

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

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
PLANOSSOLO APÓS QUATRO ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO**

Érico Schmaltz
(Dissertação de mestrado)

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

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
PLANOSSOLO APÓS QUATRO ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO**

ÉRICO SCHMALTZ
Engenheiro Agrônomo (ULBRA)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Schmaltz, Érico

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM PLANOSSOLO APÓS QUATRO ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO /

Érico Schmaltz. -- 2023.

67 f.

Orientadora: Amanda Posselt Martins.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. manejo conservacionista. 2. arroz irrigado. 3. solução do solo. 4. densidade. 5. porosidade. I. Posselt Martins, Amanda, orient. II. Título.

ÉRICO SCHMALTZ
Engenheiro Agrônomo (ULBRA)

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

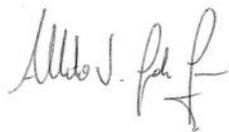
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em:
Pela Banca Examinadora

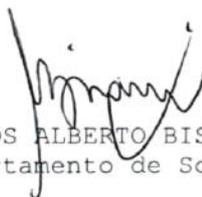


AMANDA POSSELT MARTINS
Orientadora - PPG Ciência do Solo
UFRGS

Homologado em:
Por



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo/UFRGS



CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS



GETÚLIO COUTINHO FIGUEIREDO
PPG Ciência do Solo/UFRGS

Filipe Selau Carlos

FILIPPE SELAU CARLOS
PPG MACSA/UFPel

Documento assinado digitalmente

gov.br

CARLOS ALBERTO BISSANI
Data: 05/08/2024 09:25:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia/UFRGS

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, saúde e por todas as pessoas excepcionais que Ele colocou no meu caminho.

À minha família, que esteve comigo em todos os momentos, me apoiando e incentivando durante o período de produção deste trabalho.

À minha orientadora, Professora Amanda Posselt Martins, por toda contribuição técnica durante a elaboração e execução deste trabalho, bem como sua atenção, agregando positivamente em minha formação.

Ao Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), pela disponibilidade da realização de análises laboratoriais, principalmente na pessoa do Pesquisador Pablo Gerszon Badinelli, por sua parceria ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A todos do Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, pelo suporte técnico e também pela disponibilização da área para a condução do experimento.

A todos os professores do PPGCS da UFRGS, pelas contribuições ao longo do curso, fundamentais para o meu adequado crescimento acadêmico, estendendo inclusive, ao técnico Sr. Adão Luís Santos, que nos laboratórios, foi crucial para o adequado andamento das análises.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação, que se revelaram grandes parceiros nessa jornada, principalmente ao Luciano Pinzon Brauwere e ao Adriano Vilmar Garcia.

Ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia (FAGRO) e ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), pela disponibilidade de equipamentos e infraestrutura necessária ao adequado desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela bolsa de estudos concedida, sem a qual seria inviável minha permanência no Curso de Pós-Graduação.

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM PLANOSSOLO APÓS QUATRO ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM PLANTIO DIRETO¹

Autor: Eng. Agr. Érico Schmaltz

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Posselt Martins

RESUMO

Os solos de terras baixas no Rio Grande do Sul (RS), possuem drenagem deficiente, o que os torna aptos ao cultivo de arroz irrigado por alagamento. A má drenagem pode refletir o acúmulo natural de argila no horizonte B, ou a formação de camadas adensadas em subsuperfície. A entrada de culturas de sequeiro nessas áreas, tem aumentado a adoção de manejos como o plantio direto (PD) e a integração lavoura-pecuária (ILP). Eles favorecem o acúmulo de matéria orgânica, aumentam a capacidade de troca de cátions e a retenção de água do solo. Isso é benéfico, pois os nutrientes são absorvidos da solução do solo. Assim, o processo de difusão tende a ser facilitado, podendo contribuir no suprimento de fósforo (P) e potássio (K). O objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas destes solos, em curto prazo (4 anos), quanto à disponibilidade de P e K, e às características físicas, frente à adoção de PD, com e sem cobertura de solo, além de ILP. O experimento foi implantado em 2018, em Capivari do Sul, RS, sob um Planossolo Háplico, em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. Os sistemas avaliados foram Arroz/Pousio, Arroz/trevo, ILP Arroz-Soja/Azevém e Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo. Em outubro de 2021, foi realizada coleta de solo nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m. Na safra 2021/2022 todos os sistemas foram cultivados com arroz irrigado. Os resultados demonstraram que houve mudança na classe de disponibilidade de P e K em relação ao início do experimento. Os teores disponíveis não variaram entre os sistemas, mas a quantidade destes, foi maior na camada de 0,00-0,05 m, com exceção do sistema Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo, onde o K disponível foi igual entre as camadas. O efeito das doses de P e K aplicadas via adubação mineral, explicou 61% e 54%, respectivamente, o P e o K disponíveis no solo, na camada de 0,05-0,10 m. O P disponível explicou 98% do P solúvel, nos sistemas sem pecuária. A densidade (Ds), a macroporosidade (Ma) e a microporosidade (Mi) do solo, não tiveram diferença entre os sistemas. O sistema Arroz/trevo teve menor Ds na camada de 0,00-0,05 m. Na mesma camada, a Ma foi maior nos sistemas Arroz/Pousio e Arroz/trevo e, a Mi foi maior em todos os sistemas em relação à camada de 0,05-0,10 m. Na produtividade de grãos do arroz, houve efeito positivo da Ds e negativo da Mi, nas duas camadas, o que explica em parte a diferença de 0,96 Mg ha⁻¹ de grãos entre o sistema mais produtivo (Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo) e o menos produtivo (Arroz/Pousio).

Palavras-chave: manejo conservacionista, arroz irrigado, solução do solo, densidade, porosidade.

¹ 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 (69p.) Março, 2023.

AVAILABILITY OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF A PLANOSOL AFTER FOUR YEARS OF ADOPTION OF NO-TILL FARMING SYSTEMS²

Author: Érico Schmaltz
Adviser: Amanda Posselt Martins

ABSTRACT

The lowland soils in Rio Grande do Sul State (RS), Southern Brazil, have poor drainage, which makes them suitable for irrigated rice cultivation by flooding. Poor drainage may reflect the natural accumulation of clay in the B horizon, or the formation of dense layers in the subsurface. In recent years, the introduction of rain-fed crops in these areas has motivated the adoption of management practices such as no-till farming (NT) and crop-livestock integration (ICLS). They favor the accumulation of organic matter, increase cation exchange capacity, infiltration, and water retention of soil. This benefits the crops, since the nutrients are absorbed from the soil solution. Furthermore, the diffusion process is facilitated, contributing to the supply of phosphorus (P) and potassium (K). Thus, the objective of this study was to evaluate the responses of lowland soil, in the short term (4 years), regarding the availability of P and K and, the physical characteristics of the soil facing the adoption of conservation management (NT), with and without winter cover, besides ICLS. The experiment was implemented in 2018, in Capivari do Sul, RS, under a Haplic Planosol, in randomized block design, with three repetitions. The systems evaluated were Rice/Fallow, Rice/Clover, ICLS Rice-Soybean/Ryegrass, and Livestock Native Field/Ryegrass+clover. In October 2021, soil was sampled in the 0.00-0.05 m and 0.05-0.10 m layers. The results showed that there was a change in the availability class of P and K compared to the beginning of the experiment. The available fractions did not vary between the systems. However, the amount of these was higher in the 0.00-0.05 m layer, with the exception of the Native Field/ Ryegrass +clover livestock system. The effect of the fertilizer rates of P and K applied by mineral fertilization, explained 61% and 54%, respectively, the contents of available P and K in the soil, in the 0.05-0.10 m layer. Available P explained soluble P ($R^2=0,98$), in the systems without ICLS. Soil density (SD), macroporosity (Ma) and microporosity (Mi) showed no difference among treatments. However, the rice/clover system had the lowest SD in the 0.00-0.05 m layer. In the same layer, Ma was higher in the Rice/Fallow and Rice/clover systems and, Mi was higher in all systems in relation to the 0.05-0.10 m layer. In rice grain yield, there was a positive linear effect of SD and a negative linear effect of Mi, in both layers, which partly explains the difference of 0.96 Mg ha⁻¹ of grain between the most productive system (Livestock Native Field/ Ryegrass+clover) and the least productive (Rice/Fallow) system.

Keywords: conservation management, irrigated rice, soil solution, density, porosity.

² Master's dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (69p.) March, 2023.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Caracterização e uso das terras baixas no Rio Grande do Sul	4
2.2 Cultivo do arroz em terras baixas.....	6
2.3 Cultivo de soja em terras baixas	8
2.4 Manejos conservacionistas do solo.....	10
2.5 Disponibilidade de nutrientes na solução do solo.....	11
2.5.1 Fósforo.....	13
2.5.2 Potássio.....	15
3. HIPÓTESE.....	18
4. OBJETIVOS.....	19
4.1 Objetivo geral	19
4.2 Objetivos específicos	19
5. MATERIAL E MÉTODOS	20
5.1 Histórico e caracterização da área experimental.....	20
5.2 Descrição da fase experimental	23
5.3 Amostragens e determinações no solo	24
5.3.1 Atributos físicos do solo	25
5.3.2 Solução do solo	26
5.3.3 Atributos químicos do solo.....	28
5.3.4 Avaliação da produtividade do arroz.....	29
5.4 Análise estatística dos dados	30
6. RESULTADOS	31
6.1 Teores de P e K disponíveis na fase sólida do solo	31
6.2 Solução do solo: pH, CE, COD e teores de P e K	34
6.3 Atributos físicos do solo.....	38
6.4 Produtividade de grãos do arroz irrigado e sua relação com os atributos do solo analisados.....	40
7. DISCUSSÃO.....	42
8. CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Proporção de área das ordens de solos nas terras baixas do Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Pinto et al. (2017).....	5
Tabela 2. Descrição e distribuição espaço-temporal dos sistemas de produção investigados no experimento (Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS). Arroz/pousio= sistema 2; Arroz/trevo= sistema 3; ILP Arroz-Soja/Azevém= sistema 5; Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo= sistema 7.	22
Tabela 3. Doses de nutrientes aplicadas nos sistemas testados no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS, de acordo com disposto pela CQFS-RS/SC (2016), para expectativas de altas produtividades das culturas.	23
Tabela 4. Análise química do solo da área experimental, previamente à implantação do protocolo – Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS (maio, 2018).....	24
Tabela 5. Atributos químicos do solo para os quatro sistemas avaliados, após 3,5 anos desde a implantação do protocolo experimental (coleta realizada no momento anterior (7 dias) à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....	29
Tabela 6. Teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis no solo (Mehlich-1), de acordo com os sistemas de manejo de plantio direto avaliados em um Planossolo Háplico (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....	32
Tabela 7. Valores do coeficiente de correlação (r) entre os teores de P e K no solo e as doses totais de nutrientes aplicadas via fertilizante mineral ao longo do tempo e a significância (valor p) dos resultados obtidos (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....	33
Tabela 8. Valores dos atributos P, K, COD, pH e CE da solução do solo, comparando quatro sistemas de manejo de PD, em duas camadas (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS). ...	35
Tabela 9. Valores de densidade, macroporosidade e microporosidade do solo e resultado da análise estatística, de acordo com os sistemas de manejo de PD avaliados (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....	39

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização dos solos de terras baixas (solos de várzea) no Rio Grande do Sul. Fonte: Pinto et al. (2004).4
- Figura 2.** Distribuição dos íons fosfato no solo, dependendo do valor do pH. Adaptado de: Lindsay (1979). 14
- Figura 3.** Mecanismo de fixação e liberação do K no solo. Adaptado de MEENA et al. (2016). 16
- Figura 4.** Localização geográfica do campo experimental, no município de Capivari do Sul, RS, Brasil. Fonte: extraído e adaptado do Google (2022).20
- Figura 5.** Croqui da área experimental, com indicação dos sistemas e dos blocos de cada parcela. Fonte: Centro Tecnológico Integrar-Agrinova.21
- Figura 6.** Momento da coleta das amostras de solo na trincheira (A); amostras indeformadas de solo já embaladas, para análises físicas de umidade, porosidade e densidade (B). Imagens: o autor.25
- Figura 7.** Cilindro metálico com demarcação externa de profundidade limite de 5,0 cm de penetração no solo (A); momento da coleta de solo na trincheira, respeitando a demarcação de 5,0 cm no cilindro metálico (B). Imagens: o autor.27
- Figura 8.** Análise de regressão referente aos teores de P disponível e doses totais de P_2O_5 aplicadas, nas camadas 0,00 a 0,05 m (A) e 0,05 a 0,10 m (B); significância 5% ($p \leq 0,05$). (Coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS). 33
- Figura 9.** Análise de regressão referente aos teores de K disponível e doses totais de K_2O aplicadas, nas camadas 0,00 a 0,05 m (A) e 0,05 a 0,10 m (B); significância 5% ($p \leq 0,05$). (Coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).34
- Figura 10.** Análise de regressão referente a concentração de P na solução em função dos teores de P disponível em cada um dos sistemas avaliados, considerando as duas camadas do estudo (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).37
- Figura 11.** Análise de regressão referente a concentração de K na solução em função dos teores de K disponível em cada um dos sistemas avaliados, considerando as duas camadas do estudo (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).38
- Figura 12.** Médias da produtividade de grãos do arroz irrigado (safra 2021/2022) nos sistemas de manejo de PD avaliados neste estudo (coleta realizada no

momento anterior à colheita do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....40

Figura 13. Análise de regressão entre a produtividade do arroz irrigado (safra 2021/2022) e a densidade (A) e a microporosidade do solo (B), nas camadas 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m; significância 5% ($p \leq 0,05$); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).....41

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

CE – Condutividade elétrica

Cfa – Clima subtropical, com verão quente

COD – Carbono orgânico dissolvido

Ds – Densidade do solo

ILP – Integração lavoura-pecuária

K – Potássio

kPa – Quilopascal

Ma – Macroporosidade do solo

Mi – Microporosidade do solo

MO – Matéria orgânica

P – Fósforo

PC – Preparo convencional

PD – Plantio direto

RS – Rio Grande do Sul

1. INTRODUÇÃO

Os solos de terras baixas do Rio Grande do Sul (RS) compreendem em torno de 15,6% da área de todo o estado, apresentando preponderantemente um relevo plano a suavemente ondulado. A ordem de solo com maior ocorrência é o Planossolo, abrangendo aproximadamente 54% das áreas. Em função do relevo citado, em conjunto à camada subsuperficial de baixa permeabilidade destes solos, a drenagem de água é deficiente, apresentando baixa condutividade hidráulica. Em função disso, por longos períodos há também restrição de oxigênio no solo. No horizonte superficial, estes solos apresentam baixa capacidade de armazenamento de água, o que pode facilmente limitar a disponibilidade desta às culturas não irrigadas em períodos de estiagem, diminuindo o potencial produtivo e, muitas vezes, inviabilizando sistemas de rotação de culturas.

Tais características geomorfológicas propiciam um adequado ambiente ao cultivo do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), cultura que é considerada uma das mais importantes do RS, o principal estado produtor brasileiro. O arroz é bem adaptado ao ambiente aquático pela presença de tecido parenquimático especializado (aerênquima). Assim, não sofre com o déficit de oxigênio causado pela irrigação por alagamento do solo. Na safra 2021/2022, a área plantada com arroz chegou a 957.000 ha, resultando em uma produção de 7.654 Mg com produtividade média de 7,9 Mg ha⁻¹. Nas terras baixas ocorreu na última década um expressivo avanço do cultivo de soja (*Glycine max* L.), principalmente devido ao uso de novas tecnologias genéticas e de manejo de solo que possibilita rendimentos adequados (>3 Mg ha⁻¹) da oleaginosa. De acordo com levantamento realizado pelo Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA) a safra

2020/2021 teve a maior área já semeada com soja em rotação com arroz no estado, chegando a 39%.

O preparo convencional do solo (PC) é o mais utilizado pelos produtores de arroz no RS, entretanto, esse manejo reduz a matéria orgânica do solo, frações lábeis de nutrientes e a atividade da microbiota do solo. A introdução da soja em solos de terras baixas possibilita a diversificação de renda das propriedades e facilita o controle de plantas invasoras. Apesar disso, tanto o déficit de oxigênio quanto o déficit hídrico, ainda dificultam o adequado desenvolvimento da cultura nessas áreas.

Com a irrigação por alagamento, prática fundamental da cultura do arroz irrigado, ocorrem alterações eletroquímicas no solo, o que influencia nos seus atributos químicos, físicos e biológicos. A principal alteração é o processo redutivo no solo (reações redox), refletindo em um aumento da disponibilidade de nutrientes. Isso se dá em função da elevação do pH do meio até aproximadamente 6,0 a 6,5, devido à diminuição da concentração de íons hidrogênio (H^+) livres na solução do solo. Assim, a disponibilidade de fósforo (P) e potássio (K) se eleva, mas também a concentração de cátions divalentes, que deslocam o potássio (K^+) e sódio (Na^+) da fase sólida para o meio aquoso.

Para que condições mais adequadas ao cultivo de culturas não adaptadas aos solos de terras baixas ocorram, os manejos conservacionistas do solo se tornam uma ferramenta essencial, uma vez que o preparo sucessivo afeta negativamente o perfil do solo e a sua estrutura. Nesse sentido, o PC restringe a qualidade física do solo, apresentando redução de matéria orgânica (MO) e formação de camadas compactadas. Quando se modifica o sistema de manejo para um conservacionista, como o plantio direto (PD), ocorrem alterações benéficas estruturais como: menor compactação e densidade do solo e aumento da porosidade do solo, além da maior infiltração e armazenamento de água. O PD potencializa o acúmulo de maiores quantidades de material orgânico sobre a superfície do solo, o que favorece a agregação do solo, uma vez que também há incremento da atividade biológica. Já com a adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), busca-se fundamentalmente aumentar o número de fluxos de matéria, energia e formas de ciclagem de nutrientes. Isto se dá pela alternância de uso entre lavoura e pecuária, o que resulta em

mudanças benéficas ao solo, principalmente pelo fator animal em pastejo, pois este atua como um catalisador dos processos que ocorrem no meio.

Assim como os manejos conservacionistas influem na estrutura, também refletem modificações na solução do solo, fase da qual as plantas absorvem os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. O estudo e a caracterização da composição da solução do solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de sorção, dissolução e precipitação. Já a análise química da solução permite identificar as formas e as quantidades de elementos químicos e/ou nutrientes que estão no solo, como o K e o P, por exemplo.

Em ambientes de terras baixas, os grandes responsáveis pelo fornecimento de K às culturas, são os minerais feldspatos potássicos, as esmectitas e a illita. Fora isso, há necessidade de fontes externas para o incremento da sua concentração no solo. Em relação ao P, a fração que está presente na solução do solo é a responsável pela nutrição das plantas e está sob as formas aniônicas HPO_4^{2-} e H_2PO_4^- . Diversos fatores afetam a disponibilidade de P, como a mineralogia, as propriedades químicas, a atividade microbiológica e a umidade. Nesse sentido, o emprego de manejos que adotem o pastejo e o PD podem favorecer a ciclagem, o estoque e a disponibilidade deste elemento, reduzindo a dependência de fontes inorgânicas externas.

Há, portanto, a necessidade de avaliar diferentes formas de produção para a cultura do arroz irrigado, visando a redução da dependência de insumos e ao mesmo tempo adotando manejos conservacionistas, como o PD e os SIPA, que favoreçam também as culturas de sequeiro, como a soja. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar as respostas do solo em terras baixas, quanto à disponibilidade de P e K, bem como às características físicas deste, frente à adoção de práticas conservacionistas do solo, em um experimento de curta duração (4 anos).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização e uso das terras baixas no Rio Grande do Sul

As áreas de terras baixas no Rio Grande do Sul (RS), também denominadas como solos de várzea (Figura 1), são caracterizadas principalmente pelo relevo plano a suave ondulado e compreendem aproximadamente 4,4 milhões de hectares. Isso representa em torno de 15,6 % da área total do RS (SCIVITTARO et al., 2021).

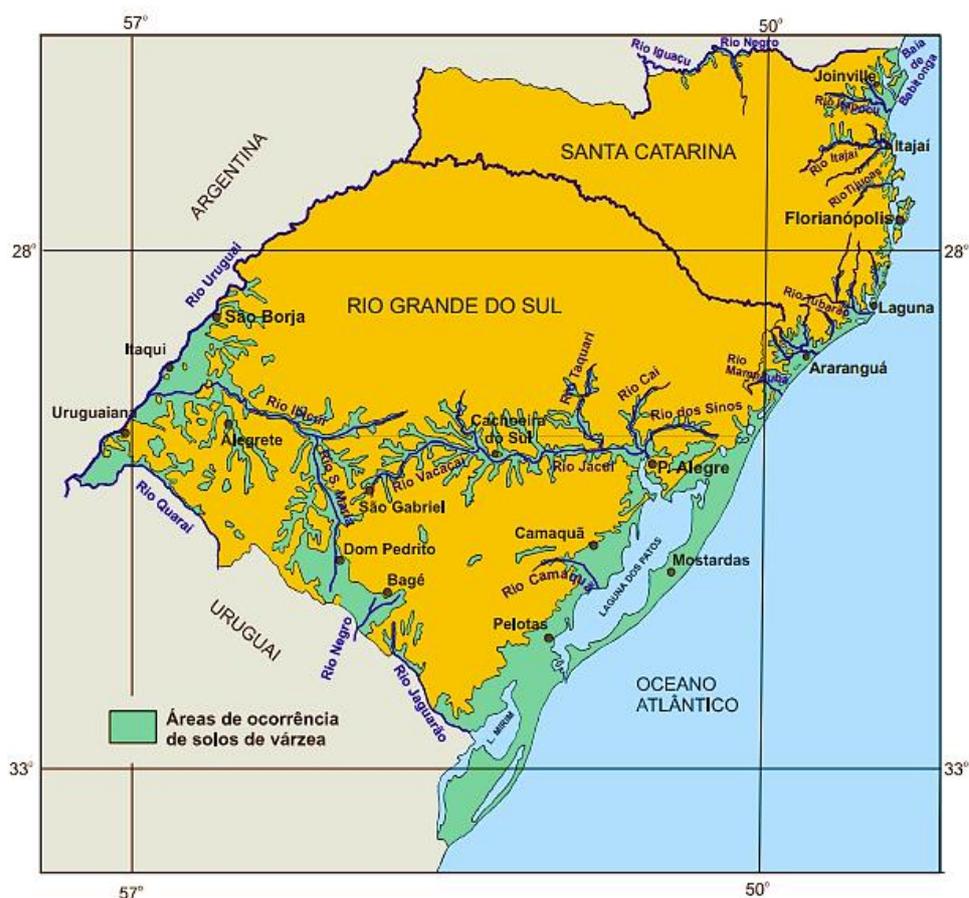


Figura 1. Localização dos solos de terras baixas (solos de várzea) no Rio Grande do Sul. Fonte: Pinto et al. (2004).

De acordo com Pinto et al. (2017), a ordem de solo que apresenta maior ocorrência nessas regiões é o Planossolo, correspondendo a mais da metade da área total das terras baixas no RS (Tabela 1). Ainda, compõem o restante das áreas as ordens Neossolo, Chernossolo, Gleissolo, Argissolo, Vertissolo e Organossolo.

Tabela 1. Proporção de área das ordens de solos nas terras baixas do Rio Grande do Sul. Fonte: adaptado de Pinto et al. (2017).

Ordem de solo *	Proporção de área nas terras baixas do RS (%)
Planossolos	54,3
Neossolos	17,2
Chernossolos	15,1
Gleissolos	7,3
Argissolos	3,9
Vertissolos	1,3
Organossolos	0,9

* Classificação de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo – SiBCS (2018).

Os solos de terras baixas apresentam condições de drenagem deficiente, frequentemente devido ao relevo citado, mas também à presença de uma camada subsuperficial de baixa permeabilidade (SCIVITTARO et al., 2021). Esta camada subsuperficial de baixa permeabilidade corresponde a um horizonte B com acúmulo de argila ou, ainda, a camadas adensadas mais próximas à superfície do solo, devido às sucessivas mobilizações decorrentes dos cultivos anuais (SANTOS et al., 2018). Além disso, os solos de terras baixas naturalmente possuem reduzida macroporosidade na subsuperfície (GUBIANI et al., 2018). Em conjunto, os fatores supracitados fazem com que estes solos apresentem reduzida velocidade de infiltração de água e baixa condutividade hidráulica, as quais, associadas à declividade praticamente nula, tornam o processo de drenagem natural mais difícil. Isso resulta na ocorrência de períodos mais prolongados onde há restrição de oxigênio no solo (GOMES et al., 2006).

Os solos de terras baixas também podem facilmente limitar a disponibilidade de água para culturas não irrigadas em períodos de estiagem, visto que estes possuem baixa capacidade de armazenamento de água no horizonte superficial, que normalmente apresenta textura média a arenosa. Isso

reduz o intervalo de umidade ideal para o desenvolvimento adequado das culturas, acarretando na diminuição do potencial produtivo e, muitas vezes, na inviabilidade de um sistema de rotação de culturas diversificado em tais áreas (PINTO et al., 2004; GUBIANI et al., 2018).

As características geomorfológicas destes solos propiciam um ambiente adequado ao cultivo do arroz irrigado, cultura que figura como uma das mais importantes no RS, o qual é o principal produtor deste cereal no Brasil (CONAB, 2022). Entretanto, nos últimos anos, com o avanço de novas tecnologias – tanto genéticas, como de manejo de solo – a soja vem se tornando uma cultura cada vez mais presente em áreas de terras baixas. Estudo de Cassol et al. (2020) demonstrou que a produtividade da soja em solos de terras baixas pode ter ganhos significativos, aliando o manejo adequado de irrigação, de solo e de semeadura.

Além disso, cultivares bem adaptadas às condições físico-hídricas destes solos, sobressaem-se em termos de produtividade de grãos, quando comparadas às demais não adaptadas, e o arranjo de plantas (espaçamento entre linhas de semeadura e a densidade de plantas) é fundamental para o adequado desenvolvimento e a boa produtividade da cultura em terras baixas (CONCENÇO et al., 2020). De acordo com levantamento de intenção de semeadura realizado pelo IRGA, a área semeada com soja em rotação com arroz irrigado foi de 500 mil ha na safra 2022/2023, representando 58,5% da área total semeada (IRGA, 2022).

2.2 Cultivo do arroz em terras baixas

O arroz pertence à família das poáceas (gramíneas) e ao gênero *Oryza*, o qual possui aproximadamente vinte espécies, sendo a mais cultivada a *Oryza sativa* (OLIVEIRA NETO, 2015). É caracterizada como uma planta anual que dispõe de mecanismo fotossintético C3 e adaptada ao ambiente aquático, uma vez que a passagem do oxigênio atmosférico para a rizosfera se dá pela presença dos aerênquimas bem desenvolvidos, localizados principalmente no colmo e nas raízes da planta (SOSBAI, 2018). Descrito por Dantas et al. (2001), o aerênquima é uma especialização do tecido parenquimático, onde há o desenvolvimento de grandes espaços intercelulares que normalmente se

interligam e que são preenchidos por gases. Dessa forma, a cultura do arroz não sofre com o déficit de oxigênio causado pelo encharcamento do solo.

A área de arroz plantada no RS na safra 2021/2022 foi de 957.000 ha, resultando em uma produção de 7.654 Mg e produtividade média chegando a 7,9 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2022). Deste montante produzido, na média geral do RS, os sistemas de cultivo mínimo com preparo antecipado, de cultivo convencional e de pré-germinado foram os mais utilizados pelos produtores, correspondendo respectivamente a 61, 17 e 11%; ou seja, tais manejos abrangem cerca de 90% da área total cultivada no RS (IRGA, 2021) e são classificados como preparo convencional (PC). Estes manejos imprimem uma intensa mobilização do solo, o que não traz benefícios para a fertilidade deste. De acordo com Denardin et al. (2019), ao longo dos anos, o preparo intensivo do solo acaba levando à redução do teor de MO, da capacidade de troca de cátions (CTC) e, conseqüentemente, da disponibilidade de nutrientes no solo.

Quando saturados pela lâmina superficial de água (prática fundamental da cultura arrozeira), os solos de terras baixas sofrem transformações relacionadas aos seus atributos. Devido à inundação do solo e ao processo redutivo do meio decorrente desta, há um aumento da disponibilidade de nutrientes no solo (CONCENÇO et al., 2020). Assim, o arroz precisa receber um aporte nutricional externo (adubação) relativamente baixo em relação a outras culturas agrícolas, principalmente no que diz respeito ao potássio (K) e ao fósforo (P) (CONCENÇO et al., 2020). Isso acaba influenciando inclusive a filosofia de recomendação de adubação adotada atualmente no RS e em SC, uma vez que o arroz é a única cultura de grãos que não segue os preceitos da adubação corretiva do solo (CQFS-RS/SC, 2016).

Relativo à parte física, a principal mudança que ocorre com a saturação do solo é a diminuição das forças coesivas que mantêm as partículas do solo unidas. Assim, à medida que o solo fica saturado, também ocorre a desagregação deste (FAGERIA & SANTOS, 2003). Ainda, com a restrição de oxigênio no solo, os microrganismos anaeróbios heterotróficos passam a obter energia através da oxidação da matéria orgânica. Tanto a fração lábil da MO (que apresenta maior taxa de decomposição e menor permanência no solo) quanto a fração recalcitrante (que apresenta menor taxa de decomposição e

maior permanência no solo), bem como seus teores, condicionam a intensidade da atividade microbiana no solo alagado (SCHMIDT et al., 2009).

Estas reações acabam consumindo íons hidrogênio (H^+) e elevando o pH do meio, que de modo geral aumenta até próximo de 6,0 a 6,5, permanecendo estável aproximadamente a partir do trigésimo dia após o início do alagamento (SOUSA et al., 2017). Em conjunto com as reações de redução e aumento do pH, aumenta a disponibilidade de diversos elementos na solução (VAHL, 1991), como por exemplo, a concentração de manganês (Mn^{2+}) e ferro (Fe^{2+}). Isso se dá em função dos compostos oxidados existentes no solo, que acabam se tornando receptores de elétrons. Assim, ocorre o deslocamento de cátions monovalentes como o potássio (K^+) e o sódio (Na^+) e também do cálcio (Ca^{2+}) e do magnésio (Mg^{2+}), da fase sólida do solo para o meio aquoso, aumentando os valores da condutividade elétrica (CE) da solução do solo e, ao mesmo tempo, facilitando a solubilização do fósforo (P) e, assim, favorecendo a nutrição do arroz (SOUSA et al., 2017), principalmente quando se refere ao P e ao K.

Apesar do arroz ser a principal cultura explorada nos solos das terras baixas do RS, há um crescente aumento do cultivo de outras culturas alternativas (KNAAK & MIRANDA, 2018), principalmente como estratégia para redução da pressão de plantas daninhas e pelo retorno econômico da cultura da soja, superior em relação à cultura do arroz irrigado (MATZENBACHER et al., 2013).

2.3 Cultivo de soja em terras baixas

A soja (*Glycine max* L.) pertence à família das fabáceas, sendo classificada como uma espécie leguminosa (CARVALHO FILHO & AMABILE, 1996). É uma importante cultura a nível mundial, contribuindo de forma expressiva na produção de grãos. Nesse sentido, o Brasil tem participação destaque como o maior produtor mundial de grãos de soja, com um montante de 123.829,5 milhões de toneladas na safra 2021/ 2022. Na mesma safra, o RS produziu 9.727,7 milhões de toneladas de grãos de soja (EMBRAPA..., 2022).

Nas terras baixas do RS, a adoção da rotação de culturas com soja e arroz irrigado vêm aumentando de forma gradativa. Em 2018, o IRGA divulgou um estudo que comparou os anos agrícolas de 2009/2010 e 2017/2018, onde foi verificado um incremento de 269.000 ha de áreas de soja rotacionadas com arroz em oito anos, o que representa um incremento médio de 33.000 ha por ano

(IRGA, 2018). A entrada da cultura da soja em áreas típicas de cultivo orizícola se dá principalmente em função da busca por maiores possibilidades de viabilizar economicamente os sistemas de produção em terras baixas, visto que há maior facilidade no controle de plantas invasoras e também a diversificação de renda da propriedade rural (SOSBAI, 2018).

Entretanto, apesar do crescimento da área cultivada, o que se verifica é que o rendimento médio da leguminosa nessas áreas são relativamente baixos – em torno de $2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ (IRGA, 2018). O reduzido teto produtivo da cultura da soja em terras baixas está atrelado a problemas de excesso hídrico, algumas cultivares não adaptadas, problemas com a acidez do solo, baixos teores de P e K, e de solo compactado. Nesse sentido, a deficiência de oxigênio é predominante em terras baixas, pois o nível do lençol freático é comumente encontrado próximo à superfície do solo (FIORIN et al., 2003).

O solo encharcado dificulta o desenvolvimento inicial da soja e, posteriormente, durante os estádios vegetativo e reprodutivo. Segundo Schöffel et al. (2001), a exposição de plantas de soja à deficiência de oxigênio em diferentes estádios fenológicos fatalmente reduzirá a produtividade final. Ocorrendo no período da germinação ou no estabelecimento da cultura, tanto a deficiência de oxigênio como o estresse hídrico resultarão na redução da população de plantas (TAVARES et al., 2013; WUEBKER et al., 2001). Em estádios fenológicos posteriores, a deficiência hídrica pode levar a planta a abortar flores e não realizar o adequado enchimento dos grãos (MUNDSTOCK & THOMAS, 2005). Já a deficiência hídrica, resultado da conjunção do rebaixamento do lençol freático e da característica franco arenosa dos horizontes A e E, reduz a quantidade de água disponível (FIORIN et al., 2003). Isso pode afetar processos fisiológicos importantes para as plantas de soja, como o processo respiratório, a fixação biológica de nitrogênio (N) e a fotossíntese (KING et al., 2014; LANZA et al., 2013).

É necessário considerar ainda que a fertilidade natural dos solos de terras baixas no RS está entre as classes moderada a muito baixa, apresentando reduzida CTC e da sua respectiva saturação por cátions básicos, sendo normalmente ácidos e com disponibilidade baixa de P, além de baixos níveis de MO (BOENI et al., 2010). Para alterar as propriedades químicas de forma

benéfica, comumente há necessidade de adotar práticas de calagem e adubação (MARCHESAN et al., 2019).

2.4 Manejos conservacionistas do solo

O preparo do solo é uma prática que afeta inúmeras características do seu perfil, visto que atua diretamente sobre a sua estrutura (MATOS et al., 2008). Normalmente, o PC é o mais utilizado em áreas de terras baixas na produção de arroz irrigado, como já citado anteriormente (IRGA, 2021). Conseqüentemente, pela adoção do PC nessas áreas, surgem limitações que restringem a qualidade física do solo, como o menor teor de MO (ROSA et al., 2011) e a formação de camadas compactadas (PEDROTTI et al., 2005). Ao modificar o sistema de manejo do solo, alterações estruturais como o estado da sua compactação podem ser percebidas. Em decorrência disto, há interferência em outras características, como na densidade, na porosidade e na infiltração e armazenamento de água do solo, o que impacta no desenvolvimento radicular das culturas (BONETTI et al., 2019; SARTORI et al., 2015).

Com o viés de atrelar sustentabilidade e produtividade, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) buscam fundamentalmente harmonizar e integrar novamente a produção agrícola ao ambiente de forma mais benéfica. Eles otimizam processos naturais e potencializam características benéficas do solo, como o aumento da biodiversidade e sequestro de carbono (MORAES et al., 2007), uma vez que a alternância de uso entre lavoura e pecuária resulta na modificação do sistema solo, principalmente pelo fator animal – que atua como um catalisador do processo da ciclagem de nutrientes (ANGHINONI et al., 2013). Ainda, quando ocorre a inclusão das forrageiras no sistema de rotação de culturas, há o benefício do aumento da quantidade de resíduos aportados, conseqüentemente elevando a MO (ROSCOE et al., 2006). Estudo de Costa et al. (2014) cita que nos SIPA onde são aplicadas intensidades moderadas de pastejo – resultando no estímulo do crescimento das raízes das forrageiras – ocorre também maior ciclagem do P no solo.

Pesquisas que já avaliaram os SIPA em terras baixas no RS analisaram sistemas com diferenças no manejo de culturas e do solo, que vão desde o PC, com sistema de pousio/arroz, até sistemas que rotacionam culturas de verão (arroz/soja), incluindo ou não o pastejo de animais sob pastagens hibernais.

Protocolos experimentais como estes últimos citados, adotam o plantio direto (PD) como base fundamental (CARMONA et al., 2018).

Freire et al. (2001) descrevem o PD como um sistema agrícola que abrange práticas ordenadas, inter-relacionadas e interdependentes, incluindo o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura – as quais mantêm a ciclagem de nutrientes e o resíduo sobre o solo, propiciando alterações positivas quanto a sua fertilidade. Cabe salientar que, na semeadura de culturas sobre resteva ou palhada da cultura anterior, ocorre o mínimo revolvimento do solo (apenas na linha de semeadura) (CERETTA & AITA, 2008). Nesse sentido, o PD potencializa o acúmulo de maiores quantidades de material orgânico sobre a superfície, o que favorece a agregação do solo, uma vez que também há incremento de atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem (SIX et al., 2004). Estudo de Beutler et al. (2014) também cita que a manutenção dos agregados do solo e o incremento de bioporos são favorecidos pela atividade biológica, juntamente com a decomposição de raízes das culturas antecessoras.

Além dos benefícios do PD expostos no parágrafo anterior, estudos recentes de Carmona et al. (2018) revelam ainda que há redução dos níveis de alumínio trocável (Al^{3+}), além do aumento da formação de agregados, da maior capacidade de retenção de água e do teor de nutrientes que possam estar prontamente disponíveis para as plantas. Tais ganhos foram proeminentes em sistemas de produção que preconizaram maior diversidade de espécies vegetais ao longo do período de estudo (CARMONA et al., 2018).

2.5 Disponibilidade de nutrientes na solução do solo

A solução do solo pode ser definida como a fase aquosa (líquida) associada à fase sólida do solo, a qual ocupa o seu espaço poroso. Os fluxos de matéria e energia do solo, em conjunto com as adjacências deste, influenciam sua composição (SPOSITO, 2008). O estudo e a caracterização da composição da solução do solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de sorção, dissolução e precipitação. Já a análise química da solução permite identificar as formas e as quantidades de elementos químicos e/ou nutrientes que estão no solo (MEURER & ANGHINONI, 2017). Conhecer a dinâmica dos

nutrientes em solução é fundamental, não só para fins econômicos como também para a prevenção da contaminação das águas superficiais ou subterrâneas e, ainda, no manejo da adubação com fertilizantes (FERNANDES et al., 2015).

A solução do solo interage com as fases sólida e gasosa, com as plantas e com a fauna do solo. Os íons na solução podem ser adsorvidos a componentes orgânicos ou inorgânicos do solo e estes também podem ser desorvidos para a solução do solo. Caso a solução se encontre supersaturada com algum elemento, ele pode precipitar na forma de um mineral, até que seja restabelecido o equilíbrio. Da mesma forma, se a solução do solo se encontra abaixo da concentração de equilíbrio em relação a algum mineral, ele pode entrar em processo de dissolução (MEURER & ANGHINONI, 2017).

O adequado desenvolvimento das culturas agrícolas se dá fundamentalmente pelo suprimento dos nutrientes (elementos essenciais) via absorção radicular; e estes necessariamente devem estar dissolvidos na sua forma iônica na solução do solo. Dessa forma, o suprimento de nutrientes até a superfície das raízes pode ser limitado pela baixa disponibilidade hídrica no solo. As plantas obtêm os nutrientes por meio de três diferentes mecanismos de suprimento, denominados de interceptação radicular, fluxo de massa e difusão (MARTINS et al., 2020).

A interceptação radicular pode ser definida como um mecanismo de suprimento de nutrientes que traduz diretamente a superfície de raiz pela superfície de solo, onde a quantidade de nutrientes absorvidos será reflexo da quantidade de nutrientes disponíveis nos espaços porosos ocupados pelas raízes. Esta difere do fluxo de massa, que está associado ao gradiente de potencial hídrico, provocado pela absorção de água pelas plantas. Já a difusão, mecanismo em que a contribuição da água é mais relevante – tanto pela dissolução do íon quanto pela sua movimentação – acontece pela mobilidade dos íons em curtas distâncias na solução do solo, em resposta a um gradiente de concentração gerado na superfície radicular (MARSCHNER, 2012).

Ainda, de acordo com Martins et al. (2020), plantas mais bem nutridas são resultado de solos que tendem a reter mais água e que formam filmes entre as partículas, o que implica principalmente no processo difusivo. Nesse sentido, nutrientes como P e K têm maior contribuição do processo de difusão para o seu

respectivo suprimento às culturas. Dessa forma, fica explícito que é na fase aquosa que ocorrem as mediações das reações que controlam a retenção de substâncias pela fase sólida do solo, como precipitação-dissolução e adsorção-dessorção, além das trocas iônicas. Essas reações são determinantes no comportamento dos nutrientes em ambientes agrícolas, seja na fase líquida ou na fase sólida do solo (TIECHER & TIECHER, 2020).

2.5.1 Fósforo

O P é o macronutriente que possui menor mobilidade no solo (SOUZA & VOLKWEISS, 1987). Sua disponibilidade comumente é baixa, devido à formação de compostos de alta energia de ligação e baixa solubilidade (chamados de complexos de esfera interna) das formas aniônicas do elemento com a fase mineral do solo. Segundo Sposito (2008), tais compostos ocorrem principalmente com os óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), onde, devido à atuação dos fatores de formação do solo (intemperismo), há influência direta na variabilidade das formas e na distribuição quantitativa do P em solos naturais (TIECHER et al., 2015).

Nesse sentido, à medida que avança o intemperismo, o teor de P total vai diminuindo, principalmente devido aos processos de lixiviação, exportação e erosão. As principais fontes de P em um solo que se encontra em fase inicial de formação são os minerais primários [apatitas, como a hidroxapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) e a fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)] e os minerais secundários [como a variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)], por exemplo (KRUSE et al., 2015).

Com o passar do tempo, o P constituinte da estrutura desses minerais (P inorgânico – Pi) é liberado lentamente, ficando disponível tanto às plantas quanto à microbiota, correspondendo, então, ao P orgânico (Po) do solo. Concomitantemente, também ocorrem ligações de baixa energia entre fosfatos e coloides do solo. Assim, ocorre a diminuição da quantidade de minerais primários e também da cristalinidade dos minerais secundários (WALKER & SYERS, 1976). Por consequência do intemperismo, há elevação do teor dos oxihidróxidos na fração argila, o que incrementa sítios de adsorção catiônica e aniônica, ou seja, a fase mineral do solo se modifica e passa de fonte para dreno

de P, o que explica a reduzida disponibilidade desse nutriente no solo (GATIBONI et al., 2013).

A fração de Pi que se encontra presente na solução do solo, apesar de extremamente pequena, é a responsável pela nutrição das plantas, visto que é da solução que estas absorvem os ânions HPO_4^{2-} (hidrogenofosfato) e H_2PO_4^- (dihidrogenofosfato). Estas são as duas formas iônicas do P que mais comumente ocorrem no solo e na solução deste, na faixa de pH entre os valores de 4,0 e 8,5 (BARBER, 1995).

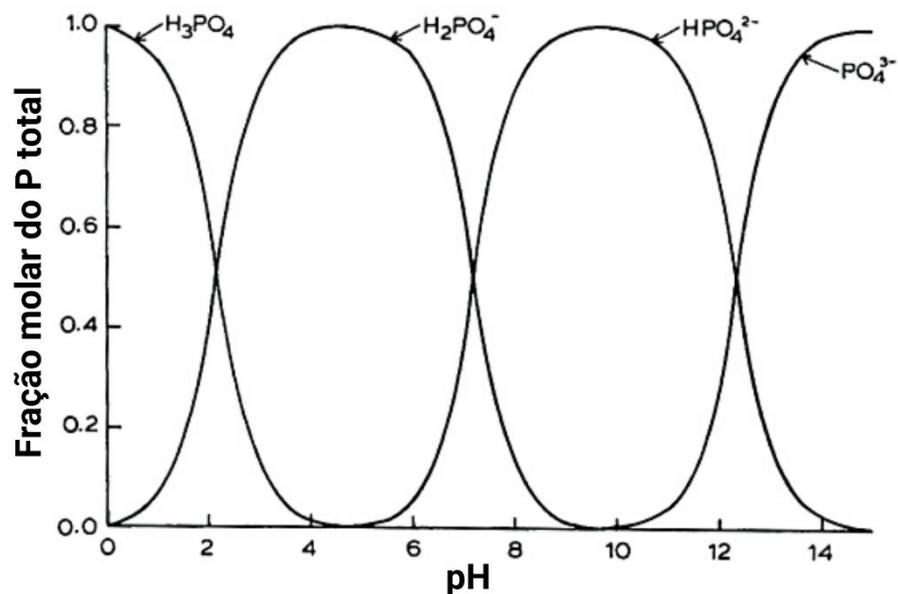


Figura 2. Distribuição dos íons fosfato no solo, dependendo do valor do pH. Adaptado de: Lindsay (1979).

Ainda que o Pi seja diretamente responsável pela nutrição das plantas, a fração orgânica (Po) também tem relativa importância, pois, do P total (Pt) do solo, esta pode chegar a representar até 90% (PARFITT et al., 2005). É através da mineralização da MO que essa fração pode contribuir decisivamente para a disponibilidade do P no solo (KIRKBY et al., 2011). Deste modo, a fração orgânica do P, pode influenciar diretamente na disponibilidade da fração inorgânica do P no solo (STEFFENS et al., 2010). Tanto a interação do Po com a MO como a interação com substâncias húmicas e sua precipitação com cátions podem favorecer o acúmulo dessa fração no solo (CELI & BARBERIS, 2005). Nesse sentido, práticas de manejo já citadas anteriormente, como o PD e o

pastejo de animais, beneficiam a estruturação do solo e a preservação do Po (NESPER et al., 2015).

Diversos fatores afetam as transformações entre as frações orgânicas e inorgânicas do P (Po e Pi, respectivamente), como a mineralogia, as propriedades químicas, a atividade microbiológica e a umidade do solo, as quais regulam o equilíbrio entre mineralização e imobilização do elemento (RHEINHEIMER et al., 2008; SHEN et al., 2011). Em sistemas de manejo com adição frequente de fertilizantes fosfatados, geralmente é a fração inorgânica a preferencialmente acumulada no solo (RISKIN et al., 2013); embora, com a adoção de manejos de solo adequados, como o uso de plantas de cobertura e PD, a forma orgânica de P também pode acumular-se (TIECHER et al., 2012). Nesse sentido, estudo de Dodd & Sharpley (2015) cita que, havendo um melhor controle do ciclo do P no solo, ou seja, mantendo-o na forma disponível sem que ocorra perdas para o meio, há o aproveitamento do estoque deste nutriente e a redução da dependência de fontes inorgânicas externas.

2.5.2 Potássio

Um dos nutrientes mais abundantes no solo é o potássio (K), encontrado em concentrações que variam de 0,3 a 30 g kg⁻¹ (SPARKS, 2000). Tal variabilidade na concentração deste nutriente é resultado fundamental dos diferentes processos pedogenéticos intrínsecos à formação de cada solo. É necessário considerar, ainda, que todo o K existente no solo é proveniente do material de origem deste, e também que solos menos intemperizados possuem teores mais elevados de K (NACHTIGALL & RAIJ, 2005), sendo absorvido pela planta na forma iônica K⁺ (MALAVOLTA et al., 1997)

Quanto à disponibilidade no solo, o K pode ser classificado como não disponível, lentamente disponível e disponível. A forma que pode ser absorvida pelas plantas (K⁺) para suprir sua necessidade é considerada como disponível, sendo constituída pelo K trocável, encontrado na solução do solo ou nos complexos de superfície de esfera externa, sorvido às cargas negativas dos grupos funcionais de superfície dos argilominerais ou da MO (SPOSITO, 2008).

Nesse sentido, diferentes métodos são utilizados para quantificar os teores de K disponível. Um bastante conhecido determina o K através da extração por uma mistura de ácidos diluídos, denominado Mehlich-1. Além

deste, outros métodos podem ser utilizados, como o que utiliza solução neutra de acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$; ou ainda, pelo método da resina de troca de íons (VILLA et al., 2004; BORTOLON et al., 2010). Tais determinações são baratas, rápidas e representam objetivamente a forma de K no solo que mais se relaciona com a forma absorvível pelas plantas (ERNANI et al., 2007a).

A outra fração do K está no solo sob forma não disponível – fixado nas entrecamadas dos minerais 2:1 – e também, como parte constituinte da estrutura dos minerais primários – K estrutural (SPOSITO, 2008). De acordo com Curi et al. (2005), de modo geral, existe um equilíbrio entre estas formas; ou seja, à medida que as plantas absorvem o K da solução do solo (o qual é tamponado pelas formas trocáveis), o mesmo é restabelecido à solução pelas formas não trocáveis e estruturais existentes no solo.

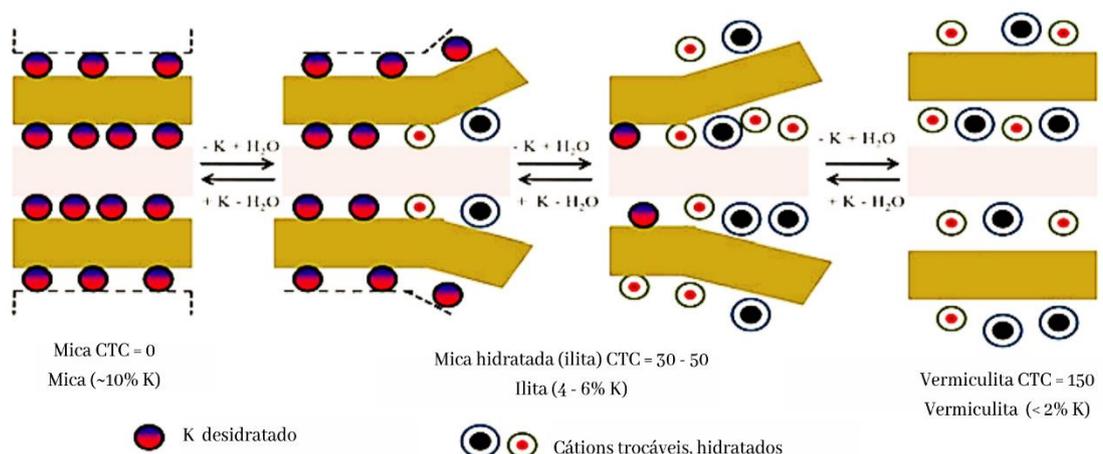


Figura 3. Mecanismo de fixação e liberação do K no solo. Adaptado de MEENA et al. (2016).

Assim, a disponibilidade de K não depende apenas da sua concentração na solução do solo, mas principalmente da capacidade das outras formas de K do solo em repor e manter esta (MENGEL & KIRKBY, 2001). A capacidade de reposição do K pode ser denominada como poder tampão de K e é definida pela relação Q/I, onde o Q se refere ao fator quantidade (K na fase sólida lentamente disponível e indisponível) e o I se refere ao fator intensidade (K na solução, onde se encontra o K disponível) (MIELNICZUK, 1982). Em ambientes de terras baixas, de acordo com a mineralogia comumente encontrada nestas áreas, os grandes responsáveis pelo fornecimento de K às plantas, segundo Fraga et al. (2009) e Britzke et al. (2012), são os feldspatos potássicos, as esmectitas

(também as com hidróxi-Al nas entrecamadas) e a ilita. Segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016), os níveis críticos para o K estão divididos de acordo com grupos de culturas. Culturas de grãos e pastagens, por exemplo, são classificadas como Grupo 2, e estes são de 60, 90, 120 e 135 mg de K dm^{-3} para solos com $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0} \leq 7,5$; 7,6 a 15; 15,1 a 30,0 e $> 30,0$ $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente.

3. HIPÓTESE

A adoção de sistemas de produção agropecuária com plantio direto, em área de solo de terras baixas no RS, aumenta a disponibilidade de fósforo e potássio e melhora a qualidade física do solo em curto prazo (4 anos).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

O objetivo geral é avaliar as respostas do solo de terras baixas, em curto prazo (4 anos), quanto à disponibilidade de P e K, bem como as características físicas deste, frente à adoção de práticas conservacionistas do solo.

4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- avaliar o impacto dos diferentes sistemas estudados, em relação aos teores de P e K disponíveis no solo;
- mensurar a variabilidade dos teores de P e K, carbono orgânico dissolvido (COD) e, os valores de pH e condutividade elétrica (CE) na solução do solo;
- mensurar o impacto dos diferentes sistemas estudados na densidade do solo e na porosidade do solo;
- relacionar as respostas físico-químicas do solo com a produtividade do arroz irrigado.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Histórico e caracterização da área experimental

Foi utilizado um experimento que estava localizado no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, situado no município de Capivari do Sul (Figura 4), área correspondente à Planície Costeira Externa do RS, Brasil (30°9'59" S, 50°29'33" O) e cuja altitude é de 7 metros acima do nível do mar. O solo foi classificado como Planossolo Háplico (SANTOS et al., 2018), o qual possui 821 g kg⁻¹ de areia, 92 g kg⁻¹ de silte e 87 g kg⁻¹ de argila, na camada até 0,10 m. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região se enquadra como subtropical (Cfa), onde os verões são quentes e as quatro estações são bem definidas. A precipitação média do município é de 1.400 mm anuais.

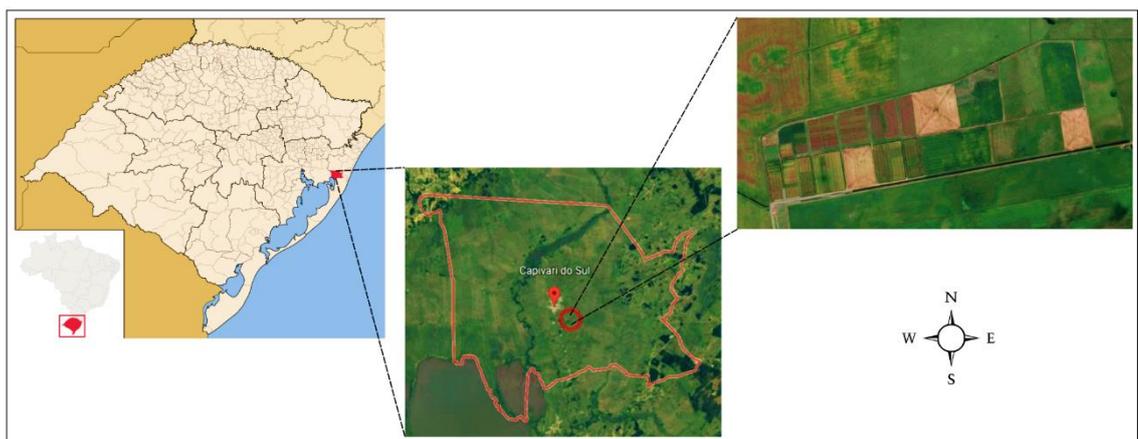


Figura 4. Localização geográfica do campo experimental, no município de Capivari do Sul, RS, Brasil. Fonte: extraído e adaptado do Google (2022).

Anteriormente à implantação do protocolo experimental, que contou com sistematização do solo, o histórico da área era de monocultivo de soja e campo de sucessão de inverno (pousio). Assim, desde 2018, em 22 ha da área, foram conduzidos sete sistemas de manejo de produção de arroz irrigado, sob delineamento de blocos ao acaso (DBC), com três repetições (Figura 5), os quais contemplam: sistema 1 (S1 – testemunha padrão), em que ocorre o monocultivo de arroz com preparo de solo e pousio no inverno; sistema 2 (S2), em que ocorre o monocultivo de arroz com pousio no inverno, entretanto, sem preparo de solo; sistema 3 (S3), onde também ocorre monocultivo de arroz, porém sem preparo de solo e com a inserção de uma planta de cobertura de solo durante o inverno (trevo persa); nos sistemas 4 e 5 (S4 e S5) já não ocorre mais o monocultivo, visto que há introdução de rotação de culturas de verão com soja e arroz e, durante o inverno é utilizado o azevém como forragem aos animais, que são inclusos no experimento a partir do S4, caracterizando assim os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA); nos sistemas 6 e 7 (S6 e S7) não há rotação de culturas de verão e, somente a cada quatro anos, a cultura do arroz retorna à área, compreendendo nos outros verões, o campo nativo de sucessão com estabelecimento natural e sem adubação.

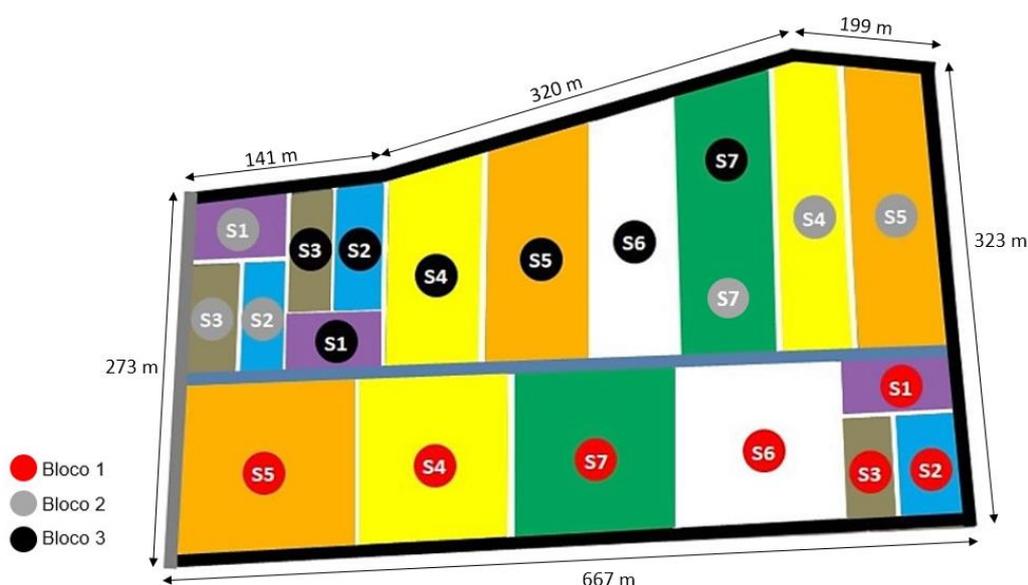


Figura 5. Croqui da área experimental, com indicação dos sistemas e dos blocos de cada parcela. Fonte: Centro Tecnológico Integrar-Agrinova.

Na fase hibernar dos sistemas integrados, ocorre a introdução de consorciação do azevém com trevo branco, o que diversifica e traz qualidade à pastagem. Há ainda, uma variável que compreende a fase de pastagens entre os sistemas 4 e 5 e os sistemas 6 e 7, no que compete ao nível de tecnologia a elas empregado. Ocorre a adoção de baixo nível de tecnologia aos sistemas 4 e 6 e de alta tecnologia aos sistemas 5 e 7. A baixa tecnologia é caracterizada pela introdução de 25 kg de N ha⁻¹ na pastagem de inverno e manejo de altura do pasto entre 5 e 10 cm. Já a alta tecnologia, é caracterizada pela introdução de 150 kg ha⁻¹ de N, 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, doses recomendadas (CQFS-RS/SC, 2016), para que sejam elevados os valores de P e K até acima do teor crítico, aliado a um manejo de altura da pastagem entre 15 e 20 cm.

Ressalta-se que neste trabalho foram avaliados os sistemas 2, 3, 5 e 7 (Tabela 2), visto que a adoção do manejo PD é uma prerrogativa do estudo, além da adequada adubação, conforme a CQFS-RS/SC (2016), onde os níveis de nutrientes são mantidos acima ou próximos do teor crítico. Deste modo, os sistemas 1, 4 e 6 não foram contemplados.

Tabela 2. Descrição e distribuição espaço-temporal dos sistemas de produção investigados no experimento (Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS). Arroz/pousio= sistema 2; Arroz/trevo= sistema 3; ILP Arroz-Soja/Azevém= sistema 5; Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo= sistema 7.

Época / ação de manejo	Sistema de manejo			
	Arroz/pousio	Arroz/trevo	ILP Arroz-Soja/Azevém	Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo
Preparo de solo	Não	Não	Não	Não
Pastejo	Não	Não	Sim	Sim
Tecnologia na pastagem	-	-	Alta	Alta
Tecnologia na lavoura	Alta	Alta	Alta	Alta
1° inverno	Po	Tp	Az	Az+Tb
1° verão	Ar	Ar	Sj	Cn
2° inverno	Po	Tp	Az	Az+Tb
2° verão	Ar	Ar	Ar	Cn
3° inverno	Po	Tp	Az	Az+Tb
3° verão	Ar	Ar	Sj	Cn
4° inverno	Po	Tp	Az	Az+Tb
4° verão	Ar	Ar	Ar	Ar

Ar = Arroz irrigado (*Oryza sativa* L.); **Az** = azevém (*Lolium multiflorum* Lam.); **Cn** = campo nativo de sucessão, com estabelecimento natural; **Po** = pousio; **Sj** = soja (*Glycine max* L.); **Tb** = trevo-branco (*Trifolium repens* L.) **Tp** = trevo-persa (*Trifolium resupinatum* L.).

5.2 Descrição da fase experimental

Decorrente do viés temporal deste estudo, o qual busca demonstrar principalmente a resposta do solo frente aos diferentes sistemas investigados, esta fase compreendeu todo o primeiro ciclo de 4 anos do protocolo experimental. Implantado em maio de 2018, preliminarmente o experimento recebeu o preparo de solo para a implantação das coberturas hibernais dos sistemas, seguindo posteriormente o cronograma determinado, conforme disposto anteriormente na Tabela 2.

Referente ao manejo da adubação (Tabela 3), este foi realizado em linha e conforme especificado pela CQFS-RS/SC (2016), de acordo com as características químicas iniciais verificadas (TEDESCO et al., 1995) e interpretação destas (CQFS-RS/SC, 2016; SOSBAI, 2018), datadas da implantação do experimento (Tabela 4). Preconizou-se que as culturas recebessem adubação adequada para a expectativa de altas produtividades. Não foi realizada correção da acidez do solo e as adubações de P e K foram sempre realizadas em linha.

Tabela 3. Doses de nutrientes aplicadas nos sistemas testados no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS, de acordo com disposto pela CQFS-RS/SC (2016), para expectativas de altas produtividades das culturas.

Ano / Período		Sistema de manejo											
		Arroz/pousio			Arroz/trevo			ILP Arroz- Soja/Azevém			Pecuária Campo nativo/Azevém+ Trevo		
		Dose de nutriente											
----- kg ha ⁻¹ -----													
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2018	Inverno	0	0	0	0	0	0	150	90	120	150	90	120
18/19	Verão	150	90	120	150	90	120	0	90	120	0	0	0
2019	Inverno	0	0	0	0	0	0	150	90	120	150	90	120
19/20	Verão	150	90	120	150	90	120	150	90	120	0	0	0
2020	Inverno	0	0	0	0	0	0	150	90	120	150	90	120
20/21	Verão	150	90	120	150	90	120	0	90	120	0	0	0
2021	Inverno	0	0	0	0	0	0	150	90	120	150	90	120
21/22	Verão	150	90	120	150	90	120	150	90	120	150	90	120
TOTAL		450	270	360	450	270	360	750	630	840	600	360	480

*Na linha "TOTAL" não foram somadas as doses de nutrientes do verão 21/22, em virtude do momento da coleta de solo, que foi realizada antes dos manejos de adubação.

Tabela 4. Análise química do solo da área experimental, previamente à implantação do protocolo – Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS (maio, 2018).

Atributo *	Camada de solo (m)		Interpretação geral ** (camada 0,00-0,20 m)
	0,00-0,10	0,10-0,20	
pH em água (1:1)	4,4	4,3	Muito baixo
MO (%)	1,8	1,3	Baixa
P (mg dm ⁻³)	1,6	1,6	Muito baixo
K (mg dm ⁻³)	78	82	Médio
Na (mg dm ⁻³)	28	28	-
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,1	1,9	Baixo
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,3	1,2	Alto
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,2	1,3	-
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	11,6	12,6	-
CTC _{pH7,0} (cmol _c dm ⁻³)	15,3	16	Alta
V (%)	24	21	Muito baixa
m (%)	24	28	Muito alta

V (%) = saturação por bases; m (%) = saturação por alumínio

* Análise realizada segundo metodologia proposta por Tedesco et al. (1995)

** Interpretação dos resultados feita com base em CQFS-RS/SC (2016) e SOSBAI (2018)

5.3 Amostragens e determinações no solo

As coletas de solo ocorreram em 14 de outubro de 2021, 42 meses após o início do experimento, todas no mesmo dia e imediatamente anteriores ao início dos manejos da semeadura do arroz. Foram coletadas amostras nas camadas de 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m de profundidade, para os atributos físicos, da solução, e químicos do solo. No momento da coleta, o tratamento Arroz/pousio estava sob pousio; o tratamento Arroz/trevo possuía cobertura hiberna de trevo-persa o tratamento ILP Arroz-Soja/Azevém apresentava azevém; e o tratamento Pecuária Campo nativo/ Azevém+trevo possuía consórcio de azevém e trevo-branco.

5.3.1 Atributos físicos do solo

Para a caracterização dos atributos físicos do solo, como densidade do solo (D_s), porosidade do solo e umidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas, utilizando cilindros metálicos com 5,0 cm de diâmetro interno, 3,0 cm de altura e volume interno de $58,9 \text{ cm}^3$. As amostras foram extraídas das parcelas do referido estudo, sendo 6 subamostras por parcela, nas camadas de 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m.



Figura 6. Momento da coleta das amostras de solo na trincheira (A); amostras indeformadas de solo já embaladas, para análises físicas de umidade, porosidade e densidade (B). Imagens: o autor.

Os cilindros foram cravados no solo com auxílio de um batedor (Figura 6A). Posteriormente à coleta, as amostras foram identificadas e embaladas de modo hermético para que não houvesse perda de umidade por evaporação (Figura 6B). Estas, foram acondicionadas sob refrigeração (aproximadamente 3°C) em laboratório, até a realização da toaleta e pesagem. A toaleta consiste em remover (com auxílio de lâmina afiada) o excesso de solo das extremidades e do entorno do cilindro metálico, de modo que permaneça apenas o solo que preenche internamente o cilindro.

Para a determinação da densidade, da porosidade e da umidade do solo e realização da análise textural, foi utilizada metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Na avaliação da porosidade, as amostras de solo foram submetidas à mesa de tensão, onde estas, previamente saturadas por capilaridade (0 kPa), tiveram a ação de sucção de uma coluna d'água de 0,60 m (6,0 kPa). O volume

de água em equilíbrio na amostra, após esta ser submetida a sucção, representou a microporosidade do solo - M_i (Equação 1), e a macroporosidade - M_a (Equação 2) resultou da diferença entre a porosidade total (P_t) e a microporosidade. A porosidade total (Equação 3) foi conhecida após a secagem das amostras em estufa a uma temperatura de 105° C, assim que estas não apresentaram mais variação de peso.

$$M_i = \frac{\text{massa de solo 6 kPa} - \text{massa de solo seco } 105^\circ \text{ C (g)}}{\text{volume de solo do cilindro (cm}^3\text{)}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$M_a = \text{porosidade total (m}^3\text{m}^{-3}\text{)} - \text{microporosidade (m}^3\text{m}^{-3}\text{)} \quad \text{Equação (2)}$$

$$P_t = \frac{\text{massa de solo 0 kPa} - \text{massa de solo seco } 105^\circ \text{ C (g)}}{\text{volume de solo do cilindro (cm}^3\text{)}} \quad \text{Equação (3)}$$

A densidade do solo (g cm^{-3}) foi calculada dividindo o valor da massa de solo (seco em estufa a 105° C) pelo volume do cilindro metálico, em cm^3 . Foi considerada a densidade da água como sendo 1 g cm^{-3} . A análise textural do solo foi realizada por parcela e por camada avaliada, utilizando o método da pipeta.

5.3.2 Solução do solo

Para extração da solução do solo, foi realizada coleta de solo indeformado com cilindros metálicos de 5,0 cm de diâmetro interno, 7,5 cm de altura e volume interno de $147,3 \text{ cm}^3$ (Figura 7A). Entretanto, os mesmos receberam demarcação externa de 5,0 cm de altura (volume de $58,9 \text{ cm}^3$) para que, no momento da coleta, esta fosse respeitada e a camada de solo coletada correspondesse à mesma medida (Figura 7B). Este procedimento foi realizado em função das camadas analisadas (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m de profundidade).

As amostras de solo foram extraídas das parcelas de estudo, sendo 6 subamostras por parcela, nas camadas de 0,00 a 0,05 m e de 0,05 a 0,10 m. Após coleta a campo, as amostras foram acondicionadas sob refrigeração e, posteriormente, a extração da solução do solo foi realizada por centrifugação rápida, seguindo metodologia proposta por Nolla (2003) com adaptação descrita por Martins (2016), onde são utilizados materiais análogos ao descrito por Elkhatib et al. (1987); entretanto, foram adaptados aos cilindros metálicos de coleta indeformada de solo, descritos no parágrafo anterior.

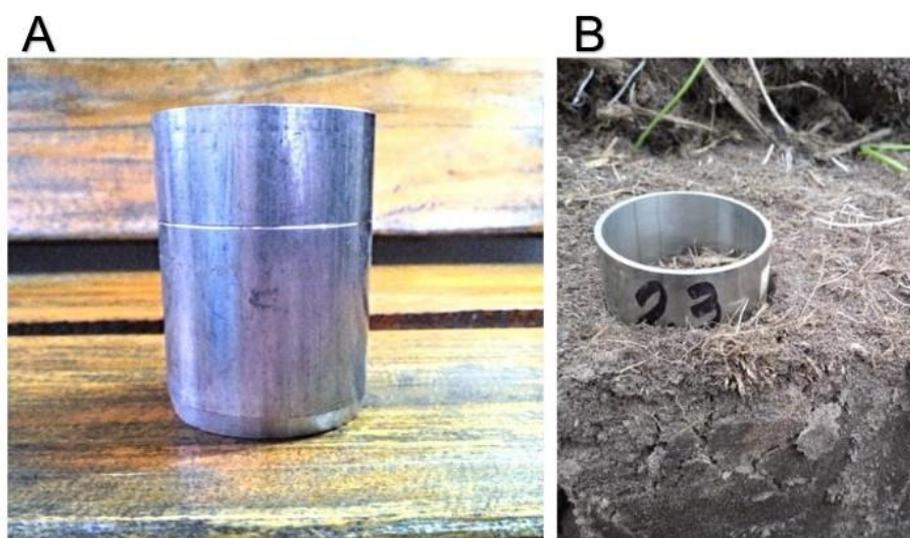


Figura 7. Cilindro metálico com demarcação externa de profundidade limite de 5,0 cm de penetração no solo (A); momento da coleta de solo na trincheira, respeitando a demarcação de 5,0 cm no cilindro metálico (B). Imagens: o autor.

Da solução extraída em centrífuga de bancada (Novatecnica NT820), a 1300 g por 30 minutos, somados os tempos de aceleração e frenagem (60 e 120 segundos respectivamente), uniu-se as soluções dos 3 blocos de cada tratamento e cada camada. Imediatamente após a extração da solução do solo, foram determinados o pH com potenciômetro (Digimed DM22), o qual foi calibrado com soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0, e a condutividade elétrica (CE) com eletrodo de platina (condutímetro Digimed DMC 010), calibrado com solução padrão de $1,412 \mu\text{S cm}^{-1}$.

O potássio (K) e o sódio (Na) foram quantificados em duplicata em fotômetro de chama (Analyser 910M) previamente calibrado em faixa de leitura, com soluções padrão de 20 mg L^{-1} de K e de Na. O fósforo (P) e o carbono

orgânico dissolvido (COD) foram determinados em duplicata, com a utilização de espectrofotômetro (Femto 600 Plus), mensurando a absorbância das amostras. Os valores de absorbância compuseram a incógnita “y” das equações previamente ajustadas (Equação 4 – curva padrão do P; Equação 5 – curva padrão do COD).

$$y = 0,6032 x - 0,002 \quad \text{Equação (4)}$$

$$(R^2 = 0,9935)$$

$$y = 0,0009 x - 0,0006 \quad \text{Equação (5)}$$

$$(R^2 = 0,9884)$$

A concentração de P foi determinada de acordo com metodologia proposta por Murphy & Riley (1962), realizando a mistura de uma solução de molibdato de amônio, antimonil tartarato de potássio e ácido sulfúrico (2,5 mol L⁻¹); com outra de ácido ascórbico (0,1 mol L⁻¹), preparada no momento das análises. O comprimento de onda foi igual a 882 nm, em amostras na proporção 6:1 entre solução de solo e reagente, após 20 minutos de repouso. Já a concentração de COD foi determinada conforme Moore (1985), em amostras na proporção 1:1 entre a amostra da solução do solo e mistura sulfocrômica. Após 4 horas em estufa, a 60° C, as amostras foram submetidas à leitura em comprimento de onda igual a 580 nm.

5.3.3 Atributos químicos do solo

Para a análise dos atributos químicos (Tabela 5) foram coletadas amostras estratificadas de solo com auxílio de trado calador, nas camadas de 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10m, sendo quinze subamostras por parcela. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Química do Solo, do Departamento de Solos da UFRGS, onde foram secas ao ar e moídas para posteriores análises, todas realizadas conforme Tedesco et al. (1995).

A acidez ativa (pH) foi determinada em água com auxílio de potenciômetro (Digimed DM22), o qual foi calibrado anteriormente com soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0. Os teores disponíveis de P (Mehlich-1), foram determinados em duplicata, com a utilização de espectrofotômetro (Femto 600 Plus), e de K e Na

(Mehlich-1) com a utilização de fotômetro de chama (Analyser 910M). Utilizando uma solução extratora de KCl 1,0 mol L⁻¹ foram determinados os teores trocáveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg) com auxílio do espectrofotômetro de absorção atômica (Perkin Elmer), e de alumínio (Al³⁺) por titulação com NaOH 0,0125M.

Tabela 5. Atributos químicos do solo para os quatro sistemas avaliados, após 3,5 anos desde a implantação do protocolo experimental (coleta realizada no momento anterior (7 dias) à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Atributo*	Arroz/pousio		Arroz/trevo		ILP Arroz-Soja/ Azevém		Pecuária Campo nativo/ Azevém+trevo	
	0,00- 0,05	0,05- 0,10	0,00- 0,05	0,05- 0,10	0,00- 0,05	0,05- 0,10	0,00- 0,05	0,05- 0,10
Camada (m)								
pH em água (1:1)	4,5	4,4	4,5	4,5	4,3	4,4	4,5	4,6
Na (mg dm ⁻³)	42	32,2	23	24,9	38,1	23	54,5	44,6
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,3	0,5	1,0	0,3	0,8	0,2	1,1	1,2
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,6	0,2	0,5	0,2	0,4	0,8	0,7	0,7
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,9	1,4	0,7	1,2	1,0	1,3	0,9	0,9
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,1	10,3	6,7	7,5	8,0	7,7	7,8	8,0
CTC _{pH7,0} (cmol _c dm ⁻³)	10,7	11,5	8,6	8,3	9,8	9,1	10,1	10,3
V (%)	23,2	10,3	23,1	10,4	18,7	13,3	22,8	22,4
m (%)	26,0	54,0	26,3	59,9	34,8	56,7	27,7	28,9

* Análises realizadas segundo metodologias proposta por Tedesco et al. (1995); **pH** = teor em água com relação 1:1; **Na** = sódio trocável; **Ca** = Cálcio trocável e **Mg** = Magnésio trocável (extração KCl); **Al** = alumínio trocável; **H+Al** = acidez potencial; **CTC_{pH7,0}** = capacidade de troca de cátions em pH 7,0; **V%** = saturação por bases; **m%** = saturação por alumínio.

5.3.4 Avaliação da produtividade do arroz

Foram utilizados os dados de produtividade por hectare da cultura do arroz referentes à safra 2021/2022, ano em que a cultura contemplou todos os sistemas do protocolo experimental e a cultivar semeada foi a Pampa CL. Foram colhidas três subamostras por parcela, resultando em uma área total igual a 2 m², em cada uma das parcelas dos sistemas. Posteriormente, as subamostras foram trilhadas e pesadas, padronizando-se a umidade dos grãos (UR%) em 13%.

5.4 Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados, foi elaborada pelo autor, com o auxílio do software *R-statistical*® versão 4.1.1, onde preliminarmente foram verificados os pressupostos de normalidade dos resíduos (*Shapiro-Wilk*) e homogeneidade das variâncias (*Bartlett*). Quando atendidos, os dados foram submetidos à ANOVA – análise de variância ($p \leq 0,05$). Sendo os efeitos das fontes de variação significativos, foi aplicado o teste de Tukey para comparação de médias ($p \leq 0,05$). Posteriormente, foram realizadas análises de correlação e regressão entre os dados, optando sempre por apresentar os resultados das equações com maior coeficiente de determinação (R^2) e com valor significativo ($p \leq 0,05$).

6. RESULTADOS

6.1 Teores de P e K disponíveis na fase sólida do solo

Os teores de P e K disponíveis tiveram incremento em todos os sistemas avaliados, comparativamente ao início do experimento. O P disponível, que se enquadrava na classe Muito baixa na análise inicial de maio de 2018 (em torno de $1,6 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada 0,00-0,10 m, conforme Tabela 4), apresentou valores médios entre os sistemas de 40,1 a $55,5 \text{ mg dm}^{-3}$ na mesma camada (Tabela 6). Isso o enquadra em uma classe de disponibilidade Muito alta para o arroz irrigado ($>12,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e Alta para a soja e pastagens cultivadas ($30,1\text{-}60,0 \text{ mg dm}^{-3}$), de acordo com CQFS-RS/SC (2016). Entre os sistemas avaliados, não houve diferença significativa entre os teores de P disponível em cada uma das camadas de solo analisadas separadamente. Ao comparar-se as duas camadas, a camada de 0,05 a 0,10 m teve redução dos teores de P disponível no solo em relação à camada de 0,00 a 0,05 m, em todos os quatro sistemas avaliados.

O K disponível, que se enquadrava na classe Média na análise inicial da implantação do experimento (Tabela 4), apresentou incremento, com valores médios variando entre 105,3 e $135,6 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada 0,00-0,10 m (Tabela 6), o que os enquadra na classe de disponibilidade Alta. Além disso, os maiores teores de K disponível foram referentes à camada de 0,00 a 0,05 m, com valores entre 126,1 e $158,3 \text{ mg dm}^{-3}$, os quais diminuíram em profundidade (camada 0,05 a 0,10 m), ficando entre 84,5 e $112,9 \text{ mg dm}^{-3}$. O teor de K não apresentou diferença significativa entre os sistemas nas camadas avaliadas separadamente. Comparando os valores entre as camadas, apenas o sistema Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo não apresentou diferença significativa, sendo que, em

todos os demais sistemas, a camada superficial apresentou maior teor de K disponível (Tabela 6).

Tabela 6. Teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis no solo (Mehlich-1), de acordo com os sistemas de manejo de plantio direto avaliados em um Planossolo Háplico (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Sistema de manejo	Teor de P disponível (mg dm ⁻³)	Teor de K disponível (mg dm ⁻³)
	Camada de 0,00 - 0,05 m do solo	
Arroz/Pousio	69,0 Aa	155,1 Aa
Arroz/trevo	78,6 Aa	126,1 Aa
ILP Arroz-Soja/Azevém	77,1 Aa	158,3 Aa
Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo	81,8 Aa	146,9 Aa
Camada de 0,05 - 0,10 m do solo		
Arroz/Pousio	11,2 Ab	94,6 Ab
Arroz/trevo	7,1 Ab	84,5 Ab
ILP Arroz-Soja/Azevém	34,0 Ab	112,9 Ab
Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo	14,5 Ab	112,2 Aa
CV %	46,89	18,78

Letras maiúsculas comparam as médias de P disponível entre os sistemas dentro da mesma camada; letras minúsculas comparam o mesmo sistema entre as camadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise de correlação de Pearson entre os teores de P disponível encontrados e a dose total de insumo mineral (P_2O_5) aplicado ao longo da execução do experimento apresentou índice significativo ($p \leq 0,05$) apenas para os dados da camada 0,05 a 0,10 m do solo. A mesma análise realizada entre os teores de K disponível no solo e a dose total de fertilizante mineral (K_2O) apresentou índices não-significativos ($p > 0,05$) para nenhuma das duas camadas analisadas (Tabela 7).

Tabela 7. Valores do coeficiente de correlação (r) entre os teores de P e K no solo e as doses totais de nutrientes aplicadas via fertilizante mineral ao longo do tempo e a significância (valor p) dos resultados obtidos (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Elemento	r	valor p
Fósforo (P)	camada de 0,00 a 0,05 m do solo	0,04
	camada de 0,05 a 0,10 m do solo	0,78
Potássio (K)	camada de 0,00 a 0,05 m do solo	0,27
	camada de 0,05 a 0,10 m do solo	0,57

* = valor significativo para análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$);

ns = valor não-significativo para análise de correlação de Pearson ($p > 0,05$);

O teor de P disponível no solo foi explicado, em parte, em função das doses de P_2O_5 aplicadas nos sistemas avaliados, apresentando significância ($p \leq 0,05$) na camada 0,05 a 0,10 m (Figura 8 B). Neste caso, a dose de P aplicada explica aproximadamente 61% (coeficiente de determinação $R^2 = 0,6102$) da quantidade de P disponível no solo naquela profundidade. Na camada superficial (0,00 a 0,05 m) do solo, não houve variabilidade dos teores de P disponíveis em função das doses de adubo aplicadas (Figura 8 A).

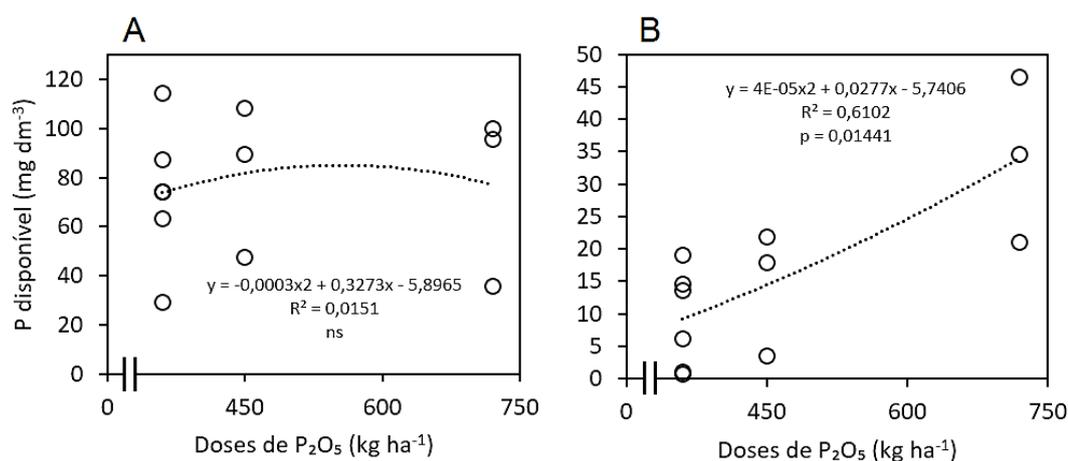


Figura 8. Análise de regressão referente aos teores de P disponível e doses totais de P_2O_5 aplicadas, nas camadas 0,00 a 0,05 m (A) e 0,05 a 0,10 m (B); significância 5% ($p \leq 0,05$). (Coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Analisando os dados dos coeficientes de correlação (r) entre as doses aplicadas de K_2O via fertilizante mineral e os teores disponíveis de K no solo, pode-se verificar que o valor de r é maior para a camada de 0,05 a 0,10 m do que para a camada de 0,00 a 0,05 m do solo (Tabela 7). Os coeficientes de determinação (R^2), não foram significativos para a camada 0,00 a 0,05 m (Figura 9 A), entretanto, foram significativos para a camada de 0,05 a 0,10 m. Assim, o teor de K disponível no solo foi explicado em função das doses de K aplicadas em aproximadamente 54% ($R^2 = 0,5412$), apenas na camada de 0,05 a 0,10 m, conforme a Figura 9 B.

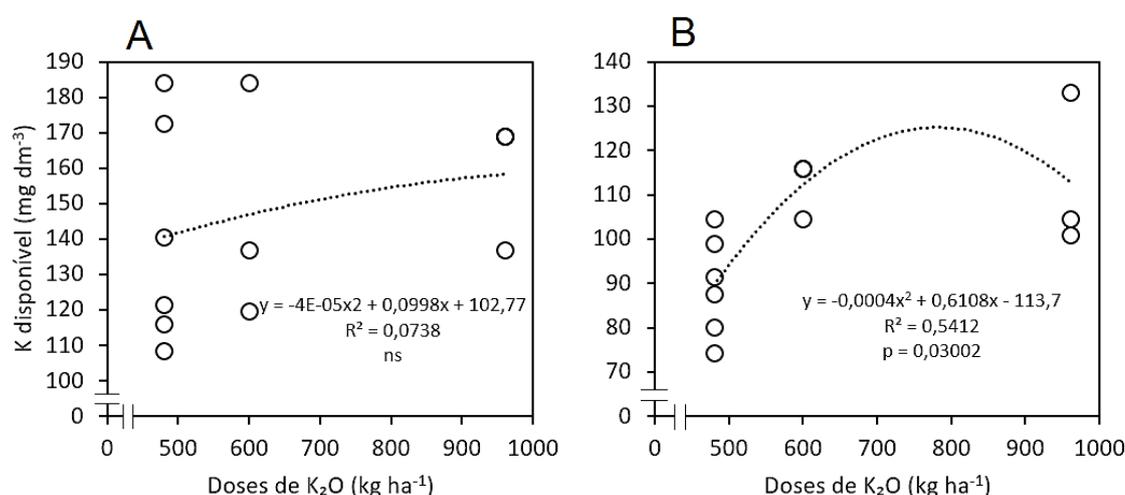


Figura 9. Análise de regressão referente aos teores de K disponível e doses totais de K_2O aplicadas, nas camadas 0,00 a 0,05 m (A) e 0,05 a 0,10 m (B); significância 5% ($p \leq 0,05$). (Coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

6.2 Solução do solo: pH, CE, COD e teores de P e K

Os dados das análises da solução do solo avaliados não apresentaram valores significativamente diferentes entre os sistemas quanto ao COD, ao pH e à CE e nem mesmo entre as camadas dentro de cada sistema (Tabela 8). Entretanto, alguns valores de P e K apresentaram diferenças significativas nas análises realizadas, conforme será apresentado a seguir.

Quando comparados os quatro sistemas de manejo dentro da camada de solo de 0,00 a 0,05 m, verifica-se que as concentrações de P na solução do solo ($mg L^{-1}$) encontradas nos sistemas Arroz/trevo e ILP Arroz-Soja/Azevém são as

maiores, respectivamente, e diferem estatisticamente do sistema Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo, que teve o menor teor de P em solução nesta camada (Tabela 8). O sistema Arroz/Pousio não difere dos demais, tendo valores intermediários. Ao comparar os quatro sistemas de manejo dentro da camada de 0,05 a 0,10 m do solo, verifica-se que o teor de P na solução do solo do sistema ILP Arroz-Soja/Azevém é maior. Inclusive, ele apresenta teor acima do encontrado na camada mais superficial deste sistema e dos demais avaliados, chegando a 1,13 mg L⁻¹ (Tabela 8).

Tabela 8. Valores dos atributos P, K, COD, pH e CE da solução do solo, comparando quatro sistemas de manejo de PD, em duas camadas (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Atributo	Sistema de manejo								CV (%)
	Arroz/Pousio		Arroz/trevo		ILP Arroz-Soja/Azevém		Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo		
	Camada de solo (m)								
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,00-0,05	0,05-0,10	0,00-0,05	0,05-0,10	0,00-0,05	0,05-0,10	
P (mg L ⁻¹)	0,64 ABa	0,12 Bb	1,08 Aa	0,24 Bb	1,06 Aa	1,13 Aa	0,38 Ba	0,07 Ba	41,7
K (mg L ⁻¹)	29,87 Aa	10,3 Ab	13,37 Aa	11,17 Aa	23,3 Aa	22,27 Aa	20,7 Aa	12,0 Aa	42,44
COD (mg L ⁻¹)	69,7 Aa	64,2 Aa	57,4 Aa	53,9 Aa	78,2 Aa	56,4 Aa	71,4 Aa	59,2 Aa	25,66
pH	5,7 Aa	5,8 Aa	5,5 Aa	5,6 Aa	5,4 Aa	5,4 Aa	5,4 Aa	5,6 Aa	8,27
CE (ds m ⁻¹)	0,36 Aa	0,32 Aa	0,32 Aa	0,22 Aa	0,31 Aa	0,23 Aa	0,38 Aa	0,36 Aa	44,95

Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas dentro da mesma camada, e letras minúsculas comparam o mesmo sistema entre as camadas pelo teste de Tukey (p≤0,05);

Assim como os resultados encontrados nas análises do P disponível na fase sólida do solo (mg dm⁻³), a camada 0,00 a 0,05 m também apresentou maiores concentrações de P na solução do solo (mg L⁻¹) nos sistemas de manejo Arroz/Pousio e Arroz/trevo. Nestes sistemas, houve diferença entre as camadas.

Analisando os dados do teor de K da solução do solo (mg L⁻¹), verifica-se que não houve diferença entre os sistemas de manejo em cada uma das camadas avaliadas separadamente (Tabela 8). Comparando os dados entre as camadas, o único sistema de manejo que apresentou maior concentração de K na solução do solo na camada de 0,00 a 0,05 m foi o sistema Arroz/Pousio.

Todos os demais sistemas de manejo não apresentaram diferença significativa de K da solução do solo entre as duas camadas de solo avaliadas (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m).

Com relação ao COD, pode-se observar que não houve diferença entre os sistemas de manejo quando analisadas as camadas separadamente. Na camada de solo de 0,00 a 0,05 m, os valores variaram entre 57,4 e 78,2 mg L⁻¹, e na camada de solo de 0,05 a 0,10 m, os valores variaram entre 53,9 e 64,2 mg L⁻¹. A concentração de COD entre as duas camadas também não foi diferente em nenhum dos sistemas avaliados. Da mesma forma, o pH da solução do solo não apresentou diferença entre os sistemas avaliados, quando verificado em cada uma das camadas separadamente. Na camada de solo de 0,00 a 0,05 m, os valores do pH da solução variaram entre 5,4 e 5,7, e na camada de 0,05 a 0,10 m, os valores variaram entre 5,4 e 5,8. A comparação do pH entre as duas camadas também não foi diferente estatisticamente em nenhum dos sistemas avaliados. Com relação à CE da solução do solo, não houve diferença estatística entre os sistemas, quando analisadas as camadas separadamente. Na camada de 0,00 a 0,05 m, os valores variaram entre 0,31 e 0,38 dS m⁻¹, e na camada de 0,05 a 0,10 m os valores variaram entre 0,22 e 0,36 dS m⁻¹. A CE entre as duas camadas não foi diferente em nenhum dos sistemas avaliados.

Foi realizada análise da relação entre a concentração de P na solução do solo e do P disponível, separadamente, em cada um dos sistemas de manejo (Figura 10), buscando avaliar qual a relação entre elas. Assim, podemos observar que nos sistemas Arroz/Pousio e Arroz/trevo, a análise de regressão foi significativa, explicando aproximadamente 98% ($R^2=0,9796$ e $R^2=0,9775$, respectivamente) da concentração de P na solução do solo em função da quantidade de P disponível da fase sólida do solo nos sistemas citados. Já os sistemas de manejo ILP Arroz-Soja/Azevém e Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo não responderam da mesma forma. Primeiramente, pelo menor valor do coeficiente de determinação ($R^2=0,6003$ e $R^2=0,4928$, respectivamente), e também por não apresentarem significância na análise de regressão. Ambos os sistemas tiveram comportamentos distintos, sendo que o sistema ILP Arroz-Soja/Azevém apresentou maiores concentrações de P na solução do solo, e o sistema Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo foi o que apresentou menores concentrações de P na solução do solo.

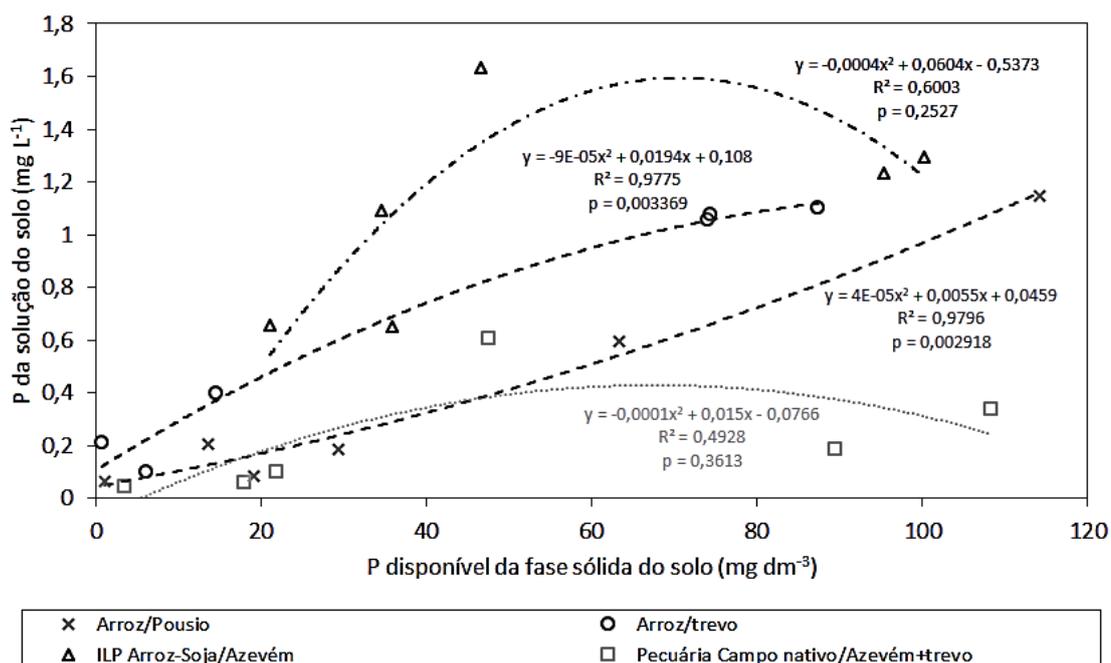


Figura 10. Análise de regressão referente a concentração de P na solução em função dos teores de P disponível em cada um dos sistemas avaliados, considerando as duas camadas do estudo (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Em relação aos resultados dos teores de K na solução do solo, foi relacionada a concentração de K na solução do solo em função do K disponível na fase sólida do solo separadamente em cada um dos sistemas de manejo (Figura 11), buscando avaliar a relação entre eles. Assim, pode-se observar que nenhum dos sistemas de manejo apresentou significância nos ajustes de regressão para explicar a variável dependente (concentração de K na solução) em função do K disponível na fase sólida do solo.

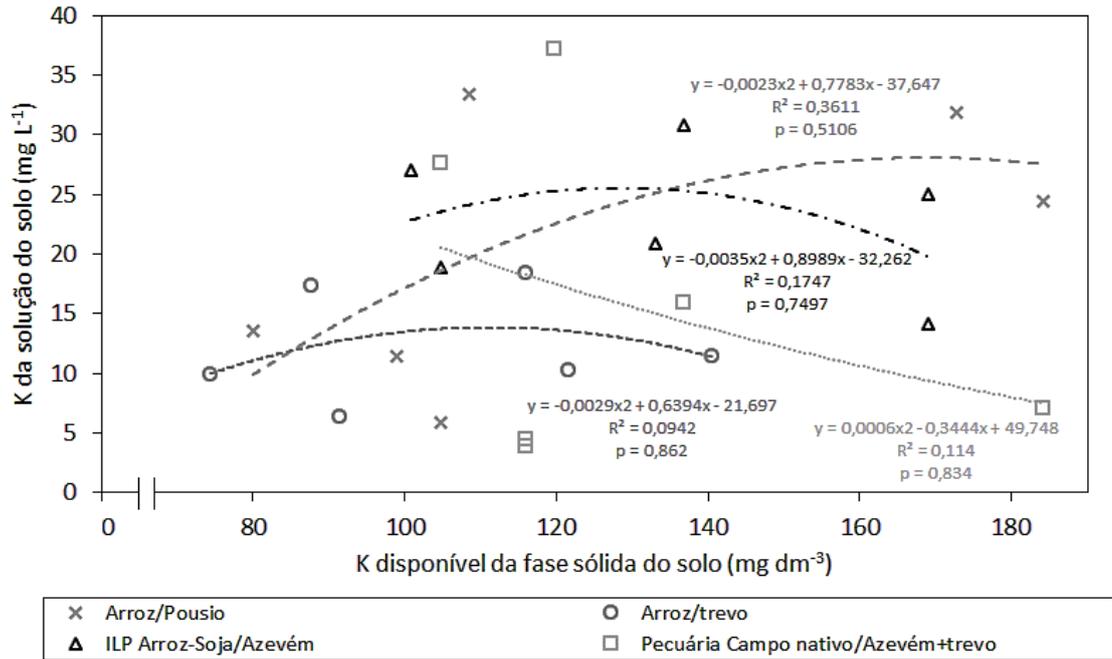


Figura 11. Análise de regressão referente a concentração de K na solução em função dos teores de K disponível em cada um dos sistemas avaliados, considerando as duas camadas do estudo (0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

6.3 Atributos físicos do solo

A densidade do solo (D_s) apresentou valores entre os sistemas variando de 1.240 até 1.500 kg m^{-3} na camada de 0,00-0,05 m, e de 1.490 até 1.670 kg m^{-3} na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 9). Analisando os resultados entre os sistemas, pode-se verificar que não houve diferença significativa para cada camada separadamente.

Ainda de acordo com os dados, só houve diferença significativa entre as camadas de solo no sistema Arroz/trevo, que demonstrou densidade do solo de 1.240 kg m^{-3} na camada 0,00-0,05 m e 1.590 kg m^{-3} na camada 0,05-0,10 m. Entre as camadas dos demais sistemas de manejo avaliados (Arroz/Pousio, ILP Arroz-Soja/Azevém e Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo), os valores da densidade do solo não foram estatisticamente diferentes.

Tabela 9. Valores de densidade, macroporosidade e microporosidade do solo e resultado da análise estatística, de acordo com os sistemas de manejo de PD avaliados (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/RS).

Sistema de manejo	Ds	Ma	Mi
	(kg m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)	(m ³ m ⁻³)
camada de 0,00 - 0,05 m do solo			
Arroz/Pousio	1.280 Aa	0,050 Aa	0,52 Aa
Arroz/trevo	1.240 Aa	0,069 Aa	0,52 Aa
ILP Arroz-Soja/Azevém	1.500 Aa	0,045 Aa	0,49 Aa
Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo	1.470 Aa	0,043 Aa	0,50 Aa
Camada de 0,05 - 0,10 m do solo			
Arroz/Pousio	1.490 Aa	0,023 Ab	0,46 Ab
Arroz/trevo	1.590 Ab	0,037 Ab	0,45 Ab
ILP Arroz-Soja/Azevém	1.670 Aa	0,036 Aa	0,43 Ab
Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo	1.650 Aa	0,035 Aa	0,44 Ab
CV %	8,55	26,86	5,83

Ds= densidade do solo; Ma= macroporosidade do solo; Mi= microporosidade do solo; Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas dentro da mesma camada, e letras minúsculas comparam o mesmo sistema entre as camadas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Em relação à macroporosidade do solo (Ma), comparando os sistemas por camada, esta apresentou valores entre 0,043 e 0,069 m³ m⁻³ na camada de 0,00-0,05 m, e entre 0,023 e 0,037 m³ m⁻³ na camada 0,05-0,10 m, sem que houvesse diferença entre os valores determinados (Tabela 9). Comparando as duas camadas de cada sistema de manejo, verificou-se que os sistemas Arroz/Pousio e Arroz/trevo possuem quantidades maiores de macroporos na camada de 0,00-0,05 m em relação à camada de 0,05-0,10 m, com diferença significativa destes valores. Ainda, é possível verificar que o sistema Arroz/trevo foi o único que apresentou conjuntamente menor Ds e maior volume de Ma na camada superficial.

A microporosidade do solo (Mi) não apresentou diferença significativa entre os sistemas avaliados, quando comparados por camada separadamente. A Mi variou entre 0,49 e 0,52 m³ m⁻³ na camada de 0,00 a 0,05 m, e entre 0,43 e 0,46 m³ m⁻³ na camada de 0,05 a 0,10 m. Todavia, as camadas diferenciaram-se entre si em todos os quatro sistemas de manejo, onde a camada de 0,00 a

0,05 m apresentou maior volume de microporos em relação à camada de 0,05 a 0,10 m (Tabela 9).

6.4 Produtividade de grãos do arroz irrigado e sua relação com os atributos do solo analisados

A produtividade de grãos do arroz irrigado não teve diferença estatística entre os tratamentos, e apresentou valores entre 8.069 a 9.441 kg ha⁻¹ entre os quatro sistemas avaliados (Figura 12). O sistema de manejo Arroz/Pousio apresentou produtividade de 8.069 kg ha⁻¹, enquanto os demais sistemas apresentaram valores de produtividade acima de 9.000 kg ha⁻¹, o que representa uma diferença entre aproximadamente 18 sacos de arroz, à até 27 sacos de arroz.

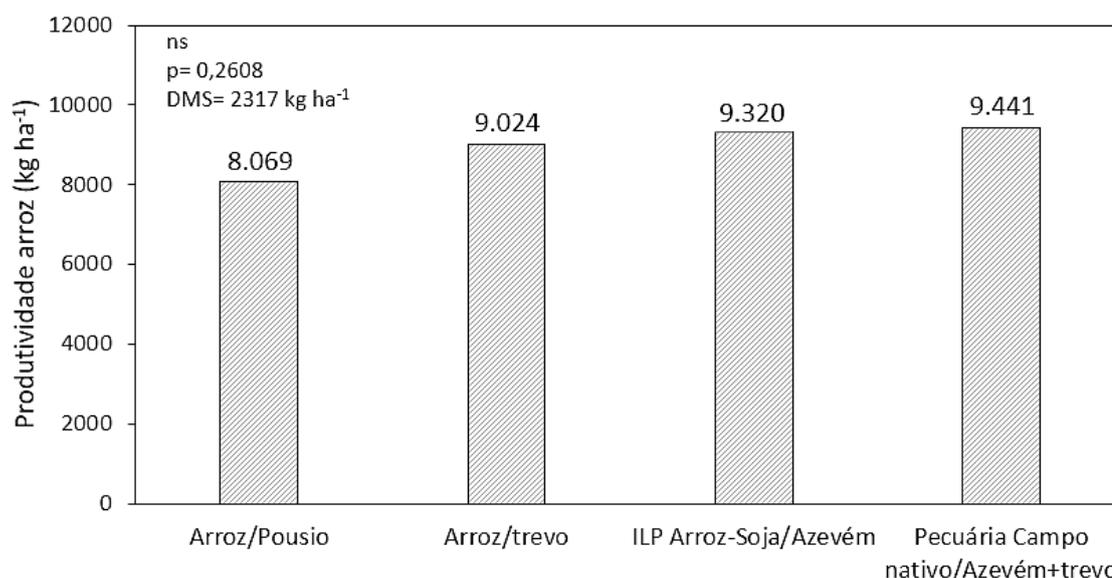


Figura 12. Médias da produtividade de grãos do arroz irrigado (safra 2021/2022) nos sistemas de manejo de PD avaliados neste estudo (coleta realizada no momento anterior à colheita do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

Comparando apenas os sistemas de manejo em que não há pecuária (Arroz/Pousio e Arroz/trevo) e levando em consideração que ambos receberam as mesmas doses de fertilizante mineral (Tabela 3), percebe-se que a produtividade do sistema que adota cobertura de inverno com leguminosa (trevo-

persa) foi de aproximadamente 19 sacos ha^{-1} a mais do que o sistema que não adota cobertura hiberna.

As análises de correlação indicaram que a Ds e a Mi do solo, explicam em parte os resultados de produtividade do arroz irrigado. As regressões entre ambos os atributos e a produtividade de grãos do arroz apresentaram significância, sendo que os maiores coeficientes de determinação estão relacionados à Ds (Figura 13 A). À medida em que os valores da Ds aumentaram na camada de 0,00 a 0,05 m, houve também incremento da produtividade do arroz. Esta correlação positiva explica aproximadamente 61% ($R^2 = 0,6122$) dos dados produtivos. Na camada de 0,05 a 0,10 m do solo, a tendência positiva se manteve, entretanto, o coeficiente de determinação foi menor ($R^2 = 0,477$).

Um dos atributos que determina a Ds é o espaço aéreo do solo e, neste estudo, os microporos compreendem sua fração preponderante (Tabela 9). Observa-se que entre este atributo e a produtividade do arroz, a correlação é negativa, uma vez que com o aumento da Mi o resultado é a diminuição da produtividade (Figura 13 B). Na camada de 0,00 a 0,05 m do solo, o R^2 foi de 0,4156, o que explica o resultado da produtividade de grãos do arroz em aproximadamente 42%. Já na camada de 0,05 a 0,10 m, o R^2 foi de 0,4371, o que explica em torno de 44% dos resultados da produtividade.

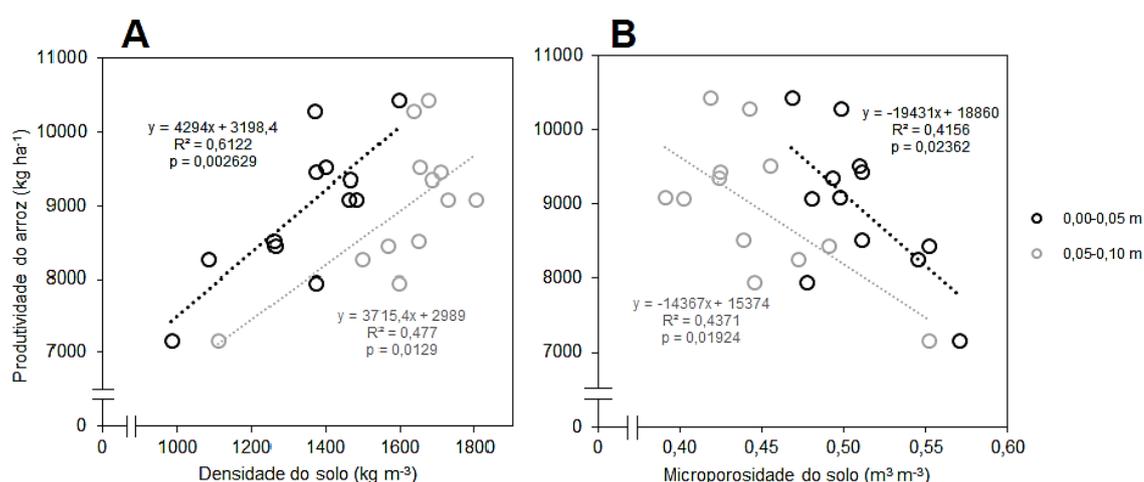


Figura 13. Análise de regressão entre a produtividade do arroz irrigado (safra 2021/2022) e a densidade (A) e a microporosidade do solo (B), nas camadas 0,00 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m; significância 5% ($p \leq 0,05$); (coleta realizada no momento anterior à semeadura do arroz do cultivo estival 2021/2022, no Centro Tecnológico Integrar-Agrinova, Capivari do Sul/ RS).

7. DISCUSSÃO

A adequada fertilidade do solo é fator fundamental para que se obtenha rendimentos com uma máxima eficiência econômica das culturas. Devido ao manejo de adubação para altas produtividades adotado nos sistemas, o P e o K apresentaram aumento dos respectivos teores no solo e, conseqüentemente, na classe de disponibilidade. Os valores médios de P disponível do solo encontrados nos sistemas avaliados até 0,10 m de profundidade se enquadram na classe de disponibilidade Muito alta e estão entre 3,3 e 4,6 vezes maiores (Tabela 6), do que o teor crítico para a cultura do arroz irrigado. Teores excessivos de P podem se tornar um problema em relação ao meio ambiente, mais especificamente quanto à qualidade das águas, onde o exagerado enriquecimento de P pode acabar levando ao fenômeno da eutrofização (KLEIN; AGNE, 2012).

Comparativamente, para a cultura da soja e de pastagens cultivadas, os teores de P foram considerados adequados (dentro da faixa de classe Alta) à produção agrícola (CQFS-RS/SC, 2016). Os menores teores de P na camada de 0,05 a 0,10 m em todos os sistemas avaliados (Tabela 6) indicam a possibilidade de serem decorrentes da reduzida mobilidade do elemento no solo (SOUZA & VOLKWEISS, 1987), embora, segundo Rajj (1991), em solos preponderantemente arenosos, essa mobilidade possa ser mais facilitada. Este fato ainda considera que o fluxo difusivo do P no solo é dependente da dose de fertilizante aplicada e, principalmente, da umidade do solo (COSTA et al., 2006). Tal afirmação ajuda a elucidar os valores da concentração de P solúvel encontrada ($1,13 \text{ mg L}^{-1}$) na camada de 0,05 a 0,10 m no sistema ILP Arroz-Soja/Azevém (Tabela 8 e Figura 10), justamente o qual recebeu as maiores doses de P entre os quatro sistemas estudados (Tabela 3). A relação entre o P

disponível do solo e a concentração de P na solução (Figura 10) revela ainda, respostas com maior linearidade em sistemas sem pecuária, como o Arroz/Pousio e o Arroz/Trevo.

No que diz respeito às doses de fertilizante fosfatado aplicadas aos sistemas durante a execução do experimento e sua relação com o P disponível do solo, verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,6102, além de significativo para o valor de p na camada de 0,05 a 0,10 m (Figura 8B). Esse resultado reforça a citação de Costa et al. (2006), do parágrafo anterior, no que se refere às características de mobilidade do P por difusão e sua dependência das doses de fertilizante aplicadas. Quanto à camada de 0,00 a 0,05 m do solo (Figura 8A), não houve correlação entre as doses de fertilizante aplicadas e o P disponível do solo. Neste caso, se observa que ocorreu um acúmulo e uma alta disponibilidade de P superficialmente (RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2001), cujo comportamento é consequência da consecutiva adição de fertilizante nessa camada, aliado à ausência de revolvimento (RHEINHEIMER et al., 2000), característica própria do PD. Sousa & Lobato (2002) reiteram que em sistemas de PD, pode haver acúmulo de P na camada superficial em razão da aplicação anual de fertilizantes fosfatados, pela decomposição dos resíduos vegetais em superfície e também por causa do menor contato e intensidade de fixação do P com os constituintes inorgânicos do solo, como óxidos, oxi-hidróxidos e hidróxidos de Fe e Al. Isso, também ajuda a explicar essa interação das doses de P aplicadas com o P disponível apenas na camada 0,05-0,10 m.

Os teores de K disponível do solo determinados na camada até 0,10 m de profundidade denotaram uma alteração da classe de disponibilidade entre o período prévio à instalação do protocolo experimental (Tabela 4) e após 3,5 anos, mudando de Média para Alta (CQFS-RS/SC, 2016). Não houve diferença dos teores de K entre os sistemas de manejo, apenas entre as camadas, com exceção do sistema Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo. A homogeneidade maior nesse sistema pode ter influência da presença do animal, que está relacionado à ciclagem de nutrientes (MARTINS et al., 2014), visto que a grande maioria da fração ingerida no consumo do material vegetal retorna ao solo pelas excretas (VENDRAMINI et al., 2014), de forma prontamente disponível, aumentando a variabilidade espacial do nutriente no solo.

Em relação às doses de fertilizante potássico aplicadas aos sistemas durante a execução do experimento e sua relação com o K disponível do solo, verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,5412, além de significativo para o valor de p na camada de 0,05 a 0,10 m (Figura 9B). Avaliando a distribuição dos teores de K no perfil do solo sob sistema de PD, Costa et al. (2009) também encontraram diferenças entre as camadas de 0,00 a 0,05 m e de 0,05 a 0,10 m, onde os maiores teores foram referentes à camada de 0,00 a 0,05 m, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho. A mobilidade do K em sistemas de PD é menor em relação a sistemas com revolvimento de solo, em função de que ela diminui com o aumento de cargas negativas (ERNANI et al., 2007b). Na camada de 0,00 a 0,05 m (Figura 9A), não houve correlação entre as doses de fertilizante aplicadas e o K disponível do solo. Nesse caso, a baixa CTC do solo (Tabela 5) traduzida em menor quantidade de sítios de adsorção de cátions, é um fator a ser levado em consideração, pois as perdas de K por escoamento superficial (BERTOL et al., 2011) ou, ainda, por lixiviação ou fixação nas entrecamadas de minerais do solo (MEENA et al., 2016), podem ter induzido este resultado. Além disso, os dados entre o K disponível no solo e o K da solução do solo (Figura 11), onde em nenhum sistema o teor de K disponível explica o K da solução, reforça esta probabilidade.

Por fim, relativo às mudanças nas classes de disponibilidade de P e K discutidas nos parágrafos acima, em relação aos dados de coleta prévios à implantação do experimento (Tabela 4), fica evidenciado que o manejo da adubação para P e K no experimento foi adequado. É importante destacar a capacidade de sistemas de PD em construir a fertilidade do solo através da adubação. Segundo Carmona et al. (2018), é desta forma que são desenvolvidas as condições adequadas para que seja suportada a diversificação do sistema produtivo.

Um resultado que chama à atenção refere-se à acidez do solo. Avaliando os valores de pH do solo encontrados em quaisquer dos sistemas estudados (Tabela 5), pode-se verificar que os mesmos são muito baixos e se encontram abaixo do valor de tomada de decisão ($\text{pH} < 5,5$) para manejo de solo sob PD (0,00 a 0,10 m), tanto para as culturas de grãos como para forrageiras de cultivo anual, cujo o pH de referência é 6,0 (CQFS-RS/SC, 2016). Isso demonstra a necessidade da realização de calagem do solo nestas áreas, o que, segundo

Raij (2011), certamente contribuiria positivamente para a neutralização do alumínio tóxico, forneceria Ca e Mg, propiciaria maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas e melhoraria a eficiência do uso dos nutrientes e da água contidos no solo. Fato que também reforça a necessidade de calagem são os teores de Ca e Mg (Tabela 5). O Ca manteve a classe de disponibilidade Baixa em todos os quatro sistemas. O Mg mudou de classe de disponibilidade (de Média para Baixa) no sistema Arroz/Pousio e Arroz/trevo, mantendo a classe de disponibilidade Média nos demais sistemas, em relação ao período do início do experimento. Segundo Freire et al. (2001), tal fato pode ter relação com a exportação destes elementos via grãos das culturas. Ainda, pode refletir o efeito da introdução de ILP nos sistemas ILP Arroz-Soja/Azevém e Pecuária Campo nativo/Azevém+trevo, tendo o animal como agente catalisador do processo de ciclagem dos nutrientes (ANGHINONI et al., 2013). Ressalta-se que a realização de calagem em superfície no sistema PD pode promover a manutenção de agregados do solo, evitando a exposição da MO (CAIRES et al., 2006), agente fundamental na determinação da carga líquida negativa dos solos e na elevação da CTC.

Os atributos físicos do solo, como a Ds, a Ma e a Mi (Tabela 9), não apresentaram diferenças entre os sistemas avaliados. Esperava-se que, com o aporte de maiores quantidades de resíduos vegetais em sistemas que adotaram a cobertura de solo em período hibernal e, conseqüentemente, o aumento de MO no solo ao longo do tempo, tais sistemas pudessem ter respondido de forma diferente, reduzindo a Ds e aumentando o volume do espaço aéreo do solo. Lal (2004) e Ferreira et al. (2012) afirmam que práticas conservacionistas como o PD e a ILP são as práticas que mais contribuem com o aporte de MO ao solo. Entretanto, Silva et al. (2020) destacam que, nos primeiros anos (curto prazo) nas áreas sob PD, a densidade do solo pode aumentar devido à reorganização das partículas do solo e que, após consolidado o sistema (longo prazo), há uma redução da densidade, principalmente em razão de maiores quantidades de carbono orgânico aportado com o passar dos anos.

Ainda, a variabilidade dos valores de densidade apresentados no primeiro parágrafo do item 6.3, se encontra dentro da faixa limite para solos de textura arenosa que é de $1,78 \text{ Mg m}^{-3}$, segundo Bruand et al. (2005). Para solos com essa textura, os autores Huang & Hartemink (2020), citam que o aumento da Ds

até um certo limite (desde que não restritivo), pode ser benéfico quando se compara a solos de textura argilosa, pois isso favorece a retenção de água, melhorando a disponibilidade desta às plantas e beneficiando as culturas de sequeiro em terras baixas.

Com relação à Ma, a mesma apresentou valores médios (Tabela 9), abaixo do limite inferior da porosidade de aeração ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), em que a difusão de oxigênio se torna limitante ao desenvolvimento das raízes (GODOY et al., 2015). As diferenças encontradas na Ds e Ma do solo entre as camadas do sistema Arroz/trevo (Tabela 9), podem ter sido influenciadas pelo trevo persa, que ainda se encontrava em estágio vegetativo no momento da coleta do solo. Investigações sobre os teores de MO ou COT do solo, podem auxiliar de forma mais exata as discussões das análises químicas e das análises físicas do solo, utilizando o resultado de correlações e regressões entre os dados. Tais variáveis devem ser consideradas em estudos futuros.

O aumento da Mi do solo resultou redução da produtividade de grãos do arroz irrigado (Figura 13B). Possivelmente, como não há revolvimento do solo pela adoção do PD, a acomodação natural das partículas aumentou o estado de compactação do solo, reduzindo o tamanho dos poros (GODOY et al., 2015). A correlação negativa entre a microporosidade e a produtividade também foi observada por Beutler et al. (2004), uma vez que com o aumento da Mi há a diminuição do alongamento radicular, pelo fato de que as raízes do arroz não conseguem reduzir seu diâmetro para penetrar nos microporos, menores que suas extremidades (MEDEIROS et al., 2005).

Diferentemente da Mi, o aumento da Ds do solo teve efeito positivo sobre a produtividade do arroz irrigado (Figura 13A). Este resultado não era esperado, uma vez que em solos compactados o desenvolvimento das plantas (e conseqüentemente a produtividade) deveria ser menor, principalmente devido ao impedimento mecânico do solo e ao crescimento das raízes, que resulta em menor volume de solo explorado (BEUTLER et al., 2004). Possivelmente a inundação do solo, prática fundamental na cultura do arroz irrigado, está ligada a esse resultado. Para estudos futuros, propõe-se o aprofundamento das investigações quanto às respostas positivas de produtividade do arroz em relação ao aumento da densidade do solo, em áreas de terras baixas.

8. CONCLUSÕES

Independentemente dos sistemas avaliados, a disponibilidade de P e K do solo aumentou em seus respectivos teores, devido às adubações realizadas com fertilizantes minerais. Em decorrência deste aumento, a classe de disponibilidade destes nutrientes no solo foi modificada, se enquadrando entre Muito alta e Alta, respectivamente. Além disso, houve relação polinomial de segunda ordem entre as doses de fertilizantes minerais aplicadas nos sistemas e a fração disponível do solo, somente na camada subsuperficial.

As maiores concentrações de P na solução do solo foram referentes ao sistema que recebeu as maiores doses de fertilizante fosfatado. O P da solução do solo apresentou correlação com o P disponível do solo apenas nos sistemas sem pecuária. Os resultados de COD, pH e CE da solução do solo não apresentaram mudanças em função dos sistemas.

A cobertura de solo durante o inverno e a introdução da pecuária sob PD não foram eficazes em promover mudanças na densidade do solo, na macroporosidade e na microporosidade do solo, possivelmente em função do reduzido período transcorrido desde a implantação do experimento (quatro anos).

O resultado da produtividade de grãos do arroz irrigado não foi diferente entre os sistemas. Além disso, apresentou correlação positiva com a densidade do solo e, correlação negativa com a microporosidade do solo, entretanto, a época da coleta de solo pode ter influenciado a correlação destes dados, o que futuramente pode ser avaliado em outros estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I. *et al.* Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n. 2, p. 325–380, 2013.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. *et al.*(Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7-18.

BEUTLER A. N. *et al.* Soil tillage, rice straw and flooded irrigated rice yield. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n.3, p. 1153-1162, 2014.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.365-371, 2004.

BERTOL, O. J. *et al.* Perda de nutrientes via escoamento superficial no sistema plantio direto sob adubação mineral e orgânica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1914–1920, 2011.

BOENI, M. *et al.* **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA/ Estação Experimental. Seção de Agronomia, 2010. p. 1–23.

BONETTI, J. DE A. *et al.* Impacto f long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of na Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p.280-291, 2019.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHILINDWEIN, J.A. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Sul do Brasil estimada por métodos multielementares. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1753-1761, 2010.

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.

BRUAND, A.; HARTMANN, C.; LESTURGEZ, G. Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. *In*: MANAGEMENT of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. Thailand: Kohan Kaen, 2005.

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

CARMONA, F. D. C. *et al.* **Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas**. Porto Alegre: Edição dos autores, 2018. 160 p. (Boletim Técnico).

CARVALHO FILHO, A.; AMABILE, R.F. Biologia da soja. *In*: MORAES, A.A.C.; SILVA, A.L. da. **Soja: suas aplicações**. Rio de Janeiro: MEDSI, 1996. p.259.

CASSOL, G. V. *et al.* Raised seedbeds and irrigation increase the yield of soybean rotated with rice in lowland of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 55, e01398, 2020.

CELI, L.; BARBERIS, E. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. *In*: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Eds.) **Organic Phosphorus in the Environment**. Wallingford: CAB International, 2005. p. 113-132.

CERETTA, C. A.; AITA, C. **Manejo e conservação do solo**. Santa Maria-RS: UFSM, 2008.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de Informações Agrícolas**. [2022]. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>>. Acesso em: 21 jul. 2022.

CONCENÇÃO, G. *et al.* **Manejo da Soja em Terras Baixas para Alta Produtividade**. Pelotas: EMBRAPA, 2020. p. 1–9. (Circular Técnica 207)

COSTA, J. P. V *et al.* Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, n. 82, p. 828–835, 2006.

COSTA, S. E. V. G. DE A. *et al.* Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1291–1301, 2009.

CQFS RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. *In*: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L., (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para a pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 71-92.

DANTAS, B. F.; ARAGÃO, C. A.; ALVES, J. D. Cálcio e o desenvolvimento de aerênquimas e atividade de celulase em plântulas de milho submetidas a hipoxia. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 251–257, 2001.

DENARDIN, L. G. O. et al. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, n. October 2018, p. 64–69, 2019.

DODD, R.J.; SHARPLEY, A.N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. **Resources, Conservation and Recycling**, Fayetteville v. 105, p. 282-293, 2015.

ELKHATIB, E.A.; HERN, J.L.; STALEY, T.E. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 51, p. 578-582, 1987.

EMBRAPA. **Dados Econômicos - Portal Embrapa_Soja em números (safra 2021/22)**. [S.l.], Embrapa Soja, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 28 dez. 2022.

ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANTOS, F.C. Potássio. *In*: NOVAIS, R.F. et al. (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS/UFV, 2007a. p. 551-594.

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

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. Classificação e atributos físicos e químicos doas solos de várzea. *In*: FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. (ed.). **Manejo da fertilidade do solo para arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. cap. 1, p. 13-34.

FERNANDES, D. M. et al. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 14–27, 2015.

FERREIRA, A.O. et al. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1583-1590, 2012.

FIORIN, T.T. et al. Profundidade do lençol freático em solos de várzea cultivado com milho em camalhões. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO; 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais do...** Ribeirão Preto: Universidade Estadual Paulista; 2003.

- 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.
- FREIRE, F. M. *et al.* Manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, p. 49–62, 2001.
- GATIBONI, L. C. *et al.* Spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by ³¹P-NMR after nine years of organic or mineral fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 640-648, 2013.
- GODOY, S. G. DE *et al.* Correlação entre produtividade do arroz no sistema semeadura direta e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 119–125, 2015.
- GOMES, A. S. *et al.* Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 31 p. (Documentos, v. 169, ISSN 1806-9193)
- GUBIANI, P. I. *et al.* Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, p. 1–14, 2018.
- HUANG, J.; HARTEMINK, A.E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, Netherlands, v. 208, n. 1, p. 1-22, 2020.
- IRGA. **Intenção de semeadura - Safra 2022 / 2023**: Intenção de semeadura para arroz e soja, [Cachoeirinha], 2022. 2p.
- IRGA. **Boletim de resultados da lavoura de arroz: safra 2017/2018**. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201807/30100758-boletim-final-da-safra-201-18-final.pdf>>. Acesso em: 14 de novembro de 2021.
- KING, C.A. *et al.* A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N₂ fixation to drought in soybean. **Crop Science**, Madison, v.54, p.746-756, 2014.
- KIRKBY, C.A. *et al.* Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, n. 3, p. 197-208, 2011.
- KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 8, n. 8, p. 1713–1721, 2012.
- KNAAK, N.; MIRANDA, F.F. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. *In*: 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. 205 p.

KRUSE, J.; *et al.* Innovative methods in soil phosphorus research: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 178, n. 1, p. 43-88, 2015.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global. **Science**, Whashington, v.304, p.1623, 2004.

LANZA, L.N.M.; ROSSI, S.C.; SODEK, L. Adubação nitrogenada beneficia soja alagada. **Bragantia**, Campinas, v.72, p.2-9, 2013.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York, N.Y.: John Wiley and Sons, 1979.

MALAVOLTA, E.; VITTI, C.G.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARCHESAN, E. *et al.* Manejo do solo em ambientes de terras baixas: a experiência da região sul. *In*: MANEJO e conservação do solo e da água. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 729-767.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 649p.

MARTINS, A. P. *et al.* Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop–livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18-28, 2014.

MARTINS, A. P. **Acidez e formas de alumínio do solo em sistema integrado de produção de soja e bovinos de corte em semeadura direta no subtropical brasileiro**. 2016. 169 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. O.; GOMES, M.V.; Relação da água com a fertilidade do solo. *In*: BONETTI, J. A.; FINK, J. R. **Manejo e conservação da água e do solo**. Lavras, MG: UFLA, 2020. cap. 2, p. 24-37.

MATOS, E.D.S. *et al.* Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 9, p. 1221-1230, 2008.

MATZENBACHER F. O. *et al.* Rapid diagnosis of resistance to imidazolinone herbicides in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) and control of resistant biotypes with alternative herbicides. **Planta Daninha**, Londrina, v. 31, n.3, p. 645-656, 2013.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, p.940-947, 2005.

MEENA, V. S. *et al.* **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. [India]: Springer, 2016.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. Potassium. *In*: PRINCIPLES of Plant Nutrition 5. ed. [S.l.]: Springer Science + Business Media Dordrecht, 2001.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. *In*: MEURER, E.J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evandraf, 2017, cap. 4, p. 85-109.

MIELNICZUK, J. **O potássio no solo**. 4.ed. Piracicaba: Instituto do Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 80 p. (Boletim Técnico, n. 2).

MOORE, T.R. The spectrophotometric determination of dissolved organic carbon in peat waters. **Soil Science Society American Journal**, Madison, p.1590-1592, 1985.

MORAES, A. *et al.* Integrated croplivestock systems in the subtropics. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 2007, Curitiba. **Proceedings of the...** Curitiba, 2007.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. **Soja**: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2005.

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

NACHTIGALL, G.R.; RAIJ, B.V. Análise e interpretação do potássio no solo. *In*: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafós, 2005. p.93-113.

NESPER, M. *et al.* Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, Amsterdam, v. 257-258, p. 123-133, 2015.

NOLLA, A. **Critérios para a calagem no sistema plantio direto**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA NETO, A. A. **A cultura do arroz**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB, 2015.

PARFITT, R.L. *et al.* N and P in New Zealand soil chronosequences and relationships with foliar N and P. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 75, p. 305-328, 2005.

PEDROTTI, A. *et al.* Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.80, p.115-123, 2005.

PINTO, L. PAULETTO, E.; NETO, E. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. *In: ARROZ irrigado no Sul do Brasil*. Brasília: Embrapa, 2004.

PINTO *et al.* Solos de várzeas e terras baixas. *In: CULTIVO de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 23-44.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, [2021]. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: abr, 2021.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991.

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. 205 p.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.345-354, 2000.

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

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

RISKIN, S.H. *et al.* The fate of phosphorus fertilizer in Amazon soya bean fields. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 368, n. 1619, 2013.

ROSA, C.M. da *et al.* dos A. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1769-1776, 2011.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. *In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. B.; SALTON, J. C. (Ed.). Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.

SANTOS H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2018.

- SARTORI, G. M. S. *et al.* Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 12, p. 1139-1149, 2015.
- SCHÖFFEL, E. R. *et al.* Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 7–12, 2001.
- SCHMIDT, F. *et al.* Resíduos de azevém na superfície de um Planossolo alagado e seus efeitos na solução do solo e em plantas de arroz. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.7, p. 2080-2086, 2009.
- SCIVITTARO, W. B. *et al.* **Manejo da fertilidade do solo e adubação para a soja em terras baixas**. Brasília: EMBRAPA, 2021. (Circular Técnica, 220)
- SHEN, J. *et al.* Phosphorus dynamics: From soil to plant. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 156, p. 997-1005, 2011.
- SILVA V.R. *et al.* Soil physical attributes in long-term soil management systems (Tillage and No-till). **Journal of Agricultural Science**. Toronto, v.12, n.4, p. 194-217, 2020.
- SIX, J. *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n.1, p. 7-31, 2004.
- SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O; VAHL, L.C. Solos alagados (Reações de redox). *In*: MEURER, E.J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. p. 177-200.
- SOUSA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Relações do superfosfato triplo em grânulos com solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.1, p. 133-140, 1987.
- SPARKS, D.L. Bioavailability of soil potassium. *In*: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 38-53.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, Inc, 2008. 342p.
- STEFFENS, D. *et al.* Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil- testing methods. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 173, n. 5, p. 765-771, 2010.
- TAVARES L.C. *et al.* Desempenho de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.8, p.1357-1363, 2013
- TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995.
- TEIXEIRA, P.C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TIECHER, T. et al. Cover crops affecting soil phosphorus dynamics in brazilian highly weathered soils. *In*: REUTER, J. (ed.). **Cover crops cultivation, management and benefits**. New York: Nova Science, 2015. p. 23-52.

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

TIECHER, T.; TIECHER, T. L. Contaminação da água e do solo por resíduos utilizados na agricultura. *In*: BONETTI, J. A.; FINK, J. R. **Manejo e conservação da água e do solo**. Lavras, MG: UFLA, 2020. cap. 7, p. 104-119.

VAHL, L.C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VENDRAMINI, J.M.B.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 2, p. 308–315, 2014.

VILLA, M.R.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.649-658, 2004.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 1-19, 1976.

WUEBKER EF, MULLEN RE, KOEHLER K. Flooding and temperature effects on soybean germination. **Crop Science**, Madison, v.41, p.1857-1861, 2001.