul do Brasil, como Latossolos e Argissolos, apresentam altos teores de  $\text{Al}^{3+}$ , que pode hidrolisar-se e acidificar o meio. Isso faz com que a necessidade de calagem desses solos seja maior devido ao seu poder de tamponamento (Sombroek, 1966; Kämpf & Klamt, 1978; Kitagawa & Möller, 1979; Pötter & Klamt, 1981). Nesses solos, não

é incomum a ocorrência do óxido de alumínio gibbsita, que pode ter seu ponto de carga zero (PCZ) próximo de 9,5 reduzido a valores abaixo de 6 (Goldberg *et al.*, 1996; Huang *et al.*, 2002). Essa redução do PCZ ocorre quando a gibbsita adsorve ânions inorgânicos e ácidos orgânicos, o que ocorre em condições naturais de solo devido a sua elevada área superficial específica (Goldberg *et al.*, 1996; Huang *et al.*, 2002). Desta forma, a gibbsita pode apresentar carga negativa mesmo quando o pH do solo for baixo, através da desprotonação, o que pode contribuir para a acidez potencial (Huang *et al.*, 2002).

O tamponamento do solo a partir da acidez potencial pode ser estimado através da utilização de técnicas como por exemplo o método SMP. Este é um índice utilizado nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, calibrado para fornecer uma relação direta entre o poder tampão do solo e a necessidade de calagem para elevação do pH (Nicolodi, 2003; CQFS RS/SC, 2016). A equação utilizada atualmente pela Rede Oficial de Laboratórios de Análises de Solo (ROLAS) foi calibrada a partir da incubação direta de solos com carbonato de cálcio (Kaminski *et al.*, 2001). Contudo, como a equação é calibrada com base nos solos utilizados no experimento, ela pode subestimar ou superestimar a acidez potencial em solos com valores de SMP muito altos ou muito baixos.

Tendo em vista a influência do pH na dinâmica de elementos nos solos, como os cátions ácidos ( $H^+$  e  $Al^{3+}$ ) e cátions trocáveis ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$ ), a presença e proporção desses cátions nas cargas do solo pode ser utilizada como parâmetro indicativo da fertilidade do solo (Tiecher, 2015). Esses parâmetros são a saturação por alumínio (m%) e a saturação por cátions (V%) e tem relação proporcional com o pH do solo. A V% leva em conta a saturação das cargas negativas do solo que estão sendo ocupadas por esses cátions trocáveis, enquanto que a m% considera quanto alumínio está ocupando as cargas, de acordo com as equações 4 e 5 (Quaggio, 1986; Tiecher, 2015; CQFS RS/SC, 2016).

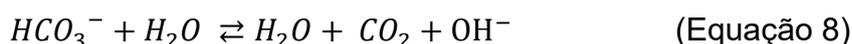
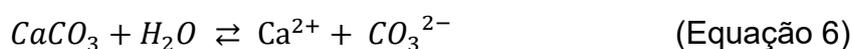
$$V\% = \frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + H^+)} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

$$m\% = \frac{Al^{3+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al^{3+})} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

A acidez do solo é um parâmetro fundamental na fertilidade do solo que precisa ser melhor compreendido. Grande parte das plantas e microrganismos que interagem no solo são sensíveis a ação da acidez. Além disso, a acidez do solo influencia a disponibilidade de nutrientes e de elementos tóxicos, afetando a dinâmica e a forma deles no solo. Portanto, entender os mecanismos e as estratégias de controle da acidez é importante para alcançar a eficiência de utilização dos recursos e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Brady & Weil, 2002; Bloom *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2016).

## 2. Estratégias de correção da acidez do solo

A correção da acidez do solo por meio da calagem é o meio mais eficiente e barato (Rodrighero *et al.*, 2015; Bellinaso *et al.*, 2021). A aplicação de calcário visa o controle da acidez ativa e potencial do solo, bem como a precipitação do  $Al^{3+}$ , além de elevar os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  no solo (Martins, 2016; Tiecher, 2022). A elevação do pH ocorre pela ação dos íons  $HCO_3^-$  e  $OH^-$  liberados pelo calcário, de acordo com as equações 6, 7 e 8.



As hidroxilas reagem com a acidez ativa do solo, neutralizando os íons  $H^+$  e elevando o pH (Martins, 2016; Tiecher, 2022). Além disso, esses íons modificam a concentração de cargas na superfície dos argilomerais e óxidos devido a deprotonação dos grupos funcionais Fe-OH, Al-OH e Si-OH. A desprotonação das superfícies minerais determina um predomínio de cargas negativas (Barrow, 1999; Tiecher, 2022), o que afeta a dinâmica de adsorção/dessorção e de absorção de cátions e ânions no solo pelas plantas. Isso ocorre também com os grupos funcionais da MOS. Essa desprotonação dos componentes tamponantes do solo ocorre até que haja um novo equilíbrio químico (Tiecher *et al.*, 2023).

No sistema de plantio convencional de solo (SPC), a aplicação de calcário é realizada juntamente com sua incorporação ao solo. Essa incorporação do

corretivo na camada 0-20 cm faz com que sua eficiência aumente pelo aumento da área de contato com o solo (Quaggio, 2000; Wiethölter, 2000). Além disso, o calcário possui baixa solubilidade em água ( $0,3 \text{ g L}^{-1}$ ), fazendo com que a incorporação facilite a descida dele no perfil. Contudo, com a adoção do SPD, as práticas agrícolas começaram a ser revistas (Anghinoni, 2007), incluindo a estratégia de aplicação dos corretivos.

O SPD é amplamente utilizado no cultivo agrícola do Brasil. Dentre os pilares do sistema está a mínima mobilização do solo, reduzindo as perdas de solo, água e nutrientes, aumentando os estoques de carbono, melhorando a agregação do solo e, conseqüentemente, aumentando a produtividade agrícola (Joris *et al.*, 2016; Tiritan *et al.*, 2016; Fuentes-Llanillo *et al.*, 2021). Tanto no SPC quanto na implantação de SPD é recomendada a análise de fertilidade do solo da camada de 0 a 20 cm (CQFS RS/SC, 2016). A partir da dose recomendada pelo manual, deve ser realizada a incorporação do corretivo ao solo, sendo essa a forma mais rápida para corrigir a acidez em profundidade (Bortoluzzi *et al.*, 2014; CQFS RS/SC, 2016; Miotto *et al.*, 2020; Bellinaso *et al.*, 2021). Contudo, quando o SPD já é consolidado a amostragem é realizada na camada 0-10 cm, apenas com monitoramentos da camada 10-20 cm. Caso não haja condições de acidez em subsuperfície, o manual (CQFS RS/SC, 2016) instrui que a aplicação pode ser realizada em superfície, sem incorporação de  $\frac{1}{4}$  da dose indicada para elevar o pH à 6,0.

O não revolvimento do solo, preconizado no SPD, é um entrave à incorporação de calcário, justificado pelos benefícios na estruturação do solo, atividade biológica, dinâmica hídrica no solo, entre outros (Machado & Silva, 2001). Entretanto, a partir dessas recomendações, a aplicação de calcário passou a ser erroneamente realizada apenas em superfície (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2021). O não revolvimento de solo pode garantir diversos benefícios, mas em solos ácidos e onde o SPD não é manejado corretamente a correção do solo é a etapa primordial para o início de um manejo adequado. Caso ela não seja realizada da maneira adequada os efeitos de neutralização da acidez podem ficar restritos a camada 0-10 cm, com pH baixo em profundidade e presença de alumínio tóxico (Rheinheimer *et al.*, 2018b; Condon, 2020). A incorporação de calcário ao solo também permite uma homogeneidade de pH (6,0 – 7,0) no perfil

do solo considerado, que traz diversos benefícios (Slattery, 2001). Todas essas discussões fazem com que a forma de aplicação seja alvo de estudos ainda hoje.

Kaminski et al. (2005), comparando a alteração dos atributos do solo com calagem incorporada e superficial no solo, em um Argissolo em Santa Maria – RS, observou que após sete anos da aplicação do calcário na superfície do solo, o aumento de pH se deu até 10 cm de profundidade do solo, enquanto que na aplicação de calcário incorporada ao solo o aumento de pH ocorreu até 25 cm de profundidade. Para Al trocável,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  os efeitos também foram até os 25 cm de profundidade quando o calcário foi incorporado.

### 3. Potássio no solo

A acidez do solo interfere em outros parâmetros do solo, como na disponibilidade de nutrientes. Solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais, e que cobrem extensas áreas no sul do Brasil, apresentam naturalmente uma elevada acidez e baixa fertilidade (Bortoluzzi et al., 2015; Rodrighero et al., 2015). A condição de fertilidade está atrelada a disponibilidade de alguns nutrientes importantes, como por exemplo o potássio (K) e o fósforo (P).

O K é o segundo nutriente mais requerido pelas culturas (Faquin, 1994; Marschner, 1995). Participando de vários processos metabólicos dentro da planta, como ativação enzimática e controle osmótico, o K é absorvido em grandes quantidades pelas culturas (Furtini et al., 2001; Nogueira et al., 2001; Marschner, 1995). Além disso, as principais funções do K envolvem a fotossíntese, translocação, balanço iônico e síntese de proteínas (Marschner, 1995). Em geral, elevadas produtividades estão correlacionadas com altos teores de K no tecido foliar (Malavolta, 1993). A absorção do K ocorre através da sua forma iônica ( $\text{K}^+$ ), de maneira ativa e seletiva (Chen & Gabelman, 2000; Malavolta et al., 2006).

Em geral, solos pouco intemperizados apresentam abundância de K, tendo em vista a sua presença significativa nas rochas da crosta terrestre, que originam os solos, com teor médio de  $26 \text{ g kg}^{-1}$  (Schroeder, 1979; Sparks, 2000). A maior parte desse K (90-98%) está na forma estrutural, como componente da estrutura cristalina de minerais silicatados (Goedert, 1975). O K trocável e o

solúvel contribuem com 2-8% e 0,1-0,2%, respectivamente (Goedert, 1975). Em solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais os teores de K são menores. Entretanto, esses solos podem possuir quantidades importantes de K estrutural (Attoe & Truog, 1945; Castro *et al.*, 1972; Goedert, 1975; Tisdale *et al.*, 1985; Sparks, 2000; Ernani, 2008), quando desenvolvidos de materiais de origem ricos em minerais primários que contenham K, como micas e feldspatos potássicos (Schroeder, 1979).

Os feldspatos potássicos apresentam substituições isomórficas de silício por alumínio em parte dos tetraedros de silício. Essa substituição gera cargas estruturais negativas que são compensadas pela entrada do K na estrutura para manter o equilíbrio do mineral (Rich 1968b; Huang, 1989). Nos solos tropicais e subtropicais, a dissolução dos feldspatos potássicos pelo intemperismo químico da origem a minerais pedogênicos como a caulinita e/ou gibbsita, dependendo do grau de dessilicação. Esse é o principal meio de liberação do K estrutural para a solução do solo (Berner, 1971; Schoeder, 1978; Tributh, 1987; Harris *et al.*, 1988), sendo facilmente lixiviado por não ser incorporado na estrutura dos minerais secundários formados nessas condições.

As micas são filossilicatos muito comuns nos solos, sendo estruturados por uma lâmina central octaédrica ligada a duas tetraédricas através de átomos oxigênicos, formando argilominerais do tipo 2:1 (Thompson & Ukrainczyk, 2002). Cada tetraedro compartilha com os tetraedros vizinhos três átomos de oxigênio, que dão origem a um anel ditrigonal. Da mesma forma que nos feldspatos, nas micas também ocorrem substituições isomórficas do silício pelo alumínio nos tetraedros, causando desbalanço de carga na estrutura do mineral, com uma carga negativa adicional. Para compensar a carga gerada pela substituição isomórfica, átomos de potássio ocupam as entrecamadas desses argilominerais 2:1 (Jackson *et al.*, 1952; Thompson & Ukrainczyk, 2002). Esse K retido na entrecamada é considerado como não trocável. Ele pode ser liberado das entrecamadas das micas gradualmente, através do processo de intemperismo desses minerais (Schroeder, 1978).

Ao contrário dos feldspatos, onde o intemperismo leva a formação de caulinita por reações de dissolução-neoformação, sem que haja incorporação do K na estrutura da caulinita, as micas podem ser intemperizadas a argilominerais secundários do tipo 2:1. A vermiculita é um desses minerais secundários

formados por transformações no estado sólido a partir da perda do K retido nas entrecamadas. A vermiculita não apresenta K na estrutura do mineral, mas tem um comportamento de fixação de cátions de baixa energia, como o K, o que pode levar a fixação e diminuição da disponibilidade do nutriente (Douglas, 1977; Kämpf & Curi, 2003). Apesar da vermiculita não ser comumente encontrada em Latossolos brasileiros, devido ao intemperismo e as condições de acidez, pode haver ocorrência de minerais 2:1 com polímeros de hidróxi-alumínio nas entrecamadas, formados a partir dela (Kämpf & Klamt, 1978; Kämpf & Curi, 2003; Schaefer *et al.*, 2008; Curi & Kämpf, 2012). Esses minerais podem apresentar comportamento semelhante a vermiculita em relação ao K (Silva, 1995; Castilhos, 1999).

Existe um equilíbrio químico entre as formas estruturais de potássio e as formas solúveis, que ocorre de maneira espontânea. Ao passo que o K da solução é absorvido ou lixiviado, a concentração é repostada pela fração trocável (Mielniczuk, 1978). Há uma contribuição expressiva do K trocável no suprimento do nutriente para as culturas devido a esse fenômeno (Chaves *et al.*, 2015; Kaminski *et al.*, 2007; Medeiros *et al.*, 2014; Rosolem *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015). Contudo, os solos que apresentam argilominerais 2:1 podem sofrer o efeito inverso, onde, quando o K é adicionado excessivamente via adubação ele pode ficar retido nas entrecamadas dos minerais (Meurer, 2017).

A capacidade de troca de cátions (CTC) do solo se refere às cargas negativas dos colóides, onde cátions, como o K, podem se ligar. Essa fração trocável do K é dependente da CTC do solo, que varia de acordo com o teor de matéria orgânica do solo, tipo e teor de argila e pH do solo (Meurer & Anghinoni, 1993). Esses fatores podem sofrer influência da estratégia de manejo do solo. A mobilização pode favorecer a oxidação da MOS, o que pode afetar a CTC. Além disso, a calagem pode aumentar a capacidade do solo em reter cátions, afetando diretamente a disponibilidade de K (Sousa & Lobato, 2004).

#### **4. Fósforo no solo**

O P é um macronutriente que participa da nutrição e crescimento das plantas. Atua desde a participação em estruturas, como membranas celulares, até a composição de ácidos nucleicos e adenosinas trifosfato. Isso faz com que

o nutriente integre diversos processos metabólicos, como síntese de proteínas, absorção de nutrientes e fotossíntese, afetando diretamente a nutrição vegetal (Yu, W. *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2013; Hinsinger *et al.*, 2018). O P do solo pode estar em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi). O Po vem principalmente de resíduos vegetais, produtos microbianos e de decomposições. O Pi é originado a partir do intemperismo do material de origem, da adubação e da mineralização do Po (Gatiboni *et al.*, 2013b). A dinâmica do P no solo é bastante complexa, especialmente em solos altamente intemperizados e com presença de óxidos de ferro e alumínio (Fink *et al.*, 2016).

As reações de adsorção tratam-se do enriquecimento de determinada substância na interface sólido-líquido, fenômeno que controla a atividade química de elementos, sendo importante na disponibilidade e mobilidade de nutrientes no solo (McBride *et al.*, 1994; Sposito, 2008). O P apresenta uma adsorção específica, que ocorre porque o  $\text{H}_2\text{PO}_4$  tem alta afinidade pelos sítios de adsorção dos minerais oxídicos. Existem duas fases de adsorção do P, onde na primeira ocorre a ligação nos sítios de alta energia, de difícil reversão, o que torna ele menos disponível. Na segunda fase, o P é adsorvido em sítios de menor energia e não específicos, sendo esses mais disponíveis. Essas características permitem separar o P quanto a sua labilidade, que tem ligação com a disponibilidade do nutriente (Rheinheimer *et al.*, 2008). Esses processos são mais pronunciados em solos com mineralogia predominante oxídica.

Em geral, solos tropicais e subtropicais apresentam avançados graus de intemperização. A composição mineralógica predominante desses solos é formada por diferentes proporções de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita), óxidos de alumínio (gibbsita), óxidos de ferro (goethita, hematita, maghemita, ferrihidrita), óxidos de silício (quartzo), argilominerais do tipo 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1HE) e minerais de baixa cristalinidade (Kämpf e Curi, 2003; Schaefer *et al.*, 2008; Kämpf *et al.*, 2012; Fink *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2020). Apesar de a quantidade de P nesses solos ser alta, o P disponível para as plantas é baixo (Hinsinger *et al.*, 2018). A disponibilidade é justamente a maior limitação, visto que, cerca de 70 a 90% do P que entra no solo é fixado nos componentes orgânicos e inorgânicos, principalmente nos inorgânicos, ficando fortemente adsorvido nos óxidos de ferro e alumínio (Kou *et al.*, 1999; Lei *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2000; Fink *et al.*, 2016a). A dinâmica de adsorção do P também

é dependente de características específicas dos óxidos. A concentração, o tipo de óxido e a cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio são os parâmetros que mais influenciam (Barrón & Torrent, 1996; Lair *et al.*, 2009; Broggi *et al.*, 2010; Yoon *et al.*, 2014, Fink, 2012). A goethita, devido a sua maior área superficial específica, tende a adsorver maiores quantidade de P do que a hematita. Além disso, há correlações positivas entre a maior adsorção de P e os teores de goethita e gibbsita (Mesquita & Torrent, 1993; Andrade *et al.*, 2002; Fink *et al.*, 2014).

Assim, o fator limitante para o P não é a sua absorção pelas plantas, mas o seu destino no solo. O P adicionado via fertilizantes fosfatados é, em grande parte, adsorvido rapidamente pelos minerais do solo (Barrow, 1983; Novais *et al.*, 2007; George *et al.*, 2018; Hinsinger *et al.*, 2018; Fink *et al.*, 2020;). Em solos mais intemperizados, com presença de óxidos de ferro e alumínio, o manejo influencia significativamente na labilidade do P (Rheinheimer *et al.*, 2008). Isso afeta, além da disponibilidade, a forma como o P se movimenta no perfil do solo. A movimentação de P no perfil do solo ocorre principalmente por difusão. Devido aos processos de adsorção, a mobilidade do nutriente é restringida, sendo por vezes insuficiente para o desenvolvimento adequado da maioria das culturas, uma vez que para ser absorvido pelas plantas o P precisa entrar em contato com as raízes. A difusão é justamente o processo de movimentação dos íons em direção a raiz, mas no caso do P, seu coeficiente efetivo de difusão é bem mais baixo que dos demais nutrientes. Isso faz com que a deficiência em P seja limitadora aos cultivos e, os gastos com fertilizantes fosfatados sejam elevados. A deficiência de P varia de acordo com o tipo de solo, o teor de argila e a composição mineralógica do solo (Hadgu *et al.*, 2014). Fink *et al.* (2016b) avaliaram a dessorção de P em solos subtropicais, percebendo que a composição e os tipos de minerais do solo interferem nos processos de adsorção do P. Assim, solos com diferentes mineralogias tem relações de adsorção e dessorção distintas. Em um estudo avaliando a adsorção de P em solos do sul do Brasil em função das propriedades do solo, Oliveira *et al.* (2020) encontraram que o teor de argila, carbono orgânico total e a quantidade de óxidos presentes influencia diretamente na adsorção de P. Solos com maiores teores de argila, acúmulo de matéria orgânica e maiores teores de óxidos de ferro, como os Latossolos e Nitossolos, apresentaram menores teores de P remanescente

( $P_{rem}$ ) e, conseqüentemente, maior adsorção de P. Em contrapartida, solos com gradiente textural, menores teores de argila e de óxidos, como Argissolos e Plintossolos, os teores de  $P_{rem}$  foram maiores e a adsorção de P foi menor.

A concentração do P, assim como a espécie química, é influenciada por características do meio, como o pH do solo. Em condições de acidez o P tende a ficar adsorvido na superfície dos óxidos e, em condições mais básicas, o nutriente pode formar ligações com o Ca ( $CaHPO_4$ ,  $CaPO_4^-$ ,  $CaH_2PO_4^+$ ), que precipitam (Costa, 2008). A aplicação de calcário é um importante meio de influenciar na dinâmica das espécies químicas de P no solo, cujo pH ideal buscado é na faixa de 5,5 à 6,5, justamente uma faixa de pH em que há maior disponibilidade de P (Tisdale *et al.*, 1985; Ernani, 2008; Embrapa, 2021).

Além de considerar as características do solo, o manejo do solo é muito influente na dinâmica do P. Em SPD, há maior acúmulo de MOS devido ao não revolvimento, rotação de culturas e cobertura de solo. Essa matéria orgânica compete com o P pelos sítios de adsorção, fazendo com que haja maior disponibilidade do P na solução do solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Rheinheimer *et al.*, 2008; Fink *et al.*, 2016). Ainda, a estratégia de aplicação dos fertilizantes fosfatados também é importante quanto a sua distribuição no perfil do solo. Devido a sua baixa disponibilidade e mobilidade, o manejo eficiente dos fertilizantes fosfatados pode ajudar no aumento da produtividade das culturas (Costa, 2008). Diversos estudos têm avaliado como a estratégia de aplicação do fertilizante afeta o P no solo, desde sua distribuição, dinâmica e a relação com o crescimento e distribuição das raízes (Klepker, 1991; Model & Anghinoni, 1992; Klepker, 1996; Wiethölter, 2000; Ceretta *et al.*, 2007).

## **5. Modo de aplicação de P e K**

A aplicação dos fertilizantes potássicos e fosfatados segue a premissa de sistemas de recomendação de adubação, como o do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O sistema recomenda doses de correção do solo, para que a disponibilidade dos nutrientes atinja o nível crítico, e doses de manutenção, suficientes para suprir a cultura de interesse (CQFS-RS/SC, 2016). A forma de aplicar essas doses de fertilizantes ainda vem sendo debatida. Muitas vezes a adubação é feita sem levar em conta outros parâmetros importantes, como a

acidez em subsuperfície (Bellinaso *et al.*, 2021). Além disso, a utilização de sistemas onde não há a incorporação dos fertilizantes, como ocorre no SPD, favorece o acúmulo de nutrientes nas camadas superficiais do solo, especialmente aqueles nutrientes menos móveis, como o P, e com o aumento da profundidade, o teor reduz (Pavinato *et al.*, 2004; Rodrigues *et al.*, 2016).

Esse efeito de distribuição gradual dos nutrientes devido as aplicações superficiais tem sido bastante reportado (Shear & Moschler, 1969; Ketcheson, 1980; Macray *et al.*, 1987; Selles *et al.* 1997). Essa distribuição heterogênea dos nutrientes em profundidade pode causar problemas no crescimento das plantas. Apesar de, nas fases iniciais, o suprimento nas primeiras camadas seja suficiente, à medida que a planta cresce podem ocorrer limitações no seu desenvolvimento (Kochhann *et al.*, 1999). Além disso, pode haver redução do crescimento de raízes e alteração na sua conformação, o que reduz a capacidade de absorção dos nutrientes e pode causar estresses em períodos de menor disponibilidade hídrica (Klepker & Anghinoni, 1993; Resende, 2004). Neste sentido, embora em SPD a fertilização do solo seja feita na camada superficial do solo, a forma de aplicação desse fertilizante em superfície ainda seja objeto de vários estudos (Pavinato *et al.*, 2004).

A aplicação a lanço, seguida da incorporação ao solo, favorece a exploração do sistema radicular, proporciona maior homogeneidade dos nutrientes nas camadas, mas pode reduzir a disponibilidade de P, em relação a outras estratégias, por aumentar a área de contato com o solo (Klepker & Anghinoni, 1993; Resende, 2004). Contudo, se o revolvimento for usado em um momento estratégico, como na implantação de um SPD ou em uma correção química necessária, ela pode promover a redistribuição vertical do C e nutrientes no perfil do solo, o que pode gerar resultados positivos (Blanco-Canqui & Wortmann, 2020). As aplicações a lanço e sem incorporação podem ser eficazes quando os teores de P do solo já são elevados, tendo em vista a baixa mobilidade desse nutriente (Randall & Hoefl, 1988; Bordoli & Mallarino 1998). A aplicação em linha é a estratégia mais utilizada atualmente, mantendo um efeito residual prolongado, apesar de também causar o gradiente de disponibilidade dos nutrientes no perfil (Caione *et al.*, 2011; Jackson *et al.*, 2016). Nesse sentido, melhorar a eficiência dos fertilizantes, através da geração e adoção de

estratégias mais adequadas de aplicação, pode possibilitar um aumento da produtividade sem que haja aumento dos custos de produção.

## 6. Relação da mineralogia do solo com a acidez e fertilidade

No processo de intemperismo das rochas vários fatores interferem na formação do solo. Fatores como clima (c), relevo (r), organismos (o) e o material de origem (m) atuam ao longo do tempo (t) para formar os solos (S), formando a função descrita na equação 9 (Jenny, 1941).

$$S = f(c, o, r, m, t) \quad \text{(Equação 9)}$$

O material de origem se refere a rocha matriz que passará pelo processo de intemperismo, fornecendo o material geológico que será alterado e originará os solos. O clima atua através da precipitação e temperatura, intensificando as reações de remoção de materiais e dissolução. Nas diferentes posições do relevo se formarão solos diferentes, principalmente pela alteração da dinâmica da água em cada posição. Os organismos, seja a macro, meso e micro fauna, bem como a flora, iniciam a fixação na superfície do material de origem, exercendo ação física ou liberando compostos que aceleram o intemperismo e proporcionam um substrato para vegetais superiores. Todos esses fatores atuam de maneira concomitante, em escala de tempo pedológica/geológica, causando o intemperismo das rochas e a formação de distintos tipos de solo (Streck *et al.*, 2008; Kämpf & Curi, 2012).

Assim como a rocha matriz, o solo formado é constituído de minerais, sólidos de composição química definida que, juntamente com a matéria orgânica, definem o comportamento químico e físico dos solos. O intemperismo dos minerais geogênicos envolve não apenas a alteração deles, mas também a formação de novas fases minerais, podendo ser distinguidos em minerais primários e secundários (Kämpf *et al.*, 2009). Os minerais primários são de origem magmática, hidrotermal e metamórfica e ocorrem principalmente nas rochas e nas frações mais grosseiras do solo, como areia (2-0,2 mm) e silte (0,02 mm). Os minerais secundários são formados a partir do intemperismo de outros minerais, primários ou secundários, e predominam na fração argila (<0,002 mm) do solo (Kämpf *et al.*, 2009). Assim, a alteração desses minerais primários e pedogênicos são processos que ocorrem através de reações, sendo sua

formação e estabilidade determinadas pelo pedoambiente (Azevedo *et al.*, 1996; Resende *et al.*, 2005). Isso faz com que os minerais que compõem o solo sirvam de indicativos pedoambientais e de processos pedogenéticos, visto que, solos originados por diferentes processos pedogenéticos terão características distintas (Inda Junior & Kämpf, 2005; Inda *et al.*, 2010).

A fase sólida do solo formado pode ser dividida em frações com diferentes tamanhos de partículas. Dentre as frações granulométricas do solo, a fração argila é considerada em um maior número de estudos devido a seu impacto no comportamento químico e físico do solo, podendo afetar a produtividade de culturas agrícolas (Fink, 2012; Inda *et al.*, 2013). Nos solos subtropicais a fração argila é composta em grande parte por argilominerais do tipo 1:1 (caulinita), por óxidos de ferro e alumínio e por argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (Nietzsche *et al.*, 2008; Schaefer *et al.*, 2008; Fink *et al.*, 2020). Essa composição mineralógica é oriunda do grau de intemperismo proporcionado pelo clima dessas regiões, com elevada temperatura e precipitação (Zanardo & Marques Jr., 2009). Essa característica faz com que a hidrólise seja a principal reação atuante no intemperismo das rochas e formação dos solos brasileiros (Melfi & Pedro, 1977). A hidrólise causa a despolimerização da estrutura de minerais primários, com liberação de silício e cátions para a solução do solo. Isso faz com que a composição mineralógica desses solos seja definida a partir da intensidade da hidrólise e da lixiviação (Kämpf *et al.*, 2012).

De maneira geral, solos brasileiros apresentam fluxo de água intenso e com lixiviação expressiva, fazendo com que a dessilicação seja completa. Dessa forma, apenas os elementos de baixa mobilidade permanecem, como o ferro e o alumínio, que precipitam como óxidos (Melfi & Pedro, 1977; Kämpf *et al.*, 2012). Contudo, existem regiões onde a hidrólise e a lixiviação ocorrem de maneira menos expressiva, resultando apenas em alterações parciais. Nesses casos, pode haver a remoção do K das entrecamadas das micas e a ocupação de entrecamadas de argilominerais 2:1 por polímeros de alumínio (Sposito, 1989; Resende *et al.*, 2011).

Os óxidos de ferro (hematita, goethita, maghemita e ferrihidrita) e alumínio (gibbsita) apresentam características de alta reatividade, alta área superficial específica e cargas superficiais dependentes de pH, fazendo com que os solos tropicais e subtropicais, onde esses minerais predominam, sejam afetados por

suas dinâmicas químicas e físicas (Kämpf & Curi, 2003; Nietzsche *et al.*, 2008; Schaefer *et al.*, 2008; Fink, 2012). Os óxidos de ferro e alumínio podem interagir com compostos orgânicos e inorgânicos, alterando a dinâmica deles no solo. Essas interações podem afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Fink, 2012). As principais ligações que ocorrem nesse grupo de minerais são com a matéria orgânica e com os ânions fosfatos presentes na solução do solo.

A caulinita, mesmo apresentando papel secundário na adsorção de P, ainda participa de reações de adsorção do fosfato devido a sua abundância em solos altamente intemperizados (Motta *et al.*, 2002; Oliveira, 2015). Assim como a superfície dos óxidos, a superfície da caulinita também apresenta grupos R-OH reativos que podem ser deslocados por ânions fosfato. Apesar da ordem de preferência na adsorção do P ser de óxidos > caulinita, a reatividade da caulinita com o P é importante devido a sua abundância em solos mais intemperizados. Segundo Oliveira (2015), em um estudo avaliando a mineralogia e a adsorção de P em solos do Rio Grande do Sul, o aumento da concentração de caulinita e a diminuição da cristalinidade de seus cristais tem influência no aumento da adsorção de P nos solos.

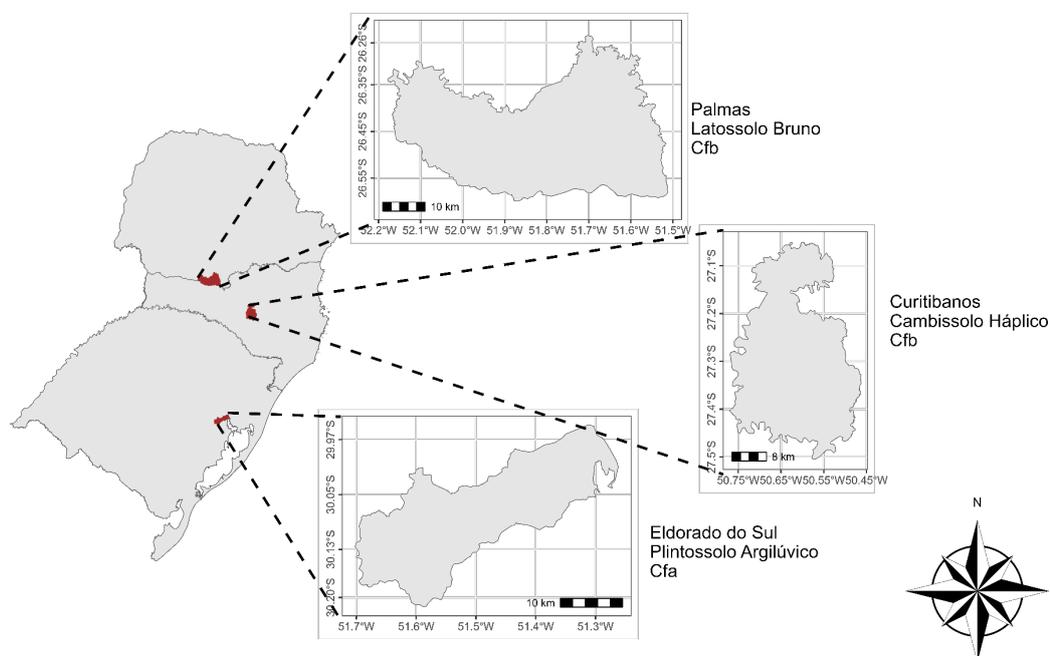
Além dos sesquióxidos e caulinita, minerais do tipo 2:1 com polímeros de alumínio nas entrecamadas (2:1 HE) podem ser encontrados nos solos subtropicais (Kämpf & Klamt, 1978; Schaefer *et al.*, 2008; Curi & Kämpf, 2012). Os minerais 2:1 HE tem origem na deposição de polímeros de hidróxi-alumínio nas entrecamadas de minerais expansíveis, como a esmectita e a vermiculita (Kämpf & Curi, 2003). Esses minerais apresentam grande afinidade por cátions fracamente hidratados, como o K (Douglas, 1977). Quando o K é adicionado via adubação, aumentando a disponibilidade em solução, os minerais 2:1 HE podem atuar como drenos, podendo fixá-los em quantidades grandes (Silva, 1994; Castilhos, 1999).

# CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

## 1. Descrição dos locais e dos solos

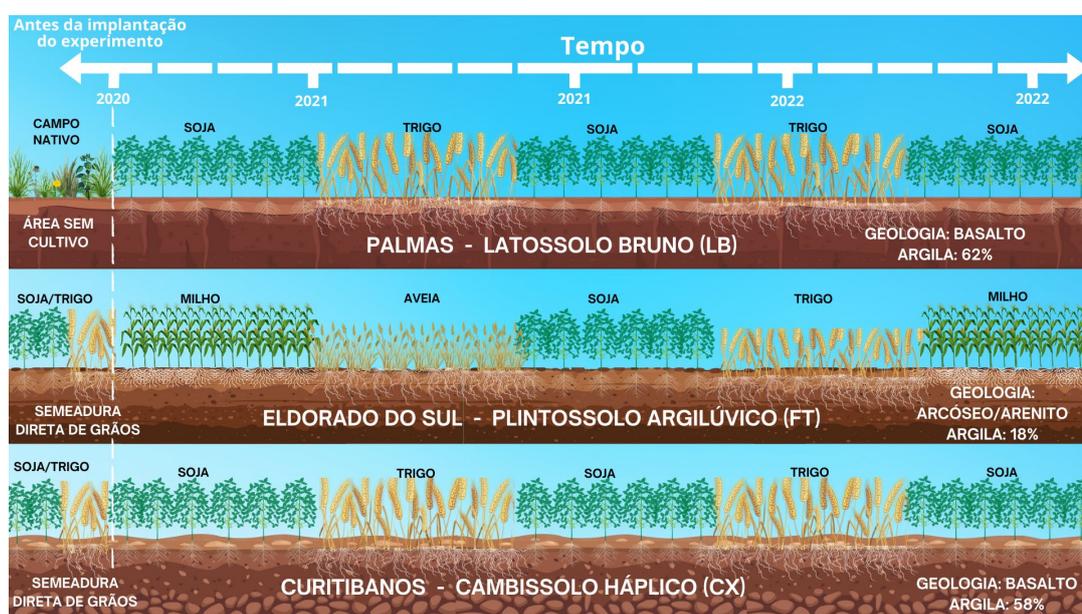
O estudo foi desenvolvido em três experimentos instalados em solos com mineralogias contrastantes: a) Palmas, no estado do Paraná, na área experimental do Instituto Federal do Paraná (Latossolo Bruno;  $26^{\circ}3'41.7''S$  $51^{\circ}5'01.3''W$ ); b) Eldorado do Sul – Rio Grande do Sul, na estação experimental agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Plintossolo Argilúvico;  $30^{\circ}0'24.8''S$  $51^{\circ}4'47.0''W$ ; e c) Curitibanos – Santa Catarina, na área experimental da Universidade Federal de Santa Catarina (Cambissolo Háplico;  $27^{\circ}1'02.7''S$  $50^{\circ}3'04.8''W$ ).

Palmas tem influência do clima Cfb (classificação de Köppen), altitude de 1100 m, com temperatura média anual de  $16,5^{\circ}C$  e precipitação média anual de 1975 mm (INMET, 2021). Eldorado do Sul tem influência do clima Cfa, altitude de 28 m, com temperatura média anual de  $20^{\circ}C$  e precipitação média anual de 1563 mm. Curitibanos tem influência do clima Cfb, altitude de 978 m, com temperatura média anual de  $19,2^{\circ}C$  e precipitação média anual de 1670 mm (INMET, 2022).



**Figura 1.** Mapa com a localização geográfica das cidades onde os experimentos foram instalados.

Antes da implantação dos experimentos, a área utilizada em Palmas era um campo nativo. Nas áreas utilizadas nos experimentos de Eldorado do Sul e Curitibaanos era realizado o cultivo de grãos (soja, milho e trigo) em semeadura direta, mas um SPD consolidado nunca foi implantado (Figura 2). Amostras de solo foram coletadas a fim de caracterizar as áreas e determinar a necessidade de calagem e adubação para cada área. A coleta foi realizada, com pá de corte, de forma estratificada nas camadas 0-10 e 10-20 cm. As características químicas e físicas dos três solos estão descritos na Tabela 1.



**Figura 2.** Descrição dos solos e das culturas utilizadas nas áreas experimentais.

**Tabela 1.** Caracterização do solo da camada de 0-20 cm antes da instalação dos experimentos em Palmas no estado do Paraná, em Eldorado do Sul no estado do Rio Grande do Sul, e em Curitibaanos no estado de Santa Catarina.

Propriedade do solo	Palmas, PR	Curitibaanos, SC	Eldorado do Sul, RS
Classificação	Latossolo Bruno (LB)	Cambissolo Háplico (CX)	Plintossolo Argilúvico (FT)
Geologia	Basalto	Basalto	Arcóseo/Arenito
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	620	580	180
COT (g dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	69,1	26,7	16,7
pH em água (1:1, v/v)	4,7	5,2	5,0
Índice SMP	4,6	5,2	6,1
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	21,8	9,0	4,5

<sup>1</sup> COT, carbono orgânico total estimado pelo método de oxidação úmida de Walkley-Black modificado por Tedesco et al. (1995).

## **2. Delineamento experimental e divisão dos tratamentos**

Em setembro/outubro de 2020, os experimentos com delineamento blocos ao acaso, com 3 repetições, foram instalados. Os experimentos foram subdivididos em três formas de avaliação:

1. A primeira considera como fator experimental três tratamentos envolvendo manejo da calagem do solo: a) Controle (sem aplicação de calcário); b) calcário em superfície (aplicação superficial de calcário sem incorporação); e c) calcário incorporado (aplicação de calcário e incorporação);
2. A segunda forma considera que o primeiro fator experimental consta de três tratamentos envolvendo manejo da calagem do solo: a) Controle (sem aplicação de calcário); b) calcário em superfície (aplicação superficial de calcário sem incorporação); e c) calcário incorporado (aplicação de calcário e incorporação). O segundo fator experimental foi o manejo da adubação fosfatada e potássica de correção + manutenção: a) Sem correção (sem aplicação de P ou K); b) Correção superfície (aplicação da adubação de correção e manutenção de P ou K na superfície do solo); c) Correção linha (aplicação de adubação de correção e manutenção de P ou K na linha de cultivo da cultura);
3. A terceira forma consistia de sete tratamentos com adubação potássica e fosfatada, considerando apenas o calcário incorporado: sem aplicação (SPK); correção + manutenção em superfície (CMS); correção + manutenção em linha (CML); correção incorporada + manutenção em linha (PKIML); correção incorporado + manutenção em superfície (PKIMS); correção com P incorporado e K na linha + manutenção em linha (PIKLML); correção com K incorporado e P na linha + manutenção em linha (KIPLML).

## **3. Aplicação do corretivo e fertilizantes**

A aplicação do calcário e dos fertilizantes foi realizada antes da implantação da cultura (Tabela 2). A dose de calcário utilizada foi aquela recomendada para aumentar o pH do solo à 6,0, via metodologia SMP em cada

local (CQFS-RS/SC, 2016). A aplicação de calcário foi realizada manualmente em cada parcela experimental. A incorporação do calcário ( $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário calcítico com 103% de PRNT) no LB foi realizada pela dupla passagem de um escarificador, incorporando o corretivo até 20 cm de profundidade. No CX a incorporação foi realizada com passagem de arado de disco e grade ( $10,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico com 80% de PRNT). No FT a incorporação foi realizada com passagem de grade de disco ( $5,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico com 75% de PRNT). A aplicação de calcário foi realizada apenas no ano de implantação do experimento.

As doses de P e K foram estipuladas para a correção e manutenção da fertilidade do solo no momento da instalação do experimento levando em consideração a expectativa de colheita de  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  para soja e  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  para milho (Tabela 2; CQFS-RS/SC, 2016). A aplicação em superfície foi realizada manualmente em cada parcela e, quando havia incorporação, os fertilizantes eram aplicados a lanço e incorporados posteriormente. A aplicação em linha foi realizada juntamente como a semeadura da cultura da soja ou milho. No Cambissolo de Curitibanos não foi realizada aplicação de K porque os teores já eram classificados como muito alto, sendo testada apenas as estratégias para P. A correção do solo foi realizada apenas no ano de implantação do experimento, com aplicação das doses de P e K de manutenção nos anos seguintes.

**Tabela 2.** Doses de corretivo e fertilizantes aplicados para correção de cada solo na implantação dos experimentos e para manutenção das culturas ao longo dos cultivos.

Solo/Local	Data	Cultura/adubação	Calagem (Mg ha <sup>-1</sup> )	N <sup>d</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>e</sup> K <sub>2</sub> O <sup>e</sup>		
				(kg ha <sup>-1</sup> )		
Palmas, PR	18/09/2020	Adubação de correção/calagem	10,0 <sup>a</sup>	0	160	30
	18/09/2020	Adubação de manutenção da soja	-	0	72	120
Latossolo	14/07/2021	Adubação de manutenção do trigo	-	10	15	15
Bruno (LB)	08/12/2021	Adubação de manutenção da soja	-	4	46	36
	12/07/2022	Adubação de manutenção do trigo	-	4	46	36
		<b>Total</b>	<b>10,0</b>	<b>18</b>	<b>339</b>	<b>237</b>
Curitibanos, SC	28/10/2020	Adubação de correção/calagem	10,4 <sup>b</sup>	0	80	0
	28/10/2020	Adubação de manutenção da soja	-	0	60	100
	09/07/2021	Adubação de manutenção do trigo	-	60	60	45
Cambissolo	03/12/2021	Adubação de manutenção da soja	-	0	60	100
Háplico (CX)	30/06/2022	Adubação de manutenção do trigo	-	70	60	45
	15/12/2022	Adubação de manutenção da soja	-	0	60	100
		<b>Total</b>	<b>10,4</b>	<b>130</b>	<b>300</b>	<b>390</b>
Eldorado do Sul, RS	31/10/2020	Adubação de correção/calagem	5,6 <sup>c</sup>	0	80	60
	31/10/2020	Adubação de manutenção do milho	-	135	60	100
	23/04/2021	Adubação de manutenção da aveia	-	50	0	0
Plintossolo	26/11/2021	Adubação de manutenção da soja	-	35	180	120
Argilúvico (FT)	21/07/2022	Adubação de manutenção do trigo	-	80	60	40
		<b>Total</b>	<b>5,6</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>260</b>

<sup>a</sup> Calcário calcítico com 103% de PRNT.

<sup>b</sup> Calcário dolomítico com 80% de PRNT.

<sup>c</sup> Calcário dolomítico com 75% de PRNT.

<sup>d</sup> Adicionado em todos os tratamentos.

<sup>e</sup> Adicionado somente nos tratamentos com adubação de P e K.

## 4. Implantação e manejo das culturas

Nos três locais realizou-se a implantação das culturas para a safra de verão de 2020. Contudo, cada local recebeu um manejo devido ao uso de culturas diferentes. A descrição dos locais, as culturas utilizadas e o histórico da área foram descritos na Figura 2.

### 4.1 Palmas

As culturas utilizadas em Palmas foram soja no verão e trigo no inverno. Em setembro de 2020 houve a primeira implantação da soja. Em julho de 2021 o trigo da cultivar R Crítico foi implantado. Assim se deu também nos anos subsequentes até 2022. As sequências de culturas, datas de semeadura e doses

de fertilizantes para adubação de manutenção no LB são mostradas na Tabela 2.

#### **4.2 Curitibaanos**

A cultivar de soja (*Glycine max*), utilizada foi a BMX Zeus 55157 RSF IPRO. A cultivar foi semeada em outubro de 2020, semeadura direta, de forma mecanizada, com espaçamento entre linhas de 40 cm, a profundidade de 5 cm, possuindo uma densidade de 325 mil plantas por hectare. A cultura da soja foi sucedida pela do trigo no inverno. As sequências de culturas, datas de semeadura e doses de fertilizantes para adubação de manutenção no CX são mostradas na Tabela 2.

#### **4.3 Eldorado do Sul**

A cultura do milho foi implantada em outubro de 2020. As variedades das culturas foram: milho (*Zea mays*), híbrido Balu 388 VIP3, com densidade populacional de 55 a 60 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Na safra de inverno, em abril de 2021, utilizou-se a cultura da aveia preta (*Avena strigosa*), cultivar EMBRAPA 139, com a densidade de 350 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Em dezembro de 2021 a cultura da soja (M 5947 IPRO) foi implantada, com densidade de 250 a 300 mil plantas ha<sup>-1</sup>, que foi seguida pela cultura do trigo no inverno. As sequências de culturas, datas de semeadura e doses de fertilizantes para adubação de manutenção no FT são mostradas na Tabela 2.

### **5. Amostragem e determinações**

Ao final do ciclo de cada cultura, com as plantas em maturação plena (R8 para soja e R6 para o milho), foram coletadas manualmente uma área representativa de cada parcela. Após a coleta, as plantas foram levadas para o laboratório, onde foram realizadas as avaliações de produtividade.

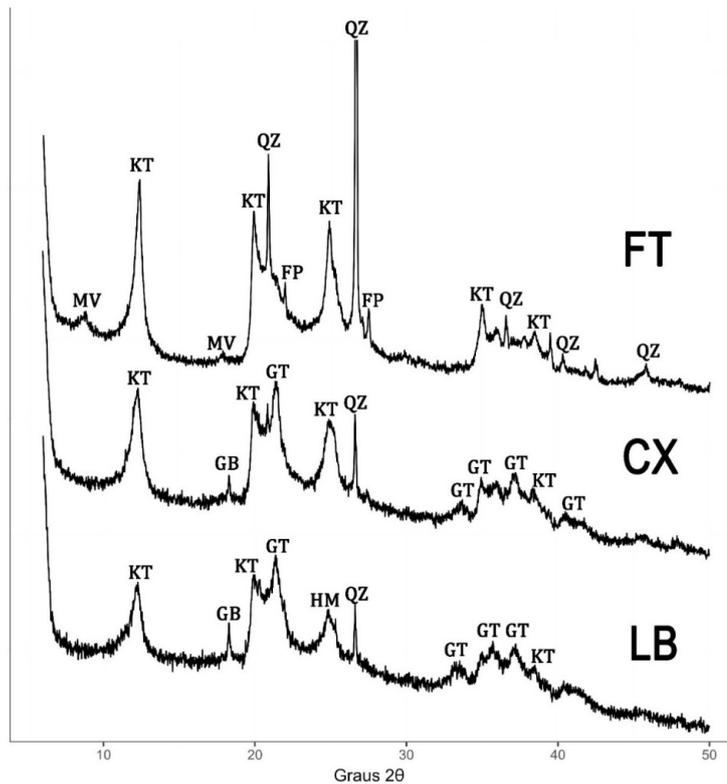
Posteriormente a coleta das plantas, coletas de solo foram realizadas em cada parcela através da abertura de trincheiras. Foi utilizada a pá de corte para abrir uma área de 40 x 40 x 40 cm, onde o solo foi coletado de maneira estratificada nas camadas 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30 e 30-40 cm de

profundidade. O solo coletado foi seco e moído para obtenção de terra fina ( $\phi < 2$  mm), para realização das análises.

O pH em água (pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>; 1:1 solo:água) e o índice SMP, determinados conforme Tedesco *et al.* (1995). Através do índice SMP foi estimada a acidez potencial do solo (H+Al) (Kaminski *et al.*, 1974). O P e K foram extraídos por solução Mehlich-I (0,0125 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 0,05 mol L<sup>-1</sup> de HCl) e determinados por espectrofotometria de absorção molecular (Murphy & Riley, 1962) e por espectrofotometria de emissão de chama (Tedesco *et al.*, 1995), respectivamente. O alumínio trocável (Al) foi extraído com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinado por titulometria (Tedesco *et al.*, 1995).

A caracterização granulométrica foi realizada por dispersão mecânica em solução de hidróxido de sódio, com separação das frações por peneiramento e sedimentação. A determinação foi realizada por pesagem após as frações serem secas em estufa. Realizou-se a separação das frações granulométricas do solo, onde, a fração areia é separada por peneiramento, enquanto que, as frações silte e argila serão, após serem dispersas em solução, separadas por sedimentação e secas a 60°C. As frações areia, silte e argila foram moídas com gral e pistilo e submetidas a análise mineralógica por difratometria de raios-X (DRX). A faixa de varredura para todas as amostras será de 4-50 °2θ, com incremento de 0,02° e tempo de leitura de 0,5 s. Os minerais serão identificados conforme os dados de difração descritos por Brown e Brindley (1980). Os resultados do DRX são mostrados na Figura 3.

Essa mesma metodologia de coletas e análises foi desenvolvida concomitantemente nos três locais, sendo repetida nos anos de 2021 e 2022, visando um experimento de maior duração.



**Figura 3.** Difratoograma de raio X para a fração argila dos solos de Palmas, PR (LB), Eldorado do Sul, RS (FT) e Curitibanos, SC (CX). KT: caulinita; GB: gibbsita; GT: goethita; HM: hematita; QZ: quartzo; MV: minerais 2:1 e FP: feldspato.

## 6. Análise de dados

A normalidade dos dados foi verificada a partir do teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variância pelo teste do Levene, ambos com um nível de significância de 5%, quando normais e homogêneos, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) em um esquema fatorial. Quando a ANOVA foi significativa ( $p < 0,05$ ), as diferenças entre as médias dos tratamentos foram avaliadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Cada subdivisão do experimento analisou esquemas fatoriais diferentes na ANOVA e no PostHoc:

1. A primeira subdivisão considerou dois esquemas fatoriais: a) o primeiro esquema fatorial foi o tratamento com calcário, a profundidade e o tipo de solo; b) o segundo esquema fatorial considerou o tratamento com calcário, a profundidade e o tempo. As parcelas selecionadas foram aquelas que receberam a adubação de

correção e manutenção em linha, variando apenas as estratégias de aplicação do corretivo;

2. A segunda subdivisão considerou um esquema fatorial com os fatores: tratamento com calcário, tratamento de correção de P e K, profundidade e tempo. As parcelas selecionadas foram aquelas que a correção de manutenção era a mesma estratégia de correção (correção e manutenção em linha, por exemplo);
3. A terceira subdivisão considerou um esquema bifatorial de estratégia de aplicação de P e K e profundidade do solo.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Efeito do modo de aplicação de calcário na acidez do solo e na saturação por alumínio

O pH do solo e a acidez potencial (H+Al) foram influenciados pela calagem, profundidade de solo amostrada e pela interação entre esses dois fatores em todos os locais e em todas as amostragens de solo realizadas (Tabela 3). O mesmo ocorreu para a saturação por Al no Latossolo Bruno de Palmas. Contudo, a saturação por Al só foi influenciada pela estratégia de calagem aos 18 meses no Cambissolo Háplico de Curitiba, e aos 6 e aos 18 meses no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul (Tabela 3).

**Tabela 3.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores no pH do solo, na acidez potencial (H+Al) e na saturação por alumínio (m%), como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).

Variável	Local	Mês após instalação do experimento (ano)	Estratégia de calagem (Calc)	Camada de solo (Prof)	Calc × Prof
pH do solo	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**
	Curitiba (CX)	6 meses (2021)	**	**	*
		18 meses (2022)	**	**	**
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**
Acidez potencial (H+Al)	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**
	Curitiba (CX)	6 meses (2021)	**	**	*
		18 meses (2022)	**	**	*
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	*
		18 meses (2022)	**	**	*
Saturação por alumínio (m%)	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**
	Curitiba (CX)	6 meses (2021)	ns	ns	ns
		18 meses (2022)	**	ns	ns
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	ns	ns
		18 meses (2022)	**	ns	ns

\*Significativo a  $p < 0,05$ ; \*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; ns: não significativo a 5%.

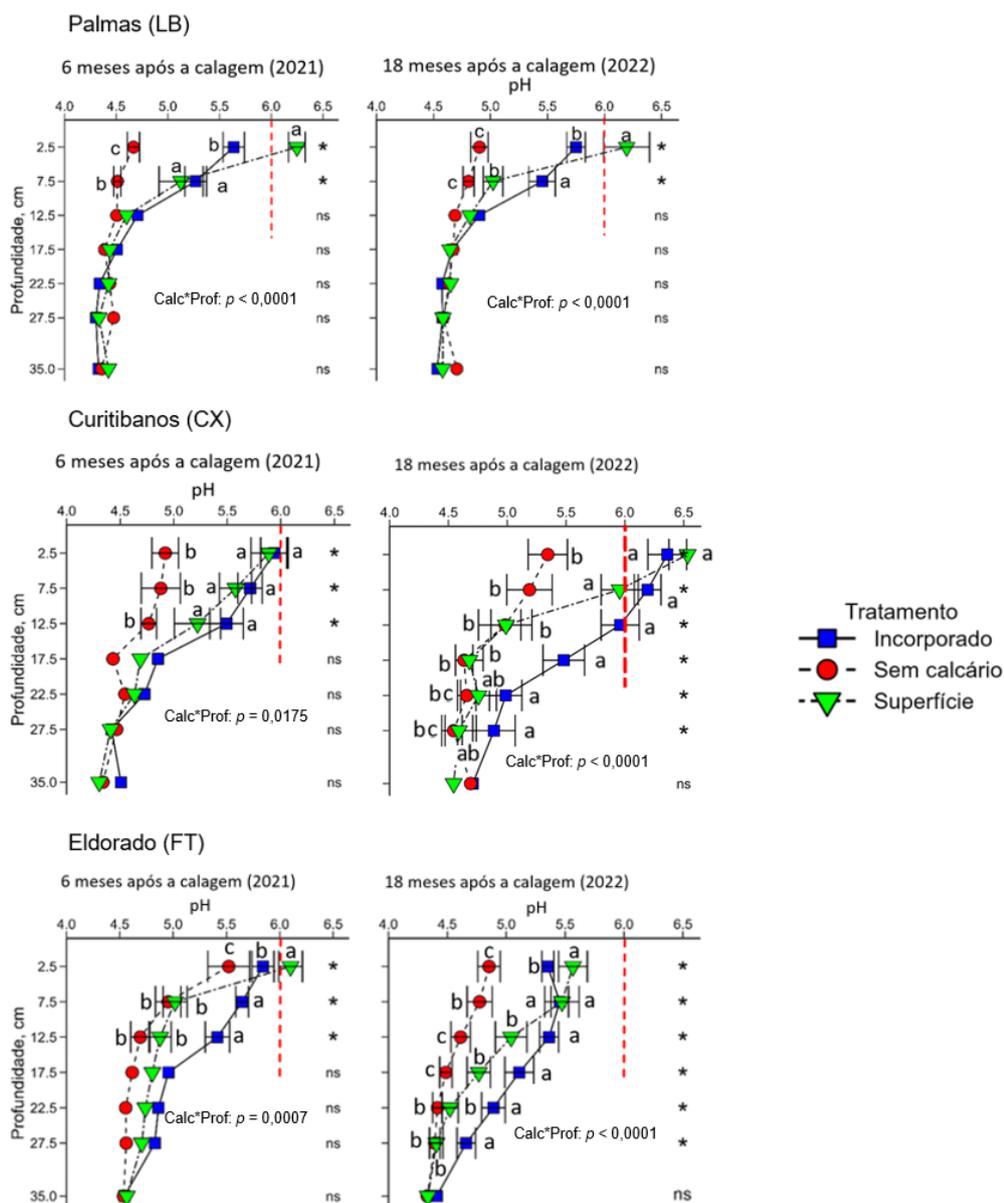
A aplicação superficial do calcário no Latossolo Bruno propiciou um aumento do pH do solo na camada 0-5 cm ( $p < 0,05$ ) nos dois anos de avaliação, em comparação com a calagem incorporada e ao tratamento controle (Figura 4).

O tratamento com calcário incorporado com dupla passagem de um escarificador aumentou o pH do solo apenas 18 meses após a aplicação para a camada 5-10. Aos 6 e 18 meses após a aplicação os efeitos se restringiram aos primeiros 10 cm de profundidade solo para aplicação superficial e incorporada. Nos dois anos de avaliação, apenas a aplicação superficial, na camada 0-5 cm, conseguiu atingir o pH 6,0 que era esperado (Figura 4).

No Plintossolo Argilúvico a aplicação superficial de calcário resultou em maior pH do solo apenas na camada 0-5 cm, aos 6 meses após a aplicação, não diferindo do controle nas demais profundidades (Figura 4). A incorporação do calcário, no entanto, elevou o pH do solo até os 15 cm de profundidade nos primeiros 6 meses, e após 18 meses, até 30 cm de profundidade. Aos 18 meses, o pH do solo foi maior na camada de 0-5 cm com calagem superficial, mas se igualou ao incorporado na camada 5-10 cm, e foi menor a partir da camada 10-15 cm. Apenas o tratamento superficial, na primeira camada e 6 meses após a calagem, atingiu o pH 6,0 objetivado na recomendação (Figura 4).

O aumento do pH do solo no Cambissolo Háplico foi similar entre os tratamentos com aplicação superficial e incorporada do calcário (Figura 4). Ambos aumentaram o pH até os 15 cm comparativamente ao controle aos 6 meses após a calagem (Figura 4). Após 18 meses da calagem houve aumento do pH até os 30 cm de profundidade quando o calcário foi incorporado ao solo. Neste solo o pH 6,0 buscado na recomendação foi atingido na primeira camada em 6 meses para ambos os tratamentos e, até os 10 cm em 18 meses depois da aplicação do calcário (Figura 4).

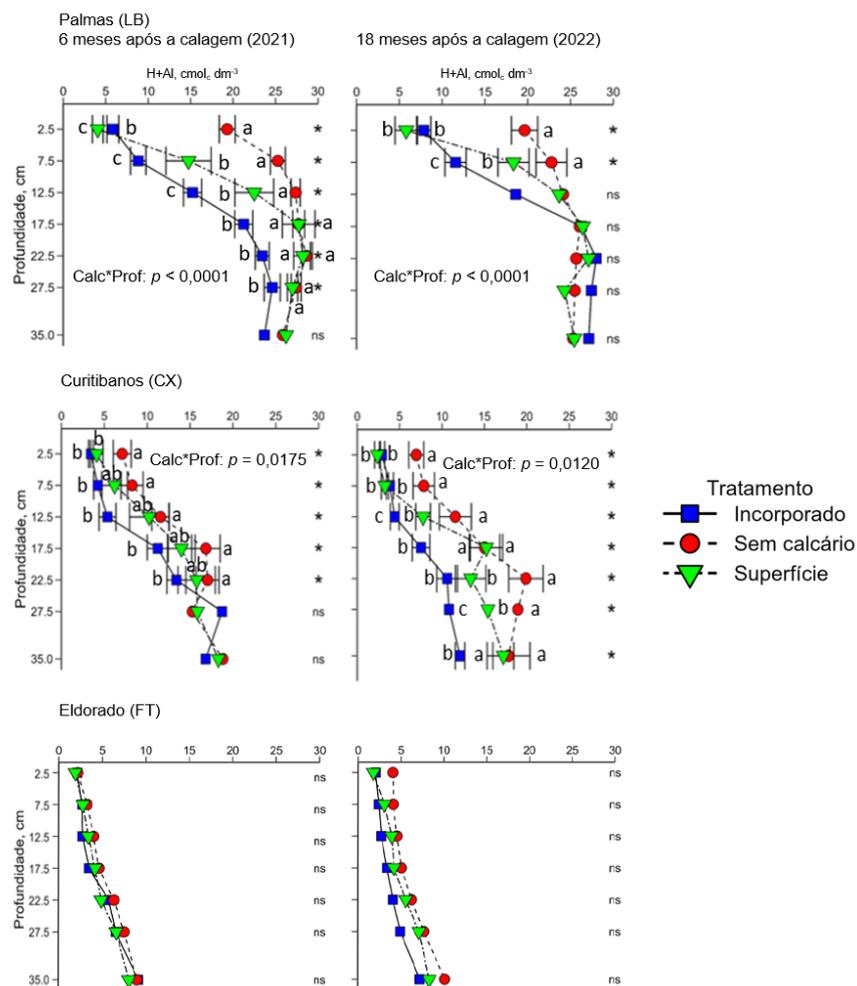
Quando comparados os solos após 6 meses da calagem, no LB e no FT há um efeito menos gradual do pH entre as camadas apenas com a aplicação seguida de incorporação do calcário, enquanto que no CX, ambas as estratégias tem esse comportamento (Figura 4). Após 18 meses da aplicação do calcário se percebeu que o LB teve o menor avanço em profundidade do aumento de pH em relação aos outros solos. Os efeitos nesse solo se restringiram aos 10 cm, enquanto que tanto o FT quanto o CX tiveram aumento de pH até os 30 cm de profundidade (Figura 4). Contudo, as estratégias de aplicação variaram o efeito nos dois solos. No FT a aplicação superficial apresentou um efeito semelhante ao incorporado, enquanto que no CX apenas o tratamento incorporado foi superior (Figura 4).



**Figura 4.** Valores de pH em água até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná (aos 6 e 18 meses após início do experimento), um Cambissolo Háplico de Curitibanos, Santa Catarina (aos 6 e 18 meses após início do experimento) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul (aos 6 e 18 meses após início do experimento), Rio Grande do Sul.

A acidez potencial (H+Al) aos 6 meses da calagem foi maior no LB seguido na sequência pelo CX e pelo FT (Figura 5). Contudo, o LB apresentou as reduções mais expressivas na acidez potencial em comparação aos demais solos, além de reduzir os valores até os 30 cm de profundidade. Ainda, no LB o tratamento incorporado foi mais eficiente em reduzir a acidez potencial em

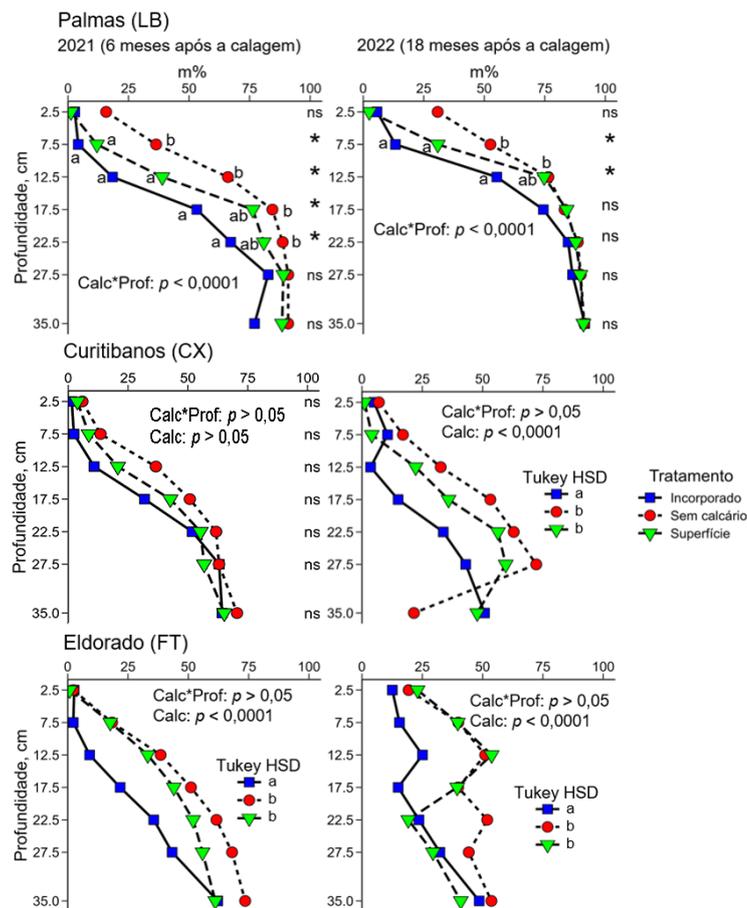
profundidade quando comparado ao tratamento superficial. Já no CX ambos os tratamentos se mostraram semelhantes, mas apenas o tratamento incorporado difere do controle em profundidade (15-30 cm). Já no FT, não houve diferença estatística entre as estratégias de aplicação de calcário. Aos 18 meses após a calagem apenas o LB e o CX apresentaram redução nos valores de acidez potencial. No CX as reduções ocorreram até os 40 cm de profundidade, o que não ocorreu no LB, cujos efeitos se restringiram até os 10 cm.



**Figura 5.** Valores de acidez potencial (H+Al) até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 e 18 meses após início do experimento.

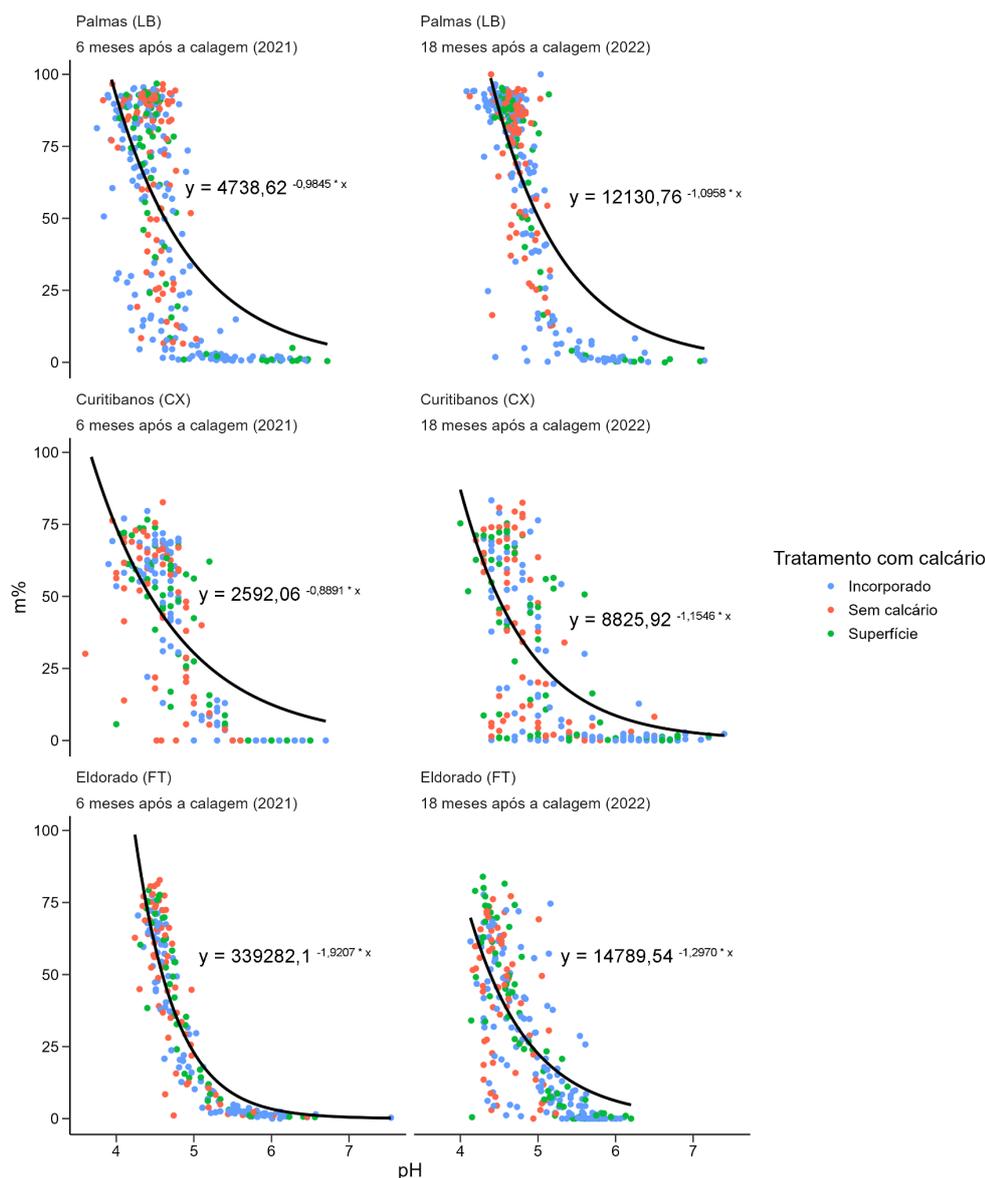
A saturação por Al do solo diminuiu em ambas as estratégias de aplicação de calcário no LB, aos 6 meses após a calagem, até a profundidade de 15 cm

(Figura 6). Entretanto, o tratamento com incorporação proporcionou redução da saturação por Al até 25 cm. No solo LB após 18 meses da aplicação do calcário, houve diferença nas camadas 5-10 e 10-15 cm, com o tratamento incorporado reduzindo a saturação por Al em relação ao controle. Os valores de saturação por Al em CX 18 meses após a aplicação do calcário, em FT 6 e 18 meses após a aplicação de calcário tiveram efeito simples do tratamento com calcário (Figura 6;  $p < 0,001$ ). Nesses três casos, apenas o tratamento com incorporação causou redução na saturação por Al, diferindo da aplicação superficial e da não aplicação de calcário (Figura 6). Já para CX, aos 6 meses após a calagem, não houve alterações nos valores de saturação por Al em função do tratamento com calcário ou sua interação com a profundidade.

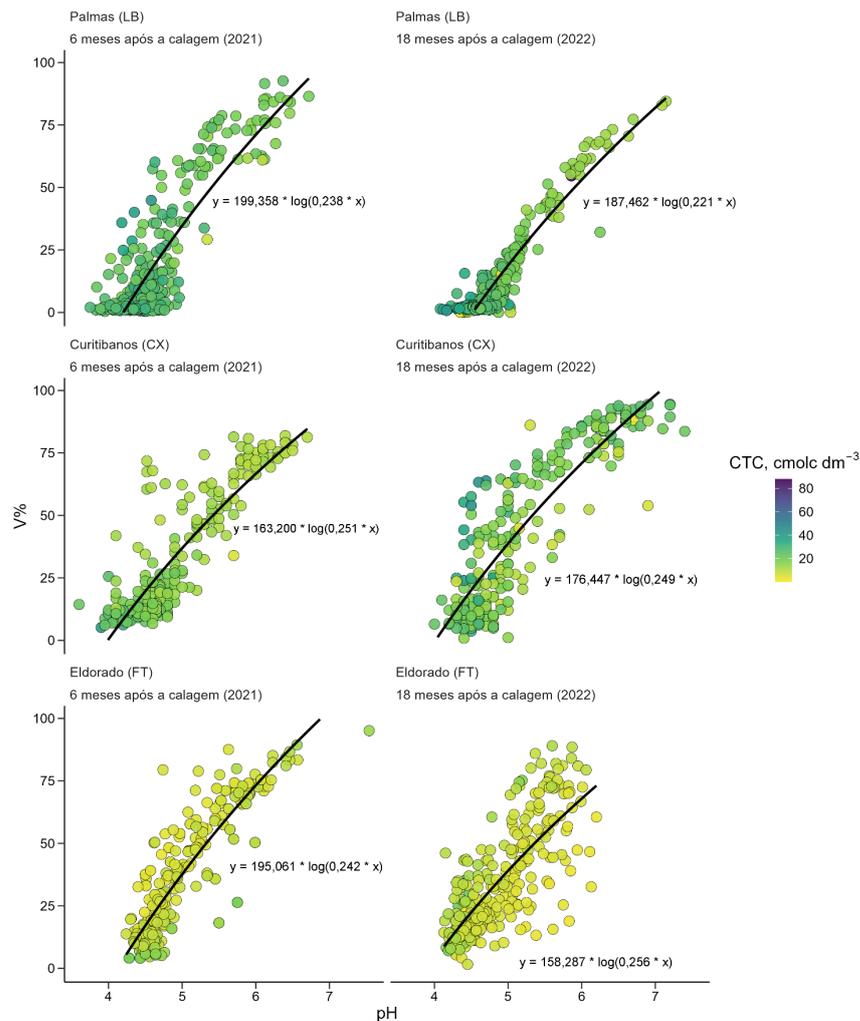


**Figura 6.** Valores de saturação por alumínio (m%) até 40 cm de profundidade em função de diferentes métodos de aplicação de calcário (superfície e incorporado no solo) em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 e 18 meses após início do experimento.

Para todos os solos e coletas houve uma relação significativa entre o pH do solo em água e a saturação por Al (Figura 7) e V% (Figura 8) dos solos. A relação entre pH e saturação por Al se adequa significativamente a uma curva exponencial, onde, o aumento de pH leva a redução da saturação por Al (Figura 7). No caso da V% a curva segue um modelo logarítmico, cujo aumento de pH eleva os valores de V% (Figura 8).



**Figura 7.** Relação entre os valores de pH em água e saturação por alumínio (m%) até 40 cm de profundidade aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háptico de Curitibanos, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul.

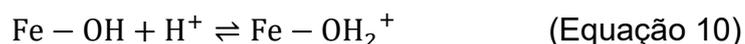


**Figura 8.** Relação entre os valores de pH em água e saturação de bases (V%) até 40 cm de profundidade aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háplico de Curitibaanos, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul.

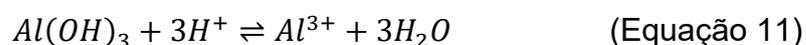
Os resultados mostraram que a aplicação superficial do calcário foi menos eficiente em aumentar o pH do solo em profundidades maiores que 10 cm, especialmente em menor tempo (6 meses), como é o caso da primeira coleta (2021, 6 meses após a calagem). Contudo, foi observado que os resultados variaram em função do tipo de solo e do ano de avaliação. No primeiro ano, aos 6 meses após a calagem, as características do solo, como a química (acidez ativa e potencial inicial) e mineralogia (tipos de argilominerais presentes), podem ter influenciado significativamente para esses efeitos. Tanto o CX quanto o FT apresentavam menor acidez potencial, em comparação ao LB (9,0, 4,5 e 21,8,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente). O teor de argila, matéria orgânica do solo (MOS)

e o tipo de argilomineral são parâmetros que contribuem no tamponamento do solo. Solos com teor de argila e MOS maiores e predominância de óxidos (LB e CX) pode ocorrer a liberação de íons  $H^+$  devido a desprotonação de grupos funcionais de superfície, o que causa um efeito de tamponamento.

A superfície dos óxidos de ferro e da MOS apresenta grupos funcionais que podem interagir com íons e moléculas presentes no solo. Esses grupos funcionais incluem principalmente  $OH^-$ , que podem se ionizar e interagir com íons  $H^+$  presentes no solo (Inda Junior & Kämpf, 2005; Schaefer *et al.*, 2008; Fink, 2012). Essa interação pode ter um efeito de tamponamento no pH do solo, ajudando na sua regulação e impedindo grandes variações causadas por adição ou remoção de íons  $H^+$  e  $OH^-$  (Melo & Alleoni, 2019). O equilíbrio químico abaixo esquematiza as reações de protonação ou deprotonação dos grupos funcionais de superfície de um óxido de ferro:



Nesse sentido, essa dinâmica de tamponamento causada pelos minerais e pela MOS pode afetar a correção da acidez do solo com calcário devido ao efeito tamponante (Melo & Alleoni, 2019). Em virtude disso, a aplicação de calcário em superfície foi mais limitada no solo com maior teor de argila e MOS, além de outros fatores, devido à desprotonação dos grupos funcionais de superfície. O LB é mais intemperizado, com presença de óxidos de ferro (goethita e hematita) e de alumínio (gibbsita), além de possuir teores elevados de MOS (Fink *et al.*, 2016). Esses óxidos de ferro e de alumínio possuem elevada área superficial específica, o que pode proporcionar um poder tampão maior da acidez. Além disso, a acidez inicial do solo permite a dissolução de alguns desses óxidos de alumínio, que libera  $Al^{3+}$  (Schaeztl & Anderson, 2005; Melo & Alleoni, 2019) e contribui para a acidificação, dificultando mais a correção pelo calcário. Esse equilíbrio ocorre para ambos os lados da equação e, quando adicionamos hidroxilas ao meio e ocorre redução da acidez, o  $Al^{3+}$  tende a passar para a sua forma de óxido, chegando a 0 quando os valores de pH são superiores a 5,5 (Figura 9; Melo & Alleoni, 2019). O equilíbrio químico da dissolução dos óxidos de alumínio e liberação de  $H^+$  está descrita abaixo:



A MOS também complexa alumínio, que pode ser solubilizado com a alteração do equilíbrio do meio. A atividade biológica também contribui através

da oxidação da matéria orgânica, produzindo CO<sub>2</sub>, que reage com a água e forma ácido carbônico (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), que se dissocia e libera H<sup>+</sup> (Souza *et al.*, 2007). Outro ponto importante é a calibração do método de recomendação de calagem, que geralmente tem maior dificuldade de estimar a acidez potencial em solos mais tamponados (maior teor de argila e MOS), como é o caso do Latossolo Bruno avaliado no presente estudo (Brunetto *et al.* 2019).

Além disso, o uso inicial do solo (campo nativo ou semeadura direta de grãos) pode ter afetado a forma como o calcário corrigiu a acidez em profundidade. O FT e o CX tiveram aumentos de pH até os 30 cm já no segundo ano. Isso pode estar relacionado com o uso anterior do solo antes do experimento. Ambos os solos já eram cultivados anteriormente, recebendo aplicação de calcário, o que não ocorreu no LB que era mantido sob campo nativo. Solos que já receberam calcário previamente tem uma facilidade maior de correção da acidez quando se aplica calcário novamente, o que facilita o avanço em profundidade, visto que, para que a frente de correção avance é necessário que as camadas superficiais estejam corrigidas (Bellinaso *et al.*, 2021). Ainda, após o corretivo ser aplicado, o processo de reacidificação do solo é bastante lento, podendo ultrapassar os 24 anos para retornar as condições naturais de acidez (Vargas *et al.*, 2019).

O método de incorporação do calcário também influencia na dinâmica de correção da acidez em profundidade. A escarificação do solo é uma prática menos agressiva para a estrutura do solo quando comparada com a grade de disco (Boller, 1996; Camara & Klein, 2005). Contudo, estudos demonstram que as operações mais intensas, utilizando operações de gradagem, neutralizam a acidez em profundidades maiores (Ciotta *et al.*, 2004; Kaminski *et al.*, 2005; Klein *et al.*, 2007). Enquanto que a escarificação se mostra menos eficiente em incorporar o calcário em profundidade, causando apenas uma pequena incorporação até a metade da operação (Klein *et al.*, 2007). Esse efeito foi observado nas diferenças de neutralização da acidez em profundidade entre o LB, cuja incorporação foi realizada com escarificação, e CX e FT, que receberam incorporação através de operações de gradagem (Figura 4).

A aplicação superficial do calcário reduziu a acidez do solo em profundidade após o segundo ano, mas não elevou o pH para valores acima de 5,0 em profundidades maiores que 15 cm. Isso mostra que essa estratégia pode

não ser suficiente para neutralizar a acidez e o alumínio em camadas mais profundas, especialmente em curtos períodos de tempo (Caires *et al.*, 2016; da Costa *et al.*, 2016; Nunes *et al.*, 2019; Bellinaso *et al.*, 2021). Além disso, valores de pH abaixo de 5,0 em profundidades inferiores a 15 cm dificultam o crescimento radicular, causando menor aporte e, conseqüentemente, menor criação de bioporos. Os bioporos criados pelos sistemas radiculares das plantas facilitam a migração do calcário para camadas mais profundas do solo. Assim, a correção da acidez em profundidade se torna um processo mais lento e gradual (Li *et al.*, 2019; Condon *et al.*, 2021).

A incorporação do calcário fez com que os valores de pH fossem mais homogêneos ao longo das camadas avaliadas no perfil. Ainda, essa estratégia elevou o pH do solo a valores maiores que 5,0 até os 25 cm no FT e no CX no segundo ano. A aplicação do corretivo, seguida da incorporação dele ao solo, faz com que a área de contato dele com o solo seja aumentada, garantindo maior umidade, facilitando as reações de solubilização e neutralização, o que proporciona seus efeitos mais rapidamente (Gallo & Catani, 1954; Ernani *et al.*, 2004; Dumale *et al.*, 2011; Bellinaso, 2019).

Mesmo apresentando maior custo operacional, a incorporação do calcário garantiu redução da acidez ativa e potencial do solo, além de precipitar boa parte do  $Al^{3+}$  trocável (Caires, 2005; Bellinaso, 2019; Rheinheimer *et al.*, 2024). Dessa forma, a incorporação proporciona controle da acidez e do Al tóxico ao longo do tempo nas camadas mais profundas. Esse efeito foi visualizado especialmente em LB aos 6 meses após a calagem, com a redução da saturação por Al (Figura 9; Figura 12) em profundidade e aumento da V% (Figura 13). Quando a acidez ativa é reduzida pela incorporação do calcário ao solo, a acidez potencial também passa a ser reduzida drasticamente, principalmente na camada 0-20 cm, contribuindo para a ação de neutralização das camadas mais profundas, visto que, a migração dos íons neutralizadores é favorecida pela diminuição da acidez potencial do solo (Rheinheimer, 2000; Bellinaso, 2019). Nesse sentido, quando o solo já foi devidamente corrigido com aplicação de calcário incorporado, a aplicação de calcário de maneira superficial torna-se uma boa opção para ser utilizada em SPD já consolidado, preservando todos os atributos do solo que seriam perdidos em caso de revolvimento (estrutura de solo e matéria orgânica; Rheinheimer *et al.*, 2024). Contudo, essa forma de aplicação

pode apresentar limitações em situações em que a correção do solo não foi realizada, encontrando condições de acidez, sendo necessária a aplicação de doses maiores e de um tempo maior para que haja uma correção adequada em profundidade (Caires, 2013; Bellinaso, 2019; Rheinheimer *et al.*, 2024). Assim, locais onde a implantação do SPD não foi realizada de maneira correta ou houve a reacidificação do solo, a interrupção do SPD através da correção com calcário incorporado se torna uma opção viável, visto que, a acidez do solo é um dos fatores que mais contribui para o desenvolvimento das culturas. Após o solo ser corrigido, faz-se a retomada do SPD para recuperar seus atributos físicos e biológicos. A partir daí, a manutenção do solo para impedir a reacidificação pode ser feita de maneira superficial. Como o solo já foi corrigido com a incorporação, a manutenção da correção com aplicação superficial vai apresentar melhores efeitos e condições de avançar em profundidade, podendo atingir camadas mais profundas (abaixo dos 20 cm).

A relação encontrada entre o pH em água do solo com a saturação por Al e saturação por Ca+Mg+K estão de acordo com a literatura. O aumento do pH do solo causa redução do Al, que é precipitado na forma de óxido, liberando as cargas que ocupava na CTC do solo (Melo & Alleoni, 2019). Com a diminuição do Al, as cargas passam a ser ocupadas por nutrientes como Ca, Mg e K (Melo & Alleoni, 2019).

## **2. Efeito de diferentes estratégias de aplicação de calcário e P e K na disponibilidade de nutrientes e produtividade de culturas**

### **2.1 Disponibilidade e distribuição de nutrientes**

Os valores de P disponível foram influenciados pela calagem, adubação, profundidade de solo amostrada e pela interação entre esses três fatores em apenas no Plintossolo aos 18 meses após o início do experimento (Tabela 4). O mesmo ocorreu para o K disponível no Latossolo, aos 6 meses após a calagem. No Cambissolo, em ambos os anos avaliados, não houve diferença significativa no P disponível para nenhum dos fatores experimentais. Do mesmo modo, não houve diferença significativa no P e no K disponíveis para o Latossolo aos 18 meses após o início do experimento. No Plintossolo, em ambos os anos

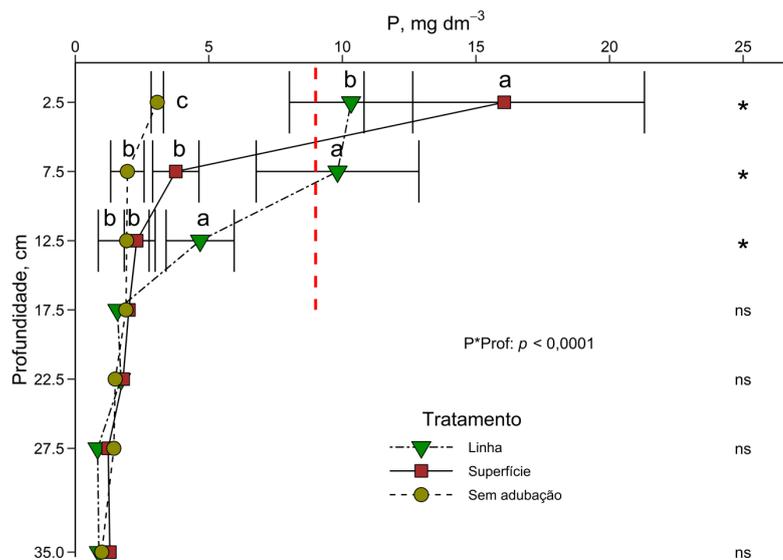
avaliados, houve interação entre as estratégias de calagem e adubação para o K disponível. Esse mesmo efeito foi visualizado no mesmo solo para o P disponível, mas se restringiu ao primeiro ano de avaliação (6 meses após a calagem; Tabela 4)

**Tabela 4.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores no teor de P e K disponível, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háptico de Curitibaanos-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).

Variável	Local	Mês após instalação do experimento (ano)	Estratégia de adubação (Adub)	Estratégia de calagem (Calc)	Camada de solo (Prof)	Calc x Prof	Adub x Prof	Calc x Adub	Calc x Adub x Prof
P disponível por Mehlich-1	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	ns	**	ns	**	ns	ns
		18 meses (2022)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Curitibaanos (CX)	6 meses (2021)	-	-	-	-	-	-	-
		18 meses (2022)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	**	ns	**	*	ns
		18 meses (2022)	**	**	**	**	**	**	**
K disponível por Mehlich-1	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**	**	**	**	**
		18 meses (2022)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Curitibaanos (CX)	6 meses (2021)	-	-	-	-	-	-	-
		18 meses (2022)	-	-	-	-	-	-	-
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	ns	ns	ns	**	ns
		18 meses (2022)	**	**	ns	ns	ns	**	ns

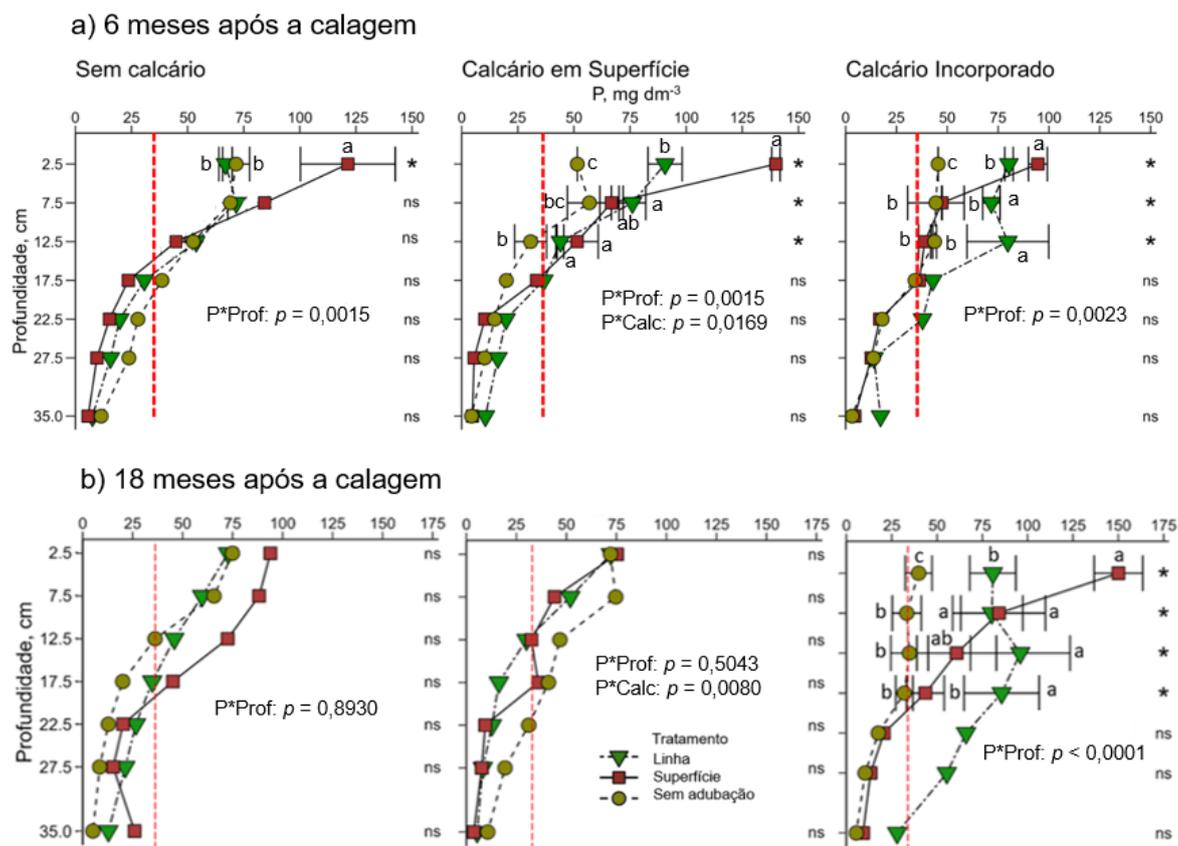
\*Significativo a  $p < 0,05$ ; \*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; ns: não significativo a 5%.

O teor de P disponível aos 6 meses após o início do experimento no Latossolo aumentou na camada 0-5 cm com ambas as estratégias de aplicação dos fertilizantes (Figura 9; Tabela 4). Já nas camadas 5-10 e 10-15 cm, apenas a aplicação em linha aumentou o teor de P disponível (Figura 9).



**Figura 9.** Efeito da aplicação superficial e na linha de semeadura no teor de P disponível até 40 cm de profundidade no Latossolo Bruno de Palmas, PR, aos 6 meses após o início do experimento.

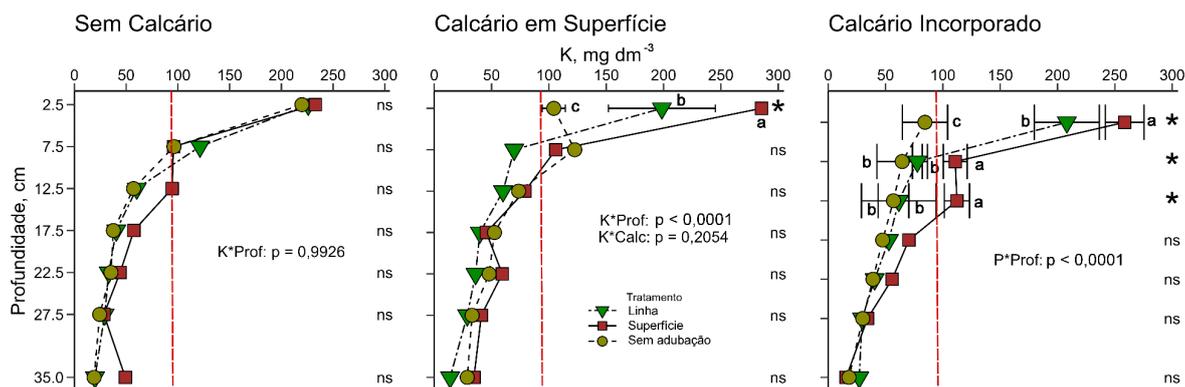
No Plintossolo Argilúvico (FT) a aplicação superficial dos fertilizantes aumentou o teor de P disponível na camada 0-5 cm, independentemente da estratégia de calagem (Figura 10). Entretanto, quando não há aplicação de calcário, os efeitos se restringem a camada 0-5 cm, enquanto que em ambas as estratégias de aplicação de calcário os efeitos de aumento de P vão até 15 cm de profundidade. Nas camadas 5-15 cm o tratamento em linha aumenta o P disponível em comparação ao controle. Aos 18 meses após o início do experimento as alterações nos valores de P só ocorrem quando o calcário é incorporado ao solo. Neste caso, a aplicação superficial de P aumenta o P disponível na camada 0-5 cm, enquanto que o tratamento em linha aumenta os valores de P até os 20 cm em comparação ao controle (Figura 10).



**Figura 10.** Efeito da aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de P disponível até 40 cm de profundidade no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, RS, aos 6 (a) e aos 18 meses (b) após o início do experimento. A linha vermelha tracejada indica o nível crítico do solo (CQFS – RS/SC, 2016).

O teor de P disponível não foi alterado no Cambissolo Háplico (CX) no ano que foi realizada a avaliação, independentemente das estratégias de fertilização e calagem ( $p > 0,05$ ; Tabela 4).

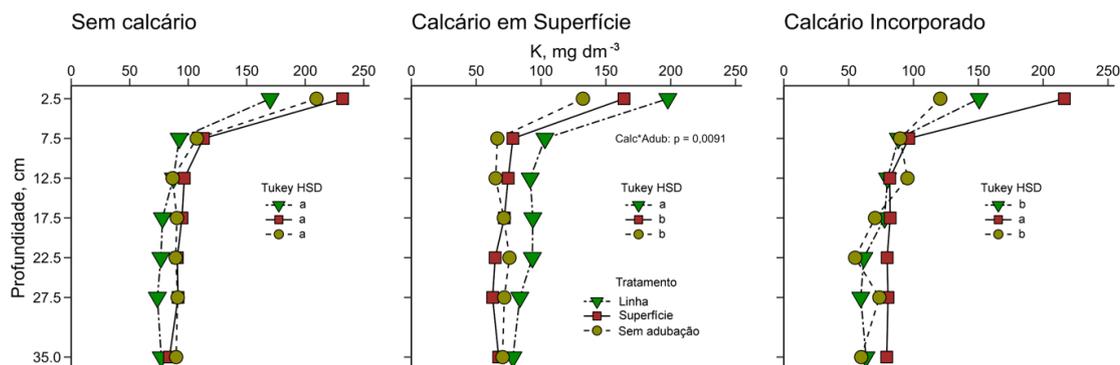
O teor de K disponível no LB, após 6 meses do início do experimento, só foram alterados quando foi aplicado calcário. Entretanto, quando o calcário foi aplicado superficialmente a aplicação superficial de K elevou os teores do nutriente nos primeiros 5 cm, enquanto que a incorporação do calcário levou ao aumento da disponibilidade de K até os 15 cm com a aplicação de K em superfície (Figura 11).



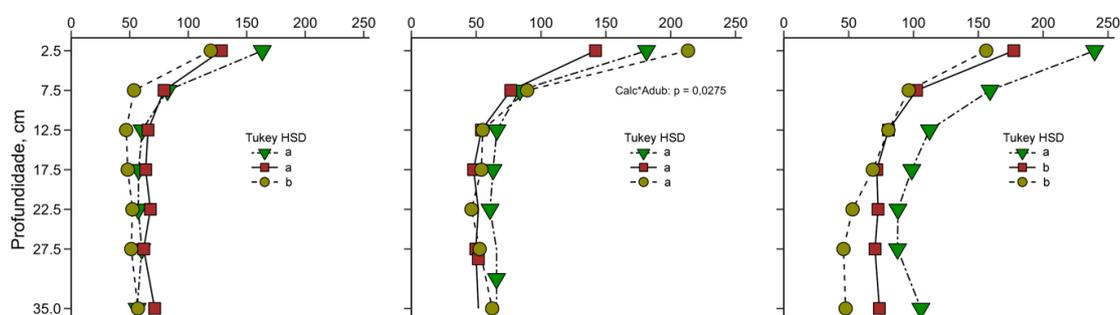
**Figura 11.** Efeito da interação entre a aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de P disponível no Latossolo Bruno de Palmas, PR, aos 6 meses após o início do experimento. A linha vermelha tracejada indica o nível crítico do solo (CQFS – RS/SC, 2016).

No FT houve efeito simples entre a estratégia de aplicação dos fertilizantes e calcário (Figura 12; Tabela 4). Quando o calcário foi incorporado a aplicação superficial de K aumentou o K disponível. Quando a aplicação do calcário foi superficial a aplicação do K em linha aumentou a disponibilidade de K. Quando não houve aplicação e calcário também não houve diferenças entre as estratégias de aplicação dos fertilizantes. Assim como aos 6 meses após o início do experimento, aos 18 meses no FT houve apenas efeito simples entre a estratégia de fertilização e aplicação de calcário (Figura 12; Tabela 4). Quando o calcário foi incorporado a aplicação em linha dos fertilizantes aumentou o K disponível ( $p = 0,0275$ ; Figura 18; Tabela 4).

a) 6 meses após a calagem



b) 18 meses após a calagem



**Figura 12.** Efeito da interação entre a aplicação superficial e na linha de semeadura da adubação e a aplicação superficial e incorporada do calcário no teor de K disponível no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, RS, aos 6 (a) e aos 18 meses (b) após o início do experimento.

Em todos os locais, foi possível verificar um forte gradiente vertical de disponibilidade de P e K, devido as aplicações superficiais, com teores mais elevados na primeira camada e com redução da disponibilidade nas camadas seguintes, o que é esperado em SPD (Martins *et al.*, 2014; Joris *et al.*, 2016; Tiecher *et al.*, 2017). Tanto o P quanto o K mostraram uma dinâmica de baixa mobilidade no solo, com os efeitos ficando restritos às primeiras camadas de solo, devido a adsorção com alta energia pela fase sólida do solo (Bellinaso, 2019).

Em concordância com Bellinaso (2019), a aplicação superficial de P aumentou os teores de P na camada 0-5 cm, não havendo diferença nas camadas mais profundas, demonstrando que o incremento de P limitou-se a área de deposição do fertilizante fosfatado. A distribuição mais homogênea do P em profundidade (disponibilidade semelhante entre as camadas de solo), que se deu

quando o P foi aplicado em linha, maximiza a exposição das raízes a camadas de solo mais ricas do nutriente, favorecendo sua absorção pelas plantas devido a maior superfície de contato com o P (Bray, 1954; Schjorring & Nielsen, 1987 apud Gahoonia *et al.*, 1997; Bellinaso, 2019; Bellinaso *et al.*, 2021). A aplicação superficial elevou os teores de P no LB acima do nível crítico apenas nos primeiros 5 cm de solo, enquanto que a aplicação em linha proporcionou esse efeito até os 15 cm (CQFS RS/SC, 2016). A baixa mobilidade do P está associada aos efeitos de adsorção do nutriente, principalmente no caso do LB que apresenta elevado teor de argila e predomínio de óxidos de ferro de maior reatividade (goethita, hematita e gibbsita, Figura 3; Fink *et al.*, 2016). No caso do FT, apesar de haver diferenças entre os tratamentos, os valores já estavam acima do nível crítico. Nesse caso, os sítios de adsorção de P já estavam ocupados e, o P aplicado pode ficar em uma fração mais lábil ou ser disponibilizado prontamente na solução do solo (Tiecher *et al.*, 2012). Esse efeito fica mais visível quando se observa a diferença entre os teores disponíveis de cada solo, onde, enquanto no LB os maiores teores de P não ultrapassam 25 mg kg<sup>-1</sup>, no FT eles passam de 150 mg kg<sup>-1</sup>. Isso ocorre devido a textura e mineralogia dos solos ser contrastante. Solos com predomínio de mineralogia oxidica adsorvem maiores teores de P, fazendo com que os teores disponíveis sejam mais baixos que solos com menores concentrações de óxidos (Kou *et al.*, 1999; Lei *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2000; Fink *et al.*, 2016). O LB tem elevado teor de argila (620 g kg<sup>-1</sup>), com presença de óxidos de ferro (goethita e hematita) e de óxidos de alumínio (gibbsita), extremamente reativos e que adsorvem grandes quantidades de P (Figura 3; Kou *et al.*, 1999; Lei *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2000; Fink *et al.*, 2016). No caso do FT, o teor de argila é menor (170 g kg<sup>-1</sup>) e essa argila tem predomínio de caulinita e argilominerais 2:1, sem predomínio de óxidos como nos outros solos (Figura 3), fazendo com que a disponibilidade de P nesse solo seja maior.

A mineralogia também tem influência na disponibilidade de K (Douglas, 1977). Enquanto que no LB a baixa mobilidade e as diferenças restritas do K podem ser devido aos altos teores naturais de K, no FT esse efeito pode ter sido devido a presença de argilominerais 2:1 (EHE e VHE; Figura 3). Mesmo a aplicação em linha do K tendo elevado os teores nos primeiros 5 cm em 6 meses após o início do experimento e 10 cm em 18 meses após o início do

experimento, em profundidade houve resultados semelhantes ao aplicado em superfície e na testemunha. Isso mostrou que o K teve baixa mobilidade no solo, visto que, o K adicionado via fertilização pode ter sido adsorvido nas entrecamadas dos argilominerais 2:1 desse solo, efeito demonstrado na literatura (Douglas, 1977; Ernani *et al.*, 2007; Alves *et al.*, 2019).

## 2.2 Produtividade das culturas

A produtividade de grãos foi influenciada pela calagem, adubação e pela interação entre esses dois fatores em todos os locais e em ambos os anos de avaliação (Tabela 5).

**Tabela 5.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores na produtividade de grãos, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).

Variável	Local	Safra	Estratégia de adubação (Adub)	Estratégia de calagem (Calc)	Calc × Adub
Produtividade	Palmas (LB)	2020/2021	**	**	**
		2021/2022	**	**	**
	Curitibanos (CX)	2020/2021	**	**	**
		2021/2022	**	**	**
	Eldorado (FT)	2020/2021	**	**	**
		2021/2022	**	**	**

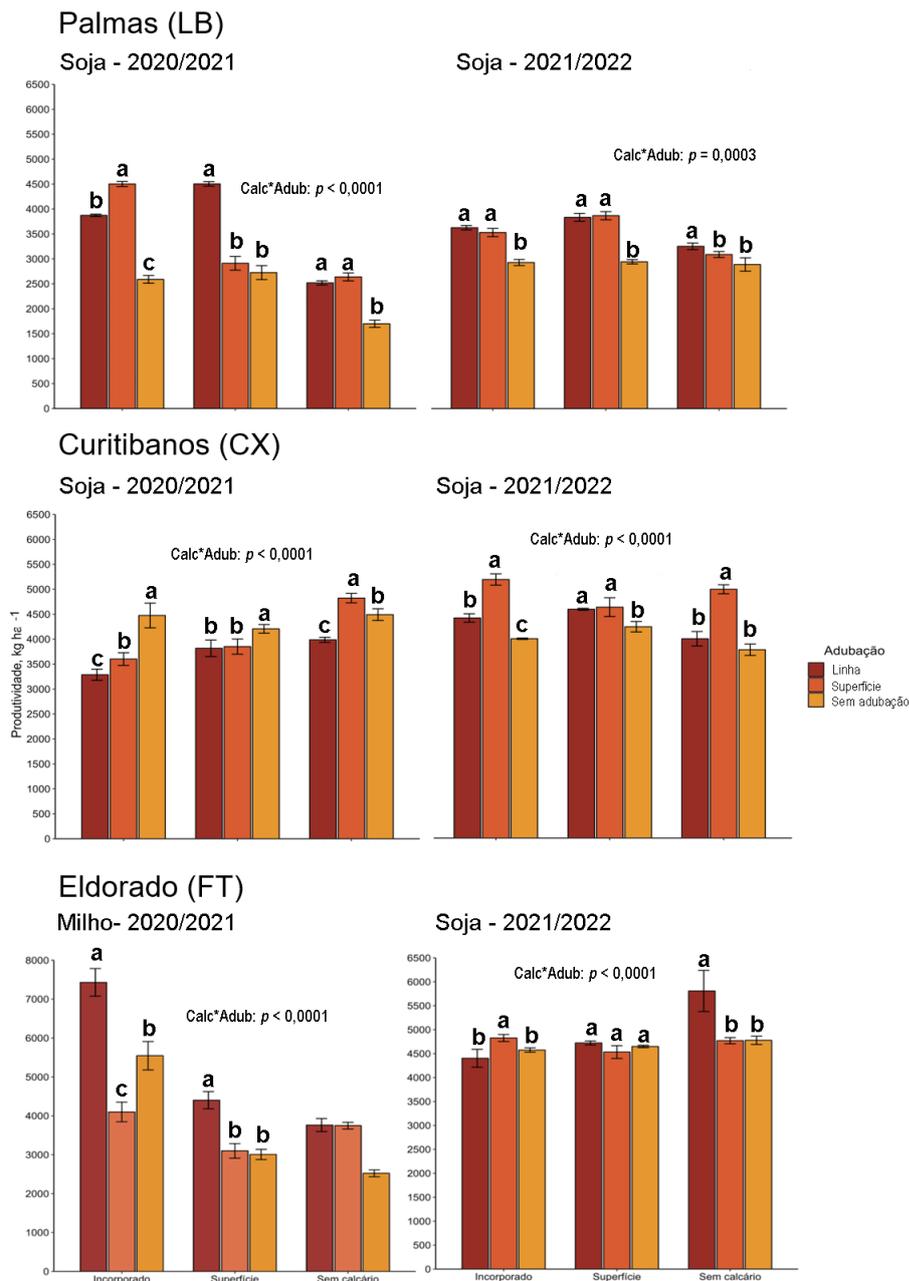
\*Significativo a  $p < 0,05$ ; \*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; ns: não significativo a 5%.

As maiores produtividades de LB na safra 2020/2021 foram alcançadas com a aplicação superficial dos fertilizantes quando o calcário foi incorporado ou com a aplicação em linha, quando o calcário foi aplicado em superfície (Figura 13). Na safra de 2021/2022 a produtividade da soja teve diferenças menos expressivas entre os tratamentos, mas ainda houve interação entre a estratégia de calagem e fertilização (Figura 13;  $p = 0,0003$ ; Tabela 5). A aplicação superficial de calcário apresentou as maiores produtividades, tanto para fertilização em superfície quanto para linha. A aplicação incorporada do calcário também garantiu produtividades maiores do que a testemunha, independente da forma de aplicar P e K (Figura 13).

Na produtividade de milho da safra 2020/2021 no FT, a aplicação de P e

K superficial foi superior aos demais tratamentos, tanto quando o calcário foi incorporado, quanto sem aplicação de calcário, alcançando as maiores produtividades em ambos. Já na safra 2021/2022, o FT recebeu a cultura da soja, cuja produtividade apresentou diferenças menos expressivas entre todos os tratamentos, mas houve efeito das interações corretivo e fertilizante (Figura 13;  $p < 0,0001$ ; Tabela 5). Inesperadamente a produtividade foi maior quando não foi aplicado calcário e a aplicação dos fertilizantes foi em linha (Figura 13).

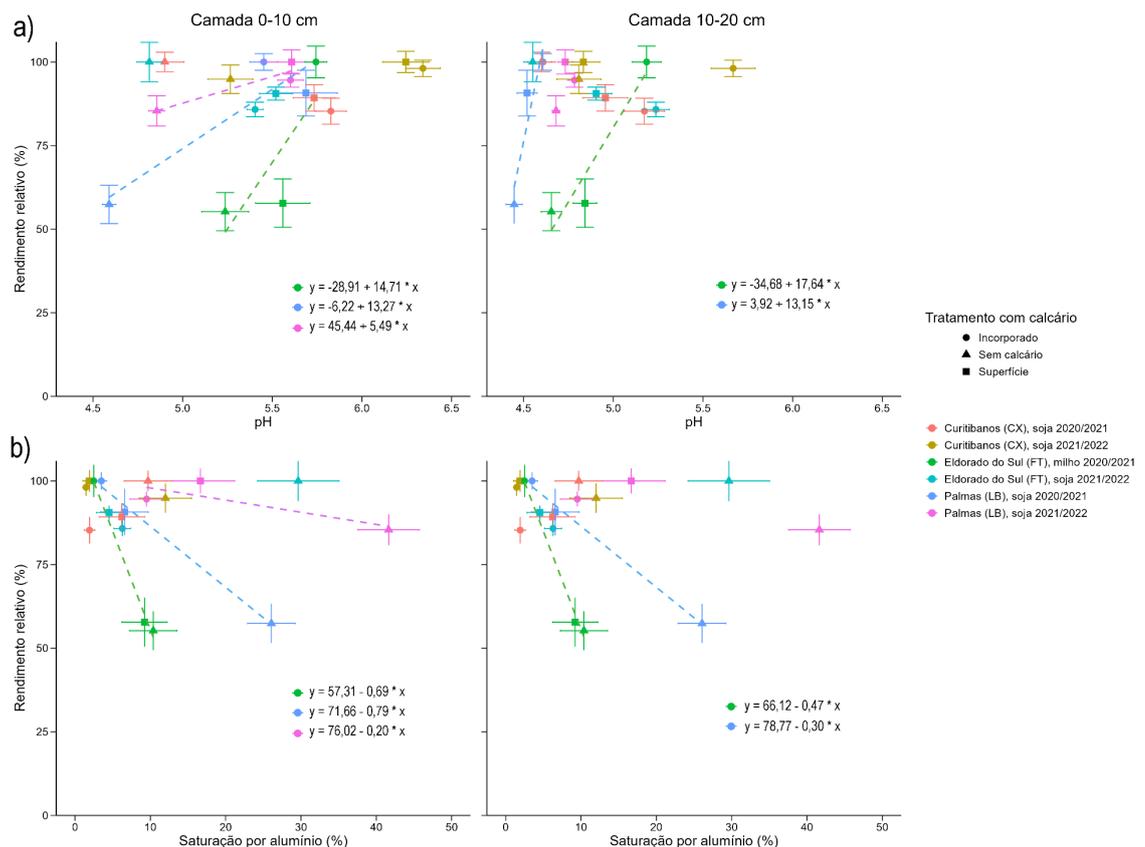
No CX, na safra de soja 2020/2021, inesperadamente o tratamento sem calcário e com P e K em superfície foi o que mais produziu. Outra diferença inesperada foi de que, em todas as estratégias de aplicação de calcário, a testemunha (sem aplicação de P e K) foi superior ao tratamento linha e/ou superfície (Figura 13). Ainda no CX, na safra 2021/2022, a aplicação de calcário incorporado com P e K em superfície alcançou a maior produtividade, juntamente com P e K em superfície quando não há aplicação de calcário (Figura 13).



**Figura 13.** Produtividades da cultura da soja cultivada em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), 6 e 18 meses após a calagem, em um Cambissolo Háplico de Curitibaanos-SC (CX) aos 6 e 18 meses após a calagem, em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT) aos 18 meses após a calagem e da cultura do milho em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT) aos 6 meses após a calagem.

Foi avaliado também a relação entre o rendimento relativo com as variáveis de solo em algumas camadas diagnósticas dos solos (e.g., 0-10 e 10-20 cm). Houve uma relação significativa entre o pH do solo em água e a saturação por Al na camada 0-10 cm no LB com o rendimento relativo da soja nas safras 2020/2021 e 2021/2022, e no Plintossolo para o milho safra

2020/2021 (Figura 14). Na camada 10-20 cm, apenas LB e FT na safra 2020/2021 tiveram relação entre alterações no rendimento relativo em função do pH ou da saturação por Al. Em todos os casos, o aumento de pH causado pela aplicação de calcário reflete em aumentos no rendimento relativo. Ainda, a aplicação de calcário reduz a saturação por Al e leva ao aumento do rendimento relativo (Figura 14). O tratamento com incorporação do calcário foi o que proporcionou os maiores rendimentos relativos. Além disso, o rendimento relativo de LB na safra 2021/2022 tem aumentos menores em função do pH em água ( $a = 5,49$ ) e da saturação por alumínio ( $a = -0,20$ ) quando comparado com LB ( $a = 13,27$ ;  $a = -0,79$ ) e FT ( $a = 14,71$ ;  $a = -0,69$ ) da safra 2020/2021 na camada 0-10 cm (Figura 14). As demais variáveis de solo, como teor de P e K, não se correlacionaram significativamente com o rendimento relativo em nenhuma das camadas diagnósticas avaliadas ( $p > 0,05$ ).



**Figura 14.** Relação entre rendimento relativo e o pH em água (a) e entre o rendimento relativo e a saturação por alumínio (b) nas camadas 0-10 e 10-20 cm aos 6 e 18 meses após a aplicação de calcário em superfície e incorporado no solo em um Latossolo Bruno de Palmas, Paraná, um Cambissolo Háplico de Curitiba, Santa Catarina e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul, Rio

Grande do Sul. A linha tracejada indica a linha de tendência da regressão, a partir dos tratamentos significativos.

De maneira geral, as diferenças mais expressivas nas produtividades foram encontradas no primeiro ano de cultivo. Isso ocorreu porque o primeiro ano de cultivo o solo estava em uma situação mais crítica de acidez e escassez de nutrientes principalmente no LB. Quando corrigidas essas situações, o segundo ano já apresentou diferenças menos expressivas por já apresentar teores altos de P e K. Assim, não havendo deficiências nutricionais, as plantas conseguem desenvolver suas funções plenamente. Os resultados do FT e CX, onde as produções nas testemunhas não diferiram ou foram superiores aos outros tratamentos, podem estar relacionados com os teores iniciais de P e K nesses solos. Ambos os solos apresentavam teores de P e K acima do nível crítico, mesmo no tratamento sem aplicação de fertilizantes, o que foi suficiente para alcançar as produtividades esperadas. Isso tem relação com o uso inicial da área antes da implantação do experimento (Figura 2). Tanto o FT, quanto o CX, eram áreas cultivadas antes do experimento e já recebiam aplicação e fertilizantes. No segundo ano o CX apresentou diferenças mais expressivas quando houve aplicação de fertilizantes, possivelmente porque os nutrientes que havia no solo foram consumidos no primeiro ano e na entre safra, diminuindo sua disponibilidade e precisando ser repostos (principalmente o K, que não foi aplicado no CX). Quando se relacionou o rendimento relativo com as variáveis pH em água e saturação por Al do solo é possível ver que de maneira geral há diminuição na produtividade com o aumento da saturação por Al e redução do pH em água. Isso ocorre especialmente porque em pH mais baixo e com elevada acidez potencial a saturação por Al é maior, o que impacta diretamente a produtividade das culturas (Bellinaso *et al.*, 2021; Rheinheimer *et al.*, 2024).

### **3. Diferentes estratégias de correção e manutenção com P e K**

Os valores de P disponíveis foram influenciados pelo modo de aplicação de fertilizantes, profundidade de solo amostrada e pela interação entre esses três fatores aos 6 meses após o início do experimento no Latossolo Bruno de Palmas, aos 18 meses após a calagem no Cambissolo Háplico de Curitiba e aos 6 e 18 meses após a calagem no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul

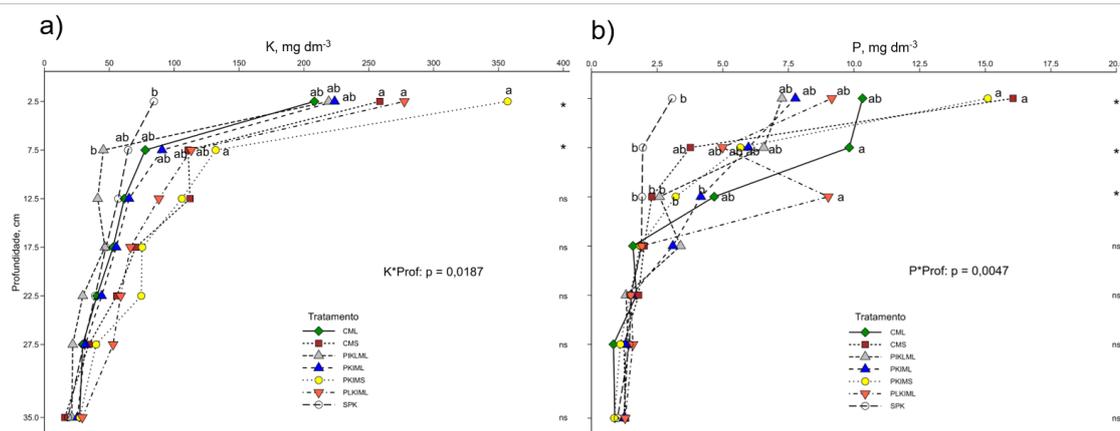
(Tabela 6). A disponibilidade de K também foi influenciada pelo modo de aplicação de fertilizantes, profundidade de solo amostrada e pela interação entre esses três fatores aos 6 meses após o início do experimento no Latossolo Bruno de Palmas e aos 6 e 18 meses após o início do experimento no Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul (Tabela 6). Após 18 meses da implantação, a disponibilidade de P e K não foi afetada pelas estratégias de aplicação de correção e manutenção dos fertilizantes em LB ( $p>0,05$ ; Tabela 6)

**Tabela 6.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e das interações entre fatores nos teores de P e K disponíveis, como resultado da análise da variância (ANOVA), nos experimentos instalados em um Latossolo Bruno de Palmas-PR (LB), em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC (CX) e um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS (FT).

Variável	Local	Mês após instalação do experimento (Ano)	Estratégia de adubação (Adub)	Camada de solo (Prof)	Adub × Prof
P disponível por Mehlich-1	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	ns	ns	ns
	Curitibanos (CX)	6 meses (2021)	ns	ns	ns
		18 meses (2022)	**	**	**
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**
K disponível por Mehlich-1	Palmas (LB)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	ns	ns	ns
	Curitibanos (CX)	6 meses (2021)	-	-	-
		18 meses (2022)	-	-	-
	Eldorado (FT)	6 meses (2021)	**	**	**
		18 meses (2022)	**	**	**

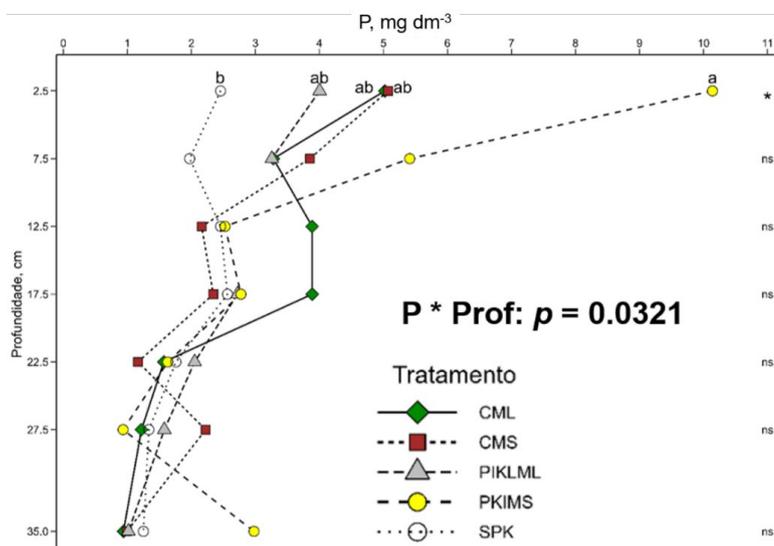
\*Significativo a  $p<0,05$ ; \*\*Significativo a  $p<0,01$ ; ns: não significativo a 5%.

Para a disponibilidade de K no Latossolo Bruno (LB), 6 meses após a implantação, quando o P e o K foram incorporados ao solo na correção e aplicados em superfície na manutenção houve maior disponibilidade de K até os 10 cm (Figura 15). Os teores de P aumentaram significativamente nos primeiros 5 cm nos tratamentos CMS e PKIMS, mas reduziram na camada 5-10 cm. O tratamento CML proporciona a distribuição dos fertilizantes até 10 cm, aumentando a disponibilidade de P nesta camada.



**Figura 15.** Teor de potássio (a) e fósforo (b) disponíveis em um Latossolo Bruno de Palmas-PR, aos 6 meses da implantação, afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade.

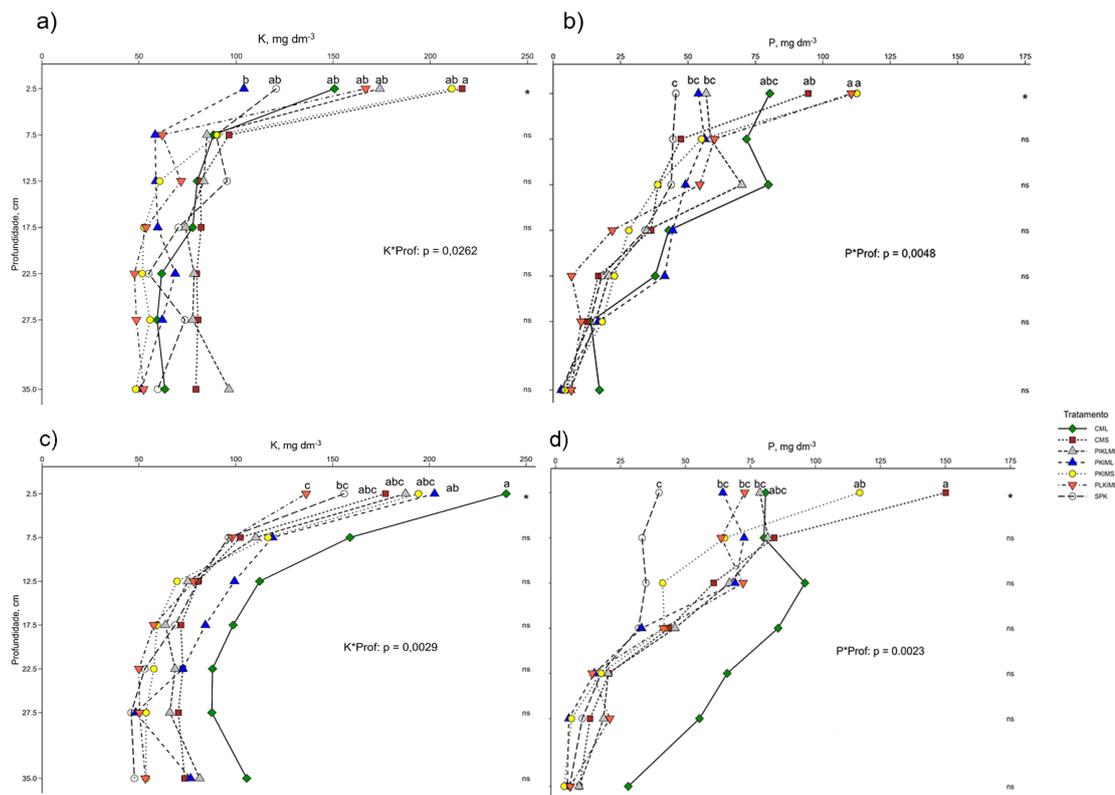
No CX, 18 meses após a implantação, apenas PKIMS diferiu de SPK, aumentando os teores de P disponível na camada 0-5 cm (Figura 18;  $p = 0,0321$ ; Tabela 6).



**Figura 16.** Teor de fósforo disponível em um Cambissolo Háplico de Curitiba-SC, 18 meses após a implantação, afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade.

Para o FT, aos 6 meses da implantação, quando a correção e a manutenção foram feitas em superfície, a disponibilidade de K na camada

superficial foi maior do que quando a correção foi feita incorporada e a manutenção em linha (Figura 16). Para os teores de P no FT, 6 meses após a implantação, PKIMS e PLKIML aumentam a disponibilidade de P na camada 0-5 cm em comparação a não aplicação de P e K, PKIML e PIKLML. CMS aumentou os teores de P na primeira camada em comparação a SPK. Aos 18 meses após a implantação, a aplicação de P e K de correção e manutenção em linha aumentou o teor de K disponível em relação a SPK e PLKIML (Figura 16). Para o P também houve aumento apenas na camada 0-5 cm, onde CMS aumentou a disponibilidade de P em relação aos outros tratamentos, com exceção de PKIMS.



**Figura 17.** Teor de potássio e fósforo disponíveis em um Plintossolo Argilúvico de Eldorado do Sul-RS aos 6 meses após a implantação (a e b, respectivamente) e aos 18 meses após a implantação (c e d, respectivamente), afetado pelas formas de aplicação de fertilizante no sulco de semeadura e à lanço na superfície do solo, até 40 cm de profundidade.

Como esperado a aplicação superficial dos nutrientes aumentou a disponibilidade deles na primeira camada de solo, mas a disponibilidade diminuiu

com o aumento da profundidade, causando um gradiente (Klepker, 1991; Rosolem *et al.*, 2003; Lupwayi *et al.*, 2005). Isso ocorre porque a difusão do P e do K é um processo lento, o que faz com que os nutrientes não sejam transportados com facilidade no perfil do solo (Wiethölter, 2000; Cantarella & Duarte, 2004). A literatura diz ser possível que adubações mais profundas, com incorporação dos nutrientes ao solo, possam melhorar a disponibilidade e o crescimento radicular em profundidade (Mallarino, 1997; Kluthcouski & Stone, 2003). Contudo, esse comportamento não foi observado pelos dados obtidos. Tanto para P quanto para K, a adubação de manutenção feita de maneira superficial parece ter relação com as maiores disponibilidades dos nutrientes na primeira camada, em comparação a outras estratégias de aplicação. Esse resultando também contrariou a literatura, onde, não haviam diferenças entre a aplicação a lanço e na linha (Wilhelm & White, 2004).

Apesar dessas diferenças entre as estratégias, o K disponível na camada 0-10 cm de todos os solos foi igual ou superior ao nível crítico recomendado para cada solo (CQFS RS/SC, 2016). Isso porque o teor de K inicial de cada solo já era naturalmente alto, sendo também suficiente para suprir as necessidades das culturas. O P, no entanto, teve uma dinâmica variada em cada tipo de solo, muito em função da textura e da mineralogia. No FT, independentemente da estratégia de aplicação o P disponível até os 15 cm era superior ao nível crítico. Essa maior disponibilidade de P ocorreu principalmente porque esse solo é arenoso e não apresenta minerais do tipo óxidos de ferro e alumínio. Já nos solos de textura argilosa e com presença de óxidos, o comportamento diferiu. No CX, o nível crítico foi atingido apenas quando a correção foi incorporada e a manutenção foi superficial. Possivelmente, a incorporação da correção preencheu a superfície dos óxidos e, quando a manutenção foi aplicada na superfície foi suficiente para aumentar a disponibilidade (Rheinheimer *et al.*, 2008). O LB atingiu o nível crítico nas estratégias com aplicação da manutenção em superfície e com correção e manutenção na linha, mas apenas nos 5 cm. Apenas a aplicação em linha da correção e manutenção conseguiu atingir o nível crítico até os 10 cm, proporcionando uma distribuição mais homogênea do nutriente. Esses resultados mostram a baixa mobilidade de P nos solos com predomínio de óxidos de ferro e alumínio. Isso porque o P se move no solo por difusão e, essa movimentação é extremamente dependente da mineralogia do solo (Hadgu *et*

*al.*, 2014). Fink *et al.* (2016b) avaliaram a dessorção de P em solos subtropicais, percebendo que a composição e os tipos de minerais do solo interferem nos processos de adsorção do P. Assim, solos com diferentes mineralogias tem relações de adsorção e dessorção distintas, onde, solos argilosos com teores elevados de óxidos adsorvem mais P.

## CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Os resultados destacam a complexa interação entre a aplicação de calcário, profundidade do solo e tipo de solo e método de incorporação na modificação do pH e na redução dos valores de acidez potencial. Notavelmente, a aplicação superficial de calcário no Latossolo Bruno demonstra eficácia consistente em elevar o pH na camada superficial (0-5 cm) ao nível desejado de 6,0 ao longo dos três anos de avaliação. No entanto, a eficácia desse método diminui nas camadas mais profundas. O Latossolo Bruno mostra reduções expressivas na acidez potencial, especialmente com o tratamento incorporado, enquanto no Plintossolo Argilúvico não se observam diferenças significativas entre as estratégias. A escarificação após aplicação de calcário é menos eficiente em corrigir a acidez do solo em profundidade do que a incorporação do calcário com gradagem profunda, efeito citado na literatura que possivelmente influenciou no estudo a partir das diferenças de neutralização da acidez em profundidade.

No Plintossolo Argilúvico, a aplicação superficial proporciona resultados significativos apenas no primeiro ano, enquanto a incorporação do calcário mostra efeitos mais pronunciados em profundidades maiores nos anos subsequentes. Por outro lado, no Cambissolo Háplico, ambas as estratégias de aplicação do calcário demonstram eficácia semelhante, elevando o pH até os 15 cm no primeiro ano e até os 30 cm no segundo ano.

Assim como para a acidez, a interação entre a mineralogia do solo e a mobilidade dos nutrientes foi claramente observada, destacando a importância de considerar tais características na prática agrícola. Dos solos estudados, notadamente o Latossolo Bruno com sua alta adsorção de P, o Cambissolo Háplico sem alterações e o Plintossolo Argilúvico, com menor teor de argila e maior disponibilidade de P, exemplificam a diversidade de respostas aos fertilizantes em função de suas características intrínsecas.

Em relação a produtividade das culturas, as diferenças mais notáveis foram observadas no primeiro ano de cultivo, indicando a resposta positiva das plantas à correção de acidez e deficiências nutricionais. Entretanto, no segundo ano, quando as condições foram melhoradas, as diferenças entre os tratamentos foram menos pronunciadas, ressaltando a importância de um manejo adequado

desde o início do cultivo. A condição natural de fertilidade do solo no momento da implantação da área também demonstra muita influência no comportamento dos nutrientes e da produtividade das culturas.

A aplicação superficial de nutrientes é mais eficaz na promoção da disponibilidade desses nutrientes na camada superficial do solo, enquanto adubações mais profundas não demonstram benefícios significativos.

Embora as diferenças entre a adubação na linha de semeadura e à lanço sejam evidentes, é interessante notar que, em todos os solos, os níveis de potássio na camada de 0-10 cm são consistentemente iguais ou superiores aos níveis críticos recomendados. Essa observação sugere que, para o potássio, a fertilidade natural do solo é suficiente para atender às demandas das culturas, independentemente da estratégia de adubação adotada.

Por outro lado, a dinâmica do fósforo é mais variada, influenciada pela textura e mineralogia do solo. No Plintossolo Argilúvico, solo mais arenoso, a disponibilidade de fósforo foi alta, independentemente da estratégia de aplicação, enquanto nos solos argilosos com presença de óxidos (Cambissolo Háplico e Latossolo Bruno), a eficácia da adubação foi mais sensível à incorporação da correção.

## CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos desenvolvidos para compor esta dissertação oferecem informações relacionadas ao manejo de calcário e fertilizantes, considerando as características específicas de diferentes tipos de solo. No caso do Latossolo Bruno, a aplicação superficial de calcário demonstrou consistente eficácia ao longo de três anos, elevando o pH na camada superficial para o desejado valor de 6,0. Contudo, as plantas exploram uma área maior do que 5 cm de solo e, a aplicação superficial do corretivo foi muito lenta em aumentar o pH e reduzir a acidez potencial. Nesse sentido, para o Latossolo Bruno que estava em condição de campo nativo, recomenda-se a incorporação inicial do calcário e fertilizantes potássicos, com implantação de um Sistema Plantio Direto. Após a correção do solo em camadas mais profundas é possível que a manutenção nas condições de pH e fertilidade possa ser feita através de aplicações superficiais, no caso do calcário, e em linha, no caso dos fertilizantes.

No Plintossolo Argilúvico, a incorporação do calcário revelou-se mais eficaz em camadas mais profundas nos anos subsequentes, embora a aplicação superficial tenha proporcionado resultados significativos no primeiro ano nas camadas superficiais. Contudo, assim como no Latossolo Bruno, a recomendação inclui a incorporação como parte da estratégia de longo prazo, realizando a manutenção com a aplicação superficial. No que diz respeito aos fertilizantes neste solo, a distribuição mais eficiente de nutrientes nas camadas do solo continua ser encontrada através da aplicação em linha.

Para o Cambissolo Háplico, ambas as estratégias de aplicação de calcário demonstraram eficácia semelhante na elevação do pH nos primeiros dois anos, destacando a flexibilidade na escolha das estratégias. A escolha entre essas estratégias pode depender de considerações práticas, como logística e custos. Quanto aos fertilizantes, a disponibilidade dos nutrientes deste solo já era inicialmente alta, o que fez com que não houvesse muitas respostas às estratégias de aplicação. Contudo, quando a adubação de correção foi realizada com incorporação e a de manutenção em superfície, os teores de P na camada 0-5 cm aumentam em relação às outras estratégias. Assim, caso a área ainda não seja cultivada, realizar as correções com incorporação pode ser eficiente. Contudo, caso já haja um Sistema Plantio Direto consolidado, a aplicação dos

fertilizantes de maneira superficial ou na linha é suficiente para manter os nutrientes em nível satisfatório, tendo em vista as boas condições iniciais de fertilidade que o solo apresenta.

Assim, os três solos, na implantação de um Sistema Plantio Direto, podem ter melhor correção da acidez em camadas mais profundas se o calcário for aplicado de maneira incorporada ao solo. Ainda, os locais cuja incorporação foi realizada utilizando operações de gradagem parecem ter tido uma maior correção da acidez em profundidade. A manutenção da acidez com a aplicação de calcário superficial pode ser uma opção boa para os três locais, mas terá eficácia e velocidade de correção diferente em cada um, devemos levar isso em consideração. Quanto a adubação, apesar das aplicações superficiais aumentarem mais a disponibilidade do fósforo e potássio na camada 0-5 cm, a aplicação na linha garante a disponibilidade dos nutrientes melhor distribuição no perfil, podendo garantir isso até os 15 cm de profundidade no caso do Plintossolo Argilúvico. Dessa forma, as aplicações dos fertilizantes em linha são eficientes em disponibilizar os nutrientes e não necessitam revolvimento do solo e destruição da estrutura e agregação do mesmo.

Ademais, muito mais do que trazer respostas, este trabalho traz perguntas. Através dele é possível ver que algo que é tido como simples (aplicação de fertilizantes e corretivos), e que por vezes pensamos que as estratégias já estão consolidadas e bem definidas, pode ser muito mais complexo e envolver muitos fatores que não entendemos e/ou não controlamos. Outrossim, os locais utilizados tem condições específicas de solo, clima e de diversos outros fatores, fazendo com que não necessariamente os resultados que são mostrados aqui serão exatamente iguais em áreas com solo de mesma classificação. Para melhor compreender os fenômenos e resultados encontrados devemos buscar uma visão holística nos experimentos futuros. Deve-se pensar se estratégias como a incorporação, mesmo sendo melhores no âmbito químico, não trariam malefícios ao solo que, quando ponderados os ganhos, eles seriam pequenos ou nulos. Existem muitos processos e fenômenos que desconhecemos e/ou ignoramos que podem ter impacto muito significativo na maneira como manejamos o solo e, conseqüentemente, nos resultados que encontramos em questão de produtividade e sustentabilidade.



## Referências Bibliográficas

ALVES, L. A. *et al.* Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 351, p. 197-208, 2019.

ALVES, L. A. *et al.* Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, [art.] e0210125, 2022.

ANDRADE, A. T. *et al.* Organic residue, limestone, gypsum and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 349-355, 2002.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.

ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração do solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 349-353, 1992.

ARUNAKUMARA, K.K.I.U. *et al.* Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes - a review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, Seoul, v. 56, p. 1–9, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s13765-012-2314-z>.

ASSIS, J. *et al.* Phosphorus lability in a subtropical Acrisol under long-term integrated crop-livestock system: impacts of grazing management and cropping system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, [art.] e0220066, 2022.

ATTOE, O. J.; TRUOG, E. Exchangeable and acid-soluble potassium as regards availability and reciprocal relationships. **Soil Science Society of America, Proceedings**, Madison, v. 10, p. 81-86, 1945.

AZEVEDO, A. C. *et al.* Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 191-198, 1996.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Surface hydroxyl configuration of various crystal faces of hematite and goethite. **Journal of Colloid Interface Science**, Amsterdam, v. 177, p. 407-410, 1996.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, p. 733-750, 1983.

BARROW, N. J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 37, p. 787–830, 1999. DOI 10.1071/SR98115.

BELLINASSO, R. J. *et al.* Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil Research**, Collingwood, v. 60, n. 1, p. 33-49, 2021.

BELLINASSO, R. J. S. Formas de aplicação de fósforo sob calagem incorporada e superficial: efeito na acidez, disponibilidade de nutrientes e resposta das culturas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019.

BERNARDI, A. C. C. *et al.* Doses E Formas De Aplicação Da Adubação Potássica Na Rotação Soja, Milheto E Algodão Em Sistema Plantio Direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 158-167, 2009.

BERNER, R. A. **Principles of chemical sedimentology**. New York: McGraw Hill, 1971.

BERTOLAZI, V. T. *et al.* Impact of an integrated no-till soybean-beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 149, p. 67-74, 2017.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, 2020.

BLOOM, P. R.; SKYLLBERG, U. L.; SUMNER, M. E. Soil Acidity. *In*: TABATABAI, M. A.; SPARKS, D. L. (ed.). **Chemical Processes in Soils**. Madison: Soil Science Society Of America, 2005. p. 411-459.

BLOOM, P. R.; SKYLLBERG, U. L.; SUMNER, M. E. Soil Acidity. *In*: TABATABAI, M. A.; SPARKS, D. L. (ed.). **Chemical Processes in Soils**. Madison: Soil Science Society of America, 2005. p. 411-459.

BORDOLI, J. M.; MALLARINO, A. P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p. 27-33, 1998.

BORLAUG, N. E.; DOWSWELL, C. R. The acid lands: one of agriculture's last frontiers. *In*: MONIZ, A. C. *et al.* (ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Campinas/Viçosa: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 5-15.

BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 104, p. 196–204, 2015.

- BORTOLUZZI, E. C.; PARIZE, G. L.; KORCHAGIN, J.; SILVA, V. R. D.; RHEINHEIMER, D. D. S.; KAMINSKI, J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 262-271, 2014.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 960 p.
- BRAY, R. A nutrient mobility concept as soil-plant relationships. **Soil Science**, Baltimore, p. 9-22, 1954.
- BROGGI, F. *et al.* Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 32-38, 2010
- BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. Identification of Clay Minerals by X-ray Diffraction Analysis. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 1, n. 1, p. 119–129, 1980.
- BRUNETTO, G. *et al.* Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29 n. 4, 2005.
- CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. *In*: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. (ed.). **Tecnologias de produção de milho: economias, cultivares, biotecnologia, safrinha, adubação, quimigação, doenças, plantas daninhas e pragas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. p. 139-182.
- CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. W. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO<sub>3</sub>-N in subsoil. **Pedosphere**, Beijing, v. 26, p. 474–485, 2016.
- CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2013.
- CAIRES, E. F. *et al.* Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27–34, 1998.
- CAIRES, E. F. *et al.* Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 791–798, 2005.
- CAIRES, E. F. *et al.* Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 162, p. 68–77, 2016.
- CALEGARI, A. *et al.* Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 32–39, 2013.

CAIONE, G. *et al.* Modos de aplicação e doses de fósforo em cana-de-açúcar forrageira cultivada em latossolo vermelho amarelo. **Revista de Ciências Agro Ambientais**, Alta Floresta, v.9, n.1, p.12-22, 2011.

CASTILHOS, R. M. V. **Suprimento de potássio em solos cultivados com arroz irrigado e sua relação com mineralogia, formas e cinética de liberação**. 175 f. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

CASTRO, A. F. *et al.* Potássio disponível em horizontes superficiais de alguns solos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira: Série Agrônômica**, Rio de Janeiro, v.7, p. 75-80, 1972.

CERETTA, C. A. *et al.* Manejo da adubação. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 851-872.

CHAVES, E. *et al.* Reserva mineral de K por diferentes métodos em Argissolos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 1088-1099, 2015.

CHAO, T. T.; HARWARD, M. E. Nature of acid clays and relationships to íon activities and íon ratios in equilibrium solutions. **Soil Science**, Baltimore, v. 93, p. 246-253, 1962.

CHEN, J.; GABELMAN, W. H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 83, n. 3, p. 213-225, 2000.

CHERNOV, V. A. **The nature of soil acidity**. Madison: Soil Science Society of America, 1964. 178 p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Núcleo Regional Sul, 2004. 376 p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2015/16. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 6, n. 10, p. 1-113, jul. 2019.

CONDON, J.; BURNS, H.; LI, G. The extent, significance and amelioration of subsurface acidity in southern New South Wales, Australia. **Soil Research**, Collingwood, v. 59, n. 1, p. 1-11, 2020.

CONDON, J.; BURNS, H.; LI, G. The extent, significance and amelioration of subsurface acidity in southern New South Wales, Australia. **Soil Research**, Collingwood, v. 59, p. 1–11, 2021.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; FILHO, G. M.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 828-835, 2006.

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**, Amsterdam (Elsevier), v. 74, p. 119–132, 2016.

CONDON, J.; BURNS, H.; LI, G. The extent, significance and amelioration of subsurface acidity in southern New South Wales, Australia. **Soil Research**, Collingwood, v. 59, p. 1–11, 2021.

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.

CURI, N; KÄMPF, N. Caracterização do Solo. *In*: KER, J. C. *et al.* (ed.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 147-170.

DOUGLAS, L. A. Vermiculites. *In*: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1977. p. 259–292.

DUMALE, J. R. *et al.* SOC Turnover and Lime-CO<sub>2</sub> Evolution during Liming of an Acid Andisol and Ultisol. **Open Journal of Soil Science**, Irvine, v. 1, n. 2, p. 49–53, 2011.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Correção da acidez do solo**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2021.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: [s. n.], 2008. 130 p.

ERNANI, P. R. *et al.* Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos de carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 393-402, 2007.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F. S.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 889–901, 2004.

- FARIA, J. M. S. *et al.* applied sciences Aluminium, Iron and Silicon Subcellular Redistribution in Wheat Induced by Manganese Toxicity. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, [art.] 8745, 2021.
- FARINA, M. P. W. *et al.* Aluminum toxicity in corn at near neutral soil pH levels. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 2, p. 683-697, 1980.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL: FAEPE, 1994. 227 p.
- FURTINI NETO, A. E. *et al.* **Fertilidade do solo**. Trabalho de conclusão de curso. 252 f. (Especialização em Solos e Meio Ambiente) – Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 62–68, 2016a.
- FINK, J. R. *et al.* REVIEW Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 369–379, 2016b.
- FINK, J. *et al.* Phosphorus and Potassium Cycling, Biological Nitrogen Fixation in Soybean, and Soil Microbial Activity in an Oxisol Fertilized with Wastewater from Heparin Production. **Journal of soil science and plant nutrition**, Temuco, v. 23, p. 4438–4449, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01361-w>.
- FINK, J. R. *et al.* Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 36, p. 379-387, 2014.
- FINK, J. R. **Dinâmica de minerais pedogênicos e adsorção de fósforo em solos sob distintos usos e manejos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2012.
- FOUANI, A. K. *et al.* **Produtividade de soja submetida a diferentes formas de adubação**. 13 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Cesumar, Maringá, 2020.
- FUENTES-LLANILLO, R. *et al.* Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 208, [art.] 104877, 2021.
- GAHOONIA, T. S. *et al.* Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. **Plant and Soil**, The Hague, v. 191, n. 2, p. 181-188, 1997.
- GALLO, J.; CATANI, R. A. Solubilidade de Alguns Tipos de Calcários. **Bragantia Instituto Agrônomo**, Campinas, v. 13, n. 5, p. 63–74, 1954.

GEORGE T. S. *et al.* Organic phosphorus in the terrestrial environment: a perspective on the state of the art and J Soil Sci Plant Nutr future priorities. **Plant Soil**, The Hague, v. 427, p. 191–208, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3391-x>.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. *In*: ARAÚJO, Adelson Paulo; ALVES, Bruno José Rodrigues (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 8. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 141–189.

GOEDERT W. J. *et al.* **Relações quantidade-intensidade de potássio em solos do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Brasileira: Série Agronomia**, Brasília, DF, v. 10, p. 31-35, 1975.

GOLDBERG, S.; DAVIS, J. A.; HEM, J. D. The surface chemistry of aluminium oxides and hydroxides. *In*: SPOSITO, G. (ed.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton: CRC Press/Lewis Publication, 1996. p. 271-331.

GUARALDO, M. C. *et al.* Brasil é quarto maior produtor mundial de grãos e maior exportador de carne bovina, mostra estudo. **Embrapa [notícias]**, Brasília, DF, 1 jun. 2021.

HADGU, F. Study of Phosphorus Adsorption and Its Relationship with Soil Properties, Analyzed with Langmuir and Freundlich Models. **Agriculture, Forestry and Fisheries**, New York, v. 3, n. 1, p. 40, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.11648/j.aff.20140301.18>

HARGROVE, W. L. The solubility of aluminum-organic matter and its implication in plant uptake of aluminum. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, p. 179-181, 1986.

HARRIS, W. G. *et al.* Nonexchangeable potassium associated with hydroxy-interlayer vermiculite from coastal plain soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1486-1492, 1988.

HINSINGER, P. *et al.* Impact of roots, microorganisms and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. **Annual Plant Reviews online**, Hoboken, v. 48, p. 375-407, 2018. DOI 10.1002 / 9781119312994.apr0466.

HINZMANN, M. *et al.* Transformations of iron-bearing minerals during chemical reduction of a Brazilian kaolinitic Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, 2020.

HOLTZ, A. C.; CAMARGO, O. A. Spatial distribution and mineralogical composition of clay fractions in Brazilian soils developed from different parent materials. **Soil Science**, New Brunswick, N.J, v. 177, n. 3, p. 215–220, 2004.

HUANG, P. M. Feldspars, olivines, piroxenes and amphiboles. *In*: DIXON, J. B., *et al.* (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: SSSA, 1989. p. 975-1050.

HUANG, P. M.; WANG, M. K.; KÄMPF, N.; SCHULZE, D. G. Aluminum oxides. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G.(ed.). **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 261-289.

INDA, A. V. *et al.* Iron oxides dynamics in a subtropical Brazilian Paleudult under long-term no-tillage management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, Feb 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000100008>

INDA, A. V. *et al.* Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtaízil Brazilian oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 33–41, 2010. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000100004>.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 851-866, 2005.

INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil: 2021-2022**. Brasília, DF: INMET, 2022.

JACKSON, M. L. *et al.* Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments II. Chemical Weathering if layer silicates. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 16, p. 3-6, 1952.

JACKSON, E. F. *et al.* Métodos de aplicação e fontes de fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 11, n. 2, p. 92-97, 2016.

JENNY, H. Reflections on the soil acidity merry-go-round. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 25, p. 428-432, 1961.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation**: a system of quantitative pedology. New York: MacGraw Hill, 1941. p. 281.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, Â; R.; HALISKI, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, p. 162–177, 2016.

JORIS, H. A. W. *et al.* Phosphorus mobility and availability in long-term no-till managed soils: The key role of organic phosphorus. **Geoderma**, Amsterdam, v. 360, p. 114–233, 2020.

KAMINSKI, J. **Fatores da acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul**. 96 f. Dissertação (Tese de Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.; BARTZ, H. Proposta de nova equação para determinação do valor de H + Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC. *In*: ANAIS DA REUNIÃO ANUAL DA ROLAS, 23., 2001, Frederico Westphalen. **Anais [...]**. Frederico Westphalen: SBCS, 2001. p. 21-26.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D. D.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. D. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

KAMINSKI, J. *et al.* Acidez e calagem no sul do Brasil: Aspectos históricos e perspectivas futuras. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v. 5, p. 307-332, 2007.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. *In*: CURI, N. *et al.* (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2003. p. 1-54.

KÄMPF, N.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de Latossolos (Oxisols) e solos podzólicos da região nordeste do Planalto Sul-Riograndense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Caminas, v. 2, n. 1, p. 68-78, 1978.

KÄMPF, N. *et al.* Mineralogia de solos brasileiros. *In*: KER, J. C. *et al.* (ed.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. v. 1, p. 81-146.

KÄMPF, N. *et al.* Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (ed.). *mQuímica e mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1, p. 333-426.

KÄMPF, N.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de Latossolos (Oxisols) e solos podzólicos da região nordeste do Planalto Sul-Rio-Grandense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 2, p. 68-73, 1978.

KETCHESON, W. J. Effect of tillage on fertilizer requirements for corn on a silt loam soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 540-542, 1980.

KITAGAWA, Y.; MÖLLER, M. R. F. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 14, p. 201-228, 1979.

KITTRICK, J. A. The free energy of formation of gibbsite and  $Al(OH)_4$  from solubility measurements. **Soil Science Society of America, Proceedings**, Madison, v. 30, p. 595-598, 1966.

KLEPKER, D. **Distribuição de fósforo e de raízes no solo e sua relação com o estresse hídrico e o crescimento de milho**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 1996.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizers placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agriculture Science)**, Madison, v. 1, p. 111-115, 1993.

KLEPKERM, D. **Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de

Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 1991.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Principais fatores que interferem no crescimento radicular das culturas anuais, com ênfase no potássio. **Potafos Informes Agronômicos**, Piracicaba, n. 203, 2003.

KOU, C. *et al.* Study on the variety of wheat and peanut in utilization in different phosphorus compound. *China J. Soil Sci.*, New Brunswick, N.J, v. 30, [Art.]. 181184. 1999.

LAIR, G. J. *et al.* Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, p. 39-44, 2009.

LI, Y. *et al.* Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 19, p. 1393-1406, 2019.

LIMA, C. L. R. F. *et al.* Fertility Improvement of Highly Weathered Tropical Soils Using Biochar. **Pedosphere**, Beijing, v. 29, n. 2, p. 187–201, 2019.

LIU, J. *et al.* Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P. **Chinese Journal of Applied Ecology**, Shenyang, v. 11, p. 360-364, 2000.

LOW, P. F. The role of aluminum in the titration of bentonite. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 19, p. 135-139, 1955.

LUCAS, Y.; LUDDEN, P. J. 8-The Mobility and Availability of Plant Nutrients in Soils Containing Hydrous Oxides of Iron and Aluminium: The Effects of Drying and Wetting Cycles on the Soils of West Africa: Proceedings of a Seminar organized by the International Institute of Tropical Agriculture (IITA) and the University of Ibadan, January 1981. 1982.

LUPATINI, M. *et al.* The biogeography of nitrogen fixation: Evidence from a global data set of functional genes. **New Phytologist**, Oxford, v. 196, n. 2, p. 402–413, 2012.

LUPWAYI, N. Z. *et al.* Impact of crop residue type on potassium release. **Better Crops**, Norecross, Georgia, v. 89, n. 3, p. 14-15, 2005.

McBRIDE, B. M. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 466 p.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil Management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, n. 1-2, p. 119-130, 2001.

MACRAY, A. D.; KLADIVKO, E. J.; BARBER, S. A.; GRIFFITH, D. R. Phosphorus and potassium uptake by corn in conservation tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 970–974, 1987.

MAGALHÃES, L. A.; MONIZ, A. C. A. Efeitos de sistemas de manejo na produção agrícola e nas características químicas de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 389–394, 1995.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**: colheitas econômicas máximas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1993.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALLARINO, A. P. Manejo de fósforo e potássio para maiz y soya en siembra directa. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE AAPRESID, 5., 1997, Mar del Plata. **Anais** [...]. Mar del Plata; AAPRESID, 1997. p. 11-19.

MALLMANN, F. J. K.; CAMPO, R. J.; TORRENT, J.; BAVARESCO, J. M.; STORCK, L. Características do solo relacionadas à erosão em um Latossolo Bruno ácido húmico e sua influência na produtividade da cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1156–1165, 2014.

MANTOVANI, M. *et al.* Potassium supply to crops by liming materials and basic slag. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 423–434, 2015.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARKER, A. F. H.; NAIR, T. K. N. Leaf growth and mineral content of *Brachiaria decumbens* in relation to phosphorus supply. **Plant and Soil**, The Hague, v. 45, n. 3, p. 511–522, 1976.

MARTINS, A. P. *et al.* Soil organic carbon stock and fractionation in a no-tillage integrated crop-livestock system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, [art.] 104476, 2020.

MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. A.; CARLOS, F. S.; NICHEL, G. H.; SILVA, R. A. P.; CARVALHO, P. C. F. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 141–149, 2014.

MARTINS, A. P. Acidez e Formas de Alumínio do Solo em Sistema Integrado de Produção de Soja e Bovinos de Corte em Semeadura Direta no Subtropical Brasileiro. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2016.

MEDEIROS, S. L. P.; ANGHINONI, I. Critical soil pH for nodulation and growth of field pea, lentil, and chickpea. **Plant and Soil**, The Hague, v. 365, n. 1–2, p. 87–98, 2013.

MEDEIROS, J. S. *et al.* Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. , Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014.

MELFI, A. J.; PEDROM G. Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil: caracterização e repartição dos principais tipos de evolução geoquímica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 7, p. 271-286, 1977.

MELO, G. W. B. de *et al.* Contributions of Liming and Fertilization to the Fluxes of CO<sub>2</sub> from Soil under Soybean. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 8, [art.] e72886, 2013.

MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luís Reynaldo F. **Química e Mineralogia do Solo: conceitos básicos e aplicações**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; CARMONA, F. C. Solos ácidos e solos afetados por sais. *In*: MEURER, Egon José (ed.). **Fundamentos da química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. Cap. 6, p. 155-175.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 377-382, 1993.

MIELNICZUK, J.; SELBACH, P. A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 2, p. 115-120, 1978.

MINELLA, J. P. *et al.* Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 32–39, 2013.

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**, Berlin v. 66, n. 2, p. 138–151, 2020.

MODEL, N. S.; ANGHINONI, I. Respostas do milho a modos e técnicas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 55-59, 1992.

MOTTA, P. E. F. *et al.* Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência

da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349–359, 2002.

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

NICOLODI, M. **Indicadores para a tomada de decisão para calagem no sistema plantio direto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2003.

NITZSCHE, R. P. *et al.* X-ray diffraction and infrared characterization of Oxisols from central and southeastern Brazil. **Clay Minerals**, London, v. 43, n. 4, p. 549–560, 2008.

NOGUEIRA, R. J. M. C. *et al.* Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

NOVAIS, R. F. *et al.* Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 551-594.  
NUNES M. R.; KARLEN D. L.; DENARDIN J. E.; CAMBARDELLA C. A. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 285, 2019.

OLIVEIRA, J. S. *et al.* Soil properties governing phosphorus adsorption in soils of Southern Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 22, 2020.

OLIVEIRA NETO, A. A. *et al.* **A produtividade da soja: Análise e perspectivas**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, DF: Conab, 2016. Compêndio de Estudos Conab – v. 1.

OLIVEIRA, J. S. **Mineralogia e adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2015.

OLIVEIRA, S. E. V. G. A. **Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2008.

OSMOND, D. L. *et al.* Increasing the effectiveness and adoption of agricultural phosphorus management strategies to minimize water quality impairment. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 48, p. 1204–1217, 2019. DOI: 10.2134/jeq2019.03.0114.

PAVINATO, P. S. C. *et al.* Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1779-1784,

2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000600017>. Acesso em: 06 fev. 2024.

PAVINATO, P. S. *et al.* Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, London, v. 10, [art.] 15615, 2020. DOI 10.1038/s41598-020-72302-1.

PAVINATO, P. S. *et al.* Editorial: Sustainable Phosphorus Use in Agriculture. **Frontiers in Agronomy**, Lausanne, v. 4, 2022. 10.3389/fagro.2022.899924.

PHALAN, B. *et al.* Crop expansion and conservation priorities in tropical countries. **PLoS One**, San Francisco, v. 8, p. 1-13, 2013.

PÖTTER, R. O.; KÄMPF, N. Argilo-minerais e óxidos de ferro em Cambissolos e Latossolos sob regime climático térmico údico no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 153-159, 1981.

QUAGGIO, J. A. Reação do solo e seu controle. *In*: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1., 1986, Piracicaba. **Anais** [...]. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 9-39.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000.

RANDALL, G. W.; HOEFT, R. G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Production in Agriculture**, Madison, v. 1, p. 70-79, 1988.

RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado na região do cerrado**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

RESENDE, M.; CURTI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros**: interpretação e aplicações. Lavras: UFLA, 2005. 192 p.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Kinetics of soil re-acidification under no-tillage system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 242, [art.] 106137, 2024. DOI 10.1016/J.STILL.2024.106137

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

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; SANTANNA, M. A.; BRUNETTO, G.; da SILVA, I. S. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from south Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 180, p. 222–23, 2018b.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob

sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

RHEINHEIMER, D.S. *et al.* **Situação da fertilidade dos solos no estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2001. (Boletim Técnico, 1).

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição de fósforo inorgânico em sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

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**, Viçosa, MG, v. 24, n. 4, p. 797–805, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Intensidade de colonização do córtex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim-pensacola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, p. 223-228, 1995.

RICH, C. I. Mineralogy of Soil Potassium. In: KILMER, V. J. (ed.). The role of potassium in agriculture. **American Society of Agronomy**, Madison, v. 5, p. 79-108, 1968.

RODRIGUES, M. *et al.* Legacy phosphorus and no tillage agricultural tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Scient Total Environment**, Amsterdam, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

RODRIGHERO, M. B. *et al.* Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 1723–1736, 2015.

ROSOLEM, C. A. **Brazil: acid soils and agriculture**. Beckley: International Steering Committee of the Symposium Plant-Soil Interactions at Low pH, 1990. 4 p.

ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo vermelho do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 5, p. 1507-1515, 2012.

SÁ, J. C. M. *et al.* Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 56-64, 2009.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, London, v. 43, n. 1, p. 137–154, 2008.

SCHAETZL, R.; ANDERSON, S. **Soil, genesis and geomorphology**. New York: Cambridge University Press, 2005. 817 p.

SCHJORRING, J. K.; NIELSEN, N. E. Root length and phosphorus uptake by four barley cultivars grown under moderate deficiency of phosphorus in field experiment. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 10, p. 1289-1295, 1987.

SCHROEDER, D. Structure and weathering of potassium minerals. *In*: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., Bern, 1978. **Proceedings** [...]. Bern: POT, 1978.

SCHROEDER, D. Relationship between soil potassium and the potassium nutrition of the plant. *In*: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., Bern, 1979. **Proceedings** [...]. Bern: POT, 1979. p. 43-63.

SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, p. 23-34, 1998.

SHARMA, S.B. *et al.* Review. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **Springer Plus**, Amsterdam, v. 2, p. 587, 2013.

SHEAR, G.M.; MOSCHLER, W.W. Continuous corn by the no-tillage and conventional tillage method: A six-year comparison. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 524-526, 1969.

SILVA, L. S. *et al.* Disponibilidade de potássio a arroz irrigado por alagamento em solos de várzea. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 379-387, 2015.

SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 19, p. 433-439, 1995.

SLATTERY, A. C. J. F. *et al.* Publishing Rhizobial ecology as affected by the soil environment. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, East Melbourne, v. 41, n. 41, p. 289-298, 2001.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAES, R. F. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 205-274.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. *In*: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.

SOUZA, F.S.; FARINELLI, R.; ROSOLEM, C. A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 387-392, 2007.

SOUZA JUNIOR, I. G. *et al.* Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca catiônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1355-1365, 2007.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A.T. Adubação fosfatada. *In*: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado**: Correção do solo e adubação. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168

SOMBROEK, W.G. **Arnazon soils**: A reconnaissance of the soils of Brazilian Amazon. Wageningen: PUDOC, 1966. 300p.

SPARKS, D. L. Environmental soil chemistry. *In*: **Inorganic Soil Components**. 2. ed. Elsevier, 2003. Cap. 2.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008. 330 p.

STRECK, E. A. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.

SUMNER, M. E.; NOBLE, A. D. Soil acidification: The world story. *In*: RENGEL, Z. (ed.). **Handbook of soil acidity**. New York: Marcel, Dekker Inc., 2003. p. 1-28.

TAYLOR, R. M. Non-silicate oxides and hydroxides. *In*: NEWMAN, A. C. D. (ed.). **Chemistry of Clays and Clay Minerals**. New York: John Wiley & Sons, 1987. p. 129-201.

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

THOMPSON, M. L.; UKRAINCZYK, L. Micas. *In*: DIXON, Joe B.; SCHULZE, Darrell G. **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons: 2002. p. 431–466.

TIECHER, T. *et al.* Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management, **Geoderma**, Amsterdam, v. 435, 2023, DOI 10.1016/j.geoderma.2023.116495.

TIECHER, T. *et al.* Base saturation is an inadequate term for Soil Science. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, 2023.

TIECHER, T. *et al.* Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 42, 2018.

TIECHER, T. *et al.* Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78-85, 2017.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long-term experiment. **Soil Tillage Research**, v. 124, p. 57–67, 2012.

TIECHER, T. **A química antes da química do solo**. Frederico Westphalen: URI, 2015. 91 p.

TIRITAN, C. S. *et al.* Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 437–447, 2016.

TISDALE, S. L. *et al.* **Soil fertility and fertilizers**. 4. ed. New York: MacMillan, 1985. 754 p.

TRIBUTH, H. Development of K containing minerals during weathering and suitable methods of their determination. *In*: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 20. Baden, 1987.

VANCE, G. F.; STEVENSON, F. J.; SIKORA, F. J. Environmental chemistry of aluminum-organic complexes. *In*: SPOSITO, G. (ed.). **The Environmental Chemistry of Aluminum**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 169-220.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 185, n. August 2018, p. 47–60, 2019.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT E. Global Extent, Development and Economic Impact of Acid Soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 171, n. 1, p. 1–15, 1995. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/42947399>. Acesso em: 06 fev. 2024.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, Santa Maria, FertBio, 2000.

WILHELM, N.; WHITE, J. Potassium responses observed in south Australian cereals. **Better Crops**, Norcross, v. 88, n. 1, p. 28-31, 2004.

YOON, S. Y. *et al.* Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies for phosphate adsorption to magnetic iron oxide nanoparticles. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 50, p. 82-190, 2010.

YU, W. *et al.* Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 13, n. 4, p. 1003-1017, dic. 2013.

ZANARDO, A.; MARQUES JÚNIOR, J. Conceitos básicos em mineralogia. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1, p. 73-150.