

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

**FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO NO SOLO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DE TERRAS BAIXAS E  
TERRAS ALTAS NO SUL DO BRASIL**

**João Pedro Moro Flores  
(Dissertação de Mestrado)**

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

**FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO NO SOLO EM SISTEMAS  
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DE TERRAS BAIXAS E  
TERRAS ALTAS NO SUL DO BRASIL**

JOÃO PEDRO MORO FLORES  
Engenheiro Agrônomo (UFSM)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Março de 2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Flores, João Pedro Moro

Formas e balanço de potássio no solo em sistemas integrados de produção agropecuária de terras baixas e terras altas no sul do Brasil / João Pedro Moro  
Flores. -- 2020.

37 f.

Orientador: Tales Tiecher.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Solo subtropical. 2. Plantio direto. 3. K estrutural. 4. K não trocável. I. Tiecher, Tales, orient. II. Título.

JOÃO PEDRO MORO FLORES  
*Engenheiro Agrônomo - UFSM*

## **DISSERTAÇÃO**

Submetida como parte dos requisitos  
para 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

Aprovado em: 20/03/2020  
Pela Banca Examinadora



TALES TIECHER  
Orientador-PPG Ciência do Solo



AMANDA POSSELT MARTINS  
PPG Ciência do Solo/UFRGS

EDSON CAMPANHOLA BORTOLUZZI  
UPF  
(videoconferência/Skype)

LEANDRO SOUZA DA SILVA  
UFSM  
(videoconferência/Skype)

Homologado em: 21/10/2020  
Por



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JR  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo



CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*" Os sonhos são estações  
Em nossa mente de humanos  
Que muitas vezes profanos  
Buscamos compensações  
Na realidade as razões  
Onde encontramos saída  
Nessa carreira perdida  
Que contra o tempo corremos  
Já que, a rigor, não sabemos  
O que haverá além da vida."*

*Jayme Caetano Braun, "Do Tempo"*

*Dedico a minha mãe, Denize, e meu  
pai, Pedro.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Pedro Osório Flores e Denize Maria Moro Flores, por além de serem exemplos no âmbito profissional, terem acreditado, orientado e me conduzido durante minhas escolhas, pregando os valores da ética, sinceridade e honestidade.

Aos demais familiares, que prestaram assistência e compartilharam momentos de trabalho e lazer.

Ao meu orientador, professor Tales Tiecher, pela orientação, amizade, oportunidades e confiança depositada em mim durante o andamento das atividades científicas.

À professora Amanda Posselt Martins pelo direcionamento inicial, ensinamentos e amizade.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, em especial à Carla Müller e ao Murilo Veloso, pelos inúmeros momentos de descontração e aprendizado durante esses dois anos de pós-graduação.

Aos colegas, bolsistas e estagiários do *Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry*, Adriano Garcia, Bruna Possobon, Bruno Scheffer, Davi Koefender, Dionata Filippi, Esraelda Araújo, Felipe Bertol, Gabriela Naibo, Gian Ghisleni, Jeniffer Valer, Júlia Assis, Julie Lipp, Liana Dambros, Lucas Alves, Luciana Lima, Luciano Pinzon, Luiz Denardin, Nicolás Rosin, Marcelo Ely, Miguel Jung, Rafael Ramon, Tainá Bartmann, Thamires Valle, Victória Dutra e Vítor Ambrosini, pela troca de experiências, amizade, convívio e colaboração nos trabalhos.

Ao técnico de laboratório Adão Luís pelos ensinamentos, amizade e auxílio na condução dos trabalhos.

Aos colaboradores da Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Fazenda Corticeiras e Instituto Rio Grandense do Arroz pela estrutura disponibilizada e auxílio na condução dos experimentos.

À UFRGS, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, aos professores, funcionários, órgãos de fomento à pesquisa, e a todos de que, alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

# FORMAS E BALANÇO DE POTÁSSIO NO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DE TERRAS BAIXAS E TERRAS ALTAS NO SUL DO BRASIL<sup>1</sup>

Autor: João Pedro Moro Flores  
Orientador: Prof. Tales Tiecher

## RESUMO

O sul do Brasil possui uma grande variabilidade de solos utilizados para exploração de atividades agropecuárias. Em solos de terras altas predomina o monocultivo de soja e em solos de terras baixas o monocultivo de arroz irrigado. Em ambas as situações, o uso de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) pode ser uma alternativa visando diversificar os sistemas de produção e promover maior ciclagem e aproveitamento do potássio (K). À medida em que a concentração da forma trocável de K do solo decresce, devido a absorção do K na solução pelas plantas, ocorre uma depleção das formas não trocáveis e estruturais, chamadas de potencialmente disponíveis, reestabelecendo o equilíbrio no sistema. No entanto, o potencial de contribuição dessas frações para suprir a demanda dos cultivos é frequentemente negligenciado em estudos de fertilidade do solo, especialmente naqueles envolvendo SIPA. O objetivo desse estudo foi quantificar as formas de K no solo e estimar o balanço de K sobre diferentes SIPA, com base na produção de soja em terras altas e arroz irrigado em terras baixas. Dois estudos foram conduzidos em diferentes locais do Rio Grande do Sul, Brasil. O experimento em terras altas foi desenvolvido num Plintossolo em Eldorado do Sul, e se baseia no monocultivo de soja com duas estratégias de fertilização de K, no verão ou no inverno, além da presença ou não de pastejo ovino em azevém no período de inverno. O experimento em terras baixas foi desenvolvido num Planossolo em Cristal, e testa diferentes arranjos de produção de arroz, envolvendo sistemas de semeadura, pastejo animal, rotação de culturas e épocas de fertilização de K. As formas de K avaliadas foram: disponível (extraído com Mehlich-1), trocável (extraído com acetato de amônio), não trocável (extraído com tetrafenil borato de Na), estrutural (obtido pela diferença entre o K não trocável e K total) e total (estimado por fluorescência de raio X). As formas potencialmente disponíveis de K, não trocável e estrutural, foram mais sensíveis que o K trocável e disponível para detectar a variação decorrente da adubação, sistema de manejo, rotação de culturas e pastejo animal. No ambiente de terras baixas, a quantidade adicionada de K e a frequência de cultivo de arroz por inundação, afeta diretamente as formas não trocável e estrutural e total no solo. A maior frequência de cultivo de arroz no verão acompanhada do cultivo de forrageiras fertilizadas no período de inverno resultaram em um balanço de K mais negativo, enriquecendo as frações potencialmente disponíveis de K no solo. No ambiente de terras altas, o pastejo animal não propicia alterações das formas de K no solo. Porém a utilização de adubação de sistemas em detrimento a adubação convencional propiciou o acúmulo momentâneo de K na forma não trocável no solo.

Palavras-chave: solo subtropical, plantio direto, K estrutural, K não trocável.

---

<sup>1</sup>Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (58p.) Março, 2020.

# SOIL POTASSIUM FORMS AND BUDGET IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM OF LOWLANDS AND HIGHLANDS OF SOUTHERN BRAZIL<sup>2</sup>

Author: João Pedro Moro Flores  
Adviser: Prof. Tales Tiecher

## ABSTRACT

The southern Brazil has great variability of soils, which can be globally divided into upland-soils, where monoculture of soybean predominates, and lowland-soils, where prevail monoculture of flooded rice. In both situations, the use of integrated crop livestock system (ICLS) may be an interesting alternative to diversify the production systems, and to provide a better potassium (K) cycling in the soil. The K uptake by plants from the soil solution are directly linked to soil K forms in the soils. When the former decrease the soil K forms promote a continue depletion of the non-exchange first, and the, from structural forms. Nevertheless, the potential to release or sink of these fractions is often overlooked in fertility studies. The aim of this study was quantifying the K forms and balance in the soil under different ICLS based on soybean production in upland and flooded rice production in lowland. Two studies were performed in different sides located of Rio Grande do Sul state, Brazil. The upland experiment tested two fertilization strategies in an ICLS with soybean in the summer, and sheep grazing on a ryegrass pasture in the winter. The treatments were fertilization in the winter or in the summer combined with or without ryegrass grazing by sheep. The lowland experiment tested different rice productions arrangements, with seeding systems, animal grazing, crop rotation and seasons to K fertilization. Soil samples were collected at the 0-10, 10-20 and 20-30 cm depth. The soil K forms evaluated were available-K, exchangeable-K, non-exchangeable-K, structural-K and total-K. In both experimental the non-exchangeable, structural and total fractions were more sensitive than exchangeable K and available to detect variation in fertilization, management system, crop rotation and animal grazing. Into the lowland experiment, the flood frequency and the amount of K added, affected directly the non-exchangeable, structural and total fractions. The frequency of rice cropped in the summer season and the fertilizer pasture in the winter season result in one more negative K budget, enriching the non-exchangeable and structural soil K fractions. Into the highlands experiment, animal grazing does not provide changes in the K forms. Furthermore, the use of systems fertilization rather than crop fertilization causes the momentary accumulation of non-exchangeable K fraction on the soil, as well as reducing nutrient losses to the soil environment.

Keywords: subtropical soil; no-tillage; structural K; non-exchangeable K.

---

<sup>2</sup>Master's Dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (58p.) March, 2020.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1. Formas de potássio no solo.....	3
2.2. Ambientes de produção agropecuária .....	7
2.3. Os SIPA como alternativa de produção.....	8
<b>3. HIPÓTESE</b> .....	11
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	12
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	13
5.1. Histórico das áreas experimentais .....	13
5.2. Descrição dos sistemas de produção em terras baixas .....	15
5.3. Descrição dos sistemas em terras altas.....	16
5.4. Coleta e análise de solo e água .....	18
5.5. Balanço de nutrientes.....	19
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	21
6.1. Comparação entre formas de K em solos de terras altas e baixas .....	21
6.2. Efeito de diferentes SIPA nas formas de K no solo em terras baixas .....	26
6.3. Efeito de diferentes SIPA nas formas de K no solo em terras altas .....	30
6.4. Número potencial de cultivos em diferentes SIPA.....	33
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	36
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	37

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Valores de K disponível, trocável, não trocável, estrutural e total em alguns solos do sul do Brasil.....	6
<b>Tabela 2.</b> Granulometria do solo no experimento de sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas.....	13
<b>Tabela 3.</b> Granulometria do solo no experimento de sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas. ....	14
<b>Tabela 4.</b> Quantidades de K adicionadas via fertilização no inverno e no verão em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil. ....	16
<b>Tabela 5.</b> Quantidades de K adicionadas via fertilização no inverno e no verão em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil. ....	17
<b>Tabela 6.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações nas formas de K no solo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas (Planossolo) e terras altas (Plintossolo) no sul do Brasil.....	21
<b>Tabela 7.</b> Balanço da forma disponível de K no solo na camada de 0-30 cm em um sistema integrado de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Tabela 8.</b> Balanço da forma disponível de K no solo na camada de 0-30 cm em um sistema integrado de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil. ....	33

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Exemplos de liberação da forma não trocável de K em uma mica e um feldspato potássico. Adaptado de Meurer et al. (2018) e Criullo (1996). .....4
- Figura 2.** Localização das áreas de estudo, experimento de terras altas no município de Eldorado do Sul e experimento de terras baixas no município de Cristal, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. .... 14
- Figura 3.** Formas de K determinadas e descrição das metodologias utilizadas para sua quantificação em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil. .... 19
- Figura 4.** Proporções das frações trocáveis, não trocáveis e estruturais de K na camada 0-30 cm de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil. .... 22
- Figura 5.** Difrátogramas de raios-X entre 4° e 54°2theta na fração TFSA (A) e argila (B) do solo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil. Ct (caulinita), Ft (feldspato), Gt (goetita), Mc (mica), Qz (quartzo), Ru (rutilo). .... 23
- Figura 6.** Teores médios das formas de K em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas e terras altas no sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam as formas de K nos diferentes ambientes ( $p < 0,10$ ). ..... 24
- Figura 7.** Relação entre o teor de K disponível extraído com Mehlich-1 e o teor de K estrutural (A), total (B), trocável (C) e não trocável (D) de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas e terras altas no sul do Brasil. \*Significante ( $p < 0,05$ ). ..... 25
- Figura 8.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (A), estrutural e total (B) e saldo de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil. .... 26
- Figura 9.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (A), estrutural e total (B) de K nas camadas de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil. .... 27
- Figura 10.** Diferença entre o teor de K na água de irrigação da cultura do arroz na saída e na entrada da lavoura em diferentes sistemas de produção em terras baixas no sul do Brasil. .... 28

**Figura 11.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (**A**), estrutural e total (**B**) e saldo de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil. .... 32

**Figura 12.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (**A**), estrutural e total (**B**) de K nas camadas de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil. .... 33

**Figura 13.** Comparação entre as quantidades de K potencialmente disponível na forma não trocável entre terras baixas e terras altas e enriquecimento dessa fração promovida pela migração de sistemas convencionais de produção com adubação de cultura para SIPA com adubação de sistema. .... 35

## RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

AC	Adubação de cultura
AS	Adubação de sistema
CP	Com pastejo
DRX	Difratometria de raios-X
EEA	Estação Experimental Agronômica
FRX	Fluorescência de raios-X
ILP	Integração lavoura-pecuária
PC	Plantio convencional
PD	Plantio direto
SIPA	Sistema integrado de produção agropecuária
SP	Sem pastejo
TFSA	Terra fina seca ao ar

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os três maiores produtores mundiais de grãos, carnes e fibras, cultivando uma área de 62,9 milhões de hectares. Desse montante, o Rio Grande do Sul representa cerca de 14% do total da área cultivada (CONAB, 2019). As interações decorrentes dos fatores pedogenéticos, (relevo, clima, material de origem, tempo e microrganismos) conferem ao Rio Grande do Sul uma grande variabilidade de tipo de solos, onde dois grandes ambientes de produção agrícola se distinguem: terras altas e terras baixas (KLAMT et al., 1985; STRECK et al., 2018).

No ambiente de terras altas predomina a utilização do plantio direto (PD) para produção de grãos no verão (soja e milho), e no período hibernal a maior parte das áreas permanece com plantas de cobertura de alto potencial forrageiro (MORAES et al., 2014). Nas terras baixas, o principal modelo de produção agrícola consiste no monocultivo de arroz irrigado sob preparo convencional (PC), com revolvimento do solo anual e intenso, e com baixa adoção de plantas de cobertura no período hibernal (REUNIÃO..., 2018).

Ambos os ambientes de produção possuem grande potencial para implantação de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), alternando na mesma área o cultivo de grãos no verão (arroz, soja e milho) com pastagens no inverno para pastejo animal sob PD (MORAES et al., 2014; CARVALHO et al., 2014). A exploração pecuária ainda é reduzida, embora os ambientes de produção tenham aptidão e grande capacidade de produção de proteína animal em pastejo, com baixo impacto ambiental e alta rentabilidade por área (SALTON et al., 2014).

Diferentemente dos sistemas convencionais, os SIPA propiciam, através da rotação de culturas e as plantas forrageiras pastejadas, uma maior extração e ciclagem de nutrientes, principalmente o K (ASSMANN et al., 2017;

FERREIRA et al., 2009; SANTOS et al., 2003). A absorção do K da solução pela planta desencadeia um processo contínuo de depleção de formas trocáveis, não trocáveis e estruturais, intensificando o intemperismo dos minerais que contém K (ERNANI et al., 2007). Embora a dinâmica das formas de K no solo em sistemas para produção vegetal tenha sido amplamente explorada (VIEIRA et al., 2016; MORTELE et al., 2016; GATIBONI et al., 2020), os estudos sobre o efeito de plantas forrageiras submetidas ao pastejo animal em SIPA nessas formas de K no solo ainda são escassos, mas muito promissores.

Ao contrário dos Latossolos derivados de basalto, os Argissolos e os Planossolos derivados de granitos e sedimentos possuem altas reservas naturais de K, associado principalmente à presença de feldspato-K e mica na fração de silte, bem como esmectita, vermiculita e illita pouco cristalizada na fração argila (BRITZKE et al., 2012). Nessas classes de solo, os teores de K não trocável e total podem chegar a 1.750 e 39.500 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente (NACHTIGALL; VAHL, 1991; BRITZKE et al., 2012). As formas potencialmente disponíveis de K no solo são principalmente determinadas por cinco fatores, (i) mineralogia do solo, (ii) quantidade de K adicionado e removido do solo, (iii) excesso de calcário, (iv) congelamento e descongelamento e (v) ciclos de umedecimento e secagem (WEIL; BRADY, 2017). Esse último fator pode acarretar aumentos significativos na fixação e posterior liberação de K de formas não trocáveis para a solução do solo em ambientes de terras baixas, principalmente naqueles com maior frequência de cultivo de arroz irrigado por inundação.

Apesar da existência substancial de estudos visando a caracterização e o estudo da dinâmica de K no sul do Brasil (MORTELE et al., 2016; BRITZKE et al., 2012; KAMINSKI et al., 2010), ainda existe escassez de estudos em SIPA envolvendo o efeito da inserção do animal em pastejo, rotação de culturas, sistemas de preparo do solo e épocas de aplicação de fertilizantes sobre as formas de K do solo. Esses fatores serão avaliados no presente trabalho visando compreender melhor a dinâmica do K no contexto de dois dos principais sistemas de produção do Sul do Brasil em ambiente de terras baixas e terras altas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

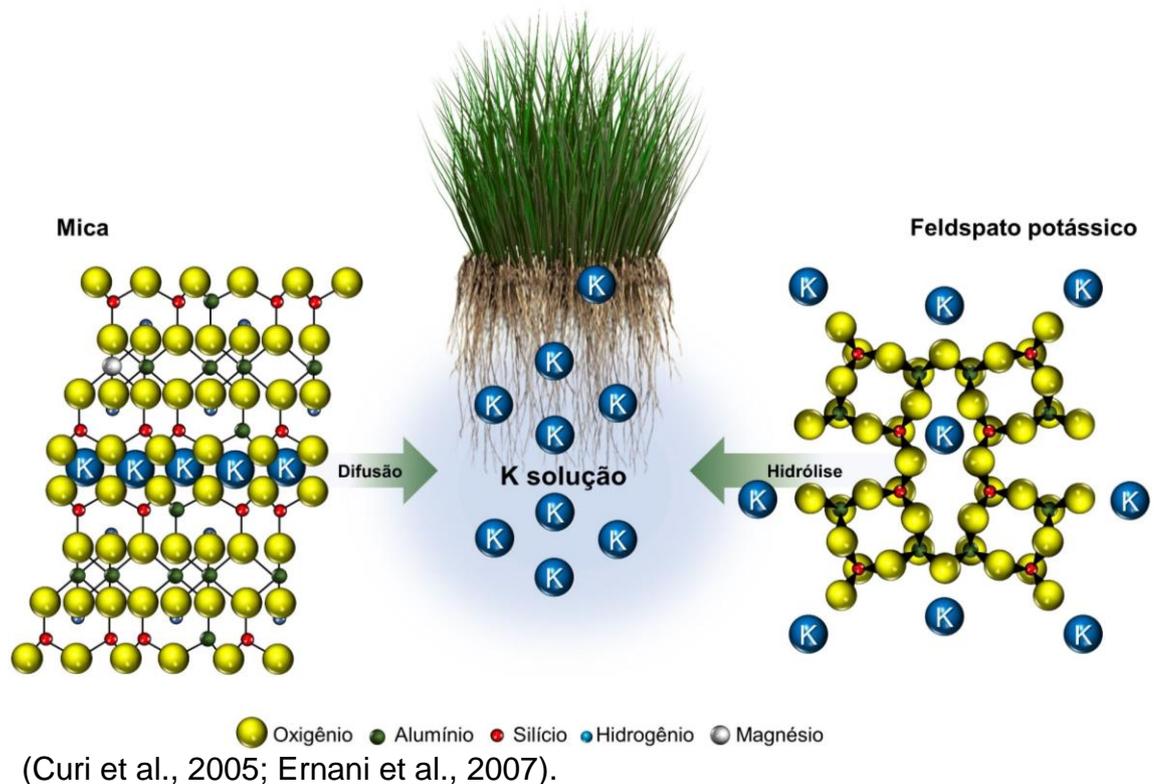
### 2.1. Formas de potássio no solo

O K é um nutriente essencial à vida, pois participa de vários processos metabólicos nas plantas, como a ativação enzimática, controle osmótico do fluxo de água, produção e quebra de cadeias de carboidratos e balanço entre ânions e cátions. É o segundo nutriente mineral demandado em maior quantidade pelas plantas e com alta mobilidade em qualquer concentração (MARSCHNER, 1995).

O Brasil consome cerca de 6.000 mil toneladas anuais de K (IFA, 2019), e possui produção interna de apenas 200 mil toneladas por ano, o que coloca o país em segunda posição dentre os maiores importadores de K no mundo. Desse modo, devido à alta dependência externa do nutriente, a otimização da aplicação e do uso de K no solo é fundamental (ZÖRB et al., 2014).

O K é o sétimo elemento mais abundante na crosta terrestre e representa cerca de 2,1-2,3 % da crosta (SCHROEDER, 1979). A maior parte do K no solo faz parte da estrutura dos minerais primários e secundários e somente uma pequena parcela é prontamente disponível às plantas. As plantas absorvem o K presente na solução do solo, sendo esse tamponado pelas formas trocáveis, adsorvido eletrostaticamente aos materiais que constituem a parte sólida do solo. O K trocável é, na maioria das ocasiões, a reserva de K mais importante para o desenvolvimento das plantas, pois se comporta como uma reserva disponível no curto prazo. Porém, o K trocável representa apenas uma fração do K disponível às plantas (MURRELL, 2018). Existe um equilíbrio entre as formas não trocáveis e estruturais, estes últimos retidos na estrutura

cristalina dos minerais, liberado através do intemperismo (SPARKS, 1987; ZÖRB et al., 2014). O equilíbrio entre as formas de K existentes no solo ocorre de maneira espontânea, de modo que ao extrair K da solução do solo através da absorção radicular, sua concentração na solução é reposta pelo K trocável. Na nutrição de plantas, o equilíbrio fundamental está entre o K trocável e o da solução do solo, formas consideradas de disponibilidade imediata às plantas (MIELNICZUK, 1978). Na medida que a quantidade na solução e nos grupos funcionais de superfície decresce, uma fração do K não trocável se difunde pelas entrecamadas dos argilominerais 2:1 como as micas ou por reações de hidrólise e protonação nos feldspatos potássicos (MIELNICZUK, 1977) (**Figura 1**), tornando-se disponível às plantas e intensificando o intemperismo do mineral



**Figura 1.** Exemplos de liberação da forma não trocável de K em uma mica e um feldspato potássico. Adaptado de Meurer et al. (2018) e Criullo (1996).

As formas não trocável e estrutural constituem reservas de médio e longo prazo de K às plantas e possibilitam assim o desenvolvimento de plantas em solos com baixo teor de K solúvel e K trocável (KAMINSKI et al., 2007; MEDEIROS et al., 2014). Isso é evidenciado quando verifica-se que a absorção de K pelas plantas é, na maioria das vezes, superior a quantidade inicial de K na forma trocável existente no solo. A fração trocável de K sofre severa redução

após cultivos sucessivos sem fertilização potássica (GATIBONI et al., 2020). Da mesma forma, o desenvolvimento de culturas sem o aporte externo de K favorece a depleção de formas não trocáveis de K no solo, favorecendo a transformação de illita em vermiculita (MOTERLE et al., 2016). Vários trabalhos indicam que existem contribuições de formas não trocáveis de K para o suprimento das exigências impostas pelas plantas (CHAVES et al., 2015; KAMINSKI et al., 2007; MEDEIROS et al., 2014; ROSOLEM et al., 2012; SILVA et al., 2015). Em contrapartida, com uma excessiva adubação potássica em solos com a presença de minerais secundários como a vermiculita, o K pode ser adsorvido na camada siloxana das entrecamadas do mineral, tornando-se potencialmente disponível as plantas (MEURER et al., 2018).

A liberação e posterior adsorção de K pelos argilominerais 2:1 pode ser rápida, como verificado por Paola et al. (2016). Nesse trabalho, após 40 dias de semeadura da cultura do milho, já foi possível identificar modificações na mineralogia da fração argila do solo devido à adsorção do K não trocável presente nas entrecamadas da mica. Da mesma forma, Steiner & Lana (2018) identificaram contribuições de K não trocável para a nutrição das plantas variando de 50 a 73% e de 1 a 18% em Latossolos e Argissolos sem e com fertilização potássica, respectivamente. Embora importante para a nutrição das plantas, as formas potencialmente disponíveis de K dificilmente satisfazem a sua demanda, especialmente para aquelas de ciclo curto, como as culturas anuais para produção de grão, que necessitam absorver uma grande quantidade de K em apenas três ou quatro meses de cultivo (DAS et al., 2018).

A abundância das diferentes formas de K no solo é governada por vários fatores, dentre eles o tipo e a quantidade de argila, de matéria orgânica (MEENA et al., 2016), das diferenças mineralógicas e do grau de intemperismo do solo (NACHTIGALL; VAHL, 1991), possuindo grandes variações em solos de uma mesma região (**Tabela 1**). Fraga et al. (2009) identificaram maior suprimento de K oriundo de formas não trocáveis à cultura do arroz irrigado quando cultivado sobre solos desenvolvidos de rochas basálticas (72%) em comparação a solos sedimentares (12%). Além disso, ambientes de maior intensidade de oxirredução como ocorre nas terras baixas com cultivo de arroz irrigado, o umedecimento do solo permite a expansão e a exposição das superfícies internas dos argilominerais, facilitando a saída do íon  $K^+$  por difusão

da entrecamada (forma não trocável) para a solução do solo (MCLEAN; WATSON, 1985).

**Tabela 1.** Valores de K disponível, trocável, não trocável, estrutural e total em alguns solos do sul do Brasil.

Classe de solo	Fertilização	Concentração		Fonte
		K disponível (mg kg <sup>-1</sup> )		
Argissolo	Sem	11		MORTELE et al. (2016)
Argissolo	Com	188 a 267		MORTELE et al. (2016)
Planossolo	Sem	47 a 150		SILVA et al. (2015)
Plintossolo	Com	85 a 167		ALVES et al. (2019)
Gleissolo	Sem	32 a 139		SILVA et al. (2015)
K trocável (mg kg <sup>-1</sup> )				
Latossolo	Sem	60 a 125		STEINER; LANA. (2018)
Latossolo	Com	125 a 160		STEINER; LANA. (2018)
Cambissolo	Sem	35 a 66		GATIBONI et al. (2020)
Argissolo	Sem	49 a 145		STEINER et al. (2015)
Nitossolo	Sem	106 a 125		STEINER et al. (2015)
K não trocável (mg kg <sup>-1</sup> )				
Latossolo	Sem	100		STEINER; LANA. (2018)
Latossolo	Com	200 a 360		STEINER; LANA. (2018)
Cambissolo	Sem	1232 a 1477		GATIBONI et al. (2020)
Planossolo	Sem	58 a 267		SILVA et al. (2015)
Argissolo	Sem	134 a 208		STEINER et al. (2015)
K estrutural (mg kg <sup>-1</sup> )				
Argissolo	Sem	2000		MORTELE et al. (2016)
Plintossolo	Sem	7373		STEINER et al. (2015)
Nitossolo	Sem	4698 a 15083		STEINER et al. (2015)
Argissolo	Sem	875 a 2904		CHAVES et al. (2015)
K total (mg kg <sup>-1</sup> )				
Planossolo	Sem	138 a 6101		SILVA et al. (2015)
Argissolo	Sem	547 a 1913		STEINER et al. (2015)
Nitossolo	Sem	5362 a 15563		STEINER et al. (2015)
Planossolo	Sem	410 a 6100		BRITZKE et al. (2012)

Os feldspatos potássicos, esmectitas, esmectitas com hidróxi-Al entrecamadas (FRAGA et al., 2009) e illita (BRITZKE et al., 2012) se caracterizam como grandes responsáveis pelo fornecimento de K às plantas em ambientes de terras baixas. Em Argissolos do Rio Grande do Sul, Chaves et al. (2015) identificaram que a reserva mineral de K desses solos é expressiva e determinada pela mineralogia das frações areia, silte e argila. Fato também identificável em Plintossolos (STEINER et al., 2015), pelas semelhanças no horizonte superficial, sendo o caráter plíntico com ocorrência somente no horizonte subsuperficial (STRECK et al., 2018). Micas e feldspatos-K foram as

principais fontes de nutrientes das frações mais grosseiras. Na fração argila também houve contribuição de argilominerais 2:1 secundários no fornecimento de K oriundo de formas não trocáveis.

Espécies de plantas forrageiras são eficientes na extração e na ciclagem de K no solo, evitando perdas do nutriente no perfil, sendo capazes de extrair formas não trocáveis de K (GARCIA et al., 2008), permitindo assim o aumento do K trocável do solo na superfície do solo após sua senescência. Siqueira Junior (2005) identificou que a interação de animais em pastejo em intensidades leves e moderadas em pastagens de aveia e azevém possibilitou o melhor aproveitamento do K do solo, aumentando o teor de K disponível na camada superficial nas áreas pastejadas e, por consequência, aumentando a eficiência do sistema. Do total de K ingerido pelos animais em pastejo cerca de 90% é retornado ao solo, sendo a maior parte (70-90%) pela urina, já na forma iônica e estando prontamente disponível para a absorção das plantas (HAYNES; WILLIAMS, 1993).

## **2.2. Ambientes de produção agropecuária**

O Rio Grande do Sul (RS) possui grande variabilidade de solos, decorrentes das interações dos fatores pedogenéticos, como o relevo, clima, material de origem, tempo e microrganismos. As terras altas situam-se principalmente na Metade Norte e Sudoeste do RS, com solos derivados de basalto e granito, respectivamente, e uma fração de arenito ao longo da Depressão Central. No ambiente de terras altas, predominam as classes de solos dos Argissolos e Latossolos (STRECK et al., 2018). Em contrapartida, as terras baixas localizam-se principalmente na Metade Sul, incluindo também a Fronteira Oeste, Planície Costeira e Depressão Central, e os solos são formadas majoritariamente por sedimentos nas planícies das lagoas e rios (KLAMT et al., 1985). No ambiente de terras baixas predomina a classe de solos dos Planossolos (STRECK et al., 2018), os quais apresentam grande variabilidade na sua composição mineralógica e granulométrica, influenciando as características químicas desses ambientes e, por consequência, a disponibilidade de nutrientes às plantas.

Nas terras baixas, o atual modelo de produção adotado na grande maioria das propriedades rurais está embasado no monocultivo de arroz com um anual e intenso revolvimento do solo, acarretando em decréscimos na fertilidade do solo (SCHOENFELD et al., 2012), além da baixa utilização de plantas de cobertura no período hibernar. O não revolvimento do solo associado ao alto aporte de resíduos propicia melhorias na qualidade química, física e biológica do solo, quando comparado ao sistema convencional de cultivo (BAYER et al., 2006; DENARDIN et al., 2019).

Em contraponto, nas terras altas, existe a predominância da utilização do plantio direto. No período hibernar, a maior parte dessas áreas permanece com plantas de cobertura de alto potencial forrageiro ou em pousio, visto que os cereais de inverno, como o trigo, são pouco cultivados devido principalmente às condições climáticas desfavoráveis e à competição de preço e qualidade com o trigo argentino (BRUM; MÜLLER, 2008). O pousio no período hibernar reduz a eficiência da ciclagem de potássio (K), comprometendo a disponibilidade para às plantas e aumentando as perdas para o sistema (TIECHER et al., 2017).

### **2.3. Os SIPA como alternativa de produção**

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são uma alternativa de produção com o intuito de diversificar as atividades desenvolvidas na propriedade rural. Os SIPA, conhecidos na literatura técnica por integração lavoura-pecuária (ILP) (CARVALHO et al., 2014), consistem em um sistema que alterna, na mesma área, a produção de pastagens anuais ou perenes sob pastejo animal e a produção vegetal (NASCIMENTO; CARVALHO, 2011). Áreas de lavoura são sucedidas à fase pecuária, permitindo a diversificação das atividades da propriedade rural e possibilitando maior lucratividade por área (MELLO et al., 2004).

A dinâmica dos nutrientes em SIPA são mais complexas que em monocultivos de grãos. Diversos trabalhos relatam os benefícios da adoção de SIPA em comparação aos sistemas convencionais de produção, seja nas propriedades químicas (LEMAIRE et al., 2013; MORAES et al., 2014; CARVALHO et al., 2018; ALVES et al., 2019; LUZ et al., 2019), físicas (SOUZA et al., 2010; CECAGNO et al., 2016) e biológicas (MORAES et al., 2014) do solo,

assim como na produtividade e sustentabilidade dos sistemas (MARTHA JÚNIOR et al., 2011; SALTON et al., 2014; PARAJULI et al., 2018).

Além das práticas relativas à lavoura, a presença de animais em pastejo é capaz de influenciar o ambiente. A ciclagem de nutrientes é alterada, uma vez que o pastoreio induz novos ciclos através da ingestão da forragem e consequente excreção, além da inclusão de novas rotas de exportação de nutrientes como a carne e o leite (MORAES et al., 2014). Ao sofrer desfolha, a planta modifica suas rotas de fluxos de carbono e nitrogênio, remobilizando momentaneamente suas reservas das raízes para a rebrota das folhas e afilhos, a fim de recuperar sua capacidade fotossintética (JOHANSSON, 1993). O crescimento radicular é lento após o pastejo, porém crescente à medida que a planta se recupera da desfolha (GIACOMINI et al., 2005).

Nos SIPA, as forrageiras assumem papel fundamental tanto na ciclagem de nutrientes, como na redistribuição desses no perfil do solo, aumentando sua disponibilidade nas camadas superficiais e, em consequência, para a cultura sucessora. A rotação de culturas imposta pelos diferentes arranjos produtivos dos SIPA proporciona a exploração de distintas camadas de solo de acordo com a espécie vegetal utilizada, com diferentes exigências nutricionais e habilidades de absorção de nutrientes, sendo esses depositados em superfície na senescência da cultura (BORKERT et al., 2003). As alterações promovidas pelas raízes são dependentes da textura e estrutura do solo, da espécie de planta, do manejo da área e da distribuição das precipitações (JONES et al., 2003), ciclo de desenvolvimento (FLOSS, 2011), disponibilidade de nutrientes (CECATO et al., 2001) e intensidade na qual as folhas são removidas (CECATO et al., 2001; MORVAN-BERTRAND et al., 1999).

Em um Latossolo do sul do Brasil foi possível identificar rápidas e significantes ciclagens de potássio (K) em SIPA (ASSMANN et al., 2017), proporcionando um melhor crescimento da pastagem e possibilitando inclusive o aumento dos teores de K no solo (SOUTO, 2006). Nesse mesmo ambiente, com baixas reservas iniciais de K estrutural e derivado de rochas basálticas, Bertolazi et al. (2017) demonstraram que em 12 anos de adoção de SIPA foi possível identificar aumento da disponibilidade de K no solo quando as forrageiras sofreram pastejo animal, possivelmente devido à maior ciclagem de K promovido pelos ciclos de crescimento de desfolha das plantas.

Considerando que o animal é o componente reciclador de nutrientes do sistema, e a exportação de nutrientes é governada pela fase lavoura (ALVES et al., 2019) a antecipação da adubação potássica para a fase pastagem, chamada adubação de sistemas, pode ser uma alternativa em sistemas que possuem teores de K acima do nível crítico. Além disso, uma vez que devido ao processo de desfolhação da pastagem, ela possui vários ciclos de estímulo ao crescimento (GASTAL; LEMAIRE, 2015), existe uma constante necessidade de absorção de nutrientes durante todo o ciclo de pastejo, possibilitando respostas positivas à adubação no período hibernar.

Desse modo, a avaliação de SIPA de longo prazo, combinando o cultivo de forrageiras sob pastejo em rotação ao cultivo de grãos é necessária. A compreensão da magnitude do processo de ciclagem e da contribuição das formas não trocáveis e estruturais de K no solo na nutrição das plantas é importante no âmbito produtivo e ambiental, tendo em vista uma melhor eficiência da adubação potássica e uma agricultura mais sustentável.

### **3. HIPÓTESE**

No ambiente de terras altas, a utilização de forrageiras sob pastejo animal propiciam um maior aproveitamento de formas potencialmente disponíveis de K no solo.

No ambiente de terras baixas, a adoção de um sistema integrado de produção agropecuária em detrimento ao preparo convencional de arroz deve propiciar incrementos nas formas potencialmente disponíveis de K do solo, reduzindo também o potencial de perdas de K nesse sistema. Além disso, a menor frequência de cultivo de arroz, aliado à maior diversificação de cultivos nesse ambiente propiciam uma maior utilização das frações potencialmente disponíveis de K no solo.

#### **4. OBJETIVOS**

Quantificar e avaliar as formas e o balanço de K no solo sobre o efeito de diferentes sistemas produtivos de soja e arroz irrigado, envolvendo plantio direto, pastejo animal, rotação de culturas e épocas de aplicação de fertilizantes em terras altas e terras baixas no sul do Brasil.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

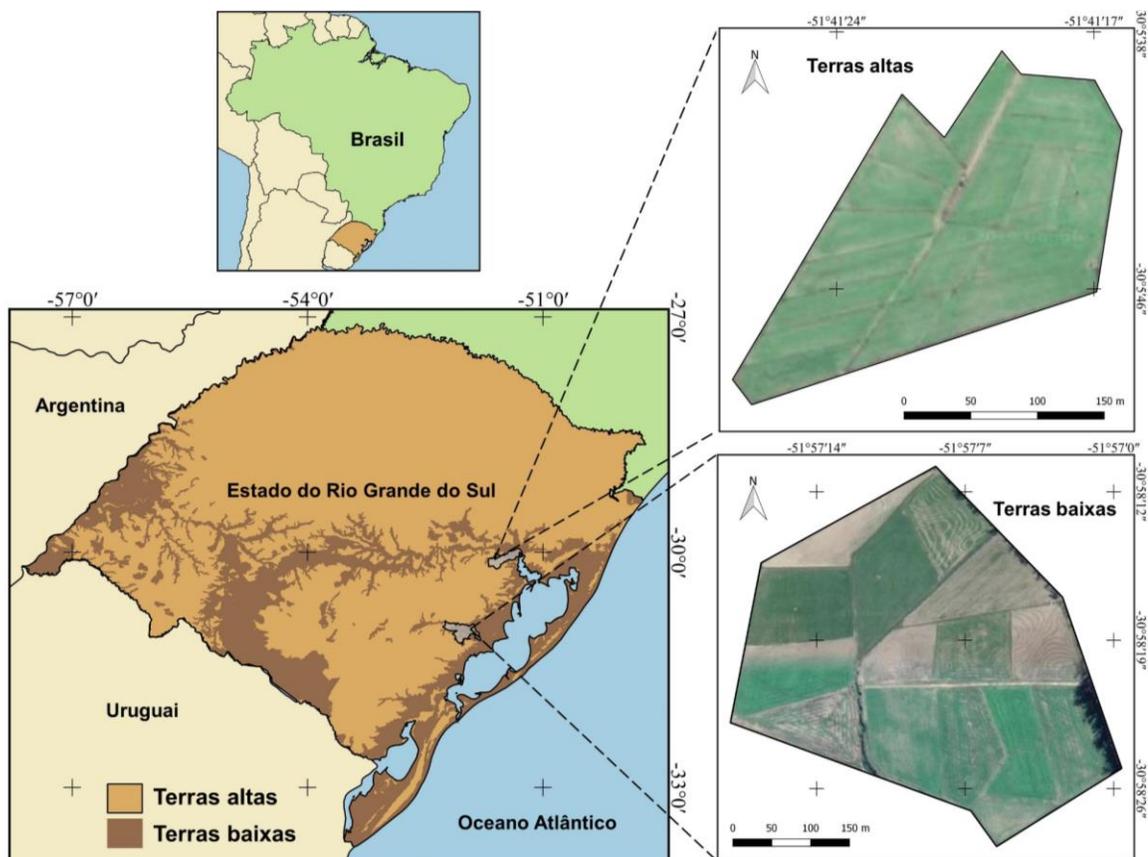
### 5.1. Histórico das áreas experimentais

Dois experimentos foram conduzidos em diferentes locais, um na região edafoclimática da Planície Costeira Interna e outro na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (**Figura 2**). Em ambos os locais, o clima é classificado como subtropical húmido (Cfa) de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, adaptado por Alvares et al. (2013), sem estação seca definida e com precipitação variando de 1200 a 2000 mm ao ano.

O experimento de terras baixas foi estabelecido em 2013 na Fazenda Corticeiras, no município de Cristal (30°58'20"S, 51°57'08"O), com altitude de 22 metros e aproximadamente 18 hectares. O solo é classificado como Planossolo Háptico eutrófico típico (STRECK et al., 2018), com relevo plano, declividade máxima de 4% e textura franco arenosa, caracterizando o experimento em terras baixas. Antes da instalação do experimento, a área permanecia em pousio por três anos. A granulometria do solo é apresentada na **Tabela 2**.

**Tabela 2.** Granulometria do solo no experimento de sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas.

Prof. --cm--	Argila (<0.002 mm)	Silte (0.002 – 0.05 mm)	Areia (> 0.05 mm)
	-----g kg <sup>-1</sup> -----		
0–10	210	413	377
10–20	226	402	372
20–30	194	420	386
30–40	174	422	404



**Figura 2.** Localização das áreas de estudo, experimento de terras altas no município de Eldorado do Sul e experimento de terras baixas no município de Cristal, estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

O experimento de terras altas foi estabelecido em 2017 na Estação Experimental Agrônômica (EEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizada no município de Eldorado do Sul ( $30^{\circ}05'44''\text{S}$ ,  $51^{\circ}41'22''\text{O}$ ), em uma área 4,8 hectares. O solo é caracterizado como Plintossolo Argilúvico distrófico típico (STRECK et al., 2018), com relevo suavemente ondulado, declividade máxima de 8% e textura franco arenoso, caracterizando o experimento em terras altas. A granulometria do solo é apresentada na **Tabela 3**.

**Tabela 3.** Granulometria do solo no experimento de sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas.

Prof. --cm--	Argila (<0.002 mm)	Silte (0.002 – 0.05 mm)	Areia (> 0.05 mm)
	-----g kg <sup>-1</sup> -----		
0–10	134	239	627
10–20	149	234	618
20–30	183	243	573
30–40	198	213	589

## 5.2. Descrição dos sistemas de produção em terras baixas

O experimento em terras baixas possui delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições, sendo testados diferentes sistemas de produção de arroz irrigado (*Oryza sativa*). Foram utilizados quatro sistemas de produção, sendo: (A-PC) monocultivo de arroz sob PC e pousio hibernar; (A-SIPA) monocultivo de arroz e pastagem de azevém (*Lolium multiflorum*) no período hibernar; (AS-SIPA) rotação entre arroz e soja (*Glycine max*) durante o período de verão e pastagem de azevém no período hibernar e (ASM-SIPA) rotação entre arroz, soja, milho (*Zea mays*) e capim sudão (*Sorghum sudanense*) no verão e pastagem de azevém e trevo branco (*Trifolium repens*) no ano de 2013 ou azevém e trevo da pérsia (*Trifolium resupinatum*) nos anos de 2014 até 2018 no período hibernar, sendo esses três últimos sistemas conduzidos sob PD.

Até o ano de 2017, A-SIPA, AS-SIPA e ASM-SIPA eram adubados tanto na lavoura como na pastagem, e a partir de março de 2017 iniciou-se o conceito de adubação de sistema, onde toda a adubação com os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) é realizada na fase pastagem, a lanço, e somente no A-PC a adubação continua sendo feita no cultivo de arroz. A mudança do sistema de adubação foi decorrente do aumento dos teores de P e K do solo para acima dos níveis críticos estabelecidos pela SBCS (2016) para as culturas de grãos. A quantidade e época de aplicação de fertilizantes por ano é apresentada na **Tabela 4**.

A densidade de semeadura média do azevém, trevo branco e trevo da pérsia foi de 30, 3 e 8 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O pastejo é realizado pelo método contínuo com lotação variável, com bovinos jovens, com 10 meses de idade e pesando cerca de 200 kg. A pastagem mantida a uma altura de 15 cm com o uso de animais reguladores de altura, pelo uso da técnica *put-and-take* (MOTT; LUCAS, 1952). A altura da pastagem é monitorada utilizando *sward stick* (BARTHAM, 1985) com a aferição de 150 pontos de amostragem por parcela experimental. A adubação nitrogenada foi aplicada na fase pastagem, quando as

plantas apresentavam três folhas completamente expandidas, com a utilização de 150 kg de N ha<sup>-1</sup> na forma de ureia, distribuídos a lanço em uma única aplicação.

**Tabela 4.** Quantidades de K adicionadas via fertilização no inverno e no verão em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil.

Ano	Estação	A-PC <sup>a</sup>	A-SIPA <sup>b</sup>	AS-SIPA <sup>c</sup>	ASM-SIPA <sup>d</sup>
		----- K (kg ha <sup>-1</sup> ) -----			
2013	Inverno	0	91	91	108
	Verão	100	100	100	100
2014	Inverno	0	108	108	108
	Verão	95	95	95	125
2015	Inverno	0	108	108	108
	Verão	100	100	66	100
2016	Inverno	0	108	108	108
	Verão	100	100	100	100
2017	Inverno	0	75	75	75
	Verão	75	0	0	0
2018	Inverno	0	62	62	62
	Verão	-	-	-	-
Média por ano		43	79	76	83
Total		469	946	913	992

<sup>a</sup>A-PC: Arroz com preparo convencional; <sup>b</sup>A-SIPA: Arroz em SIPA; <sup>c</sup>AS-SIPA: Arroz e soja em SIPA; <sup>d</sup>ASM-SIPA: Arroz, soja e milho em SIPA.

Ao final da fase pastagem, os bovinos são removidos do experimento para a dessecação de pré-semeadura das culturas de grãos. A semeadura dos cultivos agrícolas de verão ocorreu entre meses de outubro e novembro utilizando semeadora de linhas com distância entrelinhas de 17 cm para o cultivo de arroz e 45 cm para os cultivos de soja e milho. As densidades de semeadura e tratamentos culturais seguiram os propostos para cada cultura (REUNIÃO..., 2018; REUNIÃO..., 2017; REUNIÃO..., 2012), respectivamente.

### 5.3. Descrição dos sistemas em terras altas

O experimento de terras altas possui delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições, em um sistema fatorial 2 × 2, sendo testados diferentes sistemas de produção de soja em sistema plantio direto sobre

pastagem de azevém. O experimento fatorial testa efeito do pastejo [com pastejo (CP) e sem pastejo (SP)], e a época da adubação com P e K [adubação na lavoura, soja (AC) ou de sistema, azevém (AS)]. Dessa forma, o experimento possui quatro sistemas de produção, sendo: (SP-AC) cultivo de soja no período de verão com adubação de P e K na cultura e azevém sem pastejo no período de inverno; (CP-AC) cultivo de soja no período de verão com adubação de P e K na cultura e azevém com pastejo de ovinos no período de inverno; (SP-AS) cultivo de soja no período de verão e azevém sem pastejo no período de inverno com adubação de P e K na pastagem; (CP-AS) cultivo de soja no período de verão e azevém com pastejo de ovinos no período de inverno com adubação de P e K na pastagem. As quantidades e épocas de aplicação de fertilizantes por ano são apresentadas na **Tabela 5**.

**Tabela 5.** Quantidades de K adicionadas via fertilização no inverno e no verão em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil.

Ano	Estação	SP-AC <sup>a</sup>	CP-AC <sup>b</sup>	SP-AS <sup>c</sup>	CP-AS <sup>d</sup>
		K (kg ha <sup>-1</sup> )			
2017	Inverno	0	0	58	58
	Verão	58	58	0	0
2018	Inverno	0	0	58	58
	Verão	-	-	-	-
Média por ano		58	58	58	58
Total		58	58	116	116

<sup>a</sup>SP-AC: Sem pastejo e adubação de cultura; <sup>b</sup>CP-AC: Com pastejo e adubação de cultura; <sup>c</sup>SP-AS: Sem pastejo e adubação de sistema; <sup>d</sup>CP-AS: Com pastejo e adubação de sistema.

A densidade de semeadura do azevém é 30 kg ha<sup>-1</sup>, sendo a pastagem mantida a uma altura de 15 cm com o uso de animais reguladores de altura, pelo uso da técnica de *put-and-take* (MOTT; LUCAS, 1952). A altura da pastagem é monitorada utilizando *sward stick* (BARTHAM, 1985), com a aferição de 150 pontos de amostragem por parcela experimental. A adubação nitrogenada foi, na fase pastagem, de 150 kg de N ha<sup>-1</sup> na forma de ureia, distribuídos a lanço em uma única aplicação.

Ao final da fase pastagem, os ovinos foram removidos da área para a dessecação de pré-semeadura das culturas de grãos com o herbicida glifosato no

mês de outubro. A semeadura da soja ocorreu no mês de outubro utilizando semeadora de linhas com distância entrelinhas de 45 cm para o cultivo de soja. A densidade de semeadura e tratos culturais seguiram os propostos para a cultura (REUNIÃO..., 2012).

#### 5.4. Coleta e análise de solo e água

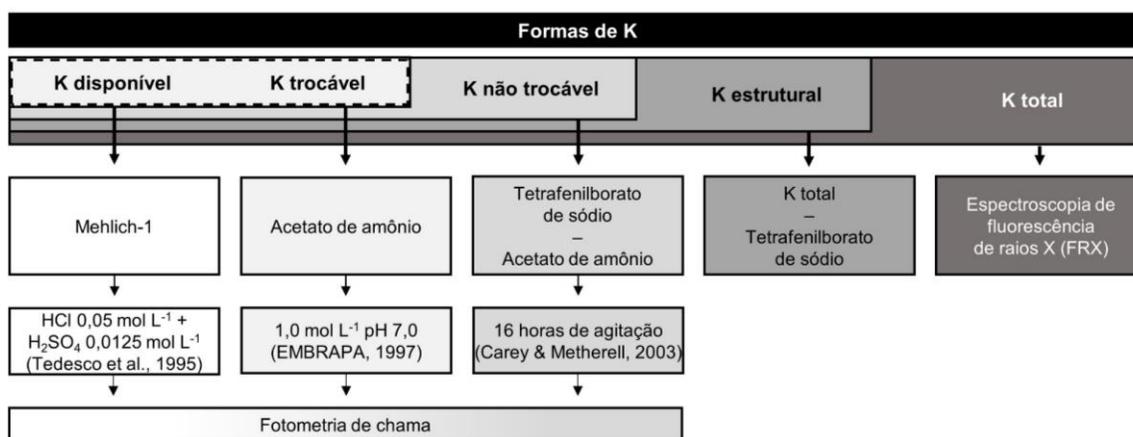
As coletas de solo foram realizadas no mês de outubro de 2018, dois anos após a instalação do experimento de terras altas e cinco anos após a instalação do experimento em terras baixas. As camadas utilizadas foram de 0-10, 10-20 e 20-30 cm, oriundas de cinco amostras compostas. As amostras de solo foram secas ao ar (TFSA), moídas e peneiradas em malha de 2 mm e analisadas, de acordo metodologia proposta por Tedesco et al. (1995), para pH em água na proporção 1:1, teor de matéria orgânica por combustão úmida, P disponível extraído por Mehlich-1, cálcio e magnésio trocáveis extraído por KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>.

A determinação das formas de K do solo levou em consideração os teores de K trocável, não trocável, estrutural e total (**Figura 3**). O K disponível foi estimado pela extração com Mehlich-1, composto por uma mistura de dois ácidos fortes diluídos (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>), conforme descrito por Tedesco et al. (1995). O K trocável foi extraído com acetato de amônio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) 1,0 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0 (EMBRAPA, 1997). O teor de K não trocável foi estimado com o extrator tetrafenilborato de sódio (NaTPB) com 16 horas de extração, conforme proposto por Carey e Metherell (2003), e posterior subtração do valor de K obtido com a extração com acetato de amônio (K-trocável). A determinação do teor de K de todos os extratos descritos acima foi realizada utilizando espectrofotometria de emissão de chama no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFRGS.

A determinação de K total foi estimada utilizando espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) utilizando a configuração "EQUA\_Oxides" em dois métodos de ensaio: "Pellet WAX" e "Solid" em um espectrômetro de fluorescência

de raios X da marca BRUKER-S2 Ranger no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul. Posteriormente, o K estrutural foi estimado pela diferença entre os teores de K total e K extraído com NaTPB (**Figura 3**). Em ambos os experimentos, foram realizadas a caracterização mineralógica, da fração argila da camada 0-30 cm de solo, utilizando difratometria de raios X (DRX) no Departamento de Solos da UFRGS.

No experimento de terras baixas, foram coletadas amostras de água remanescentes da irrigação nos sistemas A-PC e A-SIPA durante os 73 dias de irrigação por inundação da cultura em quatro momentos (2, 22, 42 e 73 dias após início da irrigação) para a quantificação das perdas de K pela água calculando a diferença entre a concentração de K ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no ponto de entrada da água nas parcelas menos a concentração de K observada na saída do quadro de irrigação.



**Figura 3.** Formas de K determinadas e descrição das metodologias utilizadas para sua quantificação em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil.

## 5.5. Balanço de nutrientes

Para o cálculo do balanço de K no solo, todas as entradas de K via fertilizantes potássicos e saídas de K via carne (ovina e bovina) e grãos (arroz, soja e milho) foram quantificados pelos dados históricos das áreas experimentais. A exportação de K pela carne ovina e bovina foram estimadas com base nos valores propostos por Williams (2007) (carne ovina =  $3,44 \text{ g kg}^{-1}$  de K e carne

bovina = 3,63 g kg<sup>-1</sup> de K). Para as culturas de grãos, os valores de exportação de K nos grãos foram de acordo com SBCS (2016) (16,7, 5,0 e 2,5 kg Mg<sup>-1</sup> de grãos para soja, milho e arroz, respectivamente).

O cálculo do balanço de K considerou a diferença entre os teores iniciais e finais de K disponível e também a proporção das formas trocáveis e não trocáveis, esses últimos em percentual, na camada de solo 0-30 cm (Equação 1):

$$BS = C_f - C_i \quad (\text{Equação 1})$$

onde: BS = balanço do solo, C<sub>f</sub> = conteúdo de K final em 2018 e C<sub>i</sub> = conteúdo de K inicial em 2013 (terras baixas) e 2017 (terras altas).

O balanço efetivo da fração disponível de K do solo foi calculado considerando as entradas de K via fertilizantes nas adubações das culturas de grãos e pastagens e saídas de K devido à exportação pelos grãos e carne (Equação 2):

$$BE = (C_f - C_i) - (E_f - S_{gc}) \quad (\text{Equação 2})$$

onde: BE = balanço efetivo, C<sub>f</sub> = conteúdo de K disponível final em 2018, C<sub>i</sub> = conteúdo de K disponível inicial em 2013 (terras baixas) e 2017 (terras altas), E<sub>f</sub> = entradas de K via fertilizantes de 2013 a 2018 (terras baixas) e 2017 a 2018 (terras altas) e S<sub>gc</sub> = saídas de K via grãos e carne de 2013 a 2018 (terras baixas) e 2017 a 2018 (terras altas).

## 5.6. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos aos testes das pressuposições do modelo matemático de normalidade por teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variáveis por teste de Levene. A análise da variância foi realizada através do teste F e quando significativa ( $p < 0,05$ ), as médias comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro, usando o software SAS<sup>®</sup>.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Comparação entre formas de K em solos de terras altas e terras baixas

A fração prontamente disponível de K foi afetada apenas pela camada de solo em ambos os ambientes de produção. Todas as frações potencialmente disponíveis foram influenciadas pelos sistemas no ambiente de terras baixas e somente o K não trocável influenciado pela adubação e camada de solo nas terras altas (**Tabela 6**).

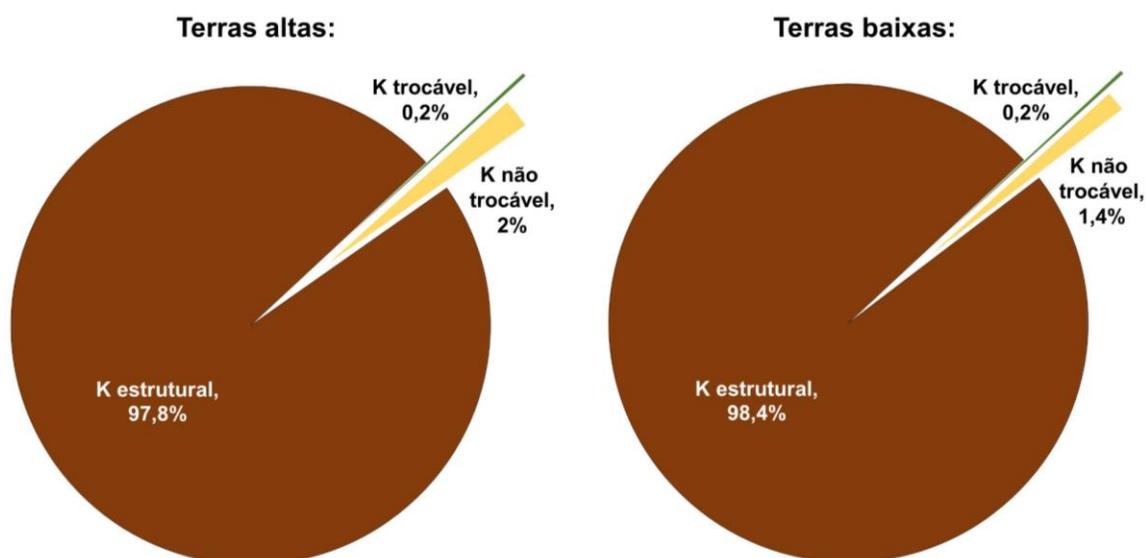
**Tabela 6.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações nas formas de K no solo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas (Planossolo) e terras altas (Plintossolo) no sul do Brasil.

Variável	--Terras baixas--			-----Terras altas-----						
	S <sup>a</sup>	C <sup>b</sup>	S×C	P <sup>c</sup>	A <sup>d</sup>	C	P×A	P×C	A×C	P×A×C
K disponível	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
K trocável	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
K não trocável	*	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
K estrutural	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
K total	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

<sup>a</sup> Sistema. <sup>b</sup> Camada de solo. <sup>c</sup> Pastejo. <sup>d</sup> Adubação. \* Significante ( $p < 0.05$ ). <sup>ns</sup> Não significante.

A maior parte do K encontra-se na forma estrutural (98,4 e 97,8% respectivamente) na média da camada 0-30 cm de solo (**Figura 4**). Esses valores são compatíveis com a mineralogia do material de origem da região (granito e

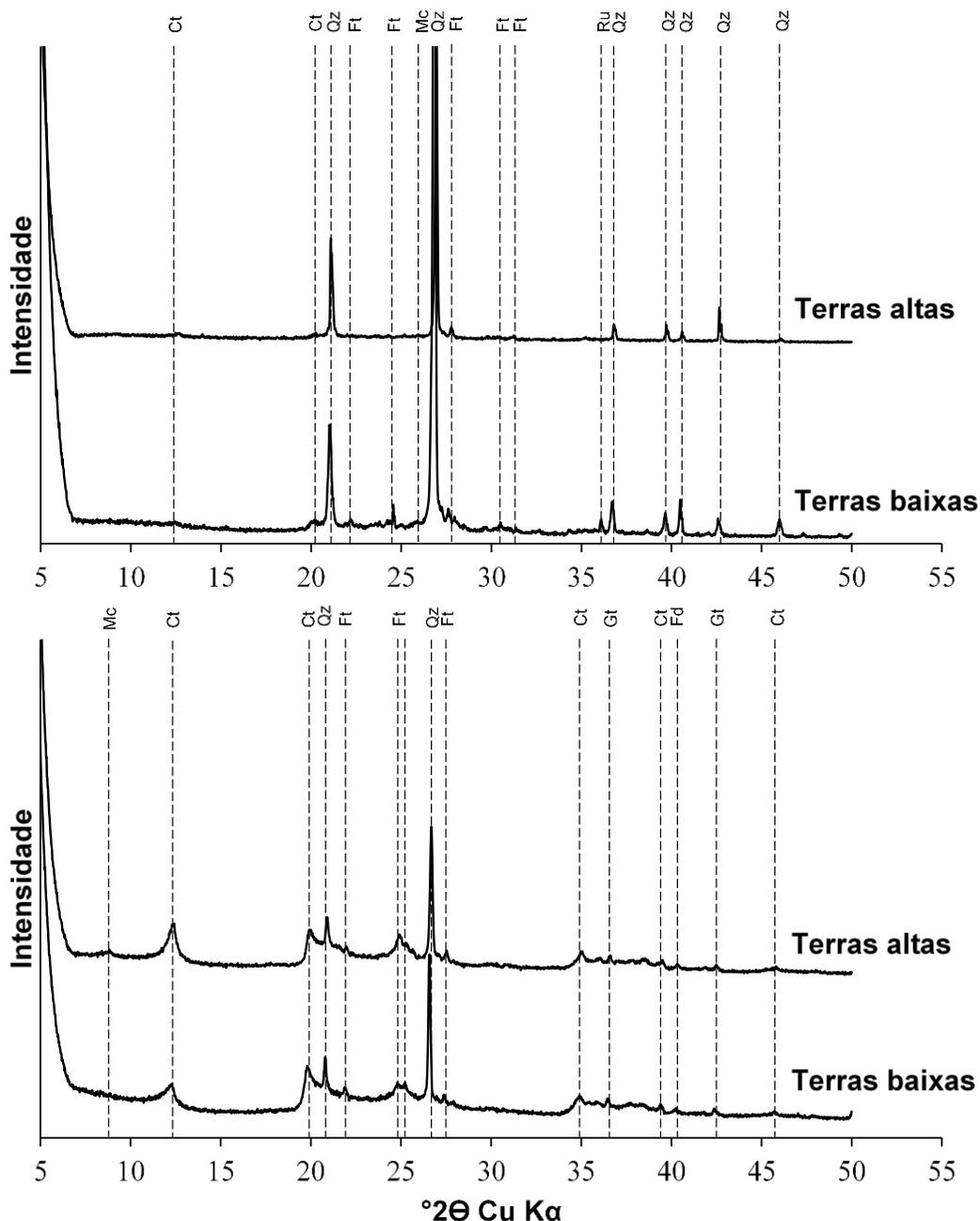
sedimentos de granito), que possuem micas e feldspatos como minerais primários. Ambos minerais foram identificados por DRX (**Figura 5**) e são ricos em K em suas estruturas sendo fonte de K no solo para as plantas (MELO et al., 2005; MELO et al., 2009). Na região sul do Rio Grande do Sul, Nachtigall; Vahl (1989; 1991) encontraram teores de K estrutural próximo aos do presente estudo (média de 27.527 e 29.990 mg kg<sup>-1</sup> em terras baixas e terras altas, respectivamente), onde solos também derivados do granito e com grau de desenvolvimento semelhantes apresentam teores de K total entre 29.000 e 39.000 mg kg<sup>-1</sup> na camada 0-20 cm.



**Figura 4.** Proporções das frações trocáveis, não trocáveis e estruturais de K na camada 0-30 cm de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil.

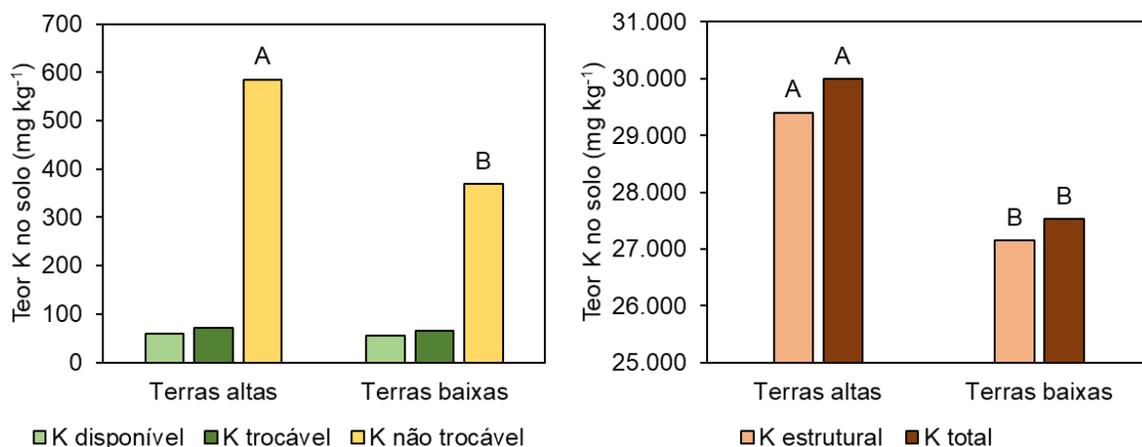
A fração não trocável representa cerca de 1,4 e 2,0% para terras baixas e terras altas, respectivamente, enquanto a forma trocável e disponível apenas 0,2% do total de K avaliado em ambos os ambientes (**Figura 4**). Isso demonstra que nessas áreas existe um potencial de fornecimento de K às culturas cerca de dez vezes maior do que a estimada pelos extratores convencionais utilizados pelos laboratórios de análises de solo de rotina (SBCS, 2016). Nos solos do Rio Grande do Sul é possível encontrar uma ampla variação de K não trocável, variando de 21 a 1754 mg kg<sup>-1</sup> (NACHTIGALL; VAHL, 1991; CASTILHOS et al.,

2002; BRITZKE et al., 2012). Os maiores teores de K não trocável foram encontrados em solos que apresentam argilominerais 2:1 e teores menores em solos com predominância de argilas do tipo 1:1. Os solos do presente estudo têm mineralogia com predominância de quartzo associado a caulinita com traços de mica e feldspato, esses ultimos importantes fontes de K no solo (**Figura 5**).



**Figura 5.** Difratogramas de raios-X entre 4° e 54°theta na fração TFSA (A) e argila (B) do solo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas e terras baixas no sul do Brasil. Ct (caulinita), Ft (feldspato), Gt (goetita), Mc (mica), Qz (quartzo), Ru (rutilo).

O ambiente de terras altas apresentou maior teor de K não trocável, estrutural e total (**Figura 6**). Isso ocorre porque embora os solos dos dois experimentos apresentem mineralogia semelhante, no ambiente de terras baixas, o cultivo do arroz por inundação e a maior umidade do solo ao longo do ano são condições que favorecem a difusão do íon  $K^+$  da entrecamada dos argilominerais 2:1.

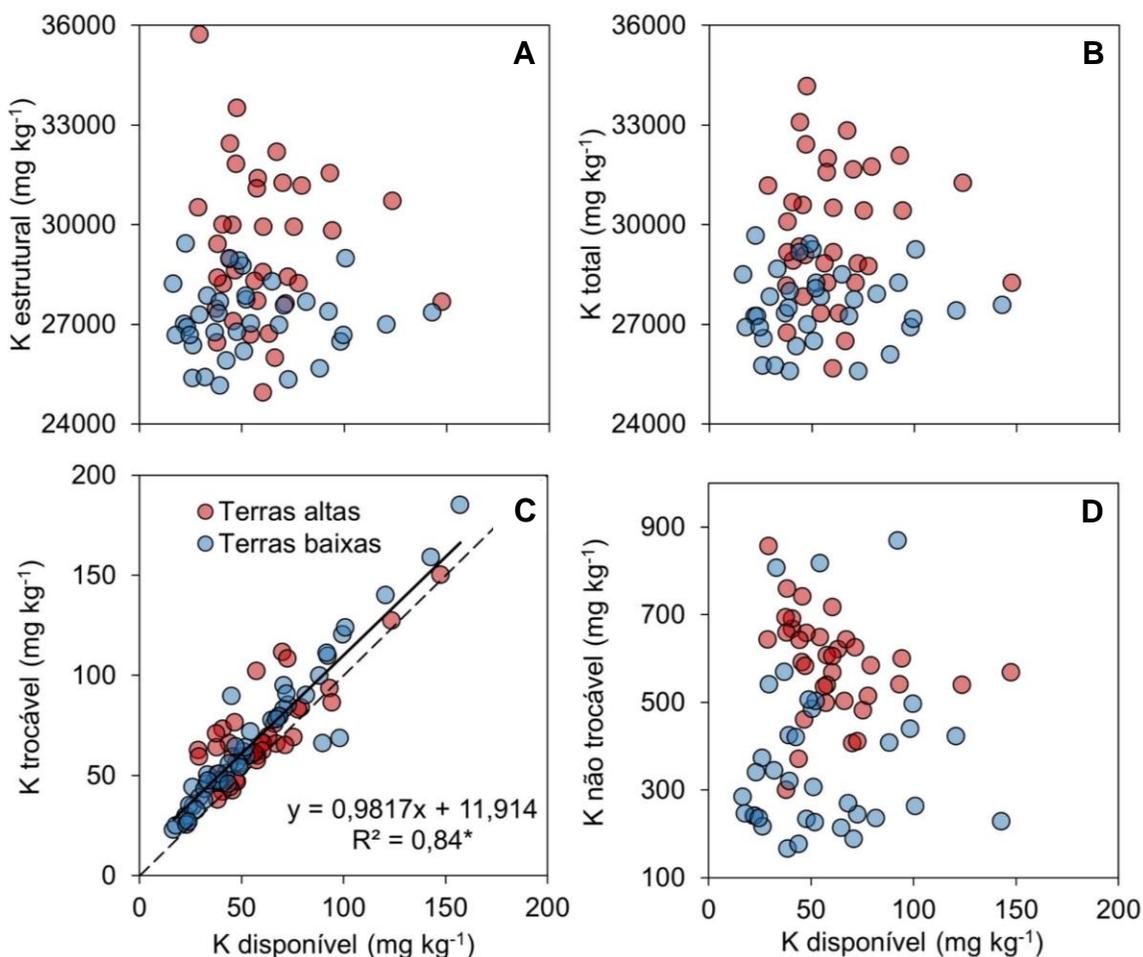


**Figura 6.** Teores médios das formas de K em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas e terras altas no sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam as formas de K nos diferentes ambientes ( $p < 0,10$ ).

Além disso, a condição reduzida do solo nas terras baixas pode favorecer a depleção das formas potencialmente disponíveis de K, o que não ocorre no ambiente de terras altas, onde os mesmos minerais tendem a se comportarem como dreno de K. Embora o K não participe diretamente das reações de oxirredução, o alagamento do solo resulta em aumento da liberação de  $K^+$  adsorvido ao solo devido à competição do ferro ( $Fe^{2+}$ ) e do manganês ( $Mn^{2+}$ ) pelos sítios de troca do solo em função da sua alta concentração (ERNANI et al., 2007). Numa condição reduzida, o N é mais estável na forma de amônio ( $NH_4^+$ ), que passa a competir diretamente com o íon  $K^+$  adsorvido na cavidade siloxana dos argilominerais 2:1. Esse efeito, juntamente com a alta absorção de K na rizosfera do arroz, cria um ambiente favorável à difusão de K pelas entrecamadas dos argilominerais em direção à sua superfície, havendo a reposição do K trocável pelo não trocável (CASTILHOS, 1999). Além disso, a expansão dos argilominerais

promovida pelo umedecimento do solo permite a exposição das suas superfícies internas, facilitando o deslocamento de K para a solução do solo, que no momento do secamento acaba por aprisionar o elemento nas entrecamadas da argila, aumentando os teores de K não trocável no solo (MCLEAN; WATSON, 1985).

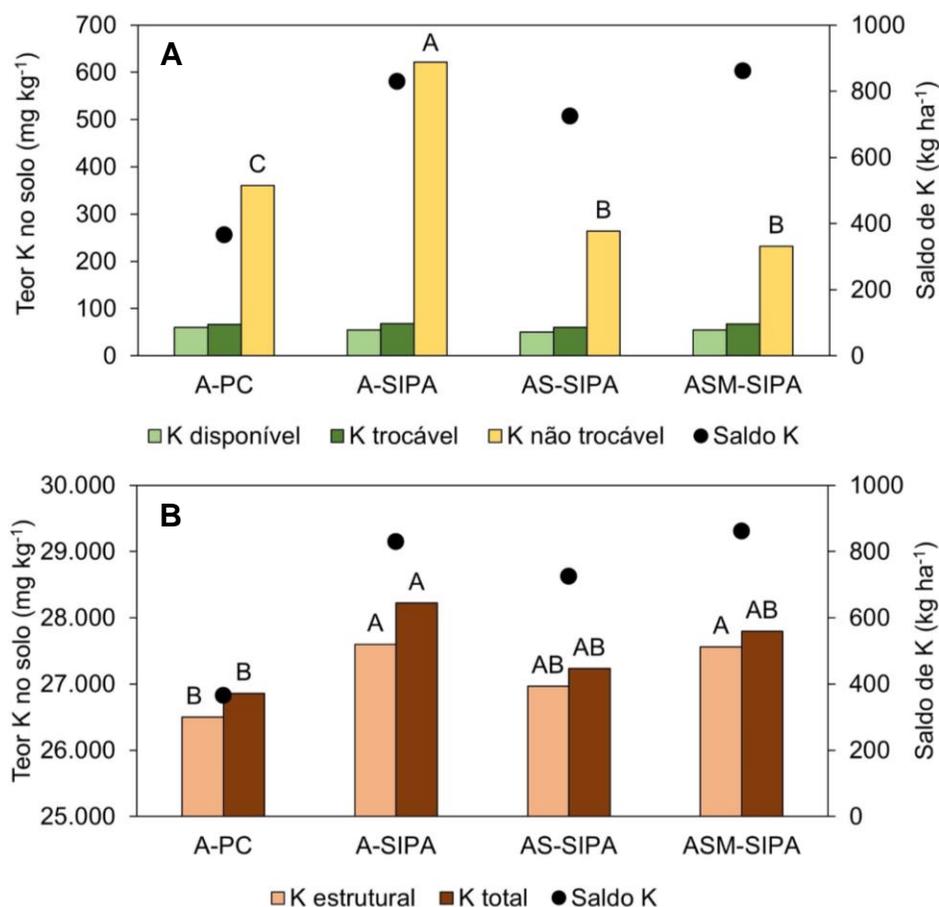
Foi verificado que existe uma estreita relação entre o teor de K extraído com Mehlich-1 e com acetato de amônio ( $R^2 = 0,84\%$ ) (**Figura 7C**), similar ao encontrado por Ferrando et al. (2020) e Fuduka et al. (2017). O teor de K extraído com Mehlich-1 e a forma estrutural, total e não trocável (**Figura 7A, B, D**, respectivamente) não apresentaram relações entre si, indicando que a extração com Mehlich-1 não é capaz de estimar a possível reserva de K de formas potencialmente disponíveis do solo.



**Figura 7.** Relação entre o teor de K disponível extraído com Mehlich-1 e o teor de K estrutural (A), total (B), trocável (C) e não trocável (D) de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas e terras altas no sul do Brasil. \*Significante ( $p < 0,05$ ).

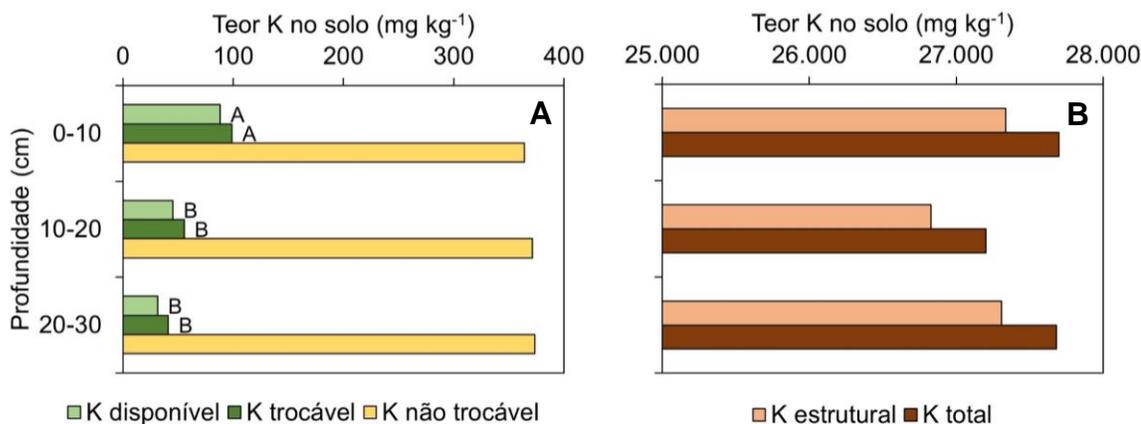
## 6.2. Efeito de diferentes SIPA nas formas de K no solo em terras baixas

O K trocável, estimado pela extração com acetato de amônio, e o K disponível, extraído com Mehlich-1, não foram sensíveis para detectar efeito dos diferentes sistemas de produção em terras baixas (**Figura 8A**). Porém, ambos extratores foram hábeis em demonstrar o forte gradiente de disponibilidade de K com aumento da profundidade (**Figura 9A**). Isso se deve à adubação realizada a lanço, sem incorporação, bem como à deposição de resíduos vegetais e dejetos dos animais na superfície do solo nos sistemas que possuem esse componente, contribuindo para a formação de uma camada superficial com maior teor de K trocável.



**Figura 8.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (**A**), estrutural e total (**B**) e saldo de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil.

A-PC: Arroz com preparo convencional; A-SIPA: Arroz com plantio direto; AS-SIPA: Arroz e soja com plantio direto; ASM-SIPA: Arroz, soja e milho com plantio direto. Letras maiúsculas comparam as formas de K nos sistemas ( $p < 0,05$ ).



**Figura 9.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (A), estrutural e total (B) de K nas camadas de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil.

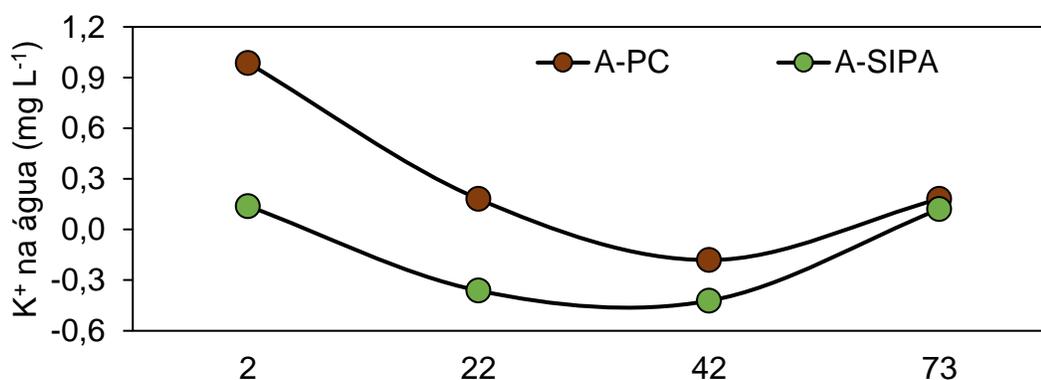
Letras maiúsculas comparam as formas de K nas profundidades ( $p < 0,05$ ).

Somente as formas de K potencialmente disponíveis às plantas (K não trocável, K estrutural e K total) foram sensíveis em detectar variações decorrentes dos diferentes sistemas de produção agropecuários utilizados (**Figura 8A, B**). A variação no teor de K estrutural e total do solo nos quatro sistemas avaliados pode ser explicado diretamente pela diferença entre a quantidade de K adicionado via fertilizante e o K exportado via grãos e carne (**Tabela 7**). Dessa forma, quanto maior o saldo de K no sistema, maior é o acúmulo de K no solo na forma estrutural e total. Por outro lado, o saldo de K no sistema não foi suficiente para explicar totalmente a variação no teor de K não trocável no solo (**Figura 8A**). Para compreender melhor a variação no teor de K não trocável, é preciso separar os sistemas em dois conjuntos: (i) com cultivo de arroz irrigado todos os anos (A-PC e A-SIPA), e (ii) com cultivo de arroz irrigado em rotação com culturas de sequeiro (AS-SIPA e ASM-SIPA).

Nos sistemas em que é feito cultivo de arroz irrigado todos os anos, a variação na umidade do solo ao longo do ano é semelhante, e o ambiente alagado durante o cultivo do arroz proporciona maior difusão do íon  $K^+$ . A maior difusão facilita tanto a entrada quanto a saída do íon  $K^+$  das entrecamadas de argilominerais 2:1, que são reguladores-chave da dinâmica de K no solo. Quando a adição de K é menor que a exportação, a tendência é de que o K fixado seja

liberado. Mas quando a quantidade de K adicionado é maior do que a exportada, como é o caso dos sistemas A-PC e A-SIPA, o excesso de K adicionado tende a ser fixado pelos argilominerais tornando-se parcialmente ou potencialmente disponível às plantas a médio e longo prazo (MEURER et al., 2018). Como o saldo de K foi cerca de 2,3 vezes maior no sistema A-SIPA ( $830 \text{ kg ha}^{-1}$  de K) comparativamente ao A-PC ( $366 \text{ kg ha}^{-1}$ ), o teor de K não trocável na camada de 0-30 cm foi quase o dobro no A-SIPA ( $622 \text{ mg kg}^{-1}$ ) comparativamente ao A-PC ( $366 \text{ mg kg}^{-1}$ ). O alto aporte externo de fertilizantes potássicos no sistema A-SIPA, permitiu uma menor depleção e consequente acúmulo da fração potencialmente disponível de K no solo, que foi cerca de 58% maior que o observado no sistema A-PC para a fração não trocável de K (**Figura 8A**).

Além do saldo de K, outros fatores podem ter contribuído em menor grau para uma maior reserva de K não trocável no sistema A-SIPA comparativamente ao sistema A-PC. Um deles é a possível saída de K decorrente do fluxo de água de irrigação sobre solo desestruturado durante o período inicial de inundação da cultura do arroz, logo após a fertilização potássica, ou durante o período de pousio hibernar. Como pode ser visto na **Figura 10**, nos primeiros dias de estabelecimento da lâmina de água na cultura do arroz, o teor de K na saída de água da lavoura no sistema A-PC chegou à  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ , enquanto que, no sistema A-SIPA, foi de apenas  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$  de K (**Figura 10**). Isso demonstra que, após o alagamento, possivelmente existe um maior potencial de perda de K quando o solo é mobilizado (A-PC).



**Figura 10.** Diferença entre o teor de K na água de irrigação da cultura do arroz na saída e na entrada da lavoura em diferentes sistemas de produção em terras baixas no sul do Brasil.

Nos sistemas em que o arroz irrigado faz rotação com culturas de sequeiro como o milho e soja (AS-SIPA e ASM-SIPA), existe menor difusão do íon  $K^+$ . A menor frequência de alagamento comparado aos sistemas A-PC e A-SIPA, permite um maior tempo para o K remanescente na solução do solo retornar as entrecamadas dos argilominerais e penetrar nessa região, se tornando menos acessível pela extração com tetrafenilborato de Na, e passando assim, a ser contabilizado como parte do K estrutural do solo. Além disso, outro fator que pode ter contribuído para o menor teor de K não trocável nos sistemas AS-SIPA e ASM-SIPA é a maior exportação de K pelas culturas (**Tabela 7**), fazendo com que formas não trocáveis sejam utilizadas pela soja e o milho conforme identificado também por Chaves et al. (2015), Kaminski et al. (2007), Medeiros et al. (2014), Rosolem et al. (2012) e Silva et al. (2015).

O balanço efetivo de K utilizando o teor de K disponível do solo foi menos negativo no sistema A-PC, decorrente do menor aporte de K via fertilização nesse sistema (**Tabela 7**). Os sistemas que possuem pastagens no período hibernar (A-SIPA, AS-SIPA e ASM-SIPA) apresentaram os balanços efetivos de K disponível mais negativo devido à aplicação excessiva de fertilizantes potássicos, resultando em um acúmulo do nutriente no solo, possivelmente na forma estrutural. Esse fato se torna mais evidente nos sistemas A-SIPA e ASM-SIPA devido à menor exportação de K e pela ausência ou menor intensidade, respectivamente, de cultivo de soja, responsável pelos maiores valores de exportação de K nesse estudo.

De forma geral, as exportações de K foram governadas pelas culturas de grãos, correspondendo a 96% do total exportado, e a carne bovina responsável por apenas 4% na média de todos os sistemas. De forma semelhante, Alves et al. (2019) encontraram valores de exportação de P e K da ordem de 95% sobre responsabilidade da cultura de grãos, sendo essa considerada o componente exportador de nutrientes do sistema. A exportação de K foi maior no sistema AS-PD, devido à maior intensidade de cultivo de soja em rotação ao arroz comparado aos demais sistemas. Somente a cultura da soja foi responsável por cerca de 66% da exportação de K nesse sistema, enquanto o arroz representou apenas 32% e

a carne bovina menos de 1%. No sistema ASM-PD embora o milho exporte o dobro de K por tonelada produzida quando comparado ao arroz irrigado (SBCS, 2016), a baixa produtividade obtida na safra 2014/2015 não permitiu obter diferenças significativas na exportação quando comparado aos demais sistemas com maior frequência de cultivo de soja e/ou arroz.

**Tabela 7.** Balanço da forma disponível de K no solo na camada de 0-30 cm em um sistema integrado de produção agropecuária em terras baixas no sul do Brasil.

	A-PC <sup>a</sup>	A-SIPA <sup>b</sup>	AS-SIPA <sup>c</sup>	ASM-SIPA <sup>d</sup>
Entradas via fertilizante (kg ha <sup>-1</sup> )	469 D	946 B	913 C	992 A
Saída via grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	103 B	112 Ba	183 Aa	123 Ba
Saída via carne (kg ha <sup>-1</sup> )	-	4 b	5 b	7 b
Saída total (kg ha <sup>-1</sup> )	103 B	116 B	188 A	130 B
Saldo (kg ha <sup>-1</sup> )	366	830	725	862
	----- K disponível (kg ha <sup>-1</sup> ) -----			
Inicial (2013)	106 <sup>ns</sup>	106	106	106
Final (2018)	119 <sup>ns</sup>	111	99	109
Balanço do solo	13 <sup>ns</sup>	4	-7	3
Balanço efetivo	-354 A	-826 BC	-732 B	-860 C

<sup>a</sup>A-PC: Arroz com preparo convencional; <sup>b</sup>A-SIPA: Arroz com plantio direto; <sup>c</sup>AS-SIPA: Arroz e soja com plantio direto; <sup>d</sup>ASM-SIPA: Arroz, soja e milho com plantio direto. Letras maiúsculas comparam os sistemas. Letras minúsculas comparam dentro dos sistemas. ns: não significativo ( $p < 0,05$ ).

### 6.3. Efeito de diferentes SIPA nas formas de K no solo em terras altas

O teor de K no solo disponível extraído por Mehlich-1 e K trocável extraído por acetato de amônio não foi sensível em detectar as diferenças na fertilização potássica realizada no ambiente de terras altas, mesmo com os sistemas SP-AS e CP-AS recebendo 58 kg ha<sup>-1</sup> de K na forma de KCl apenas 96 dias antes da coleta de solo (**Tabela 5**). Isso pode ter ocorrido devido à rápida passagem do K aplicado via fertilizantes para a forma não trocável estimada pela extração com NaTPB.

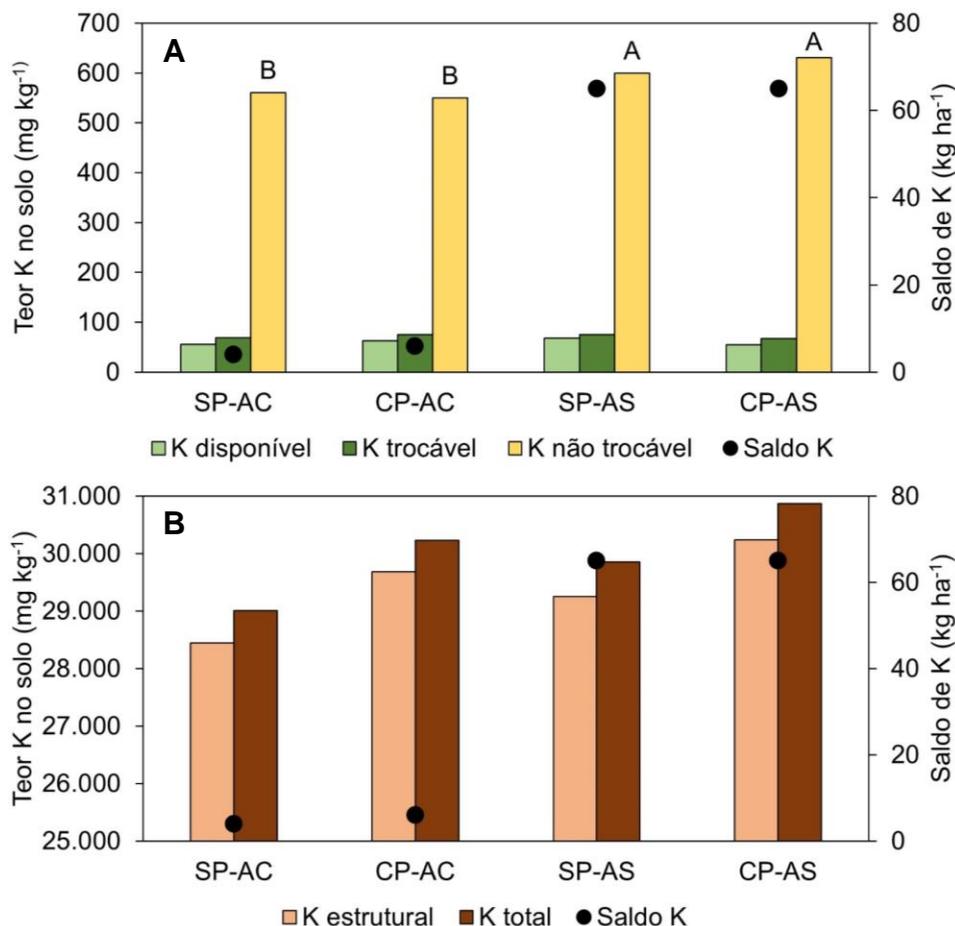
O pastejo animal não propiciou alterações nas formas de K no solo. Por outro lado, os resultados demonstram que a fração de K não trocável foi sensível em detectar efeitos da época da adubação nos diferentes sistemas. Os tratamentos SP-AS e CP-AS, que possuem adubação de K no inverno (adubação

de sistemas) apresentaram os maiores valores de K não trocável no solo (**Figura 11**). Essa diferença pode ser explicada pela época de coleta das amostras de solo em relação à época de adubação do experimento. A coleta foi realizada 96 dias após a adubação potássica e, possivelmente, o K adicionado pode ter sido aprisionado nas entrecamadas dos argilominerais 2:1 presentes no solo, como pode ser visto na **Figura 5**. Devido aos altos níveis de K na solução e no complexo de troca do solo, o remanescente deste sofre migração para as entrecamadas dos argilominerais 2:1, que são reguladores da dinâmica de K no solo, ao qual se torna parcialmente ou potencialmente disponível às plantas a médio e longo prazo (Meurer et al, 2018), reduzindo também o potencial de perdas do nutriente para o sistema. Em trabalhos envolvendo presença e ausência da adubação potássica em solos do sul do Brasil, Steiner et al. (2018) também identificaram aumentos significativos de K não trocável apenas 45 dias após a adubação, sendo esse liberado em igual ou maior proporção durante o processo de absorção de nutrientes e desenvolvimento das culturas. Da mesma forma, Paola et al. (2016) concluíram que a liberação e posterior adsorção de K pelos argilominerais do solo é rápida. Esses autores verificaram que 40 dias após a semeadura da cultura, já era possível inclusive observar modificações na mineralogia da fração argila do solo, sendo esse retornado ao solo logo após a senescência da cultura.

O extrator NATPB foi sensível também para detectar diferenças nos teores de K não trocável de acordo com a camada de solo avaliada (**Figura 12**). As maiores concentrações de K não trocável na camada 20-30 cm do solo se devem ao fato do maior teor de argila nessa camada (**Tabela 3**), o que propicia maiores teores de K em formas potencialmente disponíveis, ao inverso do que pode ser observado com as formas disponíveis e trocáveis, as quais se concentraram nas camadas superficiais do solo devido a deposição de resíduos e dejetos dos animais. Aliado a esse fator, a menor concentração de raízes na camada 20-30 cm acarreta uma menor extração de K nessa camada de solo, quando comparado a camadas superiores.

Mesmo após dois anos de cultivos e diferentes aportes de K via adubação (**Tabela 5**), o K estrutural não sofreu alterações dentre os sistemas

avaliados. Isso pode ter ocorrido possivelmente porque uma pequena diferença de K aplicado via fertilizantes entre os tratamentos não é suficiente para ser detectado via FRX (MORTELE et al., 2016), diferentemente do que foi observado no experimento de terras baixas, onde as adições de K via fertilizantes foram muito maiores.

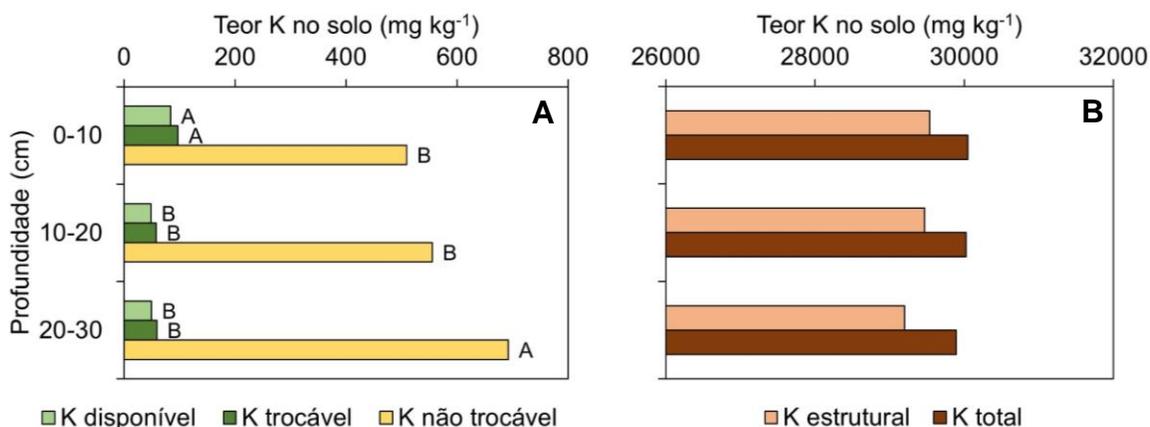


**Figura 11.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (A), estrutural e total (B) e saldo de K em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil.

SP-AC: Sem pastejo e adubação de cultura; CP-AC: Com pastejo e adubação de cultura; SP-AS: Sem pastejo e adubação de sistema; CP-AS: Com pastejo e adubação de sistema. Letras maiúsculas comparam as formas de K nos sistemas ( $p < 0,05$ ).

Devido ao momento de coleta das amostras de solo ser logo após a adubação dos sistemas contendo AS, estes apresentaram os maiores valores de entradas de K, bem como um balanço efetivo negativo de K disponível (Tabela 8). Porém, mesmo com a maior quantidade aportada de K, os sistemas não se

diferenciaram entre os teores iniciais e finais das formas de K, bem como os balanços de solo das frações trocável e não trocável de K.



**Figura 12.** Teores das formas disponível, trocável e não trocável (A), estrutural e total (B) de K nas camadas de solo em sistemas integrados de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil. Letras maiúsculas comparam as formas de K nas profundidades ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 8.** Balanço da forma disponível de K no solo na camada de 0-30 cm em um sistema integrado de produção agropecuária em terras altas no sul do Brasil.

	SP-AC <sup>a</sup>	CP-AC <sup>b</sup>	SP-AS <sup>c</sup>	CP-AS <sup>d</sup>
Entradas via fertilizante (kg ha <sup>-1</sup> )	58 B	58 B	116 A	116 A
Saída via grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	54	50 a	51	49 a
Saída via carne (kg ha <sup>-1</sup> )	-	2 b	-	2 b
Saída total (kg ha <sup>-1</sup> )	54	52	51	51
Saldo (kg ha <sup>-1</sup> )	4	6	65	65
----- K disponível (kg ha <sup>-1</sup> ) -----				
Inicial (2017)	91 <sup>ns</sup>	91	91	91
Final (2018)	113 <sup>ns</sup>	126	136	111
Balanço do solo	22 <sup>ns</sup>	35	45	20
Balanço efetivo	18 A	30 A	-20 B	-45 B

<sup>a</sup>SP-AC: Sem pastejo e adubação de cultura; <sup>b</sup>CP-AC: Com pastejo e adubação de cultura; <sup>c</sup>SP-AS: Sem pastejo e adubação de sistema; <sup>d</sup>CP-AS: Com pastejo e adubação de sistema. Letras maiúsculas comparam os sistemas. Letras minúsculas comparam dentro dos sistemas. ( $p < 0,05$ ).

#### 6.4. Número potencial de cultivos em diferentes SIPA

Simulando cenários produtivos considerando somente as exportações promovidas pelos grãos de arroz (SBCS, 2016) e pela carne bovina (WILLIAMS,

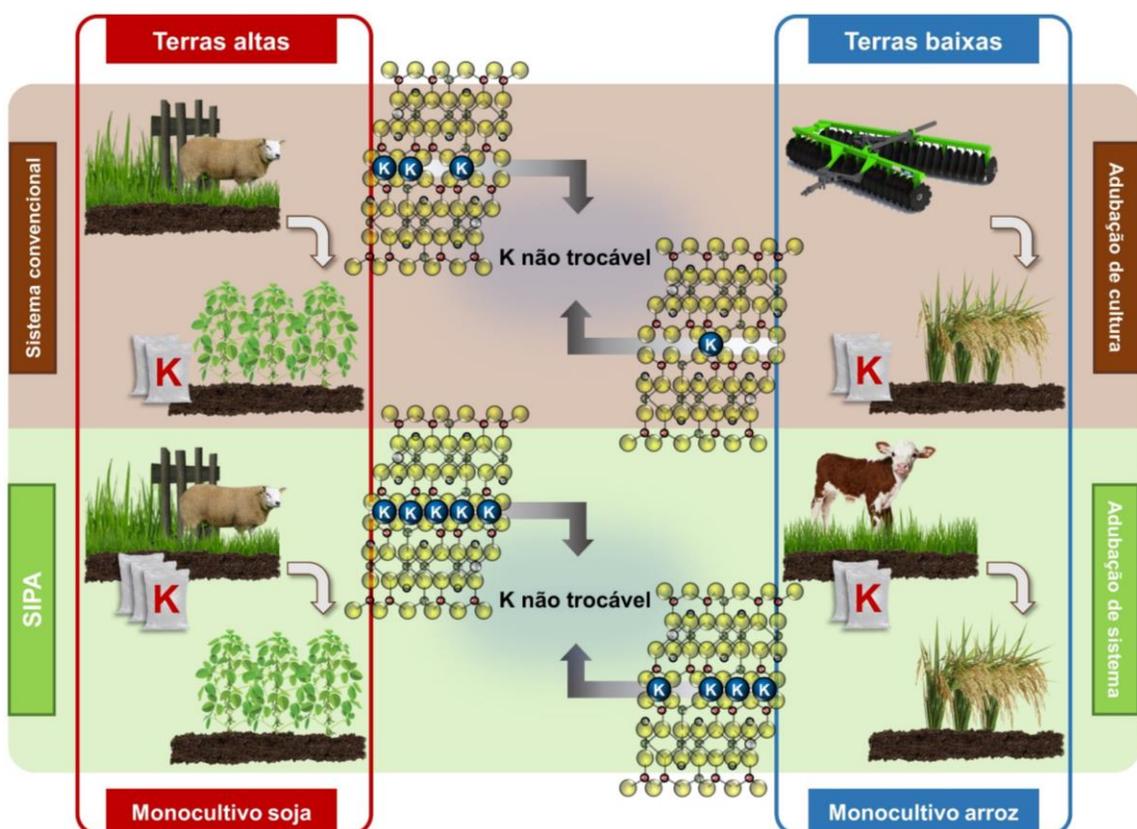
2007) no experimento de terras baixas, desconsiderando a passagem dentre as formas de K e propondo sua total passagem para a solução do solo, o estoque de K nas frações trocável, não trocável e estrutural seria suficiente para produzir cerca de 4, 25 e 1.811 safras de arroz respectivamente, com produtividade média de 10 Mg ha<sup>-1</sup>. Da mesma forma, para a produção bovina, o estoque de K nessas frações seria capaz de manter produções de 130, 739 e 54.317 anos respectivamente, com produtividade anual média de 450 kg ha<sup>-1</sup> de carne. Isso demonstra que o solo de terras baixas possui uma enorme capacidade de suprimento de K.

Na simulação de cenários produtivos considerando as exportações promovidas pela cultura da soja conforme a SBCS (2016) e da carne ovina segundo Willians (2007) no experimento de terras altas, o teor de K presentes nas formas trocável, não trocável e estrutural no Plintossolo avaliado, seria suficiente para atender às exportações de K pelos grãos da soja de 2, 15 e 774 safras, respectivamente, com produtividade anual de 4 Mg ha<sup>-1</sup>. Da mesma forma, para a produção ovina, essas mesmas frações de K no solo seriam capazes de manter produções de carne de ovinos por 143, 1.171 e 58.811 anos respectivamente, com produtividade anual de 450 kg ha<sup>-1</sup> de carne.

Contudo, é sabido que a velocidade de passagem das formas potencialmente disponíveis de K para a solução do solo pode ser lenta e incompatível com a demanda das plantas. Mortele et al. (2019), estudando um solo de sequeiro (terras altas) com pequena quantidade de argilominerais 2:1, observaram que a ausência da fertilização potássica limita a produtividade das culturas, além de comprometer as frações trocáveis e não trocáveis de K do solo. Ambos os ambientes de produção agrícola estudados possuem grande capacidade de fornecimento de K oriundo de formas potencialmente disponíveis, onde o ambiente de terras altas possui maiores reservas dessa fração no solo. Por outro lado, o ambiente de terras baixas possui maior potencial de liberação do nutriente para os cultivos agrícolas (**Figura 13**), porque a hidratação dos argilominerais que contém K em sua estrutura facilita o processo de liberação

desse para a solução do solo, vindo a ser absorvido pela cultura e por consequência consumindo as formas potencialmente disponíveis de K no solo.

A adoção de sistemas produtivos de carne e grãos que permitam uma melhor eficiência da adubação potássica, reduzindo perdas para o ambiente e maximizando o rendimento das culturas é fundamental. Estudos futuros que permitam quantificar a contribuição de formas potencialmente disponíveis de K para a nutrição de plantas em SIPA é necessário, visto que, devido à complexidade dos processos envolvidos nesses sistemas, a capacidade de suporte de culturas se diferencia de ambientes puramente agrícolas.



**Figura 13.** Comparação entre as quantidades de K potencialmente disponível na forma não trocável entre terras baixas e terras altas e enriquecimento dessa fração promovida pela migração de sistemas convencionais de produção com adubação de cultura para SIPA com adubação de sistema.

## 7. CONCLUSÕES

As formas potencialmente disponíveis de K, não trocável, estrutural e até mesmo o K total, foram mais sensíveis que o K trocável e disponível para detectar a variação decorrente da quantidade e época de aplicação de K via fertilizantes, sistema de manejo, rotação de culturas e pastejo animal, com maior potencial de acúmulo e posterior liberação no ambiente de terras baixas.

No ambiente de terras altas, o pastejo animal não propicia alterações das formas de K no solo. Porém, a utilização de adubação de sistemas em detrimento a adubação convencional propiciou o acúmulo momentâneo de K na forma não trocável no solo, podendo reduzir o potencial de perdas do nutriente para o sistema até o desenvolvimento pleno da cultura de verão. A adubação de sistemas resultou também em um balanço negativo decorrente do maior aporte de fertilizantes potássicos no momento da coleta de solo.

No ambiente de terras baixas, a adoção de um sistema integrado de produção (A-SIPA) em detrimento ao preparo convencional de arroz (A-PC), propiciou incremento nas formas potencialmente disponíveis de K, além de reduzir o potencial de perdas do nutriente. O maior aporte de fertilizantes potássicos no SIPA, resultou em um balanço de K mais negativo, enriquecendo as frações potencialmente disponíveis de K no solo. Além disso, arranjos produtivos com menor frequência de cultivo de arroz irrigado e maior diversificação de culturas (soja e milho) propiciam uma maior utilização das formas potencialmente disponíveis de K no solo.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A fração prontamente disponível de potássio, extraída com Mehlich-1 ainda é a metodologia mais aceita visando determinar a disponibilidade de potássio em curto período de tempo, a fim de realizar recomendações de adubação para o nível de safra agrícola. No mesmo sentido, diversas metodologias, como as utilizadas no presente estudo, visam caracterizar e compreender a dinâmica das diferentes formas de potássio, uma vez que, solos em uma mesma classe de fertilidade determinada pelo potássio disponível podem ter respostas totalmente diferentes quanto à eficiência da adubação.

Em terras baixas, a utilização arranjos produtivos que permitam reduzir as perdas de potássio para o sistema, como o plantio direto, e da mesma forma, exploram as reservas das formas potencialmente disponíveis, como a utilização de culturas de sequeiro com alta extração de potássio, são medidas que aumentam a eficiência da adubação potássica e a sustentabilidade do ambiente. No mesmo sentido, no ambiente de terras altas, a antecipação da adubação potássica para o período de inverno, pode reduzir a possibilidade de perdas do nutriente para o sistema, ficando esse armazenado na fração não trocável do solo.

Os resultados desse trabalho demonstram que, formas ditas como potencialmente disponíveis, com dinâmica lenta perante a adsorção e liberação de potássio, podem sim sofrer grandes variações decorrentes de sistemas de semeadura, pastejo animal, rotação de culturas, épocas de aplicação e quantidades de fertilizantes potássicos adicionados. Conhecer de forma detalhada e isolada cada um desses fatores são medidas que devem ser tomadas em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNES, V.; ZOBECK, T. M.; ALLEN, V. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop–livestock systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 6, p. 1875-1884, 2004.
- ALMEIDA, T. F. **Formas e balanço de potássio em Latossolo sob sistema integrado de produção agropecuária de soja e bovinos em plantio direto no Sul do Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-778, 2013.
- 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.
- ASSMANN, J. M. *et al.* Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 108, p. 21–33, 2017.
- BARTHAM, G. T. Experimental techniques: the HFRO sward stick. *In*: ALCOCK, M. M. (ed.). **Hill farming research organisation biennial report 1984-85**. Penicuik: HFRO, 1985. p. 29–30.
- BAYER, C. *et al.* Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237–245, 2006.
- 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.
- BORKERT, C. M. *et al.* Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 1, p. 143-153, 2003.
- BORIN, J. B. M. **Atributos de qualidade do solo e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- BRITZKE, D. *et al.* A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 12, p. 185–197, 2012.

BRUM, A. L.; MÜLLER, P. K. A realidade da cadeia do trigo no Brasil: o elo produtores/cooperativas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 46, n. 1, p. 145-169, 2008.

CAREY, P. L.; METHERELL, A. K. Rates of release of non-exchangeable potassium in New Zealand soils measured by a modified sodium tetraphenylboron method. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 46, n. 3, p. 185–197, 2003.

CARVALHO, P. C. F. *et al.* Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018.

CARVALHO, P. C. F. *et al.* Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 1040–1046, 2014.

CASTILHOS, R. M. *et al.* Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 579-587, 2002.

CASTILHOS, R. M. V. **Suprimento de potássio em solos cultivados com arroz irrigado e sua relação com mineralogia, formas e cinética de liberação**. 1999. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

CECAGNO, D. *et al.* Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.

CECATO, U. *et al.* Teores de carboidratos não-estruturais, nitrogênio total e peso de raízes em coastacross-1 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers) pastejado por ovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 644-650, 2001.

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.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra 2018/19: décimo levantamento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, Brasília, DF, v. 6, n. 10, p. 1-113, jul. 2019. Monitoramento agrícola. Observatório Agrícola: Disponível em: [https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/27148\\_784c4d4368c35979df1ea007136999ae](https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/27148_784c4d4368c35979df1ea007136999ae). Acesso em: 22 ago. 2019.

CIULLO, P. A. (ed.). **Industrial minerals and their uses: a handbook and formulary.**, New Jersey: Noyes Publications, 1996.

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. *In*: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 71-91.

DAS, D. *et al.* Measuring potassium fractions is not sufficient to assess the long-term impact of fertilization and manuring on soil's potassium supplying capacity. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 18, p. 1806–1820, 2018.

DENARDIN, L. G. O. *et al.* No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p. 64-69, 2019.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 551-594.

FERRANDO, G. M. *et al.* Comparison of the ammonium acetate, Mehlich-3 and sodium tetraphenylboron as extractants to evaluate crop available potassium. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 51, n. 8, p. 997-1005, 2020.

FERREIRA, E. V. O. *et al.* Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1675-1684, 2009.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. 5. ed. Passo Fundo: UPF, 2011.

FRAGA, T. I. *et al.* Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 497-506, 2009.

FUKUDA, M. *et al.* Evaluation of the Mehlich-3 reagent as an extractant for cations and available phosphorus for soils in Mozambique. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 48, n. 12, p. 1462–1472, 2017.

GATIBONI, L. C. *et al.* Use of exchangeable and nonexchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 20, p. 665–674, 2020.

GARCIA, R. A. *et al.* Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 579-585, 2008.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: review of the underlying ecophysiological processes. **Agriculture**, Basel, v. 5, n. 4, p. 1146–1171, 2015.

GIACOMINI, A. A. *et al.* Crescimento de raízes dos capins Aruana e Tanzânia submetidos a duas doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 1109-1120, 2005.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 49, p. 119-199, 1993.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **Short-term prospects for World agriculture and fertilizer demand**. 2019. Disponível em: <https://www.ifastat.org>. Acesso em: 7 maio 2020.

JONES, D. L. *et al.* Organic acid behavior in soils - misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, p. 31–41, 2003.

JOHANSSON, G. Carbon distribution in grass (*Festuca arundinacea*) during regrowth after cutting – Utilization of stored and newly assimilated carbon. **Plant and Soil**, The Hague, v. 151, n. 1, p. 11-20, 1993.

KAMINSKI, J. *et al.* Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1003-1010, 2007.

KAMINSKI, J. *et al.* Potassium availability in a hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 783-791, 2010.

KLAMT, E.; KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzea no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, 1985. (Boletim Técnico, n. 4).

LEMAIRE, G. *et al.* Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 4-8, 2014.

LUZ, F. B. *et al.* Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 281, p. 100-110, 2019.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1117-1126, 2011.

- MCLEAN, E. O.; WATSON, M. E. Soil measurement of plant available potassium. *In*. MUNSON, R. D. (ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA, CSSA, 1985. cap. 10, p. 227-308.
- MEDEIROS, J. S. *et al.* Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014.
- MEENA, V. S. *et al.* **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. London: Springer Nature, 2016.
- MELLO, L. M. M. *et al.* Integração agricultura-pecuária em plantio direto: produção de forragem e resíduo de palha após pastejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 121-129, 2004.
- MELO, V. F. *et al.* Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 533-545, 2005.
- MELO, V. F.; MATTOS, J. M. S.; LIMA, V. C. Métodos de concentração de minerais 2:1 secundários na fração argila visando sua identificação por difratometria de raios-X. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 527-539, 2009.
- MEURER, E. J.; TIECHER, T.; MATTIELLO, L. Potássio. *In*: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. p. 429-464.
- MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 1, n. 2/3, p. 55-61, 1977.
- 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.
- MORAES, A. *et al.* Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 57, p. 4-9, 2014.
- MORTELE, D. F. *et al.* Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. **Plant Soil**, The Hague, v. 406, p. 157–172, 2016.
- MORTELE, D. F. *et al.* Does ferralsol clay mineralogy maintain potassium long-term supply to plants? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 43, [art.] e0180166, 2019.
- MORVAN-BERTRAND, A. *et al.* Partitioning of reserve and newly assimilated carbon in roots and leaf tissues of *Lolium perenne* during regrowth after defoliation: Assessment by <sup>13</sup>C steady-state labeling and carbohydrate analysis. **Plant Cell & Environment**, Oxford, v. 22, n. 9, p. 1097- 1108, 1999.

MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. *In*: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings** [...]. Washington, DC: [s.n.], 1952. v. 2. p.1380-1385.

MURRELL, T. S. The concept of “minimal” exchangeable potassium. **Plant Nutrition Today**, Peachtree Corners, v. 3, n. 3, [p. 1-2], 2018.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Parâmetros relacionados à acidez em solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 139-143, 1989.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L.C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da Região Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 37-42, 1991.

NASCIMENTO, S. N.; CARVALHO, N. L. Integração lavoura-pecuária. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 4, n. 4, p. 828-847, 2011.

PAGOTTO, D. S. **Comportamento do sistema radicular do capim-tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) sob irrigação e submetido a diferentes intensidades de pastejo**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PARAJULI, R.; DALGAARD, T.; BIRKVED, M. Can farmers mitigate environmental impacts through combined production of food, fuel and feed? A consequential life cycle assessment of integrated mixed crop-livestock system with a green biorefinery. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 619/620, p. 127–143, 2018.

PAOLA, A. *et al.* Short term clay mineral release and re-capture of potassium in a Zea mays field experiment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 264, p. 54-60, 2016.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 39., 2012, Passo Fundo, RS. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina: safras 2012/2013 e 2013/2014**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012.

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE PESQUISA DE MILHO, 62.; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE PESQUISA DE SORGO, 45., 2017, Sertão, 2017. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul: safras 2017/2018 e 2018/2019**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 32., 2018, Farroupilha, RS. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Cachoeirinha: SOSBAI, 2018.

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.

SALTON, J. *et al.* Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward asustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70–79, 2014.

SANTOS, H. P. *et al.* Efeito de sistemas de produção mistos sob plantio direto sobre fertilidade do solo após oito anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 545-552, 2003.

SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIENCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. [S.l.]: SBCS. Núcleo Regional Sul, 2016.

SCHOENFELD, R. *et al.* Resposta do arroz irrigado a níveis de adubação em experimento de Longa duração. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 30., 2012, Maceió. **FERTBIO 2012: [anais ...]**. Maceió: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, 2012.

SIQUEIRA JUNIOR, L. A. **Alterações de características do solo na implantação de um sistema de integração agricultura-pecuária leiteira**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

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.

SOUTO, M. S. **Pastagem de aveia e azevém na integração lavoura pecuária: produção de leite e características do solo**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, E. D. *et al.* Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1365-1374, 2010.

SPARKS, D. L. Potassium dynamics in soils. *In*: STEWART, B. A. (ed.). **Advances in soil sciences**. New York: Springer-Verlag, 1987. p. 1-61.

STEINER, F. *et al.* Changes in potassium pools in Paraná soils under successive cropping and potassium fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 6, p. 4083-4098, 2015.

STEINER, F.; LANA, M. C. Contribution of non-exchangeable K in soils from Southern Brazil under potassium fertilization and successive cropping. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 4, p. 547-557, 2018.

STRECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, EMATER/RS-ASCAR, 2018. 251 p.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, M. B. *et al.* Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 867-876, 2011.

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.

VERMA, T. S.; BHAGAT, R. M.; KANWAR, K. Evaluation of chemical methods for the determination of available potassium in waterlogged soil potassium availability indices in rotation of potassium fractions. **Journal of Potash Research**, [Gurgaon], v. 10, p. 12–22, 1994.

VIEIRA, M. S. *et al.* Contribution of non-exchangeable potassium forms and its accumulation in corn plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 9–15, 2016.

WILLIAMS, P. Nutritional composition of red meat. **Nutrition & Dietetics**, New South Wales, v. 64, p. 113–119, 2007.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 171, p. 656-669, 2014.

## **Resumo Biográfico**

João Pedro Moro Flores, filho do Engenheiro Agrônomo Pedro Osório Flores, e da Licenciada em Geografia Denize Maria Moro Flores, nasceu em 4 de setembro de 1995, em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Estudou no colégio Franciscano Sant'Anna de 2002 a 2012, onde completou seus estudos de primeiro e segundo graus. Em 2013 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em 2018. Participou do Programa Jovens Talentos para a Ciência CAPES (2013-2014), atuando junto ao Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado e Uso Alternativo de Várzeas (GPAI), pertencente ao Departamento de Fitotecnia da UFSM, bolsista de Iniciação Científica CNPq (2014-2016) e FAPERGS (2017), atuando junto ao Laboratório de Pedologia e Classificação de Solos, pertencente ao Departamento de Solos da UFSM. Estagiário da empresa Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso - Fundação MT, no Programa de Monitoramento e Adubação - PMA (2017). Em abril de 2018 iniciou seus estudos de Mestrado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, obtendo o grau de Mestre em Ciência do Solo em março de 2020.