

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação**  
**Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel**  
**Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água**



Tese

**Efeito dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre as frações de  
fósforo e potássio em Planossolo**

**Juliano Brum de Quevedo**

Pelotas, 2024

**Juliano Brum de Quevedo**

**Efeito dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre as frações de  
fósforo e potássio em Planossolo**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Professor Dr. Filipe Selau Carlos

Coorientador: Professor Dr. Rogério Oliveira de Souza

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de  
Bibliotecas Catalogação da Publicação

Q3e Quevedo, Juliano Brum de

Efeito dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre as frações de fósforo e potássio em Planossolos [recurso eletrônico] / Juliano Brum de Quevedo ; Filipe Selau Carlos, orientador ; Rogério Oliveira de Souza, coorientador. — Pelotas, 2024.

103 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Sistemas integrados de produção agropecuária. 2. Arroz irrigado.
3. Fertilidade do solo. I. Carlos, Filipe Selau, orient. II. Souza, Rogério Oliveira de, coorient. III. Título.

Elaborada por Ubirajara Buddin Cruz CRB: 10/901  
Juliano Brum de Quevedo

**Efeito dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre as frações de  
fósforo e potássio em Planossolo**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências, pelo Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 27 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Filipe Selau Carlos (Orientador), Doutor em Ciências do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Walkyria Bueno Scivittaro, Doutora em Ciências Energia Nuclear na Agricultura pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura.

Prof. Dr. Fábio Joel Kochem Mallmann, Doutor em Ciências do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria.

Prof.Dr. Sidnei Denner, Doutor em Fisiologia Vegetal na Universidade Federal de Lavras

## **Agradecimentos**

Aos meus familiares, em especial meu afilhado, Rafael Quevedo, pela colaboração, apoio e incentivo.

Ao orientador Filipe Selau Carlos pela orientação e confiança depositada em mim durante o andamento das atividades científicas.

Ao PPG Manejo e Conservação do Solo e da Água, por todo suporte, em geral aos professores que contribuíram na minha formação intelectual e aos funcionários, especialmente a Rosi Trecha, que me auxiliou nos laboratórios.

Aos colegas da pós-graduação, em especial Milena Moreira, Cristiano Weinert e Celso Elias. Aos bolsistas de iniciação científica e estagiários do Fert-Soil, Lucas Vasco, Vanessa Neuyahr, Veronica Lemos, Pablo Abelaira, Tais Costa, Julia Peralta e Andrew Santos pela colaboração, empenho e dedicação.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz que propiciou minha formação, aos colegas Marcelo Ely, Pablo Badinelli e Júlio Trindade pela amizade e colaboração.

À Aliança SIPA, IRGA, UFRGS, SIA, INTEGRAR, à Fazenda Corticeiras pela concepção intelectual, condução e avaliações do trabalho ao longo do período de condução do protocolo experimental.

## Resumo

QUEVEDO, Juliano B. **Efeito dos sistemas integrados de produção agropecuária sobre as frações de fósforo e potássio em Planossolo**. Orientador: Filipe Selau Carlos. 2024.103f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

O presente estudo foi desenvolvido com o intuito de avaliar a influência de diferentes arranjos de sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas sobre os teores das frações de P (solúvel, disponível, orgânico, inorgânico, HCl e total) e K (disponível, trocável, não-trocável) do solo. As avaliações foram realizadas após o término do segundo ciclo em um protocolo de pesquisa de longa duração. O período de cada ciclo foi de quatro anos (2014-2017 e 2018-2022). O protocolo de pesquisa avaliou cinco sistemas produtivos com diferentes arranjos, os quais variaram em relação à diversidade de cultivos, frequência temporal da cultura de arroz irrigado e tempo de pastejo dos animais. O (S1): cultivo de arroz – pousio sem pastejo animal (entressafra) - arroz; S2: arroz – azevém (com pastejo moderado) – arroz; S3: arroz – azevém (com pastejo moderado) – soja– azevém (com pastejo moderado) (com pastejo moderado) – arroz; S4: rotação entre arroz, soja, milho e capim sudão no verão e pastagem de azevém e trevo-branco no ano de 2013 ou azevém e trevo-persa nos anos de 2014 até 2018 no período hiberna( com pastejo moderado); S5: azevém + trevo branco + cornichão – campo de sucessão (três anos) (com pastejo moderado) – arroz. Para as avaliações dos teores de K e P no solo, foram coletadas amostras nas seguintes profundidades: 0-2,5 cm, 2,5-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e de 20-40cm. Em relação aos estoques de fósforo, na camada de 0-20cm, os sistemas com a presença dos animais (S2, S3, S4 e S5) aumentaram em média 241% fósforo disponível, 19% o P-orgânico e 35% o P-total. Essas respostas estão vinculadas à mínima mobilização do solo, presença dos animais por um maior período, pelos benefícios das pastagens e do pastejo, além do balanço positivo de k e P, devido as adubações realizadas para correção desses nutrientes, para acima dos níveis críticos. As análises de potássio indicaram que a adoção dos sistemas com SIPA contribuíram para o aumento de frações de potássio disponível e trocável, sendo que o sistema 5, o que apresentou os maiores teores em todas as profundidades analisadas para essas frações. Os maiores teores para ambos os nutrientes foram encontrados nos solos submetidos à maior diversidade de atividades integradas (S4 e S5), sendo possível inferir que os SIPAs influenciaram no aumento dos teores e disponibilidade destes no solo, além do aumento do estoque de P, tendo em vista, que os resultados das análises de P e K, indicaram que o sistema de monocultivo sem a presença dos animais, apresentou menores teores desses elementos em relação aos SIPAS.

**Palavras-chave:** Sistemas integrados de produção agropecuária. Arroz irrigado. Fertilidade do solo.

## Abstract

QUEVEDO, Juliano B. **Effect of integrated agricultural production systems on phosphorus and potassium fractions in Planosol**. Advisor: Filipe Selau Carlos. 2024. 103f. Thesis (Doctorate in Soil and Water Management and Conservation) – Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2022.

The present study was developed with the aim of evaluating the influence of different arrangements of integrated agricultural production systems in lowlands on the contents of P fractions (soluble, available, organic, inorganic, HCl and total) and K (available, exchangeable, non-exchangeable) from the ground. Assessments were carried out after the end of the second cycle in a long-term research protocol. The period of each cycle was four years (2014-2017 and 2018-2022). The research protocol evaluated five production systems with different arrangements, which varied in relation to crop diversity, temporal frequency of irrigated rice cultivation and animal grazing time. O (S1): rice cultivation – fallow without animal grazing (off-season) - rice; S2: rice – ryegrass (with moderate grazing) – rice; S3: rice – ryegrass (with moderate grazing) – soybean – ryegrass (with moderate grazing) (with moderate grazing) – rice; S4: rotation between rice, soybeans, corn and sudan grass in the summer and ryegrass and white clover pasture in 2013 or ryegrass and Persian clover in the years 2014 to 2018 in the winter period; (with moderate grazing) S5: ryegrass + white clover + cornichão – succession field (three years) (with moderate grazing) – rice. To assess K and P content in the soil, samples were collected at the following depths: 0-2.5 cm, 2.5-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm and 20-40 cm. In relation to phosphorus stocks, in the 0-20cm layer, systems with the presence of animals (S2, S3, S4 and S5) increased an average of 241% available phosphorus, 19% organic P and 35% organic P. total. These responses are linked to minimal soil mobilization, presence of animals for a longer period, for the benefits of pastures and grazing, in addition to the positive balance of k and P, due to the fertilization carried out to correct these nutrients, above critical levels. Potassium analyzes indicated that the adoption of systems with SIPA contributed to the increase in available and exchangeable potassium fractions, with system 5, which presented the highest levels at all depths analyzed for these fractions. The highest levels for both nutrients were found in soils subjected to the greatest diversity of integrated activities (S4 and S5), making it possible to infer that SIPAs influenced the increase in levels and availability of these in the soil, in addition to the increase in P stock, having in view, that the results of the P and K analyzes indicated that the monoculture system without the presence of animals, presented lower levels of these elements in relation to SIPAS.

**Key words:** Integrated agricultural production systems. Irrigated rice. Soil fertility.



## Lista de figuras

Figura 1- Localização do município de Cristal, estado do Rio Grande do Sul, Brasil e da área experimental.....	44
Figura 2- Potássio disponível extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), $p < 0,05$ .....	51
Figura 3- Potássio potencialmente disponível (trocável) extraído por acetato de amônio em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas na Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), $p < 0,05$ .....	52
Figura 4 - Potássio não trocável extraído por tetrafenilborato de sodio em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), $p < 0,05$ .....	53
Figura 5 - Fósforo extraído por $\text{CaCl}_2$ 0,01 mol L <sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), * $p < 0,05$ = significância entre as médias .....	64
Figura 6 - Fósforo disponível extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), * = $p < 0,05$ significância entre as médias .....	65
Figura 7- Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), $p < 0,05$ * = significância entre as médias .....	66
Figura 8- Fósforo orgânico (digestão ácida em autoclave) em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), * = $p < 0,05$ (significância entre as médias).....	67
Figura 9- Fósforo extraído por HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal - RS. Least significant difference (LSD), * = $p < 0,05$ (significância entre as médias)...	68

Figura 10- Fósforo total em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS Least significant difference (LSD), * = $p < 0,05$ (significância entre as médias).....	69
Figura 11- Estoque de fósforo extraído por $\text{CaCl}_2$ em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si.....	71
Figura 12 - Estoque de fósforo extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si.....	72
Figura 13 - Estoque de fósforo inorgânico em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. ....	73
Figura 14 - Estoque de fósforo orgânico em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. ....	74
Figura 15 - Estoque de fósforo extraído por HCl em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. ....	75
Figura 16 - Estoque de fósforo total em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si.....	76
Figura 17- Estoque de fósforo lábil, moderadamente lábil e pouco lábil em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-40 cm. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. ....	77
Figura 18 - Correlação de Pearson entre os estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz média no período de 8 anos. cl20: estoque de P extraído com $\text{CaCl}_2$ , 0-20cm e Cl40, 20-40cm. me20: estoque de P	

extraído com mehlich-1, 0-20cm e me40, 20-40cm. ino20: estoque de P inorgânico, 0-20cm e ino40, 20-40cm. org20: estoque de P orgânico, 0-20cm e org40, 20-40cm. hcl20: estoque de P extraído com HCl, 0-20cm e hcl40, 20-40cm. to20: estoque de P total, 0-20cm e to40, 20-40cm. Yield: produtividade média de arroz irrigado nos 8 anos de condução do experimento. ....78

Figura 19- Análises de componentes principais dos estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz média no período de 8 anos: estoque de P extraído com  $\text{CaCl}_2$ , 0-20cm e Cl40, 20-40cm. me20: estoque de P extraído com mehlich-1, 0-20cm e me40, 20-40cm. ino20: estoque de P inorgânico, 0-20cm e ino40, 20-40cm. org20: estoque de P orgânico, 0-20cm e org40, 20-40cm. hcl20: estoque de P extraído com HCl, 0-20cm e hcl40, 20-40cm. to20: estoque de P total, 0-20cm e to40, 20-40cm. Yield: produtividade média de arroz irrigado nos 8 anos de condução do experimento. ....79

## Lista de tabelas

Tabela 1- Atributos químicos em diferentes camadas do solo antes do período experimental (março de 2013).....	45
Tabela 2- Descrição e distribuição espaço-temporal dos sistemas de produção envolvendo a lavoura de arroz irrigado em terras baixas. Fazenda Corticeiras – Cristal/RS .....	47
Tabela 3- Quantidades por hectare de K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> adicionadas via fertilização nos sistemas produtivos de arroz avaliados durante o ciclo experimental completo (fase 1 + fase 2) .....	49
Tabela 4 - Balanço de potássio em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas via adubação e exportação via produção de grãos e de carne, fazenda Corticeiras Cristal-RS durante todo período experimental.....	57
Tabela 5 - Balanço de fósforo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas via adubação e exportação via produção de grãos e de carne, fazenda Corticeiras Cristal-RS .....	69

## Lista de Abreviaturas e Siglas

BMS	Biomassa Microbiana do Solo
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
IRRI	International Rice Research Institute
K	Potássio
MO	Matéria Orgânica
NAOH	Hidróxido de Sódio
NH <sub>4</sub> CL	Cloreto de Amônio
NH <sub>4</sub> F	Fluoreto de Amônio
P	Fósforo
P- SOLUÇÃO	Fósforo em Solução
PD	Plantio Direto
Pi	Fósforo Inorgânico
Po	Fósforo Orgânico
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SIPAs	Sistemas Integrados de Produção Agropecuária
SOSBAI	Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>19</b>
<b>2. Revisão de literatura .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Arroz: produção mundial e brasileira.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Produção e principal sistema de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Produção de arroz em solos de terras baixas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Caracterização dos solos de terras baixas.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1 Classificação e atributos químicos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5 Principais alterações eletroquímicas em solos alagados e comportamento de alguns nutrientes.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1 Potássio .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.2 Fósforo .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6 Fracionamentos de Fósforo e Potássio no solo .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7 Dinâmica do potássio e fósforo em sistemas integrados de produção agropecuária .....</b>	<b>34</b>
<b>3 Hipóteses .....</b>	<b>40</b>
<b>4 Influência de sistemas integrados lavoura-pecuária sobre as formas de K no solo.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Introdução .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 Materiais e métodos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.1 Histórico das áreas experimentais.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2 Descrição dos sistemas de produção.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.3 Amostragem do solo .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.4 Frações do K.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.5 Análise estatística.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Resultados e discussão .....</b>	<b>50</b>

4.3.1 Balanço de K.....	56
4.4 Conclusão.....	58
<b>5 Efeito de diferentes sistemas integrados lavoura-pecuária sobre as formas de fósforo em planossolo no sul do brasil.....</b>	<b>59</b>
5.1 Introdução .....	59
5.2 Material e métodos.....	62
5.2.1 Determinação das frações do P.....	62
5.2.2 Balanço de P .....	62
5.2.3 Estoque de fósforo de acordo com a labilidade .....	62
5.2.4 Análise estatística.....	63
5.3 Resultados e discussão .....	63
5.3.1 Balanço de P .....	69
5.3.2 Estoque de Fósforo .....	70
5.3.3 Correlação de Pearson e análise de componentes principais (PCA) .....	77
5.4 Conclusão.....	86
<b>6 Considerações finais .....</b>	<b>88</b>
<b>Referências .....</b>	<b>89</b>

## 1. Introdução

O arroz (*Oryza Sativa*) é considerada um dos cereais mais cultivados e consumidos do mundo. Destaca-se nutricionalmente em meio a outros, por ser um dos complementos básicos da alimentação humana, representando cerca de 20% e 15% da ingestão de energia e proteína da população mundial, respectivamente (OLIVEIRA, 2021).

Com base nos dados do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE (2021), esse cultivo mundial ocupa cerca de 161 milhões de hectares, em que o Brasil responde por 65-70% de todas as áreas de cultivo de arroz na América do Sul (FAO, 2019). A produção nacional de arroz é evidenciada, principalmente nas regiões Sul, Centro-Oeste e Nordeste do país que, em conjunto com as demais regiões, na safra de 2021/2022, produziram 12 milhões de toneladas do cereal, conferindo ao Brasil o título de maior produtor de arroz do MERCOSUL e ao estado do Rio Grande do Sul destaque como o principal produtor do país (IRGA, 2022).

O estado gaúcho, juntamente ao estado de Santa Catarina, são responsáveis por aproximadamente 82% da produção nacional. O cultivo de arroz no RS ocorre, majoritariamente, em ambiente de terras baixas irrigadas, localizadas no bioma Pampa, e apresenta produtividades superiores em relação ao arroz de sequeiro (CARMONA et al., 2018). As terras baixas do bioma Pampa caracterizam-se por extensas planícies, com altitudes inferiores a 50 m e declividade de até 5% (EMYGDIO et al., 2017).

Segundo dados da Embrapa (2018), as terras baixas ocupam entre 20 e 22% do território do Rio Grande do Sul e são considerados solos característicos para a cultura do arroz, aqueles pertencentes às classes: Planossolos, Gleissolos, Neossolos (quartzarênicos), Plintossolos e Espodossolos. Contudo, nesse cultivo, a intensidade de revolvimento do solo e a adubação são práticas que precisam ser empregadas frequentemente, acarretando a redução acelerada da fertilidade química do solo (MARTINS et al., 2017; DENARDIN et al., 2019; CARLOS et al., 2020). Isto porque ocorre maior erosão dos solos e lixiviação de nutrientes, além do aumento da temperatura e oxigenação do solo, que estimula a degradação da matéria orgânica pela atividade microbiana, e essa condição acarreta a necessidade do aumento da



utilização de fertilizantes, elevando consideravelmente os custos de produção (MARTINS et al., 2017).

A exaustão dos recursos do solo ocasionada pelo monocultivo do arroz, o aumento do volume de produção e as importações ocasionaram a desvalorização do preço do grão no mercado durante a última década (VARELLA et al., 2015) e na elevação dos custos produtivos. Atualmente, esse cenário foi revertido, à medida que a produção foi recuperada, culminada a menor oferta de importantes países exportadores, houve a valorização do produto no mercado, fazendo com que seu preço permaneça em patamares elevados enquanto essa realidade for observada (MENDES, 2024).

Fato este que tem levado os agricultores a buscarem alternativas para impulsionar a produtividade com redução de custos. Uma alternativa para reversão deste quadro é a utilização de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) em terras baixas. Nesse sistema práticas como a rotação de culturas e o uso de pastagens para pastoreio de animais são empregados. Assim os SIPAS podem ser definidos como sistemas que possibilitam numa mesma área e de forma alternada, o cultivo de pastagens que serão utilizadas para alimentação animal e culturas destinadas à produção vegetal (sobretudo grãos), com vistas a explorar sinergismos e propriedades emergentes. Nesse contexto, surge a soja, que vem ganhando espaço nas áreas de terras baixas, que tradicionalmente cultivavam exclusivamente arroz irrigado. Isto porque, esta cultura ganhou expressividade devido a sua importância na prevenção de plantas daninhas do arroz, além da valorização no mercado devido ao seu potencial produtivo e comercial (EMBRAPA, 2020).

Ao estabelecer a rotação de culturas entre o arroz e a soja, deve-se considerar e manejar a condição inerente de baixa da fertilidade dos solos de terras baixas do Rio Grande do Sul. Contudo, estudos recentes demonstraram que os SIPAs desenvolvidos nesses ambientes apresentaram resultados positivos sobre os teores de nutrientes, especialmente fósforo (P) e potássio (K). Carmona et al. (2018), verificaram incremento nos teores de P e K disponível em solo de terra baixa que adota SIPAs. Flores et al. (2021), avaliando o K em SIPAs, observaram teores de K estrutural, não estrutural e total mais elevados nos sistemas de integração, entretanto há uma grande lacuna, pois são pouquíssimos os trabalhos dessa natureza que avaliam as frações de P e K em terras baixas.

A partir da verificação da redução da qualidade do solo que ocorre no sistema de cultivo convencional do arroz irrigado (monocultivo associado com intensa e frequente mobilização do solo e pousio na entressafra) e das melhorias que podem ocorrer sobre as características químicas do solo quando práticas conservacionistas são utilizadas, torna-se importante avaliar as frações dos nutrientes P e K no solo. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar a influência de diferentes arranjos SIPAs em terras baixas sobre os teores das frações de P (solúvel, disponível, orgânico, inorgânico, HCl e total) e K (disponível, trocável, não-trocável) do solo.

## **2. Revisão de literatura**

### **2.1 Arroz: produção mundial e brasileira**

O arroz, de acordo com o IRGA (2022), atualmente é classificado como segundo cereal mais cultivado e o alimento de maior relevância para mais da metade da população mundial, essa cultura demonstra a possibilidade de cultivo numa variedade de ecossistemas e sistemas de produção, com destaque para áreas de terras baixas. O Brasil é o 10º maior produtor de arroz mundial (0,0108 mi/ton), precedido dos seguintes países: China (0,149 mi/ton), Índia (0,13 mi/ton), Bangladesh (0,035 mi/ton), Indonésia (0,034 mi/ton), Vietnam (0,027 mi/ton), Tailândia (0,019 mi/ton), Myanmar (0,013 mi/ton) Filipinas (0,012 mi/ton) e Japão (0,007 mi/ton) (CONAB, 2023).

Segundo a CONAB (2023), na safra de 2022/2023 foram produzidas 10,015 mil toneladas de arroz, em uma área de 1,47 milhões de hectares. Desse montante produzido, 90% foram destinados ao mercado interno, e em torno de 1,3 milhão de toneladas foram exportadas para vários países. A maior parte dessa produção é proveniente do ecossistema de terras baixas, sendo responsável por 75% da produção nacional. O Rio Grande do Sul é o líder no ranking nacional, seguido pelos estados de Santa Catarina, Tocantins, Mato Grosso e Maranhão (BRAZILIAN RICE YEARBOOK, 2022). Conforme dados divulgados pela CONAB (2023), os estados do Brasil com os maiores níveis de contribuição na produção de arroz para com a produção nacional são: Rio Grande do Sul, 69,2%; Santa Catarina, contribuindo com 12,3%; Tocantins, com 5,3%; Mato Grosso com 2,7%; Maranhão somando 1,9%; e 8,6% outros Estados.

### **2.2 Produção e principal sistema de cultivo de arroz no Rio Grande do Sul**

No Rio Grande do Sul, os principais municípios produtores de arroz irrigado são: Uruguaiana (80.000 ha), Santa Vitória do Palmar (65.000 ha), Itaqui (63.000 ha) e Alegrete (53.000 ha) (IRGA, 2022b).

O sistema de cultivo de irrigação por inundação é considerado o principal método para cultura, que é empregado nas seguintes regiões: Fronteira Oeste, Central, Campanha, Litoral Sul, Planície Costeira Interna e Externa. Essas regiões

diferem entre si em virtude de vários fatores como: as condições climáticas, tipo de solo, recursos hídricos para irrigação, área disponível para exploração da agricultura, de maneira que, essas características registrem variações medias em relação a produtividade média e termos de produção (EMBRAPA, 2004). Segundo o IRGA (2023), a produção gaúcha do grão na safra de 2022/2023 foi de 7.3 milhões de toneladas e produtividade de 8,79 t/ha em área semeada de 839.972 hectares. Essa marca entrou para o ranking de segunda melhor safra produção de arroz do estado, ficando atrás somente da safra de 2020/2021 com produção média de 9,01 milhões de toneladas.

Quando se considera o cultivo irrigado, sua relevância é evidenciada pelo significativo volume da produção. Segundo a CONAB (2023), o sistema irrigado é o mais utilizado no Brasil com uma produção de 9,25 milhões de toneladas em 1,17 milhões de hectares, contra 763 mil toneladas do cereal cultivado em sequeiro na safra de 2022/2023. Obviamente, existem diversas particularidades intrínsecas ao sistema de produção de arroz irrigado, que serão relatadas nos próximos tópicos. Mas de maneira geral no contexto do RS, esse sistema de cultivo ganhou expressão a partir dos anos 1960, muito em decorrência do avanço nos quesitos de desenvolvimento tecnológico da mecanização, surgimento de novas técnicas, implementos e práticas agronômicas, possibilitando a estabilidade produtiva do arroz irrigado ao longo dos anos (MENDES, 2024).

### **2.3 Produção de arroz em solos de terras baixas**

Majoritariamente, o solo utilizado para o cultivo de arroz irrigado provém de de terras baixas, isto é, aqueles encontrados em planícies de rios e lagos (VEDELAGO et al., 2012). De maneira geral, esses solos apresentam predominantemente textura franco-arenosa, representada por baixos teores de matéria orgânica, P e K disponíveis (BOENI et al., 2010). Além de apresentar, como característica, reduzida taxa de infiltração de água, baixa macroporosidade e camadas adensadas próximas à superfície (DENARDIN et al., 2019), que favorecem a utilização de irrigação por inundação.

Nesse tipo de solo, o revolvimento do solo é frequentemente realizado tanto para prepará-lo para o cultivo mínimo no outono, quanto para o cultivo convencional que ocorrerá durante a primavera, podendo sofrer esse processo no sistema pré

germinado também. A realização desse manejo visa promover a uniformização superficial do solo para que a lâmina d'água seja estabelecida no momento da irrigação, além de incorporar os resíduos vegetais nas entre safras, realizando também, o aporte para o controle de plantas daninhas (DENARDIN, 2017).

Por outro lado, esse intenso revolvimento do solo, desencadeia uma série de fatores desfavoráveis ao solo e a produção vegetal como um todo, podendo destacar a menor agregação, redução dos estoques de carbono, alteração na atividade biológica, redução outros elementos importantes ao solo como na capacidade de troca de cátions (CTC), disponibilidade de nutriente e retenção de água (CARLOS, 2017). Essa alteração na homeostase do solo gera uma nova problemática como a redução da produtividade, causada pela diminuição da fertilidade do solo, afetando as propriedades químicas e físicas deste, acarretando prejuízos a sustentabilidade do sistema (DENARDIN et al., 2019, CARLOS et al., 2020).

Atualmente, mesmo com alta produtividade de grãos, com a média gaúcha alcançando 8,3 t ha<sup>-1</sup> (IRGA, 2022a), o monocultivo tradicional da lavoura de arroz, baseada na intensificação com especialização, vem demonstrando sinais de diminuição da fertilidade do solo, apresentando balanço negativo de nutrientes (SCHOENFELD et al., 2012). Essa redução da sustentabilidade não se refere somente às questões ambientais, mas também em relação a parte produtiva e econômica.

Segundo Cassman et al. (1995) e Flinn e De Datta (1984) verificaram maior degradação do solo em experimentos de longo prazo quando foi aplicado o revolvimento do solo em sistemas de cultivo de arroz irrigado. Os autores justificaram tais resultados devido à redução do pH, capacidade de troca de cátions (CTC) e uso menos eficiente dos nutrientes. De acordo com Dobermann et al. (2000), observaram que a degradação ocasionada pelo revolvimento do solo reduziu o rendimento do arroz ao longo do tempo, exigindo dos sistemas maior quantidade de fertilizantes para sustentar os altos rendimentos (BOENI et al., 2010).

O rendimento de um cultivar de arroz é em função do potencial genético e das condições do ambiente em que é cultivado, incluindo o fornecimento de minerais pelo solo, sendo necessário o uso de adubação quando o solo não tem capacidade de fornecer esses nutrientes. No entanto, no arroz irrigado, em que o solo fica alagado, a lâmina de água forma um ambiente com predomínio de microrganismos anaeróbicos, que alteram as propriedades do solo. As mudanças que se verifica no solo são

aumento do pH e da disponibilidade de fósforo e de ferro e a perda de nitrogênio por desnitrificação, com isso o K, tem sua dinâmica alterada (BRITZKE, 2010).

Além disso, uma parte considerável da lavoura orizícola com algum tipo de mobilização do solo todos os anos, com preparo do solo após a colheita do arroz (no outono) ou antes da semeadura do arroz (na primavera) (SOSBAI, 2016). Devido a desestruturação do solo ocasionada pela frequente mobilização, as características químicas e físicas são alteradas, além do alto custo envolvido com a aplicação de fertilizantes para atingir produções satisfatórias, surge a necessidade de mudanças significativas nos sistemas produtivos, entre elas tem-se o uso da rotação de culturas.

Dentro do contexto do Rio Grande do Sul, a rotação de cultura entre soja e arroz irrigado vem aumentando nos últimos anos. Em um histórico realizado pelo IRGA (2022c), demonstra um aumento na produtividade e principalmente da área plantada de soja a partir da safra de 2011/2012 até a safra 2020/2021. Sendo que na safra 2011/12, a produtividade média era de 30 sacas/ha e de uma área plantada de 121.166 ha. Já na safra 2020/2021 obteve-se nas terras baixas uma produtividade média de 52,3 sacas/ha e uma área de 370.594 ha. Observando que nos últimos 10 anos, houve um aumento substancial na produtividade de soja, em média, entre 2009/10 e 2022/23, houve um incremento anual de 47,3 kg ha<sup>-1</sup> e um aumento da área de soja em rotação com arroz irrigado de 206% (IRGA, 2022c).

## **2.4 Caracterização dos solos de terras baixas**

### **2.4.1 Classificação e atributos químicos**

As terras baixas do bioma pampa são caracterizadas por extensas planícies com variação das classes de solo, que apresentam uma particularidade comum entre si, o hidromorfismo, causadas pela drenagem deficiente desses tipos de solo (FORTES, 2009). Esses solos são identificados com altitudes inferiores a 50 m a.s.l. e declividade de até 5%, e correspondem, principalmente, as classificações do Planossolos, Gleissolos, Neossolos (quartzarênicos), Plintossolos e Espodossolos típicos de terras baixas onde predomina o cultivo orizícola (CARMONA et al., 2018).

Os solos de terras baixas possuem como características comuns baixa capacidade de drenagem, textura arenosa, fertilidade natural baixa a moderada, baixos teores P e Mo, pressupondo-se estarem diretamente relacionados à

disponibilidade de N e a baixos valores de pH (IRGA, 2022). Praticamente 80% dos solos de terras baixas apresentam pH abaixo do requerido (<5,5), 70% com Mo baixa (<2,5%), 50% com deficiência em P, e 55% com deficiência de K, para a cultura do arroz (IRGA, 2022).

De maneira geral, a maioria dos solos de terras baixas tem sua composição mineralógica bastante rica, destacando-se a presença de minerais primários, tais como ilita e feldspato, além de conteúdo significativo de esmectita, caulinita e vermiculita (KITAGAWA e MÖLLER, 1979; IRION, 1984; MÖLLER, 1986). Porém, são solos de textura predominantemente arenosa, diminuindo significativamente a influência desses minerais da fração argila. A transformação das micas para minerais 2:1 expansivos, com liberação de K estrutural, está relacionada ao intemperismo, em virtude da redução do tamanho de partícula, diminuição no teor de K, aumento no espaço basal e redução da carga estrutural dos minerais (MELLO et al., 2009).

Em estudo realizado por Britzke (2012), que avaliou a mineralogia e liberação de K em solos de terras baixas do RS, verificou-se que o solo de Santa Vitória do Palmar, dentre os 13 municípios estudados produtores de arroz irrigado neste Estado, sendo aquele que mais se aproxima das condições de solo encontrado na região da presente pesquisa, apresentou argilomineral 2:1 identificado como vermiculita, em função do material de origem proveniente de sedimentos de granito. A presença de argilominerais primários 2:1, justifica as altas quantidades de K não trocável e estrutural encontrada nesse tipo de solo, que pode ser relacionada à presença de microclínio, um tipo de feldspato. Segundo os autores, os solos que possuem maiores teores de K estrutural, são os que apresentaram maior proporção de mineral ilita na sua estrutura.

## **2.5 Principais alterações eletroquímicas em solos alagados e comportamento de alguns nutrientes**

Quando se trata de manejar solos alagados, deve-se ter claro que a dinâmica dos nutrientes é alterada, uma vez que o alagamento ocasiona a expulsão do oxigênio (O<sub>2</sub>) do espaço poroso do solo. Somente nas camadas oxidadas do solo alagado, como na superfície do solo e na rizosfera, é que existem microrganismos cujo metabolismo é aeróbio (PATRICK, 1982). Com a mudança da predominância de microrganismos aeróbicos pelos anaeróbicos, a decomposição da Mo ocorre de forma

mais lenta, pois as bactérias que realizam essa função em condições de ausência de oxigênio são menos eficientes (VAHL, 1993). Isto porque os microrganismos anaeróbios facultativos possuem menor eficiência energética e menor capacidade de decomposição da MO, uma vez que possuem como receptor final de elétrons um composto oxidado do solo (PATRICK, 1982).

Ao enfatizar as principais mudanças que acontecem no solo por conta do fator alagamento, destacam-se a perda de N por desnitrificação e o aumento do pH e da disponibilidade de nutrientes como ferro e fósforo. Isso se dá pois, o  $Fe^{3+}$  e o  $Mn^{4+}$  da superfície dos óxidos passam para forma de  $Fe^{+2}$  e  $Mn^{+2}$ , respectivamente, o que acaba aumentando sua concentração na solução do solo. Em razão disso, o K, um nutriente que não está atrelado nos processos de oxirredução, pode ter sua dinâmica fortemente alterada, sendo liberado para a solução do solo na medida em que aumenta a concentração de  $Fe^{+2}$  e  $Mn^{+2}$ , fazendo com que haja um suprimento mais satisfatório às plantas.

Porém, devido à mobilidade do  $K^+$ , existe uma maior propensão a perdas do sistema. Essa dinâmica também pode ser favorecida pela elevação do seu teor na solução do solo, concomitante a saturação do ambiente com água, beneficiando a difusão de potássio em direção às raízes das plantas (GUSTAFSSON et al., 2012; BAI et al., 2017; PENN e CAMBERATO, 2019; ALVES et al., 2021; BOSSOLANI et al., 2021).

### **2.5.1 Potássio**

O K é um nutriente importante para as plantas em vários processos fisiológicos e bioquímicos, primordiais para o desenvolvimento e produtividade das culturas, e atua na translocação dos carboidratos que são produzidos durante a fotossíntese, na síntese de proteínas e poliaminas, na ativação de enzimas, bem como na extensão e turgor celular (SCHMITID, 2017). Além disso, o adequado suprimento desse nutriente pode reduzir a incidência de algumas doenças (EMBRAPA, 2004).

Segundo Lalitha e Dhakshinamoorthy (2014), a maior parte do K do solo, em torno de 98% do total, encontra-se em formas indisponíveis (micas, feldspatos, argilominerais) e apenas uma pequena parcela do K está prontamente disponível às plantas, que inclui K disponível e trocável. A movimentação do  $K^+$  entre camadas até a solução do solo é dependente do processo de difusão, cujas variáveis relevantes a



esse processo são a distinção de concentração entre a solução do solo e as superfícies dos argilominerais, o teor de umidade e a tortuosidade do meio.

O K que se encontra adsorvido aos grupos funcionais superficiais dos colóides do solo formando complexos de esfera externa é considerado “K trocável” e prontamente biodisponível (TISDALE et al., 1993). Essa forma de K é utilizada universalmente como índice de disponibilidade do nutriente e um dos indicadores da fertilidade do solo ao desenvolvimento das plantas. Já os íons  $K^+$  que se encontram desidratados nas cargas permanentes expressas nas cavidades siloxanas dos argilominerais secundários 2:1, devido a ajustes físico-químicos, são considerados parte do K não trocável.

A força de ligação nos minerais 2:1, conferindo alta densidade de carga negativa estrutural, excede a de hidratação do íon, portanto resulta na desidratação do K (MELLO et al., 1995). Assim, o K não-trocável é retido nos poros ditrigonais entre lâminas tetraédricas adjacentes de minerais de argila do tipo 2:1 com alta densidade de carga negativa (BESOAIN, 1985; SONG e HUANG, 1988), tais como: vermiculita e minerais de argilas interestratificadas (MARTIN e SPARKS, 1985). O K não trocável também pode ser encontrado nas bordas parcialmente intemperizadas de micas (“zonas em cunha”) (KIRKMAN et al., 1994).

As formas desse nutriente apresentam estabilidade dinâmica entre si (MOODY e BELL, 2006), de tal forma que, quando as plantas realizam a extração de K na solução do solo, sua concentração tende a ser repostada pela liberação do K trocável (NACHTIGALL e VALL, 1991). Conseqüentemente, quando a quantidade de K na solução e nos grupos funcionais superficiais for drasticamente reduzida, parte do K não trocável pode difundir-se entre camadas dos argilominerais 2:1 e se tornar disponível às plantas, acelerando o intemperismo do mineral. Tomando isso como base, pode-se apontar que a absorção primária de K pelas plantas ocorrem, primeiramente, na solução do solo, em que seus teores serão dependentes da concentração mantida pelo K trocável, adsorvido nos sítios de troca.

Uma vez que o K trocável tenha esgotado, ocorre a liberação do K contido entre camadas dos argilominerais, acelerando a intemperização dos minerais primários potássicos (BORKERT et al., 1993). Segundo Castilhos e Meurer (2001), o K não-trocável pode ser disponibilizado para a absorção pelas plantas em médio prazo. Contudo, a cinética de liberação desta forma de K para a solução do solo é pouco conhecida, sendo dependente, principalmente, de fatores relacionados com a

mineralogia do solo e a sua proporção em cada fração granulométrica, bem como com a seletividade da fase mineral pelo K (MELLO et al., 1995; CASTILHOS e MEURER, 2001), além de estar associado com algumas práticas de manejo realizadas nas áreas, como por exemplo o alagamento característico do cultivo de arroz irrigado em terras baixas.

Segundo Barber (1995), o alagamento do solo impacta na dinâmica do K, uma vez que, sua mobilidade aumentada em direção às raízes pode ocorrer tanto por difusão como por fluxo de massa, que se dá, por consequência da maior disponibilidade de água, a redução da tortuosidade do caminho difusivo e as alterações no poder tampão, o que conseqüentemente pode aumentar a disponibilidade do nutriente. Associando-se também, a intensa absorção de K na rizosfera do arroz, podendo criar um ambiente favorável à difusão do K entre camadas em direção às posições mais externas dos argilominerais (sítios de adsorção menos específicos) e à solução do solo, realizando então, a reposição da forma trocável pela não-trocável (CASTILHOS, 1999).

### **2.5.2 Fósforo**

O P é um macronutriente que exerce importante colaboração para a nutrição e o crescimento das plantas, apesar de menor quantidade exigida (BLEVINS, 1999). Dentre os macronutrientes, o P é o menos exigido pelas plantas. Da fração total de P do solo, menos de 0,1 % (0,002 a 2,0 mg L<sup>-1</sup>) encontra-se na solução do solo, disponível para as plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999). No solo, o P origina-se do intemperismo das apatitas, que são minerais primários fosfatados que contêm Ca, podendo apresentar teores significativos de flúor, cloro e hidróxido. O ortofosfato liberado pelo intemperismo passa para a solução do solo, onde pode precipitar como minerais secundários, geralmente associados ao Ca, magnésio (Mg), ferro (Fe) e alumínio (Al); ser adsorvido nos sítios de sorção de óxidos e hidróxidos de Fe e Al; ou ser absorvido por plantas e microrganismos e convertido em formas orgânicas de P (imobilização) (PIERZYNSKI et al., 2005). As formas orgânicas de P podem retornar ao solo, onde podem ser adsorvidas às partículas do solo ou ser mineralizadas novamente a ortofosfato, para absorção pelas plantas a partir da solução do solo (MENUN, 2017).

O P orgânico (Po) é constituinte da matéria orgânica (Mo) presente no solo, como resíduos de vegetais e tecidos de microrganismos, bem como da decomposição de ambos, podendo constituir de 35 a 65% do P total do solo (CONDRON et al. 2005). Já o P inorgânico (Pi) fragmenta-se em quatro formas: o P dos minerais primários ou estruturais, P dos minerais secundários, P adsorvido e o P da solução do solo, sendo o último encontrado em menores quantidades em relação as demais formas de Pi (SILVA, 2013). O Pi pode se encontrar em solução (P-solução), precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, ambos em equilíbrio com a solução e compreendendo a fração lábil de P no solo (P lábil). Já a fração não-lábil está sob a forma de compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável), ou adsorvido às partículas do solo, não estando, estas formas, em equilíbrio imediato com o P em solução (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Segundo Patrick e Mahapatra (1968), as formas de maior probabilidade de ocorrência do P nos solos são fosfato de cálcio (Ca -P) e fosfato de alumínio (Al-P). Porém, para que o processo de absorção de P pelas plantas se dê com eficiência, é necessário que ocorra a difusão até a superfície radicular, sendo o principal mecanismo para suprimento do nutriente às plantas (BARBER, 1995). Essa difusão, que gera a movimentação dos íons até as raízes das plantas, é procedida do gradiente de concentração gerado na superfície radicular durante o processo de absorção. Quando se avalia o P em ambientes alagados, em geral sua absorção é afetada pela água de forma positiva, pois o P está entre os nutrientes mais favorecidos pelo alagamento do solo (COSTA, 2008).

De acordo com Mitsui (1960), Broeshart et al. (1965), e Mikkelsen e Patrick Jr. (1968), o aumento na disponibilidade do nos solos inundados pode ser atribuído aos seguintes fatores: redução do fosfato férrico a fosfato ferroso; hidrólise dos fosfatos de ferro e alumínio devido ao aumento do pH do solo; intercâmbio aniônico entre fosfatos e ânions orgânicos; deslocamento do P dos fosfatos de ferro e alumínio por agentes quelantes, produzidos pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica; liberação do P da Mo; liberação do P nos solos calcários devido à diminuição do pH; e a remoção da capa de óxido de ferro hidratado que oclui o fosfato pela redução do ferro.

## **2.6 Fracionamentos de Fósforo e Potássio no solo**

O fracionamento de nutrientes tem como objetivo identificar as formas que são retidos no solo, sua ocorrência e a amplitude de contribuição para a capacidade de suprimento para as plantas (SILVA, 2013). São utilizadas várias técnicas de fracionamento, que se diversificam no número e nas frações extraídas (inorgânicas e orgânicas), assim como na ordem e tipo de extrator. Porém, algumas formas são difíceis de serem avaliadas com exatidão, pois não há limites nítidos entre elas, em função da ampla faixa de distribuição das forças de retenção em diversos grupos funcionais, decorrentes do grau de intemperismo que foi submetido o material que deu origem ao solo (SANTOS, 2008).

A divisão do P em formas, a partir das diferentes técnicas de uso de soluções extratoras com diferentes capacidades e composições, podem ser empregadas para analisar a complexidade e a dinâmica desse elemento no solo (GATIBONI et al., 2005). Essas formas têm distintas capacidades de dessorção e abastecimento da solução no solo, conforme sua natureza química e energia de ligação. Portanto, sua divisão irá variar de acordo com a facilidade de reposição de P no solo, em geral sendo dividido em formas lábeis, moderadamente lábeis e pouco lábeis (GATIBONI et al., 2005; SILVA e RAIJ, 1999).

Os teores de P presentes no solo podem variar de acordo com a fração em que ele se concentra, além de sofrer interferência em virtude da classificação do solo ao qual está presente (FORTES, 2009). A forma orgânica é depositada desde a formação inicial do solo e é resultado do uso pelos microrganismos e, num segundo momento, pelas plantas (SILVA, 2013). Essa fração pode corresponder entre 20 e 80% do P presente no solo e suas principais formas são os fosfolipídeos (0,5 a 7%), ácidos nucléicos (menos de 3%), ésteres fosfato (> 5%), sendo que os fosfatos Inositol são responsáveis pela maior composição do P total, podendo variar entre 10 e 80% da constituição desse elemento (REHINHEMER et al., 2000).

A fração inorgânica, por sua vez, pode ser dividida em P de minerais primários e P adsorvido na solução do solo (RIBEIRO-FILHO et al., 2008). O  $P_i$  na forma adsorvida compõe um complexo grupo de fosfatos, constituído por distintos compostos, com grau de estabilidade variado. Quando encontrado em maior abundância, pode estar ligado ao cálcio, alumínio e ferro; além disso pode encontrar-se adsorvido às caulinitas e à matéria orgânica do solo, que resultará em baixas concentrações de P na solução (GATIBONI et al., 2005). Sua absorção efetiva pelas

plantas será realizada na solução do solo na forma de íons ortofosfatos como  $H_2PO_4^-$  (di-hidrogenofosfato) e  $HPO_4^{2-}$  (hidrogenofosfato) (PEREIRA, 2021; PIRES, 2023).

O fracionamento de Chang e Jackson (1957) foi desenvolvido visando identificar o acúmulo e a dessorção de P no solo, sendo que a técnica consiste na classificação, de acordo com os grupos fosfatos mencionados anteriormente, conforme o extrator utilizado ( $NH_4Cl + NH_4F$ , NaOH,  $H_2SO_4$ , entre outros). Entretanto, essa metodologia não é capaz de realizar a separação das formas orgânicas, tampouco, a labilidade das frações coletadas, mas consegue mensurá-las. Em contrapartida, tem demonstrado que com a evolução do intemperismo, a retenção do P no solo tem sido realizada com maior vigor.

A metodologia subsequente proposta por Hedley et al. (1982), foi elaborada com base na técnica de Chang e Jackson (1957), que num primeiro momento consistia na separação das formas por eles identificados como Pi-Al, Pi-Fe, Pi-Ca e Pi-Fe redutor. Entretanto, com a observação das amostras, perceberam que o modelo inicial poderia apresentar dificuldades na interpretação, podendo gerar inconformidade nos resultados, ocasionados por ocorrer readsorção durante a extração e hidrólise do P orgânico, além da variação conforme o extrator utilizado (MOTA, 2012).

Assim, Hedley et al. (1982) sugeriram o método que tem sido utilizado com mais frequência, que consiste na extração em sequência das frações do solo, com a utilização de extratores de maior e menor força de extração, para que seja possível extrair Pi e Po, sem que haja variação, incluindo desde as formas disponível às mais estáveis, possibilitando, ainda, o fracionamento do P em formas lábeis, pouco lábeis e não-lábeis. O método identifica essas classificações independentemente do sistema de cultivo e adubações realizadas, bem como ao grau de intemperismo do solo (NANZER et al., 2019). As alterações da técnica foram realizadas a fim de promover a adaptação dos laboratórios disponíveis, tornando-os mais especializados, além de facilitar sua mensuração e promover mais precisão do material avaliado (SILVA, 2013).

Outro elemento de valor nutricional essencial ao solo e as plantas é o K, que pode ser encontrado no solo nas formas de K estrutural, K trocável, que se refere à fração adsorvida nas superfícies, K não trocável, correspondente à fração fixada entre as camadas de argilominerais ou fixado na estrutura dos minerais e K de solução. E todas essas formas possuem um equilíbrio dinâmico entre si (MOODY e BELL, 2006; RAIJ, 1991).

A maior concentração de K está presente nas estruturas cristalina dos minerais silicatados, sendo que os minerais primários com maior teor de K são as micas e os feldspatos potássicos. Além disso, o K pode ser encontrado nos intervalos estruturais presentes nesses minerais, tornando-se responsável pelo balanceamento das cargas negativas (BRITZKE, 2010). O mecanismo de liberação do K contido nos feldspatos é realizado pela ação da água e de ácidos orgânicos por meio de hidrólise, sendo que a capacidade de liberação dependerá da sua intensidade. Assim, quando hidrólise é completa, o intemperismo dos feldspatos solubiliza para a produção de K. Em casos de hidrólise parcial, além da liberação de K, formam-se também outros minerais (CONCEIÇÃO et al., 2015).

Para mensurar a disponibilidade de K que é liberada por algumas rochas, também são utilizadas diversas soluções extratoras, entre as quais o acetato de amônio, Bray-1 e resina de troca iônica e Mehlich-1 (GONÇALVES et al., 2014). Segundo Bortolon et al. (2010), a solução padrão empregada para a retirada de potássio do solo é o acetato de amônio ( $C_2H_7NO_2$ ) 1 mol L<sup>-1</sup> a pH 7, sendo uma técnica eficiente e utilizada há mais de 50 anos.

Esse método também pode ser utilizado para retirada simultânea de K, Ca e Mg, sendo reconhecido e adotado por sua precisão, rapidez e baixo custo. Entretanto, nos solos do RS e Santa Catarina (SC), o extrator de Mehlich-1 é o mais adotado para a extração de K do solo, em virtude da possibilidade de extrair e mensurar uma maior quantidade de elementos simultaneamente (P, K, Ca, Mg, Na, Mn e Zn), bem como em razão dos resultados analíticos serem semelhantes ao obtido com o método de  $C_2H_7NO_2$  (BRITZKE, 2010).

Visando a eficiência dos laboratórios nas análises de solo, outro procedimento foi desenvolvido com base no Mehlich-1, o Mehlich-3, que extrai Cobre (Cu) junto aos minerais que já eram extraídos e analisados no M1 (BORTOLON et al., 2010). Estudos promovidos por Schlindwein e Gianello (2005) e Bortolon et al. (2009), a fim de avaliarem a eficiência da técnica para a extração de K e adequabilidade das análises laboratoriais em solos do RS, constataram a necessidade de separação da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) nessas avaliações, tornando-se necessário analisar além da capacidade extrativa de M3, também a capacidade de separação de CTC em distintos tipos de solos presentes na produção agrícola gaúcha.

Ainda tomando como base os estudos de Schlindwein e Gianello (2005) e Bortolon et al. (2009), avaliando a disponibilidade de K para as plantas em solos do

RS, observaram que a disponibilidade do K não é dependente somente de sua concentração no solo, e sim da capacidade que o solo tem em mantê-lo. Assim sendo, a estimativa da disponibilidade de K no solo é realizada com base na forma de K trocável, além do uso das soluções anteriormente mencionadas (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Sob essa perspectiva, pode-se inferir que as plantas absorvem primeiramente o K disponível na solução do solo, cujo teor é dependente da concentração mantida pelo K trocável, sendo adsorvida nos sítios de troca. Quando essa disponibilidade é esgotada, ocorre a liberação do K presente nas camadas intersticiais dos argilominerais, acelerando o intemperismo dos minerais primários potássicos (BORKERT et al., 1993; BRITZKE, 2010).

A vista disso torna-se valido ressaltar que, apesar de as formas de K possuírem ligação entre si, podendo ser todas liberadas para a solução, o tempo e a velocidade de liberação dependerão do tipo de reação química presente (complexo de esfera interna ou complexo de esfera externa), além de estarem altamente relacionadas com a mineralogia do solo. A composição mineralógica do solo é o fator principal para determinar a correlação entre capacidade e intensidade, em outras palavras, é o que determina a relação entre o K da fase sólida e o K de solução (CASTILHOS, 2002).

Para Rocha et al. (2005), um método para ser considerado eficiente na avaliação de um determinado nutriente e sua disponibilidade precisa apresentar alto grau de relação com a planta, quantidade adsorvida, rendimento, além de ser de baixo custo, rápido, ser exato e conter boa capacidade extrativa.

## **2.7 Dinâmica do potássio e fósforo em sistemas integrados de produção agropecuária**

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) em geral contam com práticas de manejo que utilizam o plantio direto, a rotação de culturas, uso de pastagens e presença dos animais em pastejo, além combinarem a sucessão e/ou rotação de produção agrícola/florestal com a atividade pecuária no mesmo espaço e ao longo do tempo. Essas práticas e atividades interferem diretamente na disponibilidade dos nutrientes no solo, pois levam ao aumento no teor de MO, determinando maior taxa de infiltração e armazenamento de água no solo, menor

perda por escoamento superficial, maior sequestro de carbono e mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GASPARINI et al., 2017)

Em estudo realizado por Flores et al. (2021), avaliando a cultura do arroz irrigado em SIPAs, verificou-se que os sistemas analisados (monocultivo arroz com plantio convencional, não SIPA; monocultivo arroz com plantio direto (PD) de arroz irrigado sobre pastos de azevém pastejados por bovinos de corte, SIPA - PD; rotação anual arroz e soja, SIPA - PD; rotação arroz/soja/milho/pasto tropical, SIPA) não influenciaram os teores de K trocável aos seis anos de protocolo experimental. Porém, os extratores utilizados no estudo foram capazes de detectar um significativo gradiente de K trocável no solo em profundidade. O K total foi influenciado pelos SIPAs, sendo que após cinco anos de avaliação (2014-2018), para esses sistemas o K total foi superior à testemunha, (monocultivo arroz com plantio convencional, não SIPA). Os autores justificaram tais resultados pela fertilização realizada (superfície – sem incorporação) e pela deposição de resíduos vegetais e excretas dos animais na superfície do solo nos SIPAs.

Ainda na pesquisa de Flores e colaboradores (2021), os autores dividiram os tratamentos de acordo com a frequência de cultivos alagados e alagados + sequeiro, e verificaram que os tratamentos que contaram com o cultivo de arroz irrigado todos os anos proporcionaram maior difusão do íon  $K^+$ . A maior difusão facilita tanto a fixação quanto a liberação do íon  $K^+$  do espaço interlamelar argilomineral 2:1, que é o principal regulador da dinâmica do K no solo. Quando a adição de K é menor que a exportação, a tendência é que o K fixado seja liberado (MORTELE et al., 2016). Mas quando a adição de K é maior que a quantidade exportada, como foi no caso dos sistemas com arroz todo o ano, o excesso de K adicionado tende a ser fixado pelos argilominerais 2:1, tornando-se parcial ou potencialmente disponível para as plantas a médio-longo prazo (SIMONSSON et al., 2009). Já nos sistemas onde o arroz irrigado foi rotacionado com outras culturas, devido aos ciclos de secagem, ocorreu a fixação de K com maior energia, transformando o excesso de K adicionado via fertilização em formas estruturais (FLORES et al., 2021).

Assmann et al. (2017), avaliando SIPAs (soja-bovinos de corte), observaram que o pastejo aumentou a eficiência de uso de P, porque a adição de fertilizantes fosfatados prontamente disponíveis e de resíduos de pastagem são processos complementares que resultam em maior disponibilidade P no solo. Em relação ao pastejo, os autores verificaram que intensidades de pastejo moderada a leve



aumentaram a produção de biomassa, que também foi responsável por ciclar maior quantidade de nutrientes no solo. Os autores salientaram que, especialmente, na intensidade de pastejo leve (i.e., baixa pressão de pastejo, que confere alta oferta de forragem para os animais) ocorreram condições adequadas para a renovação contínua de perfilhos, reduzindo a sua idade e aumentando a taxa de renovação e crescimento foliar, resultando em maior produção total e melhor qualidade da pastagem (ASSMANN et al. 2017). Apesar da redução na intensidade de pastejo diminuir a produção de bovinos por unidade de área, ocorreu o aumento do ganho individual dos animais (ASSMAN et al. 2017).

Segundo Costa et al. (2014), a interação solo-planta-animal influencia a ciclagem de nutrientes, altera a distribuição das formas de P no perfil do solo. Neste estudo os autores verificaram aumento do P total na camada de 0-2,5 cm sob pastejo em relação ao sem pastejo, atingindo pouco mais de 1200 mg kg<sup>-1</sup>. Esse resultado foi justificado pela adição de resíduos animais (urina + esterco) (HAYNES e WILLIAMS, 1993). Segundo Saunders (1984), o esterco pode contribuir com 30 a 40% do P na superfície do solo.

A ciclagem dos nutrientes é um dos pontos mais relevantes e favorecidos pelos sistemas integrados (HENTZ et al., 2014), caracterizando-se pelo fluxo contínuo de transferência de substâncias entre atmosfera-planta-animal-solo, desencadeados por uma sequência de processos dentro dos ciclos biogeoquímicos. Ainda, a ciclagem promove a mensuração da quantidade e velocidade com que os nutrientes são transferidos entre os componentes envolvidos, realizando, finalmente seu balanço no sistema (ANGHINONI et al., 2011). Esse processo é essencial para a manutenção da vida no mundo vegetal, acontecendo de forma natural dentro dos ecossistemas, agricultura e florestas (HENTZ, 2014)

Cabe ressaltar que a compreensão do processo de ciclagem é primordial para o melhor aproveitamento e eficiência de uso dos nutrientes disponibilizados pelos fertilizantes e, também dos resíduos dos animais e veg. Com isso, torna-se importante esclarecer que, sua disponibilização dependerá do tipo de cultura inserida no sistema, utilização ou não do componente animal, bem como do tempo de permanência destes no sistema de pastejo, podendo interferir nos processos e no fluxo ao qual esses nutrientes serão submetidos (GHIZZI, 2015). Essa interferência ocorre de modo que a presença dos animais no sistema influencia na ciclagem e redistribuição de

nutrientes, por meio do consumo de minerais pela desfolhação das pastagens e redistribuição via fezes ao solo (CAVALCANTE, 2007).

Assmann et al. (2017) concluíram que os SIPAs podem contribuir para aumentar a disponibilidade de P no solo e que aproximadamente 25 kg ha<sup>-1</sup> de P foram ciclados em um sistema integrado soja-gado de corte. Anghinoni e Barber (1980), observaram que os SIPAs influenciam positivamente o P disponível devido ao crescimento radicular, pois as pastagens fornecem diferentes capacidades de enraizamento, gerando uma exploração mais eficiente dos nutrientes contidos no perfil do solo em benefício do sistema produtivo (ZIBILSKE et al., 2002).

Outro fator determinante nos SIPAs está vinculado com a quantidade de MO gerada nos sistemas. Segundo Costa et al. (2014) e Menezes et al. (2018), a labilidade do P está associada a diversos fatores, incluindo a MO. Sendo assim, maiores quantidades de MO irão contribuir para o aumento das formas lábeis de P e de K trocável nas camadas superficiais do solo (PAVINATTO et al., 2008). Desta forma, é possível destacar que a MO é um importante indicador paramétrico da qualidade do solo (VEZZANI, 2008).

Segundo Ghizzi (2015), a constância produtiva nos sistemas de integração é dependente do processo de transformação de MO e biomassa microbiana presente no solo. Essa biomassa microbiana utiliza o substrato existente como fonte energética e dos demais nutrientes para seu desenvolvimento celular, além de sintetizar as substâncias orgânicas do solo. Com isso, os macros e micronutrientes ficam indisponíveis temporariamente e serão disponibilizados para a absorção pelas plantas somente após a morte e decomposição da biomassa (GAMA-RODRIGUES, 2008).

Nesse sentido, é essencial estabelecer a eficiência no uso dos nutrientes e sua disponibilidade no solo, a fim de favorecer todas as culturas envolvidas no ciclo produtivo. Mais uma vez, a presença do animal em pastejo é primordial para a efetiva funcionalidade do sistema, uma vez que proporciona maior heterogeneidade em relação à distribuição de resíduos no solo (ELY et al., 2019). Para isso, é essencial que haja o manejo adequado da pressão de pastejo, bem como altura de pastagem, de modo a favorecer a área de contato entre o excretado e a superfície do solo, melhorando a fertilidade deste (SANTOS et al., 2010).

Essa melhora na fertilidade do solo é promovida pela maior disponibilização e concentração de nutrientes ao solo, oriunda das excreções que, por sua vez,

promovem o desenvolvimento acelerado e mais satisfatório das plantas (BRAZ et al., 2004; MARCHESIN, 2006; SILVA et al., 2014; GLÉRIA et al., 2017).

As excretas dos animais têm um papel importante quando se trata da reciclagem de nutrientes. Segundo Haynes e Williams (1993), a maior parte dos nutrientes consumidos pelos animais durante o pastejo retorna para o solo. Em estudo realizado por Assman e colaboradores (2017), verificou-se que grandes quantidades de P (~25 kg ha<sup>-1</sup>) e K (~130-180 kg ha<sup>-1</sup>) foram cicladas em um sistema integrado soja-gado de corte; essa ciclagem é importante para manter a fertilidade do solo e permitir que os SIPAs sejam sustentáveis em longo prazo, devido a uma maior eficiência de uso dos nutrientes, demonstrando que é necessário compreender as demandas de nutrientes das pastagens e das culturas em relação aos padrões de liberação de nutrientes de resíduos (animal e vegetal).

Estudos promovidos com base em SIPAs têm demonstrado que são capazes de melhorar as condições do solo, proporcionando significativos resultados de produção das lavouras, além de atingir índices produtivos satisfatórios para a pecuária e para todo o sistema. Sendo que os fatores determinantes para obter resultados positivos com esses sistemas, envolvem a cobertura vegetal e o fator animal (CARVALHO et al., 2011).

A cobertura vegetal que se pode produzir no Sul do Brasil, sem preparo do solo na entressafra das culturas agrícolas, e seu uso como pastagem provoca melhoria das características físicas do solo devido à combinação de dois fatores principais: presença de um denso sistema radicular atuando como agente agregante e aumento da atividade da macrofauna do solo (MARCHÃO et al., 2007). Estudos têm demonstrado efeitos positivos das pastagens sobre as propriedades físicas e químicas do solo e sobre as produções das culturas (TREVISAN et al., 2017). Esse comportamento justifica-se principalmente pelo desenvolvimento do sistema radicular das gramíneas, que ocupa um volume maior de solo, reciclando ampla quantidade de nutrientes. Com isso aumenta a atividade biológica do solo, favorecendo a elevação do teor de matéria orgânica e reduzindo a erosão (SALTON et al., 2001).

Em relação ao desenvolvimento das raízes, deve-se entender que ele está diretamente vinculado com o pastejo animal. Segundo Martins et al. (2018), a adoção dos sistemas integrados, através do aumento da diversidade biológica no solo, em virtude do pastejo, acarreta a maior produção de raízes forrageiras hibernais, aumentando a proporção do solo rizosférico e da atividade microbiana, em razão da

deposição de esterco no solo. Sob essa perspectiva, Silva et al. (2014), complementam que esses acontecimentos, promovem a elevação nos teores de C orgânico na solução do solo, sofrendo forte influência do componente animal no sistema, que ao proporcionarem o maior crescimento radicular, resultam na descida química dos compostos orgânicos e inorgânicos as camadas mais profundas, podendo inclusive, aumentar o pH do solo.

Em estudo promovido por Martins et al. (2014), os autores verificaram maior produção e crescimento de raízes quando ocorreu o pastoreio das áreas, que se justifica pelo estímulo que é dado a planta a produzir uma nova folha quando é pastejada. Pois nesse momento a planta também é estimulada a produzir uma nova quantidade de raízes para que seja realizado o suprimento das necessidades desse perfilho, refletindo numa maior biomassa radicular.

### 3 Hipóteses

Com base na fundamentação apresentada levantou-se as seguintes hipóteses:

- O sistema de monocultivo de arroz utilizado como testemunha apresentará desempenho reduzido nos teores dos nutrientes estudados (P e K);
- Em contrapartida, os sistemas integrados de produção com maior diversidade de culturas e a presença do componente animal no ciclo, promoverão maior disponibilidade e concentração desses nutrientes;
- Os sistemas integrados de produção com maior diversidade de culturas, menor mobilização do solo, menor frequência temporal da cultura do arroz irrigado e maior período com a presença do componente animal no ciclo, promoverão maior disponibilidade e estoque desses nutrientes no solo.

## **4 Influência de sistemas integrados lavoura-pecuária sobre as formas de K no solo**

### **4.1 Introdução**

O arroz é um dos cereais mais cultivados e consumidos no Mundo, com destaque ao arroz produzido em áreas de terras baixas sob irrigação por alagamento, devido a maior produtividade em comparação ao cultivo em sequeiro. O Brasil é o 10º maior produtor de arroz mundial e o maior produtor mundial de arroz fora da Ásia (IRRI, 2023). Dentre os Estados brasileiros, o Rio Grande do Sul é o líder nacional (IRGA, 2022; BRAZILIAN RICE YEARBOOK, 2022). Neste Estado, a produção de arroz irrigado ocorre em terras baixas, em que por longo período da história do cultivo do grão, seu manejo foi realizado com o predomínio do monocultivo associado ao pousio e intenso preparo do solo na entressafra (SOSBAI, 2016; CHAUHAN, 2012). Atualmente, esses sistemas deram espaço para sistemas que visem a rotação de culturas e maior aproveitamento da área, através da exploração de mais uma atividade na área plantada, podendo utilizar componente animal ou vegetal (MENDES, 2024).

Os sistemas especializados, também conhecidos como monocultivo, associado ao período de pousio e intenso preparo do solo na entressafra, afetam a disponibilidade de nutrientes do solo e ocasionam menor produtividade de arroz em terras baixas (GALON et al., 2007). Segundo Borin (2018) e Tiecher et al. (2017), a adoção do pousio no período hibernar implica na redução da eficiência da ciclagem de K que, por sua vez, acarreta perdas para o sistema como um todo, em virtude da baixa disponibilidade desse nutriente às plantas.

Outro fator que desfavorece a ciclagem dos nutrientes está relacionado a falta de estímulos a biomassa microbiana do solo (BMS) em sistemas de monocultivo, quando comparados aos sistemas mistos de produção. A BMS corresponde à fração orgânica viva presente no solo, que é responsável por desencadear os processos químicos e biológicos e pode ser facilmente alterada em função do meio. Assim sendo, quanto maior a deposição de matéria orgânica no solo via excreta de animais, resíduos orgânicos de outras culturas, maior será o estímulo orgânico, promovendo o aumento populacional e a diversidade de disponibilização dos nutrientes, visto que ela participa ativamente como compartimento central dos ciclos de C, do N, do P e do S

(SOUZA et al., 2010). Com essa fração orgânica empobrecida, os sistemas fundamentados no monocultivo necessitam de adequação para não entrar em colapso pela carência de nutrientes disponíveis no solo, comprometendo diretamente a produtividade da cultura (VILELA et al., 2011).

Neste contexto, surgem os sistemas de integração lavoura-pecuária. Esses sistemas são globalmente utilizados já que é possível obter maior quantidade de alimento por unidade de área (MORAES et al., 2014), aumentar a ciclagem e disponibilidade de P e K (ASSMAN et al., 2017; DEISS et al., 2016; FERREIRA et al., 2011) e outros nutrientes, favorecendo a intensificação sustentável de sistemas agrícolas (DENARDIN, 2021). A integração entre lavoura e pecuária proporciona o uso pastagens como forragem para os animais e promove benfeitorias ao sistema de produção através da deposição de esterco e urina, que melhoram a ciclagem de nutrientes (GOODFRAY et al., 2010; THORNTON E HERRERO, 2001), além da obtenção dos grãos produzidos pelas lavouras. Deste modo, a inserção do componente animal no sistema de produção é uma alternativa extremamente viável e que vem sendo utilizada há anos.

No estado do Rio Grande do Sul, particularmente, a integração entre culturas agrícolas e animais ocorre como uma vocação histórica, que se deu pela adaptação da espécie bovina no bioma Pampa e foi implantada muito antes da popularização do SIPA, constando registros de criação desde o início do século XX, marcado pelo pastejo de bovinos em resteva de arroz irrigado cultivado em terras baixas (SILVA et al., 2011).

O tipo de solo que predomina na Região Sul do Brasil em terras baixas arrozeiras é o Planossolo derivado de granito-gnássico e sedimentar (SILVA et al., 2015). De maneira geral, esse tipo de solo pode apresentar reservas naturais consideráveis de K, que se dá devido às concentrações relativamente elevadas de K-feldspato e mica. Entretanto, esse reservatório de K não se encontra disponível para ser absorvido pelas plantas (BRITZKE, 2010).

Outro fator que influi diretamente na dinâmica e disponibilidade de potássio no solo são os ciclos de alagamento (umedecimento e secagem), que ocorrem em áreas de cultivo de arroz irrigado (SCOTT e SMITH, 1968; OLK et al., 1995; GOLESTANIFARD et al., 2020). Por consequência desse processo e concomitante ao elevado dinamismo desse nutriente, sua motilidade é aumentada em direção às raízes das plantas, que pode ocorrer por difusão de fluxo de massa (BARBER, 1995),

em que o nutriente é carregado de um ambiente com maior potencial de água para outro com menor concentração de água próximo da raiz (STEINER et al., 2018). Além disso, pode acontecer por meio da diminuição da tortuosidade do processo de difusão, bem como pelas alterações do poder dos tamponantes do solo, aumentando a disponibilidade de K (BARBER, 1995; BRITZKE, 2010). Ainda, com a constante absorção de K na rizosfera do arroz, é possível criar um ambiente que favorece a difusão do nutriente nas posições mais externas do solo, fazendo com haja reposição da forma trocável pelo não-trocável, através da contribuição dos argilominerais 2:1 (SWAROVISKY et al., 2006).

Levando em consideração as abordagens apresentadas e tendo entendimento que o comportamento dos nutrientes no solo e o desempenho produtivo da cultura são dependentes da estratégia de manejo produtivo adotada (SWAROVISKY et al., 2006), supõe-se que com a maior intensificação do uso do solo, através da realização constante de análises do solo e adubações periódicas com base nas necessidades de nutrientes constatadas, aliados aos componentes envolvidos no SIPA como a inserção do animal o sistema, adoção de forrageiras, intensidade de pastejo, PD, rotação de culturas, ocorrerá maior disponibilidade de K, devido ao aumento do K trocável, adsorvidos aos coloides no solo e do K disponível na solução, que está prontamente disponível para ser absorvido pelas plantas, além da diminuição da perda por lixiviação, devido a presença de uma cobertura permanente do solo e aumento do teor de  $M_o$ .

Nos sistemas integrados de produção, as plantas forrageiras são fundamentais e eficientes na extração e ciclagem o K, fazendo com que as perdas sejam diminuídas significativamente, apresentando capacidade de extração nas formas não trocáveis, aumentando a concentração do potássio trocável nas camadas superficiais do solo depois da sua senescência (GARCIA et al., 2008; FLORES, 2020). O estudo de Siqueira Jr (2005), constatou a afirmativa anterior ao identificar o aumento K disponível nas camadas superficiais de áreas pastejada, em virtude de seu melhor aproveitamento promovido pela interação dos animais com pressão de pastejo leve e moderada. Esse mecanismo pode ser observado nesses sistemas pois, 90% do K ingerido pode ser devolvido ao solo através da urina, em que essa devolução é realizada em sua forma iônica, estando prontamente disponível para ser absorvido pelas culturas (FLORES, 2020).



Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar as formas disponíveis, trocável e não-trocável de K e o balanço de K em Planossolo com cultivo de arroz e criação de bovinos de corte em pastejo, em terras baixas do Rio Grande do Sul, sob diferentes intensidades de manejo em sistema de integração lavoura-pecuária.

## 4.2 Materiais e métodos

### 4.2.1 Histórico das áreas experimentais

O protocolo experimental teve início em abril de 2013, tendo como área para condução do experimento estimada em 18 hectares pertencente à Fazenda Corticeiras, situada no município de Cristal, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil ( $30^{\circ}58'20''\text{S}$ ,  $51^{\circ}57'08''\text{O}$ ) (Figura 1).

O solo dessa área é classificado como Planossolo Háplico, com relevo plano a suavemente ondulado e declividade máxima de 4%, apresentando má drenagem e textura franca com 24, 23 e 53% de argila, silte e areia, respectivamente. O clima local é caracterizado como subtropical, com elevada amplitude térmica entre as estações do ano, com altas temperaturas no verão e inverno rigorosamente frio.

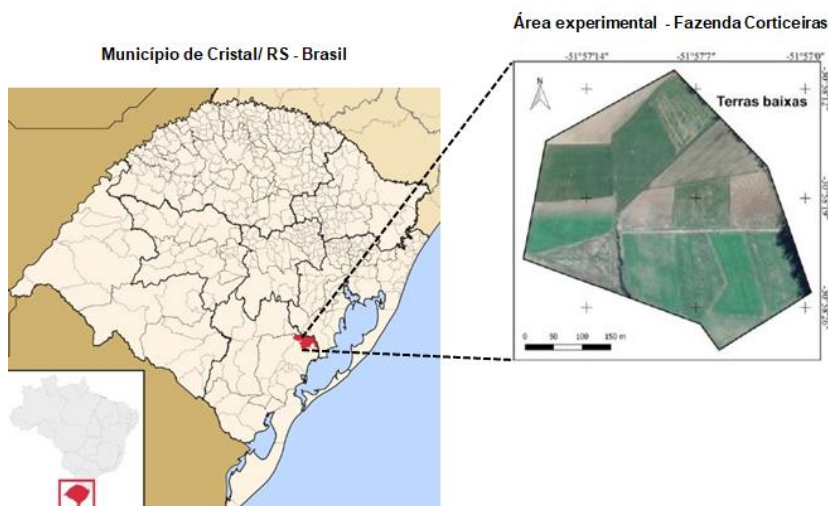


Figura 1- Localização do município de Cristal, estado do Rio Grande do Sul, Brasil e da área experimental

Fonte: FLORES, 2020.

No período antecedente do início do experimento, a coleta do solo para a determinação das características químicas deste foi realizada (Tabela 1). Toda a área experimental foi preparada previamente, com o manejo convencional de preparo de solo, utilizando o arado e a grade niveladora para a uniformização do espaço para, futuramente, receber os tratamentos.

Tabela 1- Atributos químicos em diferentes camadas do solo antes do período experimental (março de 2013)

ATRIBUTO QUÍMICO DO SOLO	CAMADAS DO SOLO (m)		
	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,4
pH	5,5	5,3	5,1
Mat. Orgânica (%)	1,8	1,2	0,9
P (Mg/Dm <sup>3</sup> )	10	5	3
K (Mg/Dm <sup>3</sup> )	76	36	26
Ca (Cmol <sub>c</sub> /Dm <sup>3</sup> )	3,5	2,9	1,7
Mg (Cmol <sub>c</sub> /Dm <sup>3</sup> )	2,3	2,2	1,3
Al (Cmol <sub>c</sub> /Dm <sup>3</sup> )	0,2	0,7	1,5
Ctc (Cmol <sub>c</sub> /Dm <sup>3</sup> )	10,6	12,2	12,1
Sat. por Bases (%)	56	43	26
Sat. por Al (%)	3	12	35

Fonte: Adaptado de DENARDIN et al., 2017.

Nota: Analisado segundo a metodologia de TEDESCO et al. (1995). pH em água (relação 1:1); Fósforo (P) e potássio (K) disponíveis extraídos com solução Mehlich 1; Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis extraídos com KCl 1 mol/L.

#### 4.2.2 Descrição dos sistemas de produção

O experimento foi conduzido durante dois períodos e as avaliações foram realizadas após o término do segundo. Cada período teve a duração de quatro anos durante os anos de (2013-2016 e 2017-2020). O protocolo de pesquisa avaliou cinco sistemas produtivos com diferentes arranjos, os quais, variaram em relação à diversidade de cultivos, mobilização do solo e frequência temporal da cultura do arroz irrigado.

Cada fase foi composta por cinco tratamentos testando manejos diversificados no cultivo de arroz irrigado em sistema de integração lavoura-pecuária, sendo:

- Sistema 1 (S1): utilizado como testemunha esse sistema contou com a sequência de cultivo entre arroz – pousio – arroz. Consiste em período mínimo, com operações de gradagem e preparo de solo, logo após a colheita do arroz, como forma de preparo antecipado para a próxima safra. Neste sistema é adotado na entressafra o pousio e, portanto, não há pastejo animal.

- Sistema 2 (S2): esse sistema é caracterizado como um sistema integrado com uma sucessão de culturas com baixa diversidade, sendo, arroz – azevém pastejado – arroz. Modelo muito característico pela utilização em pequenas propriedades com aptidão agrícola e pecuária no Sul do Brasil, em que a implantação da área de pastejo durante o inverno permite o melhor uso da terra, gerando uma fonte de renda alternativa ao agricultor.
- Sistema 3 (S3): nesse sistema uma nova cultura de grãos é inserida, aumentando a diversidade de culturas, de modo que sua dinâmica compreende o cultivo do arroz – azevém pastejado no inverno – soja – azevém pastejado no verão – arroz. Esse modelo de integração é realidade de muitas propriedades no Sul do Brasil, de maneira que a inserção da soja visa promover o controle de plantas invasoras, bem como, contribuir com a qualidade do solo.
- Sistema 4 (S4): a partir desse sistema, a diversidade na rotação de culturas é aumentada, promovendo melhorias a diversidade biológica do solo e uma variedade econômica ao produtor pela rotação entre arroz, soja, milho e capim-sudão no verão e pastagem de azevém e trevo-branco no ano de 2013 ou azevém e trevo da pérsia nos anos de 2014 até 2018 durante o período hibernal. Neste sistema, o capim-sudão é utilizado como forrageira em pastejo no verão;
- Sistema 5 (S5): Esse modelo de integraram é caracterizado pela baixa diversidade de culturas utilizando azevém + trevo-branco + cornichão – campo de sucessão (três anos) – arroz. Método muito utilizado em propriedades patronais do Sul do país, Uruguai e Argentina. Durante os oito anos da condução do experimento esse sistema recebeu apenas duas vezes a cultura de arroz em decorrência do tempo de sucessão das outras culturas implementadas.

A distribuição dos tratamentos conforme o período experimental está representado na tabela a seguir.

Tabela 2- Descrição e distribuição espaço-temporal dos sistemas de produção envolvendo a lavoura de arroz irrigado em terras baixas. Fazenda Corticeiras – Cristal/RS

Ação de manejo / Fase	A no	E estação	1	2	3	S4	S5	
Preparo de solo	Todos	out-inv	Com	Sem	Sem	Sem	Sem	
Pastejo entressafra	Todos	out-inv	Sem	Com	Com	Com	Com	
Fase 1 (2013-2016)	2013	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
	2013	prim-ver	arroz	Arroz	soja	sudão	campo	
	2014	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
	2014	prim-ver	arroz	Arroz	arroz	soja	campo	
	2015	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
	2015	prim-ver	arroz	Arroz	soja	milho	campo	
	2016	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
	2016	prim-ver	arroz	Arroz	arroz	arroz	arroz	
	Fase 2 (2017-2020)	2017	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor
		2017	prim-ver	arroz	Arroz	soja	sudão	campo
2018		out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
2018		prim-ver	arroz	Arroz	arroz	soja	campo	
2019		out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
2019		prim-ver	arroz	Arroz	soja	milho	campo	
	2020	out-inv	pousio	azevém	azevém	azevém +TB	azevém +TB+cor	
	2020	prim-ver	arroz	Arroz	arroz	arroz	arroz	
Diversidade espaço-temporal de culturas					+	+	+++ <sup>(1)</sup>	++++ <sup>(1)</sup>
Intensidade temporal do cultivo do arroz			++	++	+	+	+	+
Mobilização espaço temporal do solo			+++	+	+	+	++	+

Fonte: Dados originais da pesquisa, 2023/2024

Nota:(1). Embora o sistema 4 apresente maior diversidade de culturas comerciais, o sistema 5 é o que possui maior diversidade de espécie no campo de sucessão.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento estatístico de blocos casualizados, em área experimental de piquetes com tamanho médio de 1,06 ha com quatro repetições.

Com exceção do Sistema 1, todos os demais sistemas foram conduzidos em semeadura direta. O único evento de mobilização do solo ocorreu na restauração das taipas antes do cultivo do arroz e no sulco de semeadura das culturas agrícolas. As culturas foram manejadas de acordo com recomendações técnicas oficiais, quais sejam: arroz – Sosbai (2018) e Denardin et al. (2018); milho e sorgo – FEPAGRO (2009) e soja – EMBRAPA (2016).

Até o ano de 2017, todos os sistemas foram adubados tanto na lavoura como na pastagem visando potencializar os rendimentos e incrementar a fertilidade do solo (LOPES e GUILHERME, 2007). A partir de março de 2017, iniciou-se com a adubação de sistema, em que toda a dosagem de adubação com os macronutrientes nitrogênio (N), P e K foi aplicada na fase pastagem, à lanço e em superfície, de modo que essa

adubação suprisse as demandas das culturas de verão e inverno, em virtude da permanência de animais extraindo os nutrientes. Somente no Sistema 1 a adubação continuou sendo feita no cultivo de arroz.

A mudança no sistema de adubação foi decorrente do aumento dos teores de P e K do solo para níveis acima dos valores críticos estabelecidos pela CQFS-RS/SC (2016) para as culturas de grãos, além de atribuir esse aumento ao fato de que na fase de pastagem a extração de nutrientes é mínima, enquanto a ciclagem dos mesmos é maximizada pela interação solo-planta-animal (ELY et al., 2019). Dessa forma, com a antecipação da fertilização, utilizando a estratégia conhecida como adubação de sistema (TANGRIANI e SOARES, 2016), esperava-se o favorecimento tanto do pasto, ao incrementar os ganhos pecuários, quanto das culturas em sucessão, que aproveitariam residual dos nutrientes aplicados à pastagem.

As quantidades de adubação realizada para P e K adicionadas via fertilização, como descrito anteriormente, durante os dois ciclos, estão dispostas nas tabelas 2, respectivamente.

Não foram realizados conjuntos de amostras posterior ao período experimental visando investigar situações semelhantes a deste estudo.

Tabela 3- Quantidades por hectare de K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> adicionadas via fertilização nos sistemas produtivos de arroz avaliados durante o ciclo experimental completo (fase 1 + fase 2)

Estação/Safra	Sistemas integrados (Tratamentos)				
	1	2	3	4	5
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - K <sub>2</sub> O (kg/ha <sup>-1</sup> )				
Outono-Inverno de 2013	0-0	110-110	110-110	130-130	130-130
Primavera verão de 2013/2014	70-120	70-120	110-120	80-120	80-120
Outono-Inverno de 2014	0-0	130-130	130-130	130-130	130-130
Primavera verão de 2014/2015	70-115	70-115	70-115	140-150	90-90
Outono-Inverno de 2015	0-0	130-130	130-130	130-130	130-130
Primavera verão de 2015/2016	70-120	70-120	105-80	70-120	70-40
Outono-Inverno de 2016	0-0	130-130	130-130	130-130	130-130
Primavera verão de 2016/2017	70-120	70-120	70-120	70-120	70-120
Outono-Inverno de 2017	0-0	115-90	115-90	115-90	115-90
Primavera verão de 2017/2018	120-90	0	0	0	0
Outono-Inverno de 2018	0	123-75	123-75	123-75	123-75
Primavera verão de 2018/2019	117-75	0	0	0	0
Outono-Inverno de 2019	0	115-91	115-91	115-91	115-91
Primavera verão de 2019/2020	115-90	0	0	0	0
Outono-Inverno de 2020	0-0	120-89	120-89	120-89	120-89
Primavera verão de 2020/2021	120-90	0-0	0-0	0-0	0-0
Média por Ano	99-106	150-170	160-165	163-177	156-159
Total	752-820	1253-1320	1328-1280	1353-1375	1303-1235

Fonte: Dados originais da pesquisa

### 4.2.3 Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2020, ao final da entressafra, próximo à semeadura do arroz em todos os sistemas. As coletas de solo foram realizadas nas seguintes profundidades: 0 - 0,025 m, 0,025 - 0,05 m, 0,05 - 0,1 m, 0,1 - 0,2 m e de 0,2 - 0,4 m. Em cada uma das parcelas foram coletadas 20 amostras simples da seguinte forma: 1) abertura de trincheiras para a coleta nas diferentes camadas; 2) coleta da amostra; e 3) homogeneização das amostras simples para compor uma amostra composta representativa da parcela. As amostras das

camadas mais superficiais e intermediárias do solo (0 - 0,2 m) foram coletadas com o auxílio de uma pá, enquanto as amostras na profundidade de 0 - 0,4 m foram coletadas utilizando o trado.

#### **4.2.4 Frações do K**

Para a determinação do K disponível, foi utilizado a método Mehlich-1, composto pela homogeneização e diluição de dois ácidos fortes (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>), conforme descrito por Tedesco et al. (1995). Já para a estimativa do K trocável, foi utilizado acetato de amônio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) 1,0 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0 (EMBRAPA, 1997). Para a determinação de K não trocável foi utilizado o extrator tetrafenilborato de sódio (NaTPB) com 16 horas de extração, conforme proposto por Carey e Metherell (2003), subtraindo posteriormente do valor de K obtido com a extração com acetato de amônio (K-trocável) (Figura 3). A determinação do teor de K dos extratos foi realizada utilizando espectrofotometria de emissão de chama no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal de Pelotas.

#### **4.2.5 Análise estatística**

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

### **4.3 Resultados e discussão**

Para as análises realizadas com o extrator Mehlich-1 para quantificar os teores de K disponível, foi possível constatar que os tratamentos observados apresentaram significância ( $p < 0,05$ ) no teor de K nas profundidades de 0-0,025 m, 0,05-0,1 m, 0,1-0,15 m e 0,15-0,2 m. Foram constatados maiores teores de K disponíveis no S5 e S4 na camada mais superficial do solo (0-0,025 m), de 225 e 160 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já nas camadas mais profundas do solo (0,15-0,2 m e 0,2-0,4 m), todos os sistemas apresentam teores que variaram entorno 10 mg kg<sup>-1</sup> a 40 mg kg<sup>-1</sup>.

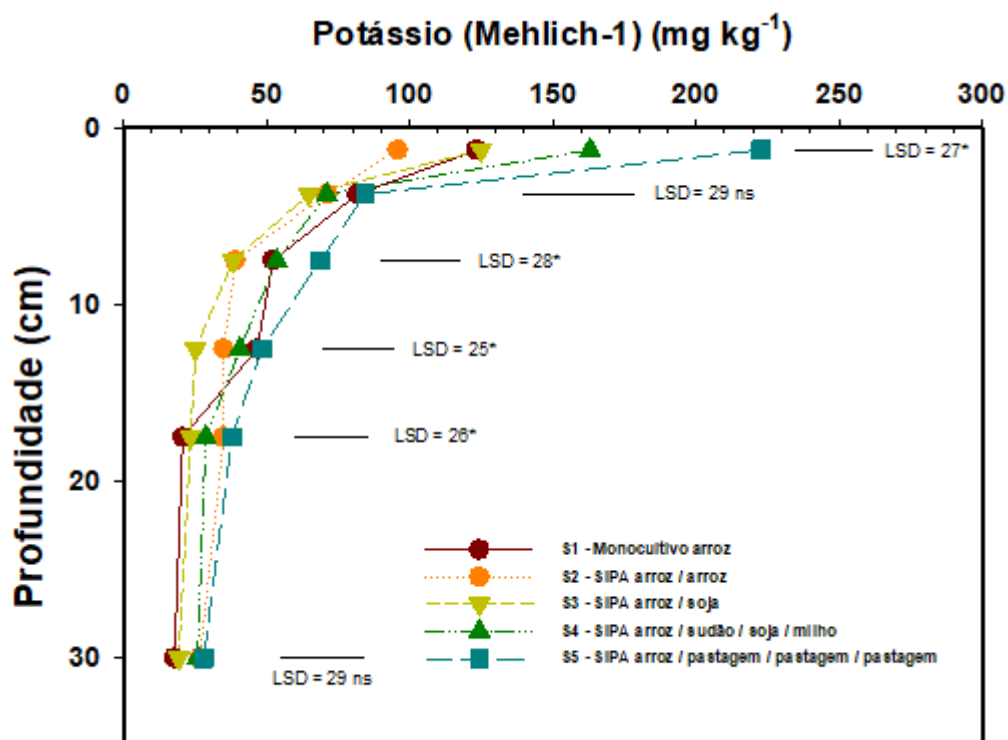


Figura 2- Potássio disponível extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD),  $p < 0,05$

Fonte: Dados originais da pesquisa

Utilizando o extrator de Acetato de Amônio para a mensuração de K potencialmente disponível, verificou-se que o sistema 5 (SIPA) apresentou os maiores teores de K trocável em todas as profundidades, enquanto o sistema de monocultivo (S1) demonstrou suas maiores concentrações na camada mais superficial, de 0,025 – 0,05 m. Nas demais profundidades, foi possível observar teores menores que 100  $\text{mg kg}^{-1}$ . Quanto aos sistemas integrados 2 e 4, ambos obtiveram teores semelhantes de K potencialmente disponível em todas as camadas analisadas, com exceção da camada estimada em 0,07 – 0,12 m, em que S2 expressou as maiores concentrações. O sistema (S3), rotação arroz e soja, foi identificado com os menores teores de K trocável a partir da profundidade de 0,1 m, sendo possível observar concentrações menores que 40  $\text{mg kg}^{-1}$  entre as profundidades de 0,1 – 0,2 m e menores que 20  $\text{mg kg}^{-1}$  na camada de 0,2 - 0,4 m.



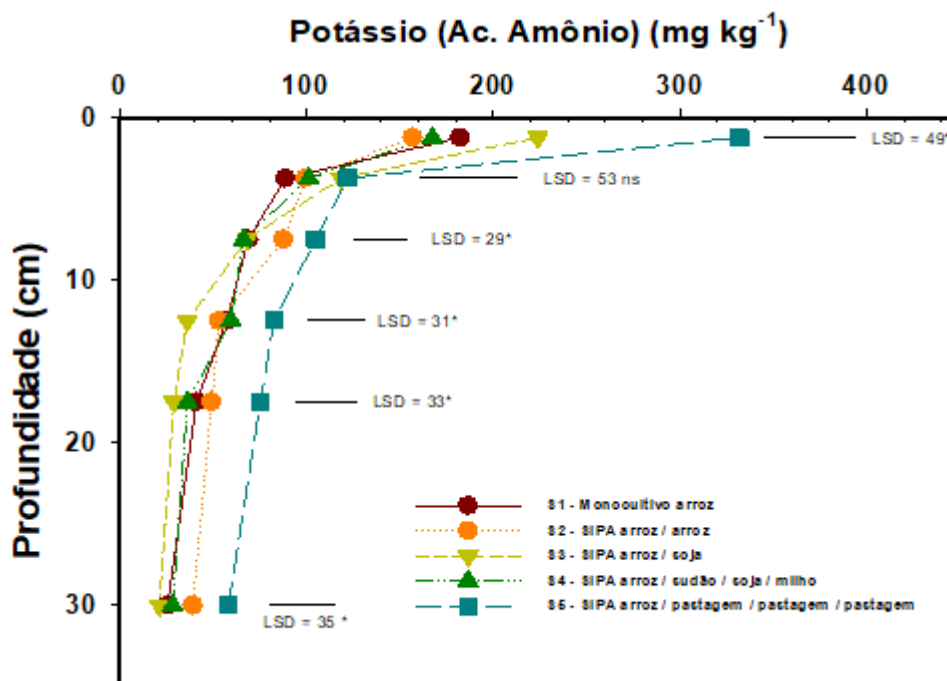


Figura 3- Potássio potencialmente disponível (trocável) extraído por acetato de amônio em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas na Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. *Least significant difference* (LSD),  $p < 0,05$   
 Fonte: Dados originais da pesquisa

Os sistemas avaliados influenciaram os teores de K não trocável em todas as camadas de solo analisadas (Figura 4). Nas camadas mais superficiais (até 0,1 m), os maiores teores de K não trocável foram registrados no S2, atingindo quase 600 mg kg<sup>-1</sup> na camada 0-0,025 m, de modo que S1 e S5 apresentaram comportamento semelhante nessa mesma profundidade. Na profundidade de 0,1-0,2 m, as maiores concentrações foram expressas por S5, enquanto S1 e S2 demonstraram concentrações parecidas (300 mg kg<sup>-1</sup>).

Na camada mais profunda do solo (0,2-0,4 m), os tratamentos S5 e S3 apresentaram semelhança na variável observada, expressando maiores teores de K não trocável em relação aos demais tratamentos. O sistema 2, nessa mesma profundidade, apresentou resultados estimados em cerca de 300 mg kg<sup>-1</sup> de K não trocável, enquanto S1 e S4 tiveram os menores teores, respectivamente.

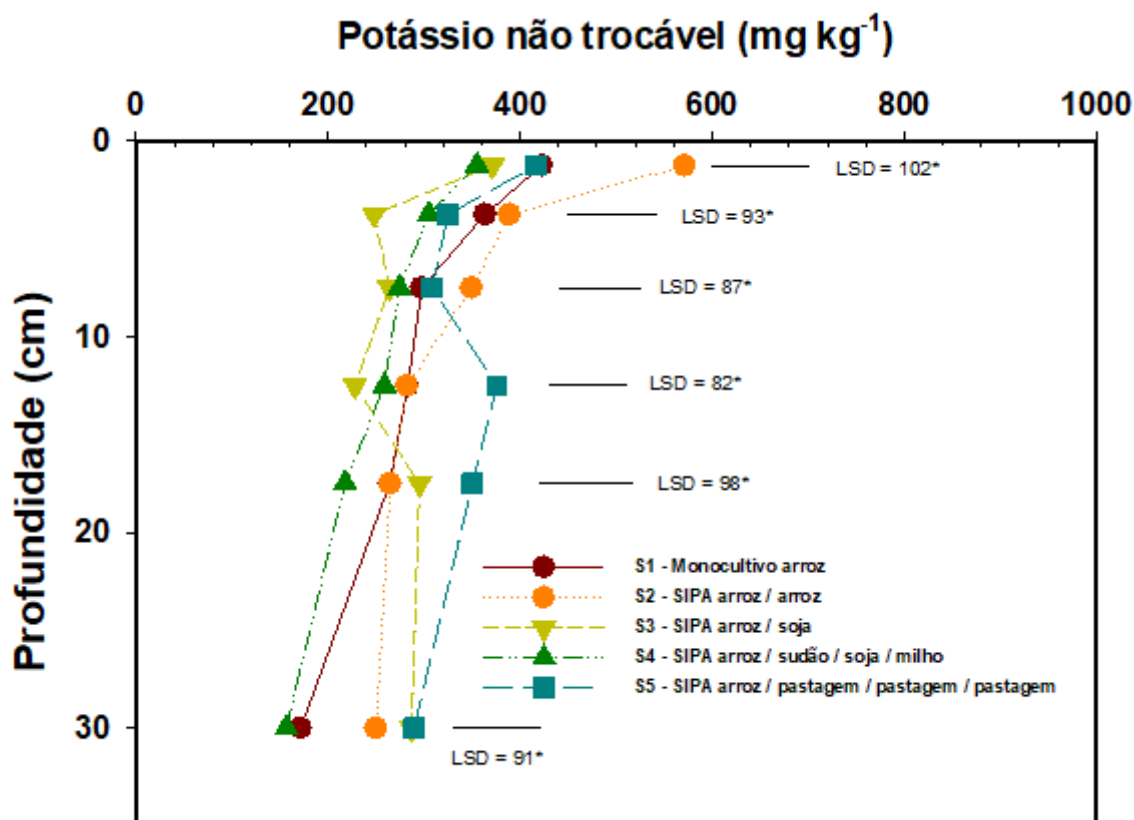


Figura 4 - Potássio não trocável extraído por tetrafenilborato de sódio em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD),  $p < 0,05$ .  
Fonte: Dados originais da pesquisa

De acordo com Swarovisky et al. (2006), comumente, o potássio concentra-se no solo varia de 1 a 50 mg L na solução do solo. O autor ainda apresenta que para a região sul do país essa concentração é estimada 11 mg L em terras baixas quando realizadas utilizando o extrator Mehlich-1. Em contrapartida, mais de 60% dos solos cultivados com arroz irrigado nessa região, apresentam concentrações abaixo de 60 mg/L (MEURER, 2007). O processo de alagamento do solo pode influenciar positivamente no aumento da disponibilidade de K, que se dá pela troca de íons ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) que ocorre nos sítios de troca, favorecendo também a difusão da superfície até as raízes (OLIVEIRA-PAIVA et al., 2022).

Em concordância a isso, Sparks (1987) constatou que a disponibilidade de K é impulsionada pela difusão e, conforme o solo seca durante o cultivo de alguma cultura de sequeiro, os íons  $\text{K}^+$  tornam-se mais concentrados em um volume menor de solução do solo. Desta forma, é possível afirmar que quando os sistemas de cultivo utilizaram a rotação de culturas, como a soja, associadas ao processo efetivo de adubação é possível esperar um aumento do K disponível.

Outro fator de relevância para o aumento da disponibilidade e contribuição na ciclagem dos nutrientes é a interação-animal-solo-planta, que concomitante ao sistema plantio direto, proporcionam, principalmente, o aumento da disponibilidade de K, P, Fe e Mg no solo, apresentando efeito positivo sobre o carbono nas frações superficiais e intermediárias do solo, que por sua vez, está relacionada com a adição constante e manutenção dos resíduos vegetais, preservando a Mo no interior do agregado (CARVALHO, 2015).

Assim, o aumento no conteúdo de K disponível em S5 pode estar vinculado com o grande período de adoção de animais em pastejo. Em geral, as pastagens possuem grande capacidade de ciclagem de potássio, além dos animais exportarem menos de 5% de K quando comparado com lavoura de grãos como arroz e a soja (Assmann et al., 2017). O cultivo de soja ( $3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e de arroz irrigado ( $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) exporta  $60$  e  $29 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , respectivamente. Enquanto uma produção de  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de peso vivo de gado exporta  $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Em relação à soja e ao arroz, a exportação do gado representa 0,8 e 1,7%, respectivamente.

Dernardin (2021), atribuiu o aumento da disponibilidade de potássio no solo à presença de animais em pastejo, que através da excreção de fezes e urina auxiliam na dinâmica de C orgânico que, por sua vez, tornam-se o principal suprimento de nutrientes para as forrageiras, além de melhorar a qualidade do solo e a dinâmica de todos os nutrientes, beneficiando também a ciclagem de potássio.

Em razão dessa deposição de esterco, a matéria orgânica do solo é aumentada, refletindo-se diretamente no estímulo da biomassa microbiana do solo (BMS), responsável por processos bioquímicos e biológicos no solo e sensivelmente alterada pelas condições impostas pelo meio, impactando na concentração disponibilidade dos nutrientes (SANTOS, 2020).

Ainda, é importante salientar a essencialidade das pastagens aos sistemas produtivos, cuja presença de raízes é aumentada, promovendo o incremento da fração rizosférica do solo, de maneira que quanto maior for a quantidade e o comprimento das raízes que permanecem no perfil do solo, melhores serão os aspectos de aeração solo, da movimentação de nutrientes e da água (CONCENÇO et al., 2020).

Diante disso, em virtude do azevém, que é a pastagem predominante em sistemas de terras baixas, ter um sistema radicular bastante robusto, que além de minimizar as perdas de K do sistema, cicla o nutriente de camadas profundas (0,4-0,8 m) para a camada superficial do solo (0-0,2 m) (ASSMANN et al., 2017). A ciclagem

de potássio é potencializada pelo efeito do pastejo, que desencadeia maior liberação de hormônios vegetais e estimula, conseqüentemente, maior produção de raízes pelas forrageiras (FLORES, 2020).

Essas alterações que ocorrem na rizosfera do solo, decorrentes da expressiva atividade radicular, são consideradas essenciais do ponto de vista biológico. No entanto, os atributos químicos do solo também são modificados por essa atividade, de maneira que, essas modificações possam ser ocasionadas pela relação entre cátions e ânions que são absorvidos pela cultura, refletindo diretamente no controle do pH e concentração de nutrientes (ALMEIDA, 2019).

Pesquisa realizada por Batista e colaboradores (2018), que avaliaram sistemas integrados de produção e intensidades de pastejos das áreas, mostra que com baixa intensidade ou sem pastejo ocorre baixa produção e crescimento de raízes e, em áreas pastejadas, há maior desenvolvimento radicular. Além disso, os autores afirmam que a heterogeneidade no espaço e no tempo são decorrentes da presença do animal em pastejo, em razão dessa variabilidade afetar os indicadores de fertilidade do solo devido à distribuição diferenciada dos nutrientes, já que eles retornam ao sistema na forma de fezes e urina, ocasionando alterações de fluxos de nutrientes, bem como em sua natureza e magnitude.

No presente estudo verificou-se que o K disponível, para ambos os extratores utilizados, na profundidade de 0,025-0,05 m para o sistema 1 (testemunha – monocultivo tradicional de arroz) não diferiu dos demais sistemas de produção, mesmo esse sistema apresentando menores valores em profundidade. Este fato pode estar possivelmente vinculado com o resíduo da palha da cultura do arroz irrigado e sua incorporação, pois este sistema é o único com mobilização de solo. Além disso, outro fator que pode estar atribuído à semelhança dos valores do K disponível (0,025-0,05 m) para o sistema 1 e sistema 2 é que ambos cultivaram na área como cultura de grão, apenas o arroz irrigado.

Em estudo conduzido por Yadvinder-Singh et al. (2010), os autores afirmaram que a palha de arroz pode proporcionar a liberação de até 79% de potássio. Assim, considerando os sistemas avaliados, tanto o sistema 1 como o 2 contaram com a presença da palha do arroz ao longo de todos os anos de avaliação, fato que, provavelmente, contribuiu nas concentrações do K disponível.

No que diz respeito ao K não trocável, Britzke (2012) aponta que sua concentração em solos de terras baixas do RS pode ser variável, principalmente em

decorrência dos distintos tipos de solos presentes, bem como sua composição mineralógica, influenciando diretamente o potencial de liberação e a quantidade desse nutriente. Desta forma, o K não trocável, que comumente é chamado de K fixado, pode ser considerado como a reserva potássica de médio e longo prazos para as plantas, em virtude de representar a forma não prontamente disponível (SILVA et al., 2015).

Partindo desse pressuposto, foi possível observar aumento consistente na fração de K não trocável em S5, constatando-se que esse sistema apresenta maior reserva de K de liberação lenta para as plantas, quando comparado aos demais. Com isso, pode-se compreender que a maior concentração de K nesse sistema encontra-se na sua forma estrutural, principalmente contida na forma de minerais primários, evidenciando possíveis distinções na disponibilidade do nutriente entre os tratamentos abordados.

Além disso, esse resultado pode estar atrelado ao efeito de alagamento do solo na disponibilidade de K não trocável em outros sistemas. Para Britzke (2012) e Silva et al., (2015), o aumento na concentração de K num determinado sistema mostra as distintas capacidades de suporte dos solos em manter a disponibilidade de potássio as culturas, que neste caso, pode ser decorrente da variação de culturas implantadas, bem como, presença do componente animal.

#### **4.3.1 Balanço de K**

A Tabela 4 apresenta o balanço de K dos cinco sistemas de produção, cuja entrada foi deu-se através da adubação e as saídas foram as exportações via produção de carne e grãos. Observando os dados da tabela 4, é possível constatar que a menor saída de K se deu no S5, com somente 64,4 kg ha<sup>-1</sup> de K para as culturas de grão implementados no sistema. Ainda, considerando a entrada de K via adubação, o S5 também apresentou balanço positivo do nutriente, superando outros sistemas que tiveram adubação superior e balanço negativo de K, como S2, S3 e S4.

O sistema com ausência de pastejo (S1) teve maior saída de K para as culturas de grão em comparação ao S2 (193 kg ha<sup>-1</sup> de K e 183 kg ha<sup>-1</sup> de K), respectivamente. O S2, apesar da maior necessidade de adubação, obteve menor saída de K via carne, apresentando o segundo maior balanço de K dos sistemas. Enquanto S3 e S4

apresentaram a maior saída do nutriente para as culturas de grãos. Além disso, apresentaram o pior balanço de K entre os sistemas com uso animal.

Tabela 4 - Balanço de potássio em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas via adubação e exportação via produção de grãos e de carne, fazenda Corticeiras Cristal-RS durante todo período experimental

Sistema	Entrada (adubação)	Saída (grãos)	Saída (carne)	Balanço
kg ha <sup>-1</sup> de K				
S1	681	193	-	488
S2	1096	183	5,7	907
S3	1062	317	7,8	737
S4	1141	244	9,1	888
S5	1025	56	8,4	960

Fonte: Dados originais da pesquisa

Os sistemas que apresentaram maior saldo positivo de K foram, sequencialmente, S5, S2 e S4. Nesses sistemas, os fatores que justificam o ocorrido são que S5 há menor presença de culturas de grãos no decorrer do ciclo, contando com apenas um ciclo de arroz a cada quatro anos, dado que as culturas de grãos proporcionam maior exportação de K em relação aos animais. Ainda, a presença de maior período de pastagens com azevém, trevo-persa e cornichão, além do campo de sucessão de verão contribuirão significativamente positivamente para a ciclagem de potássio, efeito que é potencializado pelo pastejo. A permanência dos animais em pastejo, bem como a consequente deposição de MO no solo, oriunda dos dejetos, pode ter melhorado a ciclagem de K, contribuindo para que o S5 tenha apresentado o melhor balanço dentre os sistemas avaliados.

Já o S2, com monocultivo de arroz irrigado, apresentou uma maior exportação através dos grãos, em relação ao S5, pela maior frequência temporal de arroz nesse sistema e apresentou as menores saídas K através da carne, em virtude do tempo de permanência dos animais em pastejo ser reduzido. No S2, o menor tempo de permanência dos animais ocorre em razão das pastagens após arroz produzirem menos forragem e apresentarem condição de pastejo mais tardiamente, comparativamente aos sistemas que utilizam soja.

Por fim o S4, mesmo possuindo maior diversificação de culturas de grãos e uma alta exportação de nutrientes através dos grãos, o maior tempo de permanência

dos animais em pastejo favoreceu para um balanço satisfatório de nutrientes, quando comparado com a necessidade de adubação.

#### **4.4 Conclusão**

Os teores de K disponível e trocável no perfil do solo são influenciados em sistemas de integração lavoura e pecuária em terras baixas, decorrentes da melhoria na ciclagem do nutriente. Os sistemas influenciaram nos teores de K na camada superficial. Os maiores teores de K disponíveis são verificados nas camadas superficiais dos sistemas com maior adoção de pastagens e rotação de culturas. No sistema com monocultivo de arroz e adoção de SIPA, tem os maiores teores de K não trocável na camada superficial.

Dessa forma, os sistemas integrados de produção agropecuária interferem nos teores e frações de K, de modo que os SIPAs conferem aos sistemas com maior tempo de permanência do componente animal, maior disponibilidade de potássio nas frações disponíveis e não trocáveis em terras baixas.

## **5 Efeito de diferentes sistemas integrados lavoura-pecuária sobre as formas de fósforo em planossolo no sul do Brasil**

### **5.1 Introdução**

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuárias (SIPAs) visam promover interações entre solo-planta-animal-ambiente, sendo planejados para o benefício sinérgico e de propriedades emergentes que esse comportamento interativo proporciona (MORAES et al., 2012). Entre os SIPAs para terras baixas mais conhecidos e utilizados, destacam-se aqueles em que a funcionalidade seja associar o cultivo de soja, arroz, milho e outras culturas agrícolas com a produção animal na mesma área, podendo ser de forma concomitante ou não, a depender do planejamento e disponibilidade de área (SILVEIRA et al., 2020).

Em solos de terras baixas, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, os SIPAS têm sido adotados com o intuito de diminuir a área de pousio posterior ao cultivo do arroz e outras culturas de grãos estivais, passando assim, a empregar a atividade de pastejo subsequente a colheita dos cultivos agrícolas, proporcionando ao agricultor uma fonte de renda alternativa (CARVALHO et al., 2016). Por consequência desse manejo, diversas propriedades de solo podem ser beneficiadas e melhoradas, sejam elas, físicas, químicas e/ou biológicas (ANGHINONI et al., 2013).

Outro modelo produtivo que também é beneficiado por esse sistema é a rotação entre arroz e outras culturas de sequeiro, como a soja, que tem por objetivo tornar-se uma fonte de renda alternativa quando o preço do arroz não estiver tão valorizado no mercado, além de proporcionar o controle de plantas invasoras, pelo uso de outros princípios ativos de herbicidas (ANGHINONI et al., 2013). Podendo ser incrementada nesta mesma área, pequenos ou longos ciclos de criação pecuária.

De acordo com Souza (2008), entre todos os nutrientes presentes no solo, o fósforo (P) é o que apresenta a dinâmica mais complexa. Por isso, devido a sua complexidade, diversos fatores podem alterar e afetar seu comportamento, isso envolve desde as práticas de manejo de cultura, o preparo do solo até a introdução do animal e outras atividades no sistema de produção (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). Levando em consideração que a presença de P no solo é oriunda da aplicação de fertilizantes, dos minerais intemperizados, dos resíduos orgânicos culturais e da decomposição de microrganismos e que este nutriente apresenta baixa



mobilidade no solo, a diversificação dos sistemas de produção pode promover um maior aproveitamento do nutriente (MORAES et al., 2002; SILVA, 2023).

Considerando que as formas moleculares e a dinâmica desse nutriente podem variar conforme as condições mencionadas anteriormente, ainda, sofrem influência de sua forma coexistente (orgânica e inorgânica) (COSTA, 2019). A representação do nutriente imobilizado em tecidos vegetais, microrganismos e outras estruturas semelhantes (fosfoproteínas, ácidos nucleicos, fosfolipídeos e, majoritariamente, fosfatos de Inositol) são reconhecidos como a fração orgânica do P. Em níveis moleculares, esse P orgânico é encontrado, em sua maioria, na forma de ortofosfato de monoésteres (R-OPO<sub>3</sub>), com variações relativas de 20 a 80% do P total (BEZERRA et al., 2015).

Em contrapartida, a fração inorgânica do P está encontra-se nos solos, ligadas em outros elementos podendo ser em Ca (P-Ca), Fe (P-Fe) e Al (P-Al), de maneira que sua ligação dependerá da composição desses elementos, apresentando a possibilidade de ligação na forma de P-ocluso – forma de maior absorção pelas plantas (COSTA, 2019). Ainda, em ambas as situações, podem expressar variações em virtude de sua fixação no solo, classificando-se em P na solução do solo, P lábil (facilmente disponibilizado para absorção), P moderadamente lábil (P moderadamente fixado) e P não-lábil (menos passível de liberação em função da fixação) (BEZERRA et al., 2015; COSTA, 2019).

Assim, a disponibilidade desse nutriente terá variação e será controlada por meio do equilíbrio estabelecido entre a concentração de fosfato na fração sólida do solo e sua concentração no solo, mecanismos denominados de fator quantidade e fator intensidade, respectivamente (COSTA, 2019). À medida que ambos os fatores estejam equilibrados, conforme a planta absorve P da solução do solo, reduzindo o fator intensidade, as porções mais fixadas desse nutriente são liberadas para suprir as exigências da planta através do processo de dessorção (HORTA e TORRENT, 2010).

O sistema plantio direto promove maior acúmulo de fósforo superficial que, de maneira negativa, pode ser perdido em virtude de possíveis erosões. Ainda, acúmulos de P podem ser observados nas linhas de semeadura, visto que a adubação mais eficiente é realizada nas linhas e não à lanço, para que haja melhor aproveitamento do nutriente pelas plantas e menor adsorção (BARBOSA et al., 2015). Ao contrário do K, esse nutriente é pouco móvel e apresenta baixo dinamismo, isso faz com que

baixos teores de P sejam encontrados nas camadas mais profundas do solo (ASSIS, 2020).

Esse fator também é influenciado pelo plantio direto, que é um manejo onde não é feito o revolvimento do solo. A presença da MO, oriunda da cobertura no solo e a vegetação viva em significava parte do ano, faz com que as perdas por erosão sejam diminuídas (LEITE, 2007). Entretanto, o SPD atua no acúmulo de MO que, por sua vez, influencia diretamente nas quantidades de P presentes no solo, visto que boa parte do P encontrado na MO está indisponível para ser aproveitado pela planta e para que este seja liberado a solução do solo é necessário que haja a mineralização da MO. O processo de mineralização dependerá de fatores como: aeração do solo, pH, temperatura, população dos microrganismos e composição do material que foi depositado (ASSIS, 2020).

Em contrapartida, os sistemas integrados comumente apresentam teores superiores de P lábil e moderadamente lábil nas camadas mais superficiais do solo (0 a 0,1 m), em comparação aos demais sistemas agrícolas que não realizam a inserção do componente animal no ciclo produtivo, mesmo que haja a mesma intensidade de manejo e as mesmas doses de adubação (ASSIS, 2020; COSTA et al., 2014). Ainda, a ciclagem desse nutriente dentro de um sistema integrado é realizada, também, pelas excretas dos animais, em que as fezes são a principal responsável pelo retorno do fósforo ao solo (ARNUTI, 2018; MARTINS et al., 2015). O fósforo que é consumido pelos animais contidos nas células das plantas encontra-se na forma orgânica e, através da ruminação, uma parte é transformada em fósforo inorgânico (Pi), que ao ser excretado estará mais prontamente disponível, quando comparado a outros materiais vegetais que não passam por esse processo de decomposição (SANTOS et al., 2011).

Além disso, os SIPAs podem ser considerados uma ferramenta facilitadora para as interações mais complexas do fósforo no solo, devido aos ganhos consideráveis aos teores de matéria orgânica que o método vem apresentando (SILVA, 2023). Contudo, quando o componente animal é inserido no sistema, o comportamento do P pode ser alterado, sendo marcado pela captação do nutriente do solo devido à pressão de pastejo e, posteriormente, a reposição do mesmo ao através das excretas, podendo alterar a forma e a dinâmica do P no solo (ASSMANN et al., 2017; GATIBONI et al., 2007).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos sistemas de produção agropecuária (monocultivo e sistemas integrados) sobre as frações do fósforo em Planossolo de terras baixas no estado do Rio Grande do Sul.

## **5.2 Material e métodos**

O protocolo experimental, bem como a apresentação da metodologia e descrição dos tratamentos utilizados para determinação da influência dos sistemas de produção agropecuária sobre as frações do P em Planossolo em terras baixas foi descrita no tópico 3.2 do presente trabalho.

### **5.2.1 Determinação das frações do P**

O método utilizado analisou parâmetros do solo relacionado à disponibilidade de P para plantas. Esse método mede algumas frações usando extrações sequenciais rápidas, ou seja, P prontamente solúvel extraído por  $\text{CaCl}_2$  0,01 M, o P vegetal disponível por Mehlich-3, o P inorgânico e orgânico moderadamente lábil extraído por NaOH 0,5 M, o P em minerais primários extraído por HCl 1 M e o P total medido em outra sub amostra de solo (GATIBONI e CONDRON, 2021).

### **5.2.2 Balanço de P**

O cálculo do balanço de P foi realizado subtraindo a entrada de P nos sistemas via adubações, das exportações de P via grãos e produção animal (carne). A quantificação da entrada de P foi calculada baseando-se nas adubações em cada um dos sistemas, convertendo os valores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para P, para cada época de manejo (Outono-Inverno e Primavera Verão) durante a duração do protocolo experimental. A exportação do P dos sistemas, foi calculada através das produtividades na colheita dos grãos das culturas de arroz (exp. 11 kg  $\text{Mg}^{-1}$ ), soja (exp. 16 kg  $\text{Mg}^{-1}$ ), milho (exp 9 kg  $\text{Mg}^{-1}$ ) e de PV de carne (exp. 16 kg  $\text{Mg}^{-1}$ ) de acordo com metodologia descrita por FIORIN (2008).

### **5.2.3 Estoque de fósforo de acordo com a labilidade**

Foi realizada a determinação do estoque de fósforo de acordo com a labilidade, fosforo lábil, moderadamente lábil e pouco lábil. As frações lábeis foram as extraídas com  $\text{CaCl}_2$  e o extrator Mehlich-1. Para a determinação do P moderadamente lábil e do P inorgânico, considerou-se um volume de 20% da fração P orgânica, quanto para a fração não lábil foi considerada como 80% da fração orgânica, de maneira que ambas as frações foram extraídas por HCl, conforme Costa et al. (2014).

#### **5.2.4 Análise estatística**

Os dados dos teores de P foram submetidos aos testes das pressuposições do modelo matemático de normalidade por teste de Shapiro-Wilk. A análise da variância foi realizada através do teste F e, quando significativo ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Também foram realizadas as análises de correlação de Pearson e análise de componentes principais (PCA). As análises estatísticas foram realizadas com suporte do software estatístico R (versão 4.2.2).

### **5.3 Resultados e discussão**

Houve efeito dos sistemas de culturas no teor de P extraído por  $\text{CaCl}_2$  (P- $\text{CaCl}_2$ ) em todas as profundidades avaliadas ( $p < 0,05$ ), sendo que diferenças mais expressivas entre os SIPAs ocorreram na camada mais superficial do solo (0-0,05 m) (Figura 6). Os sistemas 5 e 4 foram os que apresentaram os maiores teores de P ao longo das profundidades avaliadas apresentando teores de 13 e 28  $\text{mg kg}^{-1}$  (0-0,025 m), respectivamente. Na maior profundidade, atingiram teores próximos de 6  $\text{mg kg}^{-1}$  em ambos os sistemas de 0,2-0,4 m.

Nos sistemas 1 e 3, observaram-se teores intermediários de P solúvel, partindo de 6 e 11  $\text{mg kg}^{-1}$  na menor profundidade (0-0,05 m) e atingindo 4  $\text{mg kg}^{-1}$  na profundidade de 0,2-0,4 m. O sistema 2 foi o que apresentou os menores teores de P ao longo das profundidades do solo, partindo de 6  $\text{mg kg}^{-1}$  na profundidade 0-0,025 m e menos de 4  $\text{mg kg}^{-1}$  na maior profundidade (Figura 5).

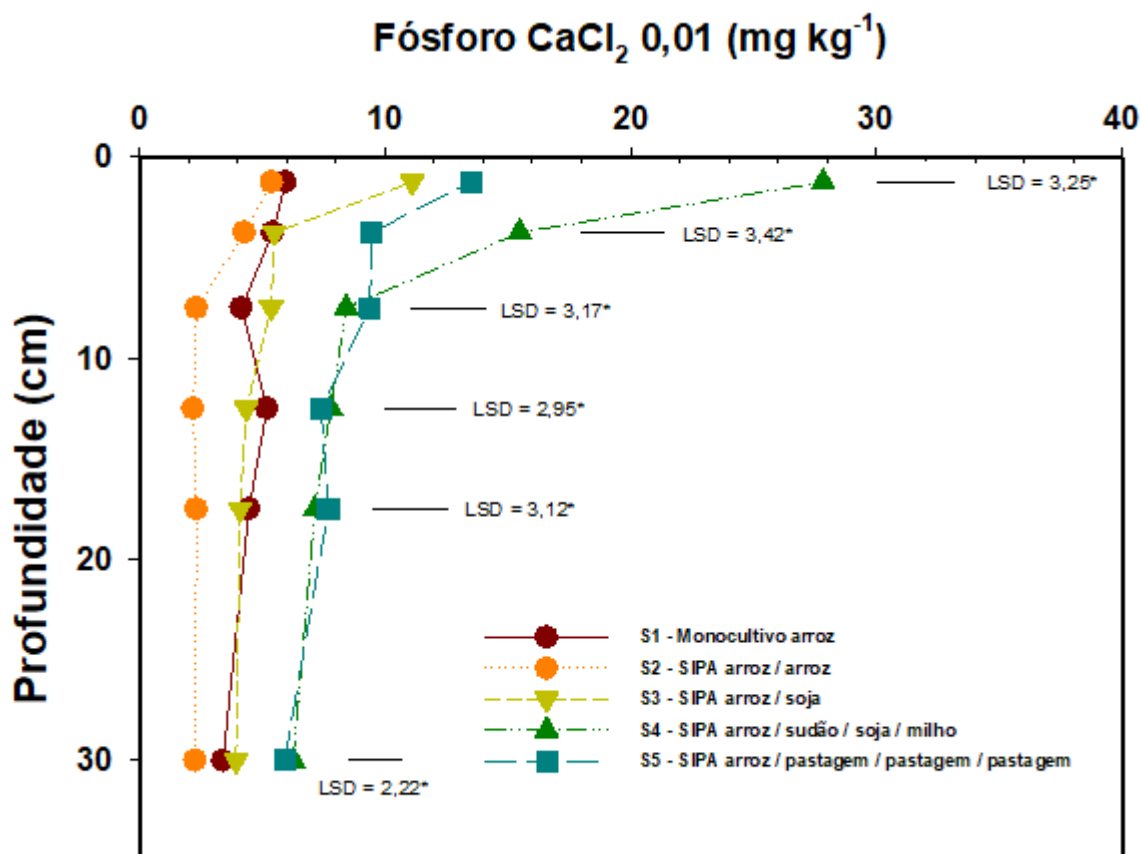


Figura 5 - Fósforo extraído por CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. *Least significant difference* (LSD), \*p<0,05 = significância entre as médias

Fonte: Dados originais da pesquisa

Ao longo do perfil do solo, os maiores teores de P disponível extraído por Mehlich-1 foram verificados nos sistemas 5, 4 e 2, partindo de médias de cerca de 208, 138 e 114 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, na profundidade 0,0-0,025 m e atingindo 10, 7 e 11 mg kg<sup>-1</sup> na maior profundidade, respectivamente. Os menores teores foram observados nos sistemas 1 e 3, que partiram de 25 e 66 mg kg<sup>-1</sup>, na menor profundidade, e atingiram 2 e 3 mg kg<sup>-1</sup>, na profundidade de 0,2-0,4 m, respectivamente (Figura 6).

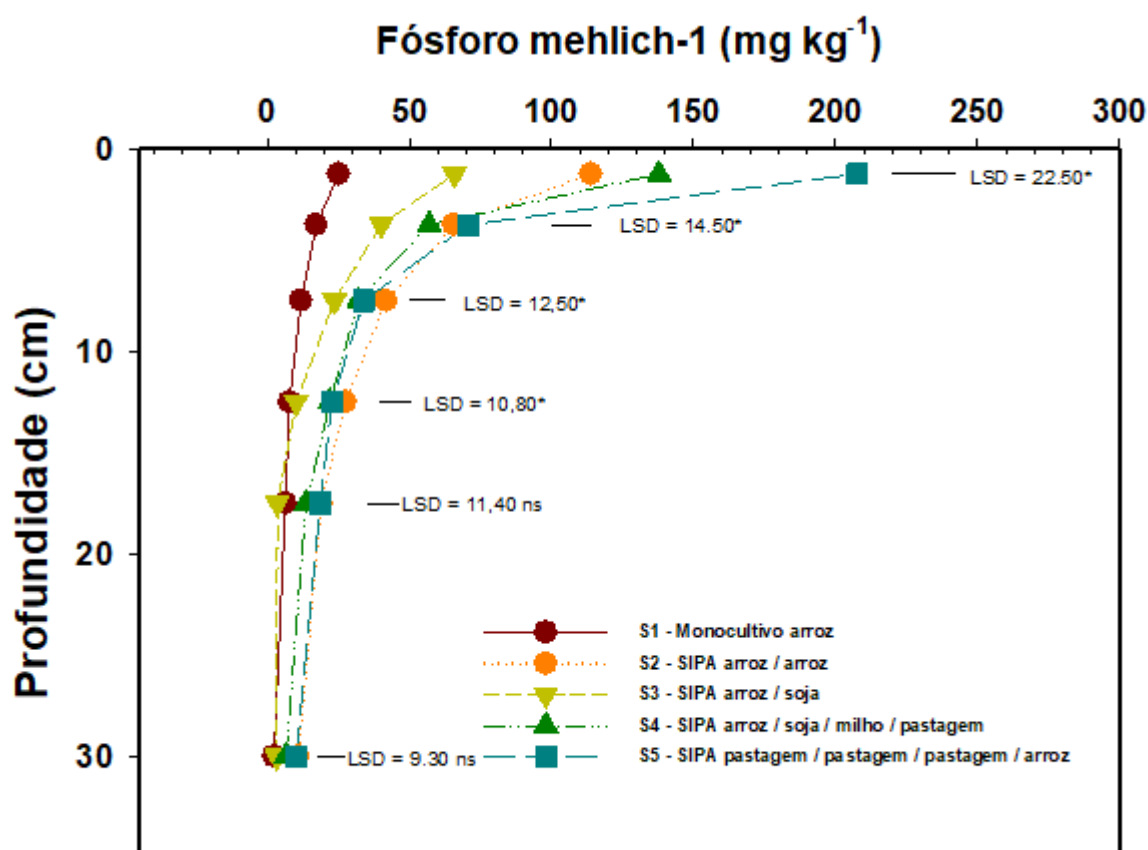


Figura 6 - Fósforo disponível extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. Least significant difference (LSD), \* =  $p < 0,05$  significância entre as médias  
Fonte: Dados originais da pesquisa

Ao analisar a camada mais superficial, os sistemas integrados S3, S4 e S5 apresentaram maiores teores de P disponíveis pelo método com extrator de Mehlich-1, apresentando concentrações de 220, 230 e 320 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, quando comparados ao S1 e S2. Enquanto na camada mais profunda todos os sistemas obtiveram teores próximos, ficando entre 100 e 120 mg kg<sup>-1</sup>. O sistema baseado no monocultivo de arroz (S1) apresentou os menores teores em praticamente todas as profundidades do solo. No S1, observou-se cerca de 100 mg kg<sup>-1</sup> na camada mais superficial do solo e cerca de 45 mg kg<sup>-1</sup> na maior profundidade (0,2-0,4 m). O sistema 2 apresentou valores intermediários na camada mais superficial do solo próximo de 180 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 7).

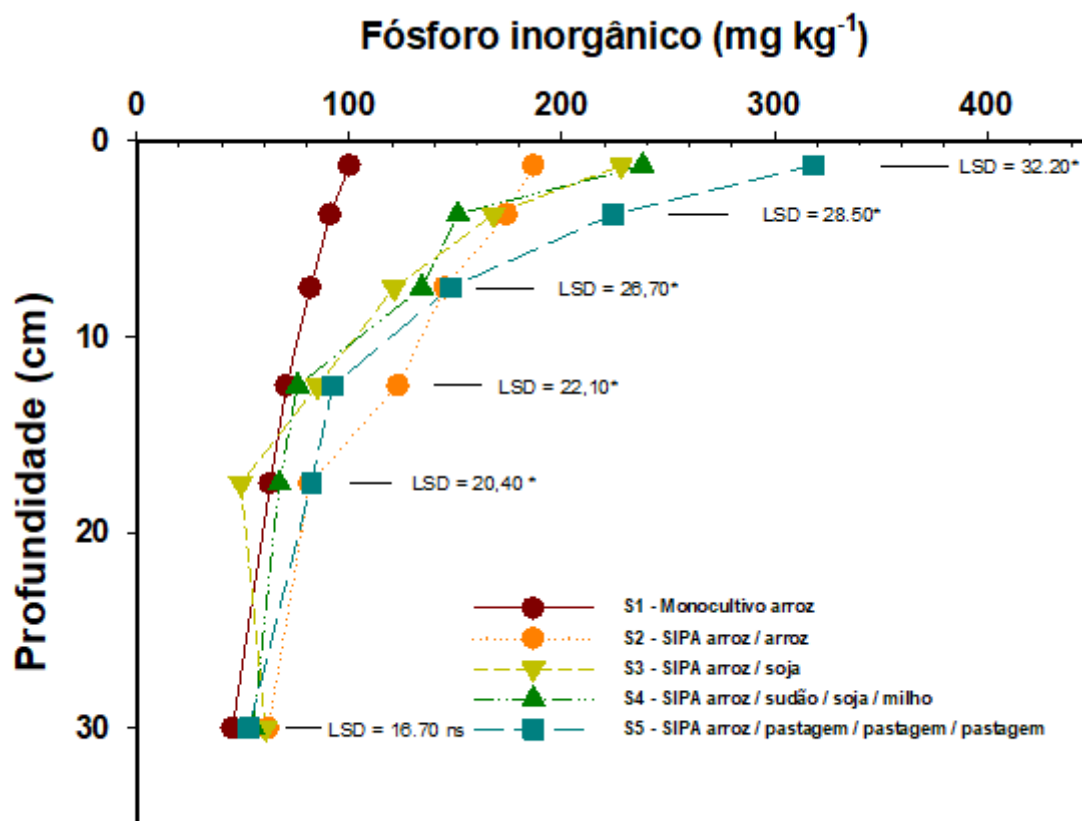


Figura 7- Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. *Least significant difference* (LSD),  $p < 0,05$  \* = significância entre as médias  
 Fonte: Dados originais da pesquisa

Observou-se influência dos sistemas nos teores de fósforo orgânico (Po) em todas as profundidades avaliadas. No sistema 4, observaram-se os maiores teores de Po, 1.202 mg kg<sup>-1</sup> e 973 mg kg<sup>-1</sup>, nas profundidades 0,0-0,025 m e 0,025-0,05 m, respectivamente. Observou-se o teor de Po no S5 de 944 mg kg<sup>-1</sup> na profundidade 0,0-0,025 m e de 265 mg kg<sup>-1</sup> na camada mais profunda do solo (0,2-0,4 m) (Figura 8).

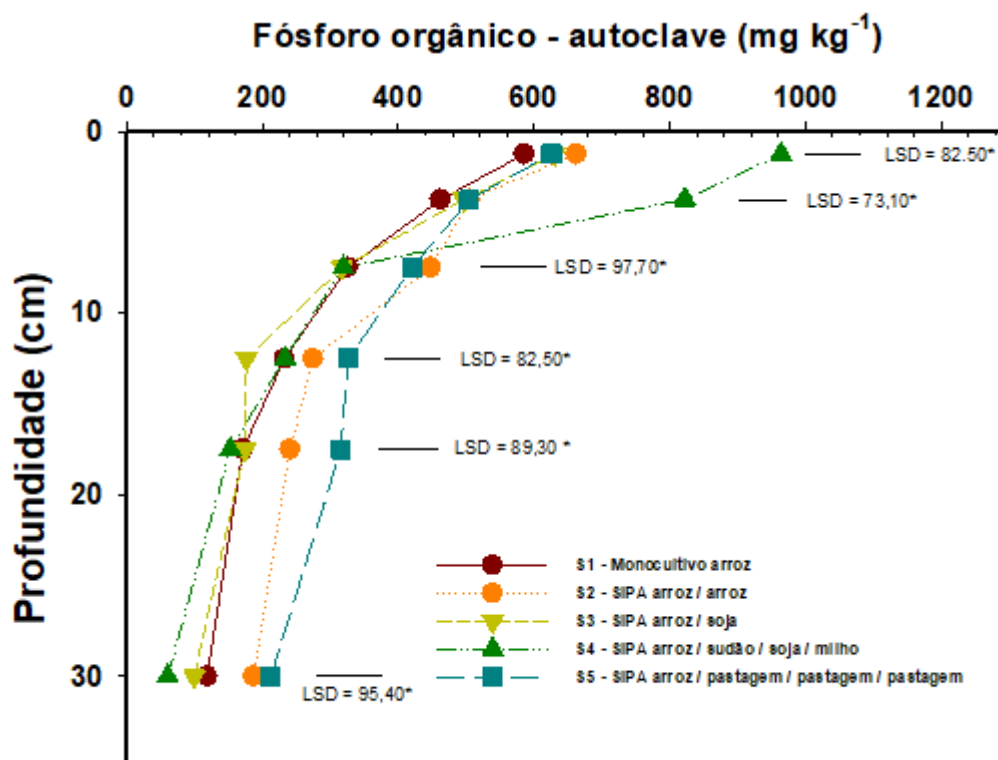


Figura 8- Fósforo orgânico (digestão ácida em autoclave) em Planosolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS. *Least significant difference* (LSD), \* =  $p < 0,05$  (significância entre as médias)

Fonte: Dados originais da pesquisa

Também se observou influência da adoção dos sistemas nos teores de P extraído com HCl. Conforme os resultados, nos sistemas integrados (2, 3, 4 e 5) os teores foram superiores a  $15 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto o S1 não atingiu  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  na menor profundidade (0-0,025 m). O sistema 4 apresentou teor de P-HCl de cerca de  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  na camada mais superficial, ocorrendo uma redução considerável do teor de P-HCl na profundidade de 0,05-0,1 m ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura 9).



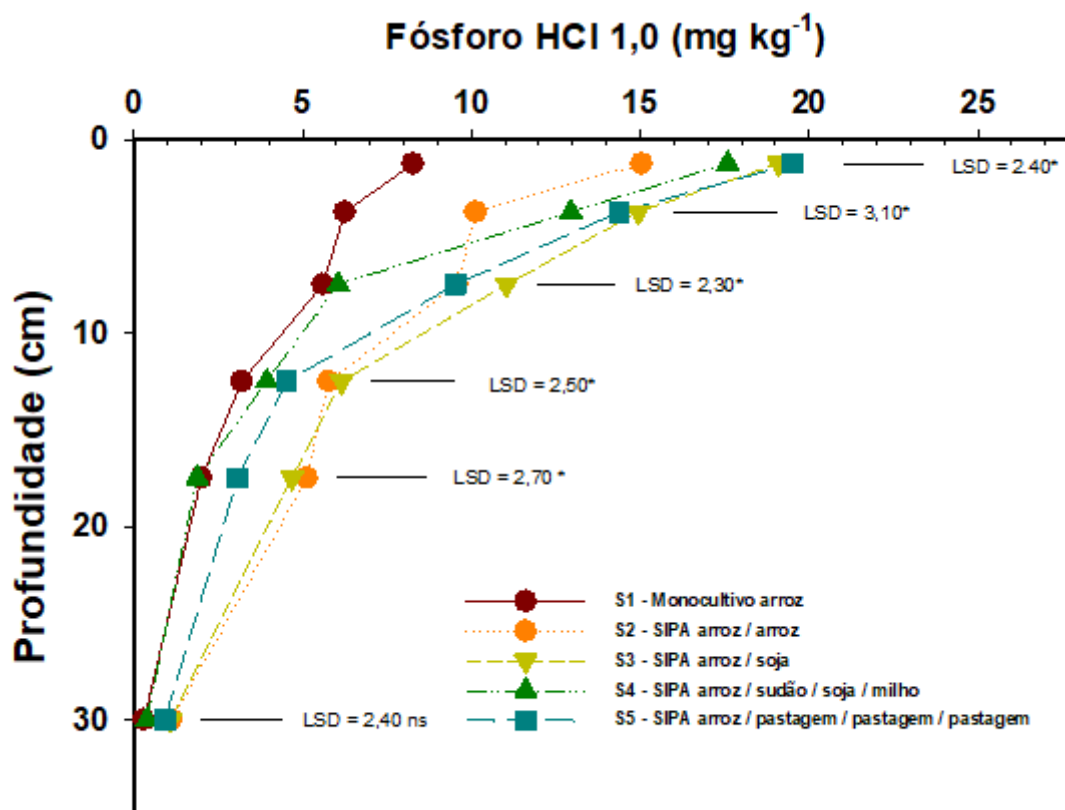


Figura 9- Fósforo extraído por HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal - RS. Least significant difference (LSD), \* = p<0,05 (significância entre as médias)  
Fonte: Dados originais da pesquisa

Em todas as profundidades avaliadas houve efeito dos sistemas sobre a fração de P total nos sistemas 2 e 5, apesar de não se observarem os maiores teores de P total nas profundidades de 0,0-0,025 m (1.184 e 983 mg kg<sup>-1</sup>) e 0,025-0,05 m (823 e 759 mg kg<sup>-1</sup>), foram os sistemas nos quais se observaram os maiores teores de P total nas camadas mais profundas do solo (0,2-0,4 m). Na camada mais superficial do solo, o sistema 1 sob monocultivo de arroz, sem pastagem e animais no período hibernar e com preparo de solo apresentou os menores teores de P total, em torno de 720 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 10).

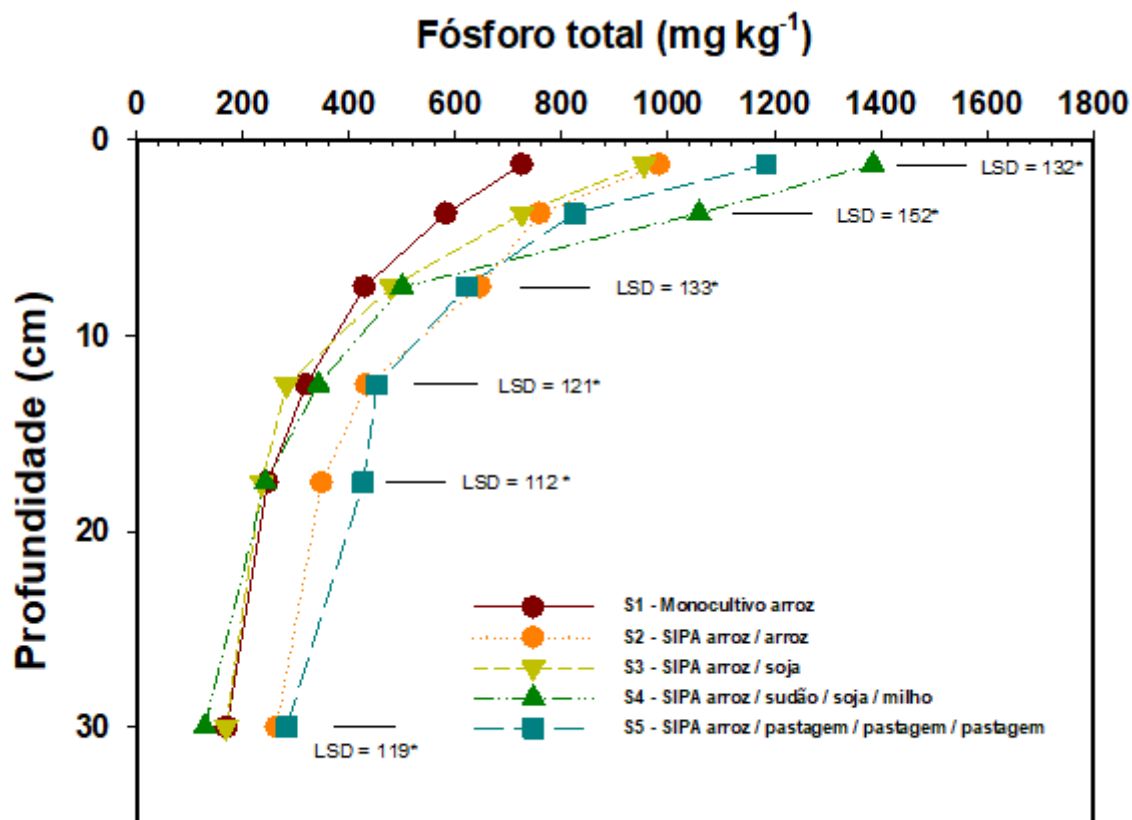


Figura 10- Fósforo total em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Fazenda Coiceiras, Cristal-RS *Least significant difference* (LSD), \* =  $p < 0,05$  (significância entre as médias)

Fonte: Dados originais da pesquisa

### 5.3.1 Balanço de P

Na tabela 5 são apresentados os dados referentes ao balanço do P. Observou-se que o balanço a partir da adição pela adubação e exportação via grãos e carne foi superior nos sistemas sob SIPA, principalmente nos sistemas 3, 4 e 5 (Tabela 4).

Tabela 5 - Balanço de fósforo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas via adubação e exportação via produção de grãos e de carne, fazenda Corticeiras Cristal-RS

Sistema	Entrada (adubação)	Saída (grãos)	Saída (carne)	Balanço
kg ha <sup>-1</sup> de P				
S1	329	178	-	151
S2	547	168	10	369
S3	580	166	13	401
S4	591	128	14	449
S5	569	51	18	500

Fonte: Dados originais da pesquisa

Conforme abordado anteriormente e ilustrado acima, os sistemas integrados (S3, S4 e S5) apresentaram balanço de P superiores aos sistemas de monocultivo (S1 e S2). Apesar do maior requerimento de adubação em S5, o sistema apresentou o balanço mais positivo de P com saída total de apenas 69 kg ha<sup>-1</sup> dos 569 kg ha<sup>-1</sup> que foram adicionados ao solo via adubação. Mesmo sem a presença do animal em pastejo, o S1 teve o menor saldo de P, visto que a saída de P de 178 kg ha<sup>-1</sup> foi extraído do solo somente pela cultura agrícola implantada nesse sistema.

Avaliando a saída de P entre grãos e carne, é possível observar que os grãos demandaram maiores exportação por área bastante superior em comparação a produção de carne pelos animais. Para Carvalho et al. (2010), o balanço de nutrientes dentro do sistema de produção integrada dependerá do manejo de animais na pastagem, como adoção ou não do pastoreio rotacionado, pressão de pastejo, carga animal, determinando o espaço na área de pastejo, em que será definida a capacidade da pastagem em prover o balanço positivo ou negativo ao sistema.

Em conformidade com Anghinoni et al. (2013), quando os balanços de nutrientes são negativos, pode ser um indicativo de que a adubação foi realizada aquém da necessidade dos componentes do sistema, ou seja, a exportação de nutriente foi maior que a exportada pela planta ou animal, comprometendo a fertilidade do solo e afetando a rentabilidade do sistema. Ao contrário disso, saldos extremamente positivos podem ser reflexo de baixa eficiência do uso de nutrientes, que acarretam a problemas ambientais, devido ao excesso de nutrientes no solo e interferem negativamente na economia da atividade, que se dá devido as perdas do nutriente adubado em função da erosão e lixiviação (ARNUT, 2018).

### **5.3.2 Estoque de Fósforo**

Observou-se diferença significativa no estoque de fósforo extraído por CaCl<sub>2</sub> dos sistemas 4 e 5 em relação ao sistema 1, nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Pode-se verificar que os sistemas que apresentaram os maiores estoques de fósforo solúvel, extraído por CaCl<sub>2</sub>, nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, foram os sistemas 4 e 5, apresentando 33,2 kg ha<sup>-1</sup> e 25,6 kg ha<sup>-1</sup> e 20,3 kg ha<sup>-1</sup> e 19 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 11).

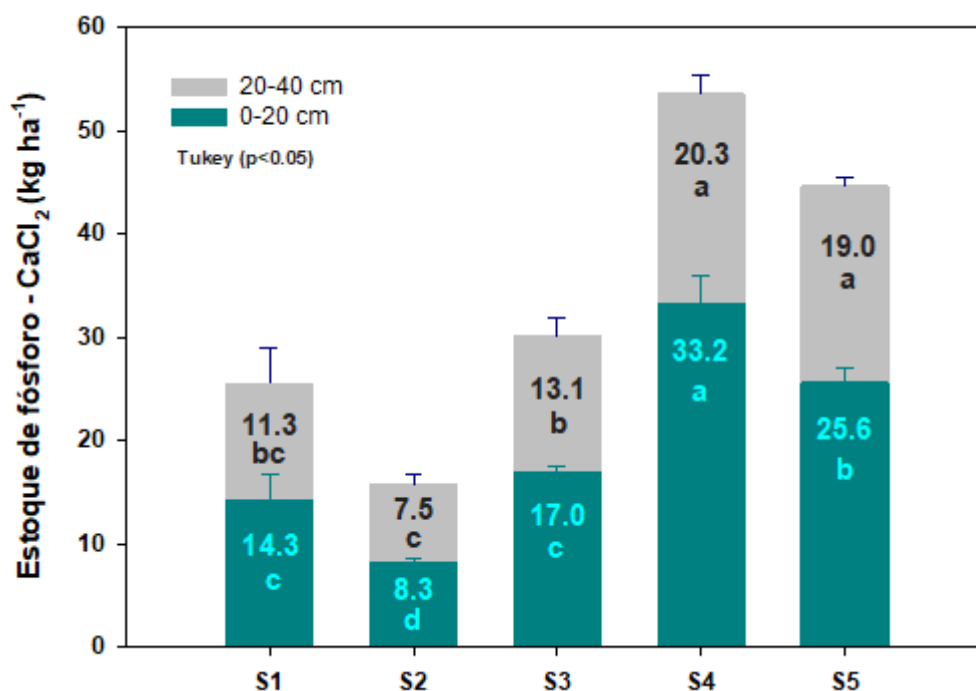


Figura 11- Estoque de fósforo extraído por CaCl<sub>2</sub> em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey (p<0,05) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. Fonte: Dados originais da pesquisa

Verificou-se que na profundidade de 0-0,2 m o estoque de P extraído por Mehlich-1 foi maior no S5, diferenciando dos demais. Observou-se também que todos os sistemas integrados de produção (S2, S3, S4 e S5) diferenciaram-se estatisticamente em relação ao sistema convencional S1. Na profundidade de 0,2-0,4 m, os sistemas S5 e S2 apresentaram maior estoque de P, diferenciando dos demais (Figura 12).

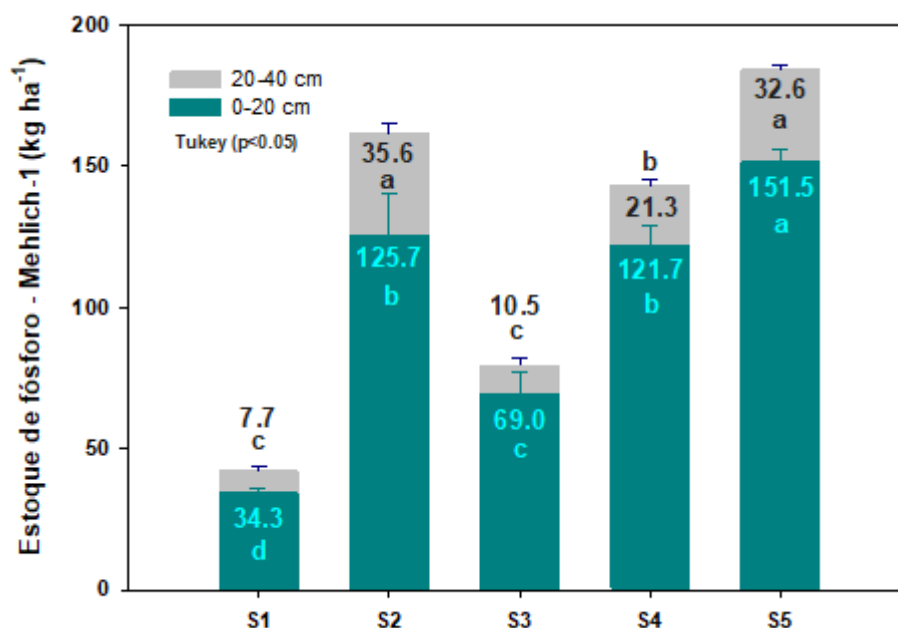


Figura 12 - Estoque de fósforo extraído por Mehlich-1 em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si.

Fonte: Dados originais da pesquisa

Verificou-se na camada de 0-0,2 m que todos os sistemas integrados de produção (S2, S3, S4 e S5) apresentaram maior estoque de fósforo inorgânico, diferenciando-se estatisticamente em relação ao sistema convencional S1. Já na profundidade de 0,2-0,4 m não ocorreram diferenças significativas entre os sistemas analisados (Figura 13). Na média, ocorreu um aumento de 241% do estoque de fósforo inorgânico em relação ao monocultivo de arroz sem pecuária na camada de 0-0,2 m.

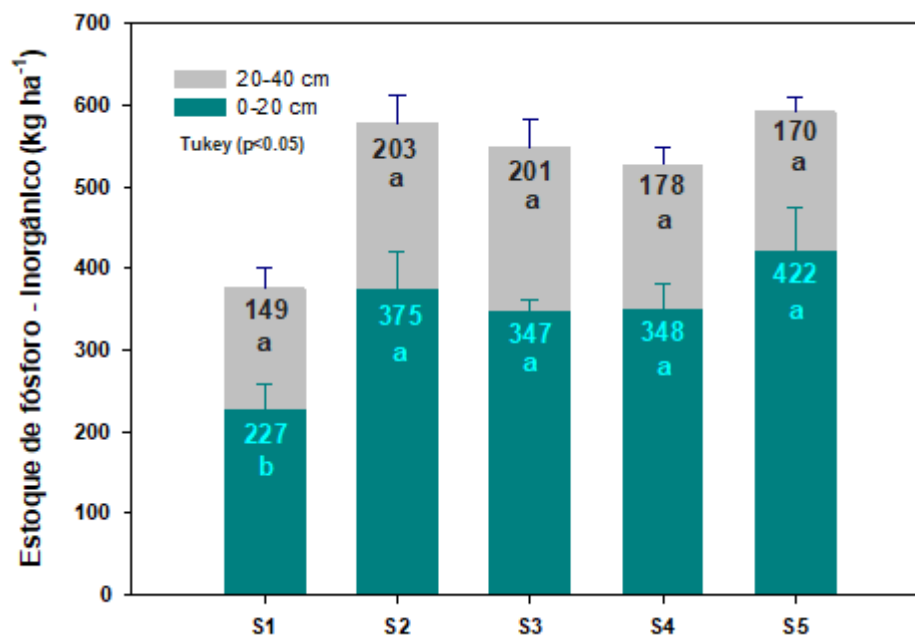


Figura 13 - Estoque de fósforo inorgânico em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. Fonte: Dados originais da pesquisa

Na avaliação do estoque de P orgânico, constatou-se que, na profundidade de 0-0,2m, o sistema 4 apresentou maior estoque ( $1.176 \text{ kg ha}^{-1}$ ), diferindo significativamente do sistema convencional (S1). Já na camada de solo de 0,2-0,4 m foi o sistema 5 apresentou maior estoque de P orgânico ( $682 \text{ kg ha}^{-1}$ ), maior do que os sistemas S1, S3 e S4 (Figura 14).

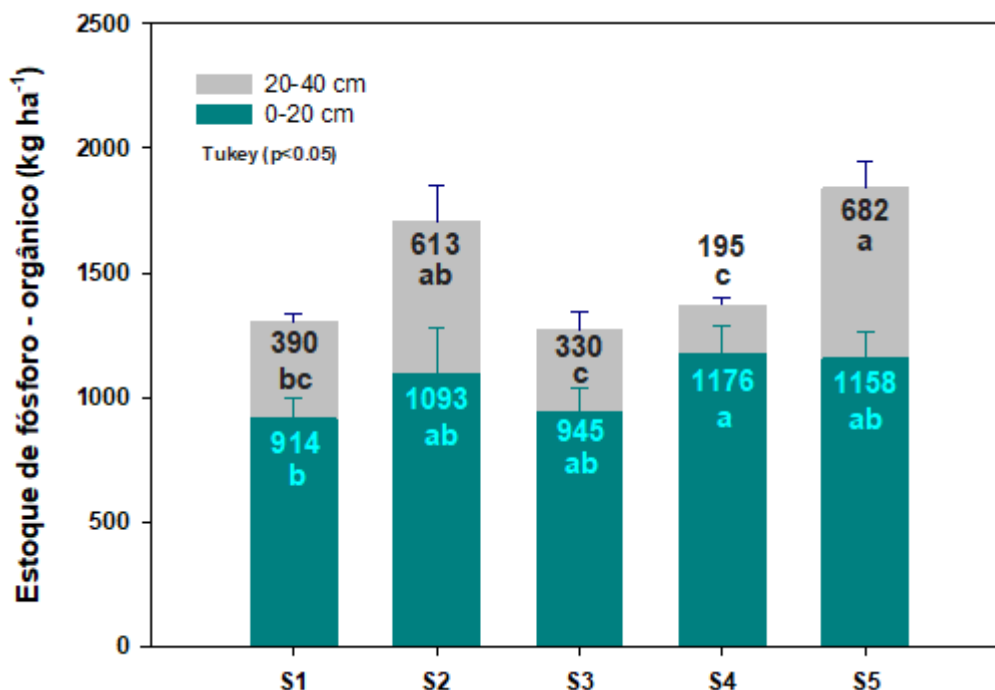


Figura 14 - Estoque de fósforo orgânico em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p<0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. Fonte: Dados originais da pesquisa

Na profundidade de 0-0,2 m, o sistema 3 apresentou o maior estoque de P-HCl, atingindo  $29,8 \text{ kg ha}^{-1}$ , superando os demais sistemas. Na profundidade de 0,2-0,4 m, o maior estoque de P-HCl foram os sistemas 2, 3, e 5, que apresentaram  $3,6$ ;  $3,6$  e  $2,9 \text{ kg há}^{-1}$ , diferindo dos sistemas 1 e 4 (Figura 15).

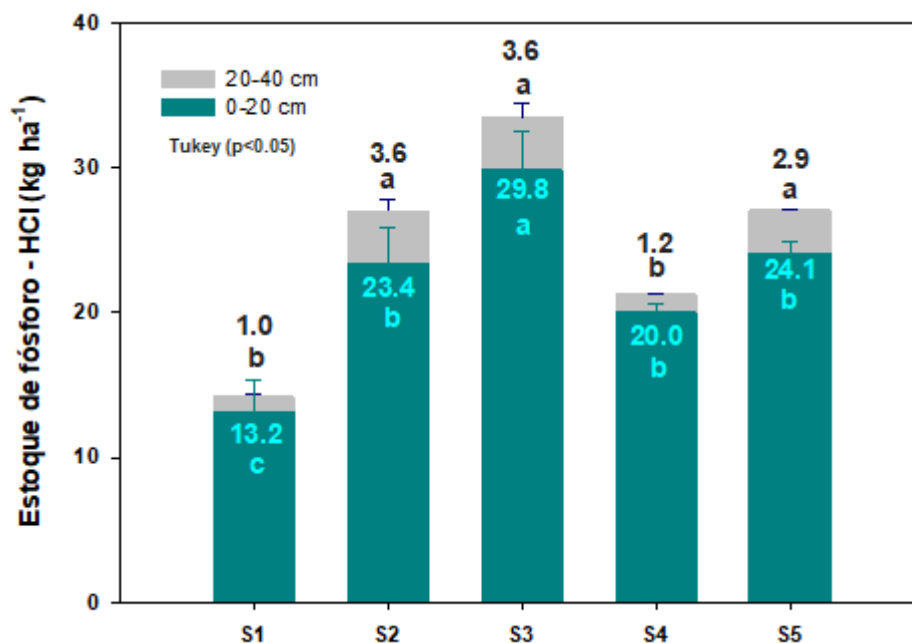


Figura 15 - Estoque de fósforo extraído por HCl em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p<0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si.

Fonte: Dados originais da pesquisa

Em relação ao fósforo total, observou-se que os sistemas (S2, S4 e S5), na profundidade de 0-0,2 m, apresentaram maiores estoques de P total ( $1.781 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $1.700 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $1.625 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente), superando o sistema convencional (S1). Já na profundidade de 0,2- 0,4 m, os sistemas (S2 e S5) apresentaram maior estoque de P total, ( $863 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $907 \text{ kg ha}^{-1}$ ), respectivamente, em comparação com os demais sistemas (Figura 16).



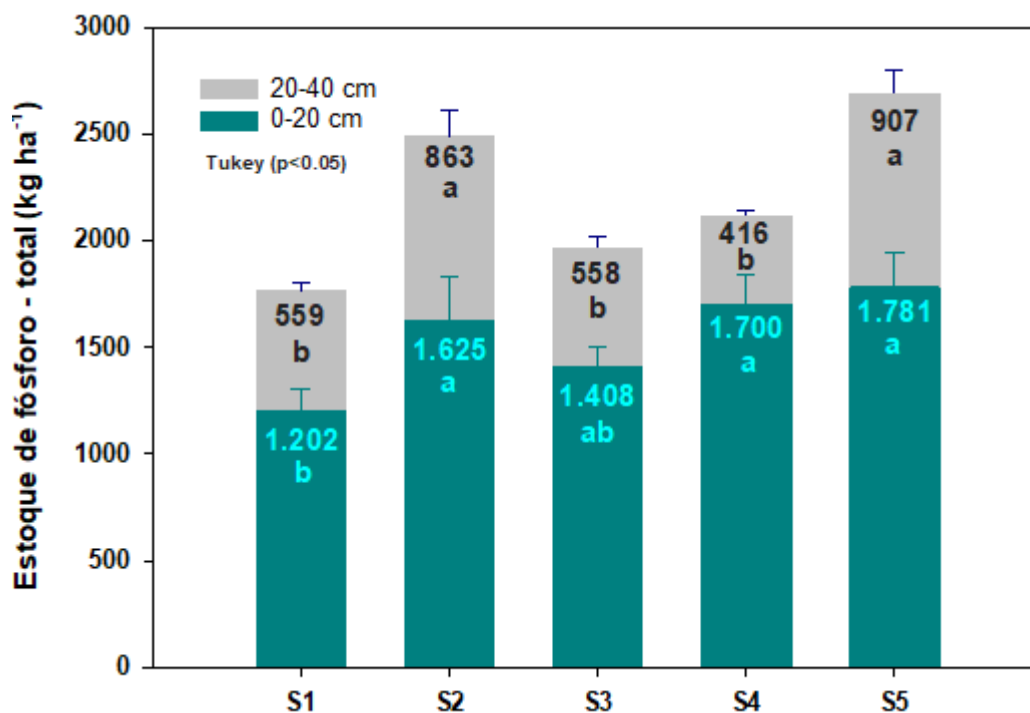


Figura 16 - Estoque de fósforo total em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. Fonte: Dados originais da pesquisa

Observou-se o maior estoque de P pouco lábil no sistema 5 em comparação ao sistema 1. Na fração moderadamente lábil, os sistemas 2 e 5 demonstraram maior estoque de P e superior ao S1. E em relação a fração lábil do fósforo, verificou-se que todos os sistemas com adição de integração lavoura e pecuária avaliados (S2, S3, S4 e S5) foram maiores em relação ao sistema 1, sendo que o S5 apresentou maior estoque, diferindo dos demais (Figura 17).

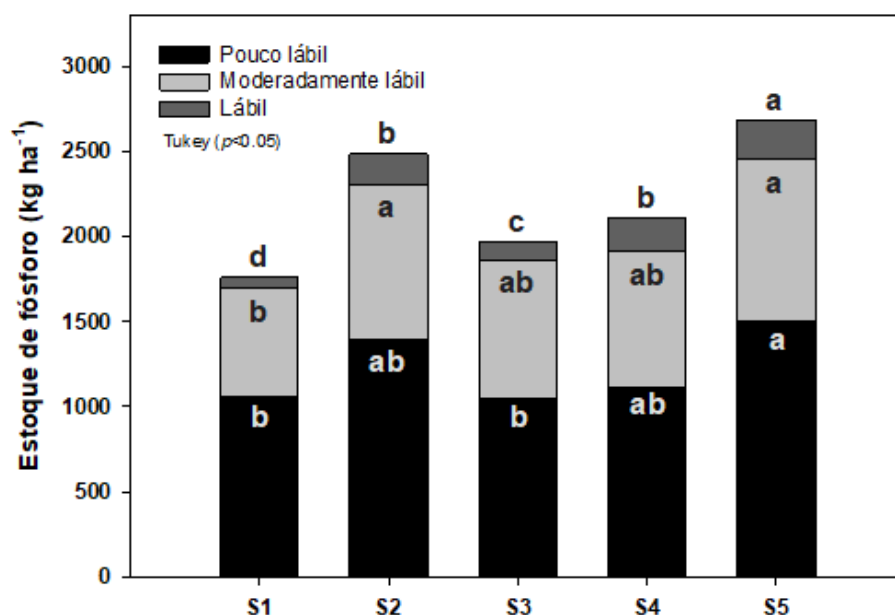


Figura 17- Estoque de fósforo lábil, moderadamente lábil e pouco lábil em Planossolo sob diferentes sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas nas camadas de 0-0,4 m. Fazenda Corticeiras, Cristal-RS. Tukey ( $p < 0,05$ ) = médias seguidas de letras iguais não diferem entre si. Fonte: Dados originais da pesquisa

### 5.3.3 Correlação de Pearson e análise de componentes principais (PCA)

Na Figura 18 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre os estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz no período de 8 anos. De acordo com os resultados, é possível verificar que houve alta correlação positiva entre estoque de P total 0,2-0,4 m com o estoque de P orgânico 0,2-0,4 m ( $r=0,99$ ). Correlação alta e positiva foi verificada entre estoque de P extraído com Mehlich-1 0,2-0,4 m ( $r=0,75$ ) e de P extraído com Mehlich-1 0-0,2 m ( $r=0,54$ ), respectivamente.

Também foi verificada correlação alta e positiva entre o P total 0-0,2 m e P orgânico 0-0,2 m ( $r=0,94$ ), entre P total 0-0,2 m e os seguintes estoques: P inorgânico 0,2-0,4 m ( $r=0,86$ ), P extraído por Mehlich-1 0,2-0,4 m ( $r=0,75$ ) e P extraído por Mehlich-1 0-0,2 m ( $r=0,87$ ). Observou-se também a correlação alta e positiva entre estoque de P extraído com HCl 0,2-0,4 m e o estoque de P extraído com HCl 0-0,2 m ( $r=0,86$ ). Correlação mediana e positiva foi verificada entre P extraído com HCl 0,2-0,4 m e P inorgânico 0-0,2 m ( $r=0,56$ ). E correlação mediana e positiva foram verificadas entre P extraído com HCl 0-0,2 m e os estoques de P inorgânico 0,2-0,4 m ( $r=0,53$ ) e P inorgânico 0-0,2 m ( $r=0,64$ ).

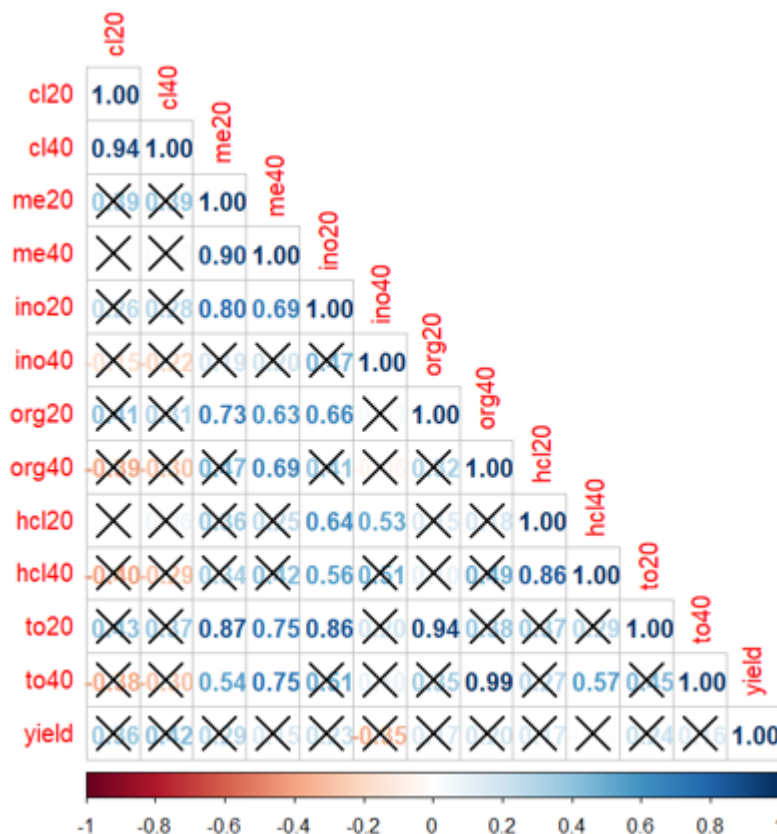


Figura 18 - Correlação de Pearson entre os estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz média no período de 8 anos. cl20: estoque de P extraído com  $\text{CaCl}_2$ , 0-0,2m e cl40, 0,2-0,4 m. me20: estoque de P extraído com Mehlich-1, 0-0,2 m e me40, 0,2-0,4 m. ino20: estoque de P inorgânico, 0-0,2 m e ino40, 0,2-0,4 m. org20: estoque de P orgânico, 0-0,2 m e org40, 0,2-0,4 m. hcl20: estoque de P extraído com HCl, 0-0,2 m e hcl40, 0,2-0,4 m. to20: estoque de P total, 0-0,2 m e to40, 0,2-0,4 m. Yield: produtividade média de arroz irrigado nos 8 anos de condução do experimento.

Fonte: Dados originais da pesquisa

Para o estoque de P orgânico 0,2-0,4 m, correlação mediana e positiva com o estoque de P extraído com Mehlich-1 0,2-0,4 m ( $r=0,69$ ). O estoque de P orgânico 0-0,2 m apresentou correlações medianas e altas, ambas positivas com os estoques: P inorgânico 0-0,2 m ( $r=0,66$ ), P extraído por Mehlich-1 0,2-0,4 m ( $r=0,63$ ) e P extraído por Mehlich-1 0-0,2 m ( $r=0,73$ ). O estoque de P inorgânico 0-0,2 m apresentou correlação positiva e mediana com o P extraído por Mehlich-1 0,2-0,4 m ( $r=0,69$ ) e correlação alta e positiva com o P extraído por Mehlich-1 0-0,2 m ( $r=0,80$ ).

Correlação alta e positiva foi encontrada entre estoque de P extraído por Mehlich-1 0,2-0,4 m e estoque de P extraído por Mehlich-1 0-0,2 m ( $r=0,90$ ). Para o estoque de P extraído com  $\text{CaCl}_2$  0,2-0,4 m, observou-se correlação alta e positiva com P extraído com  $\text{CaCl}_2$  0-0,2 m ( $r=0,94$ ), demonstrando que o aumento do P na

camada mais profunda do solo consequentemente terá um aumento no teor da camada superficial do solo.

Na figura 19 é apresentada a análise dos componentes principais (PCA) dos estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz média no período de 8 anos. Observou-se que PC1 e PC2 são responsáveis por 67,8% das variações observadas. Observou-se um nítido agrupamento dos diferentes sistemas identificados pelas elipses, sem sobreposição dos sistemas (Figura 14). O vetor *yield* relacionado a média de produtividade de arroz ao longo dos 8 anos teve tendência de direcionamento ao sistema 5. Nesse mesmo sistema observou-se também o direcionamento dos vetores de estoques de P-mehlich-1, P-total e P-orgânico na camada de 0-0,2 m.

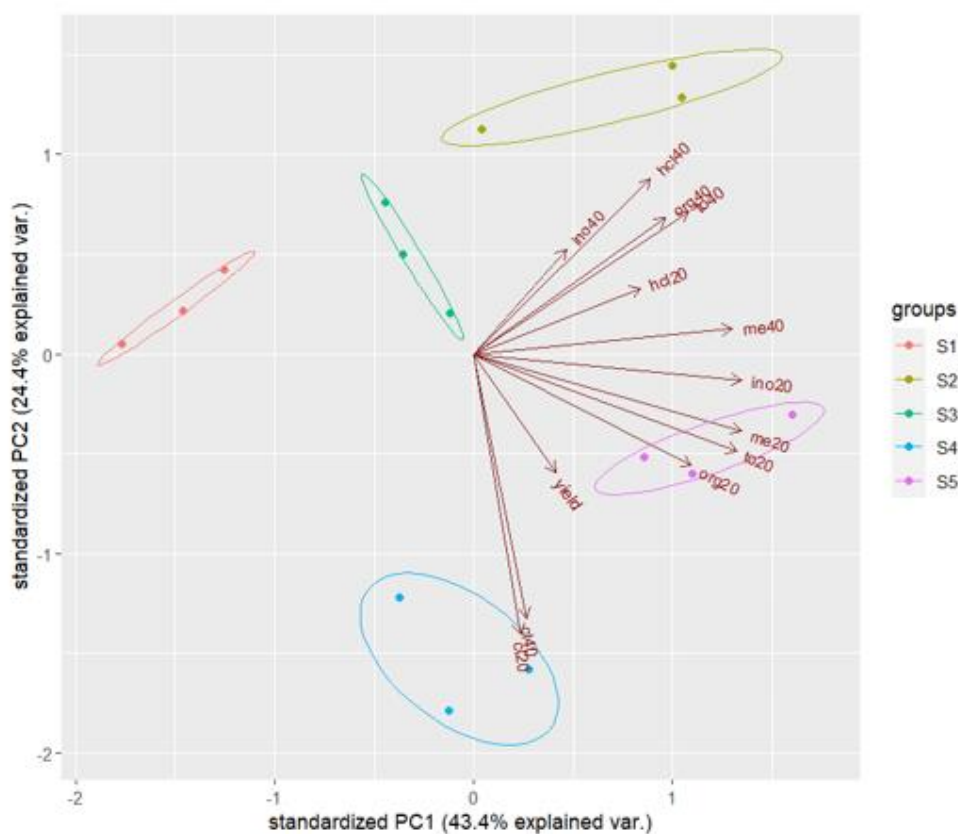


Figura 19- Análises de componentes principais dos estoques de frações de fósforo nas camadas e produtividade média de grãos de arroz média no período de 8 anos: estoque de P extraído com  $\text{CaCl}_2$ , 0-20cm e Cl40, 20-40cm. me20: estoque de P extraído com mehlich-1, 0-20cm e me40, 20-40cm. ino20: estoque de P inorgânico, 0-20cm e ino40, 20-40cm. org20: estoque de P orgânico, 0-20cm e org40, 20-40cm. hcl20: estoque de P extraído com HCl, 0-20cm e hcl40, 20-40cm. to20: estoque de P total, 0-20cm e to40, 20-40cm. Yield: produtividade média de arroz irrigado nos 8 anos de condução do experimento.

Fonte: Dados originais da pesquisa

Diversas ações estão envolvidas em sistemas de integração lavoura-pecuária, podendo envolver plantio direto, rotação de culturas, uso de pastagens e a inserção de animais. Todos esses fatores tornam as atividades produtivas (lavoura/pecuária) mais complexas, visto que alteram os processos biológicos no solo com reflexo sobre a disponibilidade de nutrientes, produtividade das cultivares disponíveis ao pastejo, entre outros.

Tratando especificamente do fósforo, as formas em que é encontrado no solo podem ser fragmentadas em: orgânica (Po) e inorgânicas (Pi), diferindo entre si quanto ao grau de estabilidade ou solubilidade e, portanto, apresentam disponibilidade distinta para as plantas (SOUZA et al., 2007). O Pi pode ser encontrado nas formas de solução (P-solução), precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, compondo a fração lábil de P no solo (P lábil). A fração não-lábil de P está relacionada aos compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável) e encontra-se protegida pelos micros agregados do solo (NOVAIS e SMYTH, 1999). Torna-se importante enfatizar que os processos biológicos podem influir fortemente sobre a distribuição de P no solo, de maneira que regulam a dinâmica e a distribuição de formas lábeis de P no solo e que a reciclagem da forma orgânica é uma importante fonte de P disponível às plantas (ADEPETU e COREY, 1976).

Ficou evidenciado no presente estudo que os SIPAs influenciaram as frações de P no solo, sendo que, para a maioria das frações de P avaliadas, o sistema que utilizou o monocultivo do arroz (S1) apresentou os menores teores em todo o perfil de solo analisado. Isso indica que práticas como o revolvimento do solo influenciam negativamente atributos químicos. Em contrapartida, os demais sistemas avaliados, principalmente aqueles envolvendo plantio direto associado à maior diversidade de atividades (rotação de culturas/pastagens/animais) – sistemas 4 e 5), apresentaram resultados superiores para as frações de P-solúvel, P-disponível, P-inorgânico, P-orgânico, P-HCl e P-total. Ressalta-se que as diferenças maiores entre esses sistemas foram verificadas na camada mais superficial do solo. Além disso, podemos ressaltar a importância da adubação de correção do P, para acima dos níveis críticos e, a adubação de reposição que levou em consideração, tanto as pastagens (inverno), como também, a cultura de produção de grãos (verão), de forma a gerar um balanço positivo de P, conforme mostrado na tabela 4, onde verificou-se maiores valores de P, nos sistemas 4 e 5, com menor frequência do cultivo de grãos e maior período das pastagens e dos animais em pastejo moderado.

Diversos fatores estão associados com tais resultados, como a natureza e dinâmica da matéria orgânica e a ciclagem de P, que varia em função do manejo do solo. Portanto as práticas de cultivo alteram o comportamento da matéria orgânica, tendo grande impacto sobre a distribuição nas formas de P no solo (TURRIÓN et al., 2000). Guerra e Fonseca (2022) observaram aumento das formas lábeis de P com o aumento do carbono orgânico total. Os autores justificaram tal resultado pelo aumento da matéria orgânica no solo.

Além disso, é importante considerar a massa microbiana envolvida nos processos. A fração viva da  $M_o$  é a biomassa microbiana, que é sensivelmente influenciada pelas condições impostas pelo meio (MOREIRA e SIQUEIRA, 2003). Em áreas com maior deposição de resíduos orgânicos no solo e com grande quantidade de raízes, ocorre aumento populacional e da atividade da biomassa microbiana (CATTELAN e VIDOR, 1990). A massa microbiana também representa o compartimento central do ciclo do C no solo e pode funcionar como compartimento de reserva de nutrientes, como o P orgânico, ou como catalisador na decomposição do C orgânico, aumentando assim os teores de P disponíveis, pois esses microrganismos vão atuar na mineralização desse nutriente, agindo na fração mineral, através da produção de ácidos orgânicos e inorgânicos e na fração orgânica através da ação direta de enzimas como por exemplo a fosfatases e fitases, que quebram a matéria orgânica no radical P, tornando disponível para absorção das plantas na solução do solo .

Portanto, a mineralização de P está diretamente relacionada a densidade e diversidade microbiana do solo, pois uma gama de microrganismos tem essas capacidades de sintetizarem esses ácidos e enzimas que atuam na sua disponibilização. Desta forma, a quantidade e a qualidade dos resíduos vegetais e excretas de animais depositados no solo podem alterar consideravelmente a população e diversidade microbiana e influenciarem na disponibilização de nutrientes (DENARDIN, 2021).

Avaliando a influência da distribuição de placas de esterco afetada pelo manejo da pastagem e sua relação com a variabilidade espacial de atributos de solo e da produtividade da soja em sistemas integrados, Silva (2015) inferiu que maiores concentrações de P e K em áreas em que foram implantadas mais placas de esterco, com aumentos expressivos de 36% no teor de P, com incremento de  $2,93 \text{ mg dm}^{-3}$ . Esse resultado confirma as teorias do aumento da ciclagem de nutrientes através das

excretas (TEIXEIRA et al., 2012). Esse resultado corrobora com as pesquisas de Dubeux Jr. et al. (2014), Schnyder et al. (2010) e Woodard et al. (2013), que também encontraram maiores concentrações desses nutrientes em áreas com maior deposição de placas de esterco.

Souza e Anghinoni (2006), avaliando a evolução do fósforo em sistema de integração agricultura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo, observaram que todas as formas e frações de fósforo se acumularam no solo com o tempo, independentemente da intensidade de pastejo, porém predominantemente como fósforo inorgânico moderadamente lábil, que atingiu 20 cm, e o orgânico, até 10 cm de profundidade. A fração lábil desse nutriente foi a primeira a aumentar, sendo a única afetada pelo pastejo, com menor aumento na maior pressão de pastejo.

Estudos demonstraram que os SIPAs aumentaram a quantidade de carbono orgânico (CO) (BARBOSA et al., 2015). Nesse sentido, Carmona et al. (2018) verificaram que o sistema que contou com 3,5 anos das áreas sendo pastejadas e, na sequência, o cultivo de arroz irrigado apresentou maior aumento do conteúdo de carbono orgânico total, passando de 8 para 14,0 g kg<sup>-1</sup> em 18 meses de implementação do sistema, e atingiu 15,5 g kg<sup>-1</sup> após 30 meses. Neste mesmo estudo, verificaram-se aumentos dos teores de P disponível nos SIPAs avaliados.

O P disponível no presente estudo teve um acréscimo de 16,15 mg dm<sup>-3</sup> de P no solo (média SIPAs), sendo que os sistemas contaram com adubações tanto nas culturas de verão como nas pastagens de inverno.

Por sua vez Oberson et al. (2005), observaram que os teores de P total e de P disponível foram maiores na camada superficial de solos submetidos ao plantio direto e cultivo convencional. Esses autores também observaram que em sistemas envolvendo plantio direto foram determinados teores superiores de P orgânico e P microbiano na camada superficial do solo, relativamente aos teores encontradas em solos sob preparo convencional.

Assim parte dos resultados encontrados nos sistemas 4 (arroz/capim sudão/soja / milho com azevém e leguminosas sob pastejo no período hibernal sob plantio direto) e 5: (arroz/campo nativo de sucessão por três anos com azevém e leguminosas sob pastejo no período hibernal sob plantio direto) provavelmente estejam associados à adoção de plantio direto e ao aporte de maior quantidade de CO no solo devido a maior quantidade de resíduos vegetais e animais aportados ao solo.

O aumento do teor de carbono orgânico no solo pela adoção dos SIPAs também contribui para o aumento de fósforo lábil. Esse fato ocorre, pois, os grupos orgânicos formam ligações com grupos de superfície de óxidos de ferro que estão entre os principais responsáveis pela adsorção específica de fósforo em solos tropicais e subtropicais. Embora em solos de terras baixas os teores de óxidos de ferro sejam menores do que Latossolos, por exemplo, a adsorção específica de fósforo também ocorre nos Planossolos.

A maior quantidade de resíduos vegetais também pode estar envolvida com os resultados obtidos no sistema 2 (arroz/arroz), para algumas frações de P orgânico e P total, que foi superior à de sistemas mais diversificados (Incluir os sistemas aqui entre parênteses). A explicação para esse comportamento pode estar relacionada ao fato de, no sistema 2, haver um grande aporte de resíduos do cultivo de arroz (palha), que são mantidos na superfície do solo. Segundo Mongkol e Anan (2006), a incorporação da palha de arroz logo após a colheita pode contribuir para a elevação da produtividade, em virtude do aumento dos teores de N, P e K do solo. Além disso, deve-se considerar o resíduo das pastagens presente também neste sistema. Em estudo realizado por Carmona et al. (2018), verificou-se que o azevém pastejado atingiu expressiva produtividade de biomassa, atingindo valores superiores a 10 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca. Segundo esses autores, isso se deve ao pastejo, que estimula o crescimento radicular das espécies forrageiras, além da biomassa da parte aérea.

O sistema 3, apesar de contemplar, também, rotação de cultura, pastagens e animais, apresentou menores teores de P em relação ao sistema 2 (arroz/arroz). Este comportamento pode estar relacionado à possível limitação de raízes do sistema 3, devido ao cultivo de soja. Carmona et al. (2018), em pesquisa desenvolvida no mesmo experimento, verificaram, em sistema que contava com azevém pastejado / soja / azevém pastejado / arroz, aumento na resistência à penetração na camada de 15-30 cm. Os autores justificaram esse efeito ao limitado desenvolvimento radicular decorrente da maior frequência de cultivo da soja. Isso porque essa cultura possui sistema radicular pouco agressivo e em menor profundidade sobre o solo e os resíduos são de fácil decomposição.

Além disso, outro fator que pode auxiliar a explicar os resultados obtidos é a produtividade das culturas e sua capacidade de aportar carbono ao solo. A soja produziu em torno de 3 a 3,5 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto o arroz atingiu produtividades variando de 10 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>. Portanto a capacidade de aportar carbono é menor na cultura da



soja. Pelo índice de colheita aproximado 50%, o cultivo da soja tem capacidade de aportar resíduos 70% inferior em comparação com o arroz irrigado. E ainda se deve considerar que os resíduos vegetais da soja têm baixa relação C:N, o que acelera a mineralização dos resíduos da leguminosa pós-colheita.

Analisando o comportamento das frações de P ao longo das profundidades avaliadas, percebe-se que o sistema 5 (arroz/pastagem/pastagem/pastagem), de maneira geral, manteve maiores teores de P em profundidade em relação aos demais sistemas. Esse comportamento pode estar associado à presença maior de raízes na área. Segundo Carvalho (2010), a presença de pastagens no sistema produtivo é capaz de ampliar a absorção dos nutrientes no solo, em virtude da maior quantidade de raízes, além de diminuir a incidência de erosão e compactação do solo, interferindo positivamente nos aspectos de fertilidade deste. Em estudo realizado por Possamai et al. (2020), que avaliaram atributos químicos de solos em SIPAs (soja, milho e/ou feijão-pastagem de verão-mata nativa), verificaram-se valores maiores de P na camada de 0,05-0,10 m do solo sob SIPAS em relação à pastagem de verão. Os autores justificaram esse resultado ao cultivo mínimo e ao maior desenvolvimento radicular promovido pelo este consórcio de plantas, que pode ter facilitado a incorporação de parte dos nutrientes em profundidade. Assim, como o sistema 5 contou com maior diversidade de espécies forrageiras e animais ao longo dos anos de avaliação, possivelmente esses fatores impactaram de maneira substancial sua resposta.

O pastejo, a urina e o esterco dos animais possivelmente estejam entre os principais responsáveis pelos impactos positivos do SIPA sobre as frações de P do solo. O pastoreio contribui para o crescimento das raízes (SOUZA et al., 2009), que pode promover a formação de macro e bioporos, favorecendo a migração de P para camadas mais profundas do solo. Por outro lado, sem pastoreio, os canais que são deixados ano após ano, podem também favorecer o crescimento mais profundo de raízes.

Portanto, o P pode migrar pelos mesmos canais quando ocorre o pastejo. Além disso, a absorção de P pelas raízes nas camadas mais profundas pode favorecer a biomineralização do P, promovendo aumentos em seu teor de. A influência das raízes na mineralização de P e seu aumento na disponibilidade de P foi observada por Ciotta e colaboradores (2002), que também reconheceram a importância das raízes na redistribuição de P nas camadas mais profundas. Conforme afirmado por O'Halloran

et al. (1987), um rearranjo das formas de P ocorre nos solos sob plantio direto de longa duração, alterando a distribuição de P e de raízes no perfil do solo. No sistema 5 com maiores teores e estoques de fósforo na maior parte das frações avaliadas, além dos fatores provocados pelas pastagens, há menor frequência temporal de culturas agrícolas que exportam significativamente mais fósforo do solo.

Denardin et al. (2018), afirmaram que sistemas de integração lavoura-pecuária, por contarem com o componente animal, atuam como catalisador dos processos, modificando e acelerando o fluxo de nutrientes pela ingestão de biomassa vegetal. Diversos estudos já comprovaram que os bovinos exportam baixas quantidades de nutrientes. Alves et al. (2021), relataram que nos sistemas de integração, do total das exportações de P, 95% saem do sistema via colheita de grãos e apenas 5% são exportados pela atividade pecuária. Desta forma, fica evidenciado que os animais aceleram o fluxo de ciclagem dos nutrientes através da ingestão de biomassa e pelo retorno de grande parte dos nutrientes para o solo, através da urina e do esterco (HAYNES e WILLIAMS, 1993).

Em pesquisa realizada por Carmona et al. (2018), os autores verificaram que os bovinos exportaram apenas 5,6 de N, 4,6 de  $P_2O_5$  e 0,5  $K_2O$  a cada 200 kg  $ha^{-1}$  de peso vivo produzido. Os autores salientaram, ainda, que a liberação dos nutrientes via dejetos é ainda mais rápida e uma parte deles pode ser novamente incorporada à pastagem e ingerida pelo animal, podendo retornar ao sistema no mesmo ciclo de pastejo (reciclagem).

As diferenças observadas referente aos estoques das frações do fósforo entre o sistema 1 e os demais sistemas com utilização de SIPA podem ser explicadas pelo balanço positivo de P, devido a adubação de correção para acima dos níveis críticos e, a adubação de reposição que levou em consideração, tanto as pastagens (inverno), como também, a cultura de produção de grãos (verão) e, também, pela recuperação da fertilidade do solo, devido à utilização do manejo conservacionista (plantio direto), e pelo manejo adequado das forrageiras e pastejo dos animais. A correta condução das pastagens como “lavoura de pastos” (uso de sementes de qualidade, escolha de cultivar adequada, época de semeadura, adubação de base, adubação de cobertura, entre outros) e o pastejo moderado proporcionam rápida recuperação da fertilidade química do solo (CARLOS, 2017; DENARDIN, 2017; CARMONA et al., 2018).

O aumento intermediário do estoque das diferentes frações do fósforo no sistema 3 pode ser explicado pela presença da cultura da soja em rotação, a qual

produz poucos resíduos e de rápida decomposição. A inserção do componente animal no sistema de produção pode alterar a dinâmica dos nutrientes e, conseqüentemente, a fertilidade do solo ao longo do tempo.

Segundo Carlos e colaboradores (2020), a adoção de SIPA aumentou significativamente os principais macronutrientes na solução do solo cultivado com arroz irrigado. Além desse benefício, as atividades enzimáticas, que são de grande importância na biogeoquímica e processos do solo, podem aumentar de 49 a 105% em sistemas sob SIPA comparado com o monocultivo de arroz, influenciando especialmente os principais macronutrientes essenciais, o funcionamento da comunidade microbiana do solo e a nutrição das plantas de arroz.

Em relação ao estoque de P Melhich-1, o S2 possui um estoque de 161 kg ha<sup>-1</sup> e o S1 42 kg ha<sup>-1</sup> na camada de 0-40 cm. Significa um aumento de 119 kg ha<sup>-1</sup> de P. Considerando a exportação de P pelo arroz de 24 kg ha<sup>-1</sup> para uma lavoura de 10 Mg ha<sup>-1</sup> e soja de 25 para uma lavoura de 3,6 Mg ha<sup>-1</sup>. Esse aumento de estoque de P após 8 anos de adoção de SIPA em terras baixas supriria a exportação de 4,8 ou 4,9 anos agrícolas (safras) de lavouras de arroz e soja, respectivamente, conforme produtividades descritas anteriormente.

#### **5.4 Conclusão**

Os sistemas integrados de pecuária de corte com arroz irrigado e outras culturas de grãos em rotação aumentam as frações e estoques lábeis, orgânicas e total de fósforo em Planossolo.

Os sistemas que envolviam maior diversidade de cultivos, presença dos animais em pastejo moderado por maior tempo e menor frequência das culturas de grãos, balanço positivo de P, devido as adubações realizadas para correção para acima dos níveis críticos e semeadura direta (S4 e S5) possuem maiores teores de P-disponível, P-inorgânico, P-orgânico e P-total. O aumento dos teores nas frações de fósforo é significativo nas camadas mais superficiais do solo, o que ressalta o comportamento de baixa mobilidade do nutriente em direção as camadas mais profundas do solo.

Em relação a labilidade todas as frações sofreram influência dos SIPAS destacando-se a fração lábil onde todos os sistemas avaliados (S2, S3, S4 e S5) foram maiores em relação ao sistema sem a presença dos animais (S1). Da mesma forma,

as frações de P analisadas, que de maneira geral apresentam influência dos SIPAS, tanto nas camadas mais superficiais como também em profundidade apresentando maiores estoques em relação ao (S1), sem a presença dos animais.

## 6 Considerações finais

As formas de K e P foram influenciadas pelo sistema de produção adotado. Visto que os sistemas com maior diversidade de culturas, maior tempo de pastejo moderado, menor mobilização do solo e menor frequência de cultivo de grãos apresentaram maiores concentrações para ambos os nutrientes quando comparados ao sistema menos diversificados ou com menor intensidade de uso do componente animal.

Ainda, é possível constatar que quando manejados com taxas de lotação animal adequadas, conforme a capacidade de suporte dos pastos, além controle de entrada e saída dos animais das áreas de pastejo, os SIPAS auxiliarão na estruturação do solo, sem comprometer sua fertilidade e compactação, uma vez que essas pastagens atuarão na proteção deste contra o pisoteio, bem como, seu sistema radicular auxilia na diminuição da erosão, e conseqüentemente, perda de nutrientes como o P e K que permanecem na camada mais superficial.

Tendo em vista que de forma respectiva os sistemas 5 e 4 mostraram-se mais eficientes em aumentar os teores e disponibilidades de K e P, além do estoque de P das diferentes frações e labilidade, dessa forma pode-se concluir que os sistemas integrados de produção agropecuária apresentaram-se mais vantajosos em relação aos sistemas de monocultivo no presente estudo, tornando-se uma alternativa viável para a minimização de perdas de nutrientes, e por conseqüência, melhor retenção dos nutrientes avaliados no solo.

## Referências

- ADEPETU, J.A.; COREY, R.B. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of Southern Nigeria. **Soil Sci.**, 122:159-164, 1976.
- ALMEIDA, Tauana Ferreira de. **Formas e balanço de potássio em Latossolo sob sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no sul do Brasil**. 2019. Dissertação de mestrado em ciência do solo do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grand do Sul. Disponível em: [Formas e balanço de potássio em Latossolo sob sistema integrado de produção agropecuária em plantio direto no sul do Brasil \(ufrgs.br\)](#) Acesso em: 25 de mai de 2024.
- ALVES, L. A.; AMBROSINI, V.G.; DENARDIN, L.G.O.; FLORES, J.P.M.; MARTINS, A.P.; FILIPPI, D.; BREMM, C.; CARVALHO, P.C.F.; FARIAS, G.D.; CIAMPITTI, I.A.; TIECHER T. Biological N<sub>2</sub> fixation by soybeans grown with or without liming on acid soils in a no-till integrated crop-livestock system. **Soil Till Res**, 209:104923, 2021.
- ANGHINONI, I. et al. Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária. **Synergismus Scientifica**, Pato Branco, v. 6, n. 2, 2011.
- ANGHINONI, I., CARVALHO, P. D. F., & COSTA, S. D. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropico brasileiro. **Tópicos em ciência do solo**, 8(2), 325-380. 2013.
- ARNUTI, F. **Ciclagem e balanço de nutrientes em sistema integrado de produção agrícola e pecuária com ovinos**. Tese (doutor em ciência do solo) do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018. Disponível em: [A Cidade Pálida : ação política empresarial-militar e construção de hegemonia durante a ditadura de Segurança Nacional em Rio Grande/RS \(1964-1975\) \(ufrgs.br\)](#) Acesso em: 25 de mai de 2024.
- ASSIS, J. Frações de fósforo no solo em sistema integrado de produção de grãos e ovinos de corte de longo prazo. Dissertação (Mestre em ciência do solo) do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2020. Disponível em: [A Cidade Pálida : ação política empresarial-militar e construção de hegemonia durante a ditadura de Segurança Nacional em Rio Grande/RS \(1964-1975\) \(ufrgs.br\)](#) Acesso em: 25 de mai de 2024.
- ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. O.; NICHEL, G. H.; COSTA, S. E. V. G. A.; SILVA, R. A.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C.F.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutr. Cycl. Agroecosyst**, 108:21–33. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.088>
- BAI, J.; YE, X.; JIA, J.; ZHANG, G.; ZHAO, Q.; CUI, B.; LIU, X. Phosphorus sorption–desorption and effects of temperature, pH, and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. **Chemosphere**, 188:677-88, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.117>

BARBER, S. A. **Soil bioavailability: a mechanistic approach**. New York: J. Wiley, 1995. 414 p.

BARBOSA, N. C. et al. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 1, p. 87–95, 2015. DOI 10.14393/BJ-v31n1a2015-18196. Available from: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/18196>. Acesso em 25 de mai de 2024.

BATISTA, E. R.; ZANCHI, C. S.; FERREIRA, D. A.; SANTIAGO, F. D. A.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. D.; & CARNEIRO, M. C. (2018). Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. et al. ed. *Sistemas Integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: **Copiart**, 1, 71-90. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/29868> Acesso em 25 de mai de 2024.

BESOAIN, E. **Mineralogia de arcillas de suelos**. San José: Instituto Interamericano de Cooperacion para La Agricultura, 1985. 1205 p

BLEVINS, D.G. **Por que as plantas precisam de fósforo?** Informações agrônômicas, Piracicaba, n. 87, p. 4-5, 1999. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/1BEAD545821EB58683257B8D004BFA0E/\\$FILE/page4-5-87.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/1BEAD545821EB58683257B8D004BFA0E/$FILE/page4-5-87.pdf) Acesso em 25 de mai de 2024.

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavourapecuária no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 3, p. 1287-1306, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n3p1287>.

BOENI, M. et al. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha/IRGA, 2010. (Boletim técnico, 8). Disponível em: [Evolucao da fertilidade.pdf \(agrolink.com.br\)](#) Acesso em 25 mai de 2024.

BORKERT, C. M.; SFREDO, G. J.; SILVA, D. N. Calibração de potássio trocável para soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 12, p. 223-226, 1993. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100007>

BORIN, J. B. M. Atributos de qualidade do solo e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre. 130p. 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/114911> Acesso em 25 de mai 2024.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do sul do Brasil estimada por métodos multielementares. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 34(5), 1753–1761. 2010. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500027>

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J.A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Sci. Agr.** 10:305-312, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v10i4.14728>

BOSSOLANI, J.W.; CRUSCIOL, C.A.C.; PORTUGAL, JR.; MORETTI, L.G.; GARCIA, A.; RODRIGUES, V.A.; FONSECA, M.C.; BERNART, L.; VILELA, R.G.; MENDONÇA, L.P.; REIS, A.R. Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **Eur J Agron.** 128:126308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308>

BRAZ, A. J. B. P. et al. Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 83-87, 2004. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/2315>. Acesso em: 25 maio. 2024.

BRAZILIAN RICE YEARBOOK. **Anuário Brasileiro do Arroz**. 2022. / Benno Bernardo Kist... [et al.]. – Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2022. 88 p. Disponível em: [https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wp-content/uploads/2022/07/ARROZ\\_2022.pdf](https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wp-content/uploads/2022/07/ARROZ_2022.pdf). Acesso em 25 de mai de 2024.

BRITZKE, D. **Mineralogia e liberação de potássio em solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010. Disponível em: [BRITZKE, DARINES.pdf \(ufsm.br\)](#) Acesso em 25 de maio de 2024.

BRITZKE, D.; SILVA, L. S.; MORTELE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; BORTOLUZZI, E. C. A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. **J Soils Sediments**. 12:185–197, 2012. Disponível em: DOI:10.1007/s11368-011-0431-7

BROESHART, H.; HAUNOLD, E.; FRIEND, M. The effect waten conditions and and oxidation-reduction status of rice soils on the availability of soil and fertilizer phosphate. **Pl. Soil**, 23:305.313, 1965.

CAREY, P. L.; METHERELL, A. K. Rates of release of non-exchangeable potassium in New Zealand soils measured by a modified sodium tetraphenyl-boron method. **New Zeal J Agr Res**, 46:185–197, 2003. DOI:10.1080/00288233.2003.9513546

CARLOS, F. S. **Índices de qualidade do solo em sistemas de produção de arroz irrigado**. 2017. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

CARLOS, F.S.; DENARDIN, L. G. O.; MARTINS, A. P, et al. Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degrad Dev**, 1–11, 2020. Disponível em: [Índices de qualidade do solo em sistemas de produção de arroz irrigado \(ufrgs.br\)](#) Acesso em 24 de mai 2024.

CARMONA, F. C.; DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I. **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas**. In: Boletim Técnico-Porto Alegre, RS, 2018. ISBN: 978-85-67302-72-0



CARVALHO, J. S.; KUNDE, R. J.; STÖCKER, C. M.; LIMA, A. C. R.; SILVA, J. L. S. Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1131-1139, 2016. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150240/1/Evolucao-de-atributos-fisicos-quimicos.pdf> Acesso em 25 de mai de 2024.

CARVALHO, P. C. F. et al. A integração soja-pecuária no sul do Brasil. In: MARTINS, A. P. et al. (Ed.). Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil. Porto Alegre: UFRGS, 2015. p. 21-22. DOI:10.13140/RG.2.1.3576.3922

CARVALHO, P. C. F.; MORAES, A. Integration of grasslands within crop systems in South America. In: LEMAIRE, G.; HODGSON, J.; CHABBI, A. (Ed.). Grasslands productivity and ecosystems services. **Oxfordshire**: CABI, 2011. p. 219-226. <https://doi.org/10.1079/9781845938093.021>

CARVALHO, P.C.F. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Dordrecht, v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010. DOI:10.1007/s10705-010-9360-x

CASSMAN, K.G.; S.K. DE DATTA; D.C. OLK; J.M. ALCANTARA; M.I. SAMSON, et al. **Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigated rice systems in the tropics**. In: Lal R, Stewart BA, editors. Soil management: experimental basis for sustainability and environmental quality. Boca Raton: Lewis/CRC. 1995. p. 181–222. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-0047-9\\_254](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0047-9_254)

CASTILHOS, R. M. V. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 977- 982, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400015>

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

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 979-983, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000600010>

CATTELAN, A.J.; VIDOR, C. Sistemas de cultura e a população microbiana no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 14:125132, 1990.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de MO, P, K, e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.394-400, 2007. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200015> Acesso em 25 de mai de 2024.

CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.

CHAUHAN, B. S. Weed ecology and weed management strategies for dry-seeded rice in Asia. **Weed Technology**, v. 26, p. 1-13, 2012. doi:10.1614/WT-D-11-00105.1

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 26, 1055–1064, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400023>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 12º Levantamento - Safra 2021/22. **Boletim da safra de grãos, 2022**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 12º Levantamento - Safra 2021/22. Boletim da safra de grãos, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em 09 de jun 2023.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SALTON, J. C.; REIS, C. E. S. D. Eficiência de soluções densas no fracionamento físico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, 490-497, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140447>

CONCENÇO, G.; AGUILA, L.; PARFITT, J. M. B., & SCIVITTARO, W. B. Manejo da soja em terras baixas para alta produtividade. Circular Técnica 207, **Embrapa**, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218062/1/CIRCULAR-207.pdf> Acesso em 25 de mai 2024.

CONDRON, L.M.; TURNER, B.L.; CADE-MENUN, B.J. **Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus**. In: Sims JT, Sharpley AN, editors. Phosphorus, agriculture and the environment. Monograph no 46. Madison: Soil Science Society of America; 2005. p. 87–121.

COSTA, Danyllo Denner de Almeida. **Fracionamento do fósforo no solo em função dos sistemas de manejo**. 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

COSTA, S. E. V. G. A. **Distribuição do fósforo de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo**. 2008. Dissertação de mestrado (ciências do solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufrgs.br/handle/123456789/25021> Acesso em 25 de mai 2024.

COSTA, S. E. V. G.A., SOUZA, E. D., ANGHINONI, I., CARVALHO, P. C. F., MARTINS, A. P., KUNRATH, T. R., ET AL. Impact of an integrated no-till crop–livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agric. Ecosyst Environ**. 190, 43–51, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.12.001.

CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11ª ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul,

376 p., 2016. Disponível em: [https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual\\_de\\_Calagem\\_e\\_Aduacao\\_para\\_os\\_Estados\\_do\\_RS\\_e\\_de\\_SC-2016.pdf](https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Aduacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf) Acesso em 25 de mai 2024.

DUBEUX Jr. et al. Stocking method, animal behavior, and soil nutrient redistribution: How are they linked? *Crop Science*, v. 54, p. 2341-2350, 2014.

DEISS L, MORAES A, DIECKOW J, FRANZLUEBBERS AJ, GATIBONI LC, SASSAKI LG, CARVALHO PCF. Soil phosphorus compounds in integrated crop-livestock systems of subtropical Brazil. *Geoderma*.274:88-96, 2016. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210125> Acesso em 25 de mai 2024.

DENARDIN, L. G. O **Resposta do solo e das culturas agrícolas à adubação em sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/233176> Acesso em 25 de mai 2024.

DENARDIN, L. G. O. **Variabilidade espaço-temporal de atributos do solo e resposta do arroz irrigado à adubação em sistemas integrados de produção agropecuária**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

DENARDIN, L. G. O.; CARMONA, F. C.; FREITAS, T. F. S.; GOMES, M. V.; CARLOS, F. S.; MARCOLIN, E.; MARTINS, A.P.; CAMARGO, F. A. O.; ANGHINONI, I. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. *Soil & Tillage Research*, v. 186, p. 64-69, 2019. DOI:10.1016/j.still.2018.10.006

DENARDIN, Luiz Gustavo de Oliveira. **Variabilidade espaço-temporal de atributos do solo e resposta do arroz irrigado à adubação em sistemas integrados de produção agropecuária**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

DOBERMANN, A.; D. DAWE, R.P. ROETTER, AND K.G. CASSMAN. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment. *Agron J*. 92:633–643. 2000.

DOS SANTOS, E.; MARTINS, K. G.; MARQUES, R. Mineralização do nitrogênio no solo sob Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, em Paranaguá, PR-Brasil. *Nativa*, v. 8, n. 4, p. 558-566, 2020. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i4.9971>

DUBEUX Jr. et al. Stocking method, animal behavior, and soil nutrient redistribution: How are they linked? *Crop Science*, v. 54, p. 2341-2350, 2014. DOI:10.2135/cropsci2014.01.0076

ELY, M. F., BARBOSA, G. V.; FLORES, J. P. M.; MARTINS, A. P.; TIETZ, R. S.; DENARDIN, L. G.; & DA TRINDADE, J. K. (2019). Desenvolvimento de planta e produtividade de grãos de arroz irrigado na integração lavoura-pecuária com

adubação de sistemas. In **Anais do XI Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, Balneário Camboriú.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde** / Luiz Adriano Maia Cordeiro ... [et al.], editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2016. 393 p. Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manejo da Soja em Terras Baixas para Alta Produtividade**. CIRCULAR TECNICA 207. NOV. 2020. PELOTAS-RS. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126892> Acesso em 25 de mai 2024.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção 03: Sistema de Cultivo de Arroz Irrigado no Brasil**. Ariano Martins de Magalhães, Júnior, Algenor da Silva Gomes, Alberto Baêta dos Santos. -- Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004, 270 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja em números (safra 2020/21)**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em 8 de jun 2023.

EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P.; OLIVEIRA, A. D. Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul. Brasília, DF: **Embrapa**. 2017.

ETENE - Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste. **Arroz: produção e mercado**. Caderno setorial, 6,n.156,2021. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/698/1/2021\\_CDS\\_156.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/698/1/2021_CDS_156.pdf) Acesso em: 28 de mai. de 2023

FAO: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Mordor Intelligence. 2019**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-rice>>. Acesso em: 28 de mai. de 2023

FEPAGRO – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Reunião Técnica Anual do Milho**, 54. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO SORGO, 37, 2009, Pelotas. Atas e Resumos, Veranópolis: FEPAGRO, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/40041/1/ata.pdf> Acesso em: 28 de mai. de 2023

FERREIRA EVO, ANGHINONI I, ANDRIGHETTI MH, MARTINS AP, CARVALHO PCF. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-

pecuária sob semeadura direta. **Rev Bras Cienc Solo**.35:161-9, 2011. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210125>

FIORIM, J. E. **Ciclagem de nutrientes e produtividade de grãos em sucessões de culturas sob o sistema de plantio direto**. 2008. 123f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FLINN, J.C.; DE DATTA, S. K. 1984. Trends in irrigated-rice yields under intensive cropping at Philippine research stations. **Field Crop Res**. 9:1–15.

FLORES, J. P. M. **Formas e balanço de potássio no solo em sistemas integrados de produção agropecuária de terras baixas e terras altas no sul do Brasil**. Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Mestre em Ciência do Solos. 2020. 58p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/233142> Acesso em 25 de mai de 2024.

FLORES, J. P. M.; ALVES, L. A.; DENARDIN, L. G. O.; MARTINS, A. P.; BORTOLUZZI, E. C.; INDA, A. V.; CARVALHO, P. C. F.; TIECHER, T. Soil K forms and K budget in integrated crop-livestock systems in subtropical paddy fields. **Soil & Tillage Research**, 213:105070, 2021. DOI:10.1016/j.still.2021.105070

FORTES, Magali de Ávila. Fósforo em Planossolo cultivado com culturas de sequeiro e sua disponibilidade para o arroz subsequente em Plantio Direto. 2009. 130f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. <http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/123456789/2455>

GALON, L.; AGOSTINETTO, D.; MORAES, P.V.D; TIRONI, S.P.; DAL MAGRO, T. Estimativa das perdas de produtividade de grãos em Cultivares de arroz (*oryza sativa*) pela interferência do Capim-arroz (*Echinochloa* spp.). **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 697-707, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000400006>

GAMA-RODRIGUES, E. F. da et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 893-901, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600007>

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

GATIBONI, L. C.; CONDRON, L. M. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. **Geoderma**, 385: 114893, 2021.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de P acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-699, 2007.

GATIBONI, L.C.; SANTOS, D.R. dos.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Phosphorus Forms and Availability Assessed by <sup>31</sup>P-NMR in Successive Cropped Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.



GHIZZI, Lucas Ghedin. **Ciclagem de nutrientes, produção de milho em sistema de integração lavoura-pecuária subsequente ao consórcio de pastagens hibernais**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1523> Acesso em 25 de mai de 2024.

GLÉRIA, A. A.; SILVA, R. M.; SANTOS, A. P. P.; SANTOS, K. J. G.; & PAIM, T. P. (2017). Produção de bovinos de corte em sistemas de integração lavoura pecuária. **Archivos de zootecnia**, 66(253), 141-150. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v66i253.2138>

GOLESTANIFARD, A., SANTNER, J., ARYAN, A., KAUL, H., WEMZEL, W.W., Potassium fixation in northern Iranian paddy soils. **Geoderma**, 375. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114475>

GONÇALVES, A. S. F.; MARTINS, V.; LEITE, M. C. A.; GUILHERME, L. R. G.; MARCHI, G.; DE SOUZA MARTINS, É. **Fracionamento de potássio em solos adubados com fontes alternativas**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113792/1/34261.pdf> Acesso em 25 de mai de 2024.

GOODFRAY, H.C.J.; J.R. BEDDINGTON, I.R. CRUTE, L. HADDAD, D. LAWRENCE, J.F. MUIR, J. PRETTY, S. ROBINSON, S.M. THOMAS, C. TOULMIN, Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**. 327, 812–818, 2010. DOI: 10.1126/science.1185383

GPSIPA - GRUPO DE PESQUISA EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPEUÁRIA. **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil** / Grupo de Pesquisa em Sistema Integrado de Produção Agropecuária. Porto Alegre, 2015. 102 p. ISBN: 978-85-67302-11-9

GUERRA, K.C.S.; FONSECA, A.F. Phosphorus fractions and their relationships with soil chemical attributes in an integrated crop-livestock system under annual phosphates fertilization. **Front. Sustain. Food Syst.** 6:893525, 2022. DOI: 10.3389/fsufs.2022.893525

GUSTAFSSON, J.P.; MWAMILA, L.B.; KERGOAT K. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. **Geoderma**, 189:304-11, 2012.

HAYNES, R.J.; WILLIAMS, P.H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advanced Agronomy**, v.49, n.1, p.119-199, 1993.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil science Society of American Journal**, Madison, v.46, p.970-976, 1982.

HENTZ, P., CARVALHO.; N. L., LUZ, L. V.; & BARCELLOS, A. L. (2014). Ciclagem de nitrogênio em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Ciência e Natura**, 36(II),

663-676. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467546184033>  
Acesso em 25 de mai de 2024.

HORTA, M. C.; TORRENT, J. Dinâmica do fósforo no solo: perspectiva agrônômica ambiental. **Portugal: Edições IPBC**, 2010.

IRGA - INSITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Condições meteorológicas e seus impactos sobre as lavouras de arroz irrigado e soja em rotação, e ações de geração e difusão de tecnologia**. DATER (Divisão de Assistência Técnica e Extensão Rural), Seção de Política Setorial, meteorologista Jossana Ceolin Cera, Coordenadorias Regionais e NATE's (Núcleos de Assistência Técnica e Extensão) e a Divisão de Pesquisa do IRGA, setembro de 2022b.

IRGA – INSITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Boletim de resultados da safra 2021/2022 em terras baixas – Arroz irrigado e soja**. DATER (Divisão de Assistência Técnica e Extensão Rural), Seção de Política Setorial, meteorologista Jossana Ceolin Cera, Coordenadorias Regionais e NATE's (Núcleos de Assistência Técnica e Extensão) e a Divisão de Pesquisa do IRGA. Em 19 de setembro de 2022. 2022 a.

IRGA – INSITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Soja em áreas de arroz cresceu 12% em um ano**. Assessoria de Comunicação. Publicado 01/07/22. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/soja-em-areas-de-arroz-cresceu-12-em-um-ano>. Acesso em: 07 de mar. 2022.

IRION, G. **Clay minerals of Amazonian soils**. In: SIOLI, H. The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. ed. Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. p. 537-579.

KIRKMAN, J. H.; BASKER, A.; SURAPANENI, A.; MacGREGOR, A. N. Potassium in the soils of New Zeland - a review. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 37, p. 207-227, 1994.

KITAGAWA, Y.; MÖLLER, M. R. F. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v 14 p. 201-208, 1979.

LALITHA, M.; DHAKSHINAMOORTHY, M. Forms of soil potassium-a review. **Agricultural reviews**, v. 35, n. 1, p. 64-68, 2014. DOI:10.5958/j.0976-0741.35.1.008

LEITE, M. H. S. **Avaliação das perdas de solo, água e nutrientes em diferentes sistemas de preparo num Latossolo VermelhoAmarelo ácrico típico sob chuva natural**. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300021>

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1-64, 2007. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~nutricao/deplantas/fertisolo.pdf> Acesso em: 07 de mar. 2022.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SÁ MAC; VILELA, L., BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura pecuária no Cerrado. **Pesq Agropec Bras.** 42:873-82, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600015>

MARCHESIN, W.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, A. C.; LUZ, P. D. C.; HERLING, V.; ROCHA, C.; & DE OLIVEIRA, W. S. Guia de identificação da sintomatologia nutricional em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. In: Embrapa Pecuária Sudeste-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE2006, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006.

MARTIN, H. W.; SPARKS, D. L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. **Communications on Soil Science and Plant Analysis**, v. 16, p. 133-162, 1985.

MARTINS, Amanda Posselt et al. Aspectos ambientais Integração sojabinos de corte no Sul do Brasil / Grupo de Pesquisa em Sistema Integrado de Produção Agropecuária, Porto Alegre, 2015. p. 71–76. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/148776/001003667.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 07 de mar. 2022.

MARTINS, A. P.; GOMES, M. V.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; DE FREITAS, T. F. S.; ANGHINONI, I., BAYER, C.; ROBINSON, T. (2018). Melhorias ambientais proporcionadas pelos sistemas integrados de produção agropecuária. Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. Tubarão, SC: **Copiart**, 45-70.

MELLO, V. F. et al. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p.159- 164, 1995.

MELLO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO V. F.; ALLEONI L. R. F. Química e mineralogia do solo: parte I – conceitos básicos. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 251-332, 2009.

MELLO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N, F. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p.159- 164, 1995.

MENDES, Krisley. **Efeitos de mudanças na política comercial brasileira para a cadeia produtiva do arroz.** Texto para Discussão, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/12873> Acesso em: 07 de mar. 2022.

MENEZES-BLACKBURN D.; GILES C.; DARCH T.; BLACKWELL M.; STUTTER M.; SHAND C., ET AL. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from

MENUN, B. J. C. Characterizing phosphorus forms in cropland soils with solution <sup>31</sup>P-NMR: past studies and future research needs. **Chem. Biol. Technol.** Agric. 4:19, 2017. DOI:10.1186/s40538-017-0098-4



MEURER, E. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p. 65-90.

MIKKELSEN, D.S.; PATRICK, J.R., W.H. Fertilizer use our rice. In: The changing patterns in fertilizer use. **Smil Sei. Soe. Am.**, Madison, p. 403-432, 1968.

MITSUI, S. **Inorganic nutrition, fertilization and soil amelioration for lowland rice**. 4th ed. Yokendo Ltd., Tokyo. 1960.

MÖLLER, M. R. F. **Mineralogia de argilas de solos da região Amazônica brasileira**. In: SIMPÓSIO DO TRÓPICO ÚMIDO, 1., Belém, 1984. Anais... Belém, Embrapa- CPATU, 1986. p. 214-223.

MONGKOL T. A. P.; ANAN, P. **Improvement of paddy soil for organic rice (in Thai)**. Department of Extension Cooperative, Ministry of Agriculture and cooperatives, 2006. 22 p.

MOODY, P. W.; BELL, M. J. Availability of soil potassium and diagnostic soil tests. **Australian Journal of Soil. Research**, v. 44, n. 3, p. 265-275, 2006.  
<http://dx.doi.org/10.1071/SR05154>

MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4–9, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>

MORAES, A.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S.C.; COSTA, S.E.V.G.A. & KUNRATH, T.R. Crop-livestock integration in Brazilian subtropics II. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS. Porto Alegre, 2012. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. DOI:10.1016/j.eja.2013.10.004

MORAES, A.; PELISSARI, A.; ALVES, S.J.; CARVALHO, P.C.F. & CASSOL, L.C. Integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. In: MELLO, N.A. & ASSMANN, T.S., orgs. Integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. Pato Branco, CEFET, 2002. p.3-60. Disponível em:  
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27034/000763214.pdf?...1> Acesso em: 07 de mar. 2022.

MOREIRA, F.M.S; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003. 626p.

MORTELE, D. F.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E. C. Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. **Plant Soil** 406:157–172, 2016.  
DOI:10.1007/s11104-016-2862-9

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Dinâmica de liberação de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 43-47, 1991. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000400004>

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; DE OLIVEIRA, T. P.; DA SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 136-145, 2019. DOI: 10.5965/223811711812019136. Disponível em: <https://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/10832>. Acesso em: 25 mai. 2024.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p

O'HALLORAN, I.P.; STEWART, J.W.B.; DE JONG, E. Changes in P forms and availability as influenced by management practices. **Plant Soil**, 100, 113–126, 1987.

OBERSON, A.; JONER, E. J. Microbial turnover of phosphorus in soil. **Organic phosphorus in the environment**, p. 133-164, 2005. DOI:10.1079/9780851998220.0133

OLIVEIRA, M. Arroz um alimento de verdade: Fonte de nutrientes, aliado da saúde, Porto Alegre, 2021. 96p. ISBN: 978-65-86327-29-8.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E. Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. In: MEYER, M.; BUENO, A. de F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (ed.). **Bioinsumos da cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 163-179.

OLK, D.C.; Cassman, K.G.; Carlson, R.M. Kinetics of potassium fixation in vermiculitic under different moisture regimes. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 59, 423–429. 1995.

PATRICK JUNIOR, W. H. Nitrogen transformation in submerged soils. **Agronomy Monographs**, vol.22, 1982.

PATRICK JUNIOR, W.H.; MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, v.20, p.323-359, 1968.

PAVINATTO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.

PENN, C.J.; CAMBERATO, J.J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, 9:120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>.

PEREIRA, D. S. et. al. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, São Paulo, v. 5, p. 1-4, 2021. doi: 10.29372/rab202124

PIERZYNSKI, G.M.; MCDOWELL, R.W.; SIMS, J.T. Chemistry, cycling and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In: Sims JT, Sharpley AN, editors. Phosphorus, agriculture and the environment. Monograph no 46. Madison: Soil Science Society of America; 2005. p. 53–86. DOI:10.2134/agronmonogr46.c3

PIRES, Luciana Pinheiro. **Fixação e disponibilidade de fósforo no solo: uma revisão**. 2023. 40 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Ambientais) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/37024> Acesso em: 25 mai. 2024.

POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; HASKEL, M. K.; STUMPF, L.; PAIER, C. D.; ROSA, J. K.; SARTOR, L. R. Atributos químicos de solos em integração lavoura-pecuária de longa duração. **Research Society and Development**, v. 9, n. 11, e2169119632, 2020. DOI:10.33448/rsd-v9i11.9632

RAIJ, B. V. Avaliação da fertilidade do solo. 2. ed. Piracicaba: Instituto Internacional da Potassa, 1991.

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

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.345-354, 2000.

RIBEIRO-FILHO, M. R.; SIQUEIRA, J. O.; CURTI, N.; SIMÃO, J. B. P. Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25, 495-507, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200025>

ROCHA, A. T. D.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 9, 178-184, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200005>

ROCHA, T. S. M. **Potencial e lacunas de produtividade da soja cultivada em rotação com arroz irrigado**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 80p. 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/23540> Acesso em: 25 mai. 2024.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. M.; HERNANI, L. C. **Integração lavoura-pecuária: alternativas de rotação de culturas**. In: ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 5., 2001, Dourados. Anais... Dourados: UFMS/Embrapa Cnpao, 2001. p. 31-32 (Documentos, 31). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/933216> Acesso em: 25 mai. 2024.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M. D.; SILVEIRA, P. M. D.; & BECQUER, T. (2011). Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, 1339-1348. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000030>

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 705-714, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200025>

SAUNDERS, W.M.H. Mineral composition of soil and pasture from areas of grazed paddocks, affected and unaffected by during dung and urine. **N.Z. J. Agric. Res.** 27, 405–412, 1984.

SCHLINDWEIN, J.A. & GIANELLO, C. Doses de máxima eficiência econômica de fósforo e potássio para as culturas cultivadas no sistema plantio direto. **R. Plantio Direto**, 85:20-25, 2005.

SCHMIDT, F. Crescimento e produção de arroz irrigado de pericarpo colorido em função da aplicação de nitrogênio e potássio. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 34-42, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99550456004> Acesso em: 25 mai. 2024.

SCHNYDER, H., LOCHER, F., AUERSWALD, K. Nutrient redistribution by grazing cattle drives patterns of topsoil N and P stocks in a low-input pasture ecosystem. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, p. 183–195, 2010. DOI:10.1007/s10705-009-9334-z

SCHOENFELD, R. et al. Resposta do arroz irrigado a níveis de adubação em experimento de Longa duração. In: Fertbio, 2012, Maceió. Anais... Maceió: Fertbio, 2012.

SCOOT, S.J; SMITH A.D. Mechanism for soil potassium release by drying. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 32, 443–444. 1968.

SILVA, F.C.; RAIJ, B.V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.267-288, 1999.

SILVA, J. B. **Influência do alagamento nas formas e disponibilidade de fósforo em solo de várzea. Tese** (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2013. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/123456789/2437> Acesso em: 25 mai. 2024.

SILVA, J. L. S. et al. Manejo de azevém anual e rendimento de bovinos de corte em integração lavoura-pecuária nas terras baixas do bioma pampa. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2011. 8 p. (Circular Técnica, 119). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78831/1/Circular-119-.pdf> Acesso em: 25 mai. 2024.

SILVA, Juliana Brito. **Influência do alagamento nas formas e disponibilidade de fósforo em solo de várzea.** 2013. 123p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/123456789/2437> Acesso em: 25 mai. 2024.

SILVA, L. S.; POCOJESKI, E.; BRITZKE, D.; KAEFER, S.; GRIEBELER, G.; SANTOS, D. R. Disponibilidade de potássio a arroz irrigado por alagamento em solos de várzea. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 45, n. 4, p. 379-387, 2014. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/35437>. Acesso em: 25 maio. 2024.

SILVA, Francine Damian da et al. **Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade da soja e qualidade do solo em sistema de integração lavoura-pecuária**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3624> Acesso em: 25 maio. 2024.

SILVEIRA, D. C., FONTANELI, R. S., REBESQUINI, R., DALL'AGNOL, E., PANISSON, F., BOMBONATTO, M., & CEOLIN, M. (2020). Plantas de cobertura de solo de inverno em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária. *Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola*, v. 29, n. 173, p. 18-23, jan./fev. 2020. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1121117> Acesso em: 25 maio. 2024.

SIMONSSON, M.; HILLIER, S.; OBORN, I. 2009. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma* 151, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.018>

SONG, S. K.; HUANG, P. M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 383-390, 1988. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200020015x>

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Bento Gonçalves, 2014.192 p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz Irrigado - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Farroupilha, 2016.

SOSBAI. **Irrigated Rice South-Brazilian Society**. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Cachoeirinha, pp. 205. 2018.

SOUZA JÚNIOR, R. F. S.; OLIVEIRA, F. H. T.; COSTA SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Phosphorus forms in soils under influence of liming and organic fertilization. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, 31 (6), 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600030

SOUZA JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 159-169, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100017>

SOUZA, E. D. D. Evolução da matéria orgânica, do fósforo e da agregação do solo em sistema de integração agricultura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. Tese de doutorado no Programa de Pós-Graduação em

Ciência do Solo, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/14905> Acesso em: 25 maio. 2024.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; OLIVEIRA, E. V. F.; MARTINS, A. P.; CAO, E.; ANDRIGHETTI, M. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. RBCS, Viçosa, v. 34, p. 1365-1374. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400033>

SOUZA, E.D., COSTA, S.E.V.G.A., ANGHINONI, I., CARVALHO, P.C.F., ANDRIGHETTI, M.H., CAO, E.G. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 33, 1829–1836, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600031>

SPARKS, D. L. **Nutrient balances and the need for potassium: In: potassium release from sandy soils.** In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 13th.IPI-congress, France1986, Reims, Proceedings... Bern: International Potash Institute, p. 43-63.

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

STEINER, Fábio; ZUFFO, Alan Mario. Elementos da Natureza e Propriedades do Solo 6. Ponta Grossa: **Atena Editora**, v. 6, p. 227, 2018. DOI: 10.22533/at.ed.055182507

SWAROWSKY, A.; RIGHES, A. A.; MARCHEZAN, E.; RHODEN, A. C.; & GUBIANI, E. I. (2006). Concentração de nutrientes na solução do solo, sob diferentes manejos do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10, 344-351. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200014>

TANGRIANI, S. A.; SOARES, A. B. Migrando da adubação de culturas para adubação de sistemas por meio da integração lavoura pecuária. **Informativo Integrar**, n.15, 2016. Disponível em: <[www.aliancasipa.org](http://www.aliancasipa.org)>. Acesso em: 27 de jun. de 2023.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, D. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. **In: Boletim técnico**, 2º ed. Porto Alegre, 1995.

TEIXEIRA, V. I. et al. Herbage mass, herbage rejection, and chemical composition of signalgrass under different stocking rates and distances from dung pads. **Crop Science**, v.52, p. 422-430, 2012. DOI:10.2135/cropsci2011.02.0094

THORNTON P.K.; HERRERO M. Integrated crop–livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. **Agric. Syst.** 70, 581–602. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00060-9)

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; DOS SANTOS RHEINHEIMER, D. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter



cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78-85, 2017.  
DOI:10.1016/j.geoderma.2017.08.028

TISDALE, S. L. et al. **Soil fertility and fertilizers**. 5. ed. New York: McMillan, 1993, 634p.

TREVISAN, R. G., FREDDI, O. D. S., WRUCK, F. J., TAVANTI, R. R., & PERES, F. S. C. (2017). Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, 76, 145-154. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.580>

TURRIÓN, M.B.; GLASER, B. & SOLOMON, D. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Khyrgyzia. **Biol. Fert. Soils**, 31:134-142, 2000. DOI:<https://doi.org/10.1007/s003740050636>

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Economic Research Service - Rice Outlook. September 2022. 2022. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=104742>. Acesso em: 07 de mar. de 2023.

VAHL, L. C.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; **A calagem e a cultura do arroz irrigado por alagamento no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, 2ª edição, 1993, 14p. (Boletim Técnico de Solos, 2).

VARELLA, C.A; SANT'ANNA, M.D.; PILON, M.; PEREZ, B.N.; LAMPERT, N.V. **A integração da Lavoura-Pecuária no contexto dos campos Sul-Brasileiros: Visão da EMBRAPA Pecuária Sul**. 102ª Expofeira Bagé, v. 1, p.66-70, 2015

VEDELAGO, A.; CARRMONA, F. C.; BOENI, M.; LANGE, C. E.; ANGHINONI, I.; Fertilidade e aptidão de uso dos solos para o cultivo da soja nas regiões arroyeiras do Rio Grande do Sul. **In: Boletim Técnico**, 12. Cachoeirinha: IRGA/Estação Experimental do Arroz, 2012. 48p.

VELOSO, M. G.; ANGERS, D. A.; TIECHER, T.; GICOMINI, S.; DIECKOW, J.; BAYER, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 268, 15–23. DOI:10.1016/j.agee.2018.08.024

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, p.743-755, 2009.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>

VILELA, L. et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1127- 1138, 2011.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000003>

WOODARD, K.R. et al. Leaching potential of phosphorus from cattle excreta patches in the Central Highlands of Florida. *Journal of Environmental Quality*, v. 42, p. 872–880, 2013. DOI:10.2134/jeq2012.0348

YADVINDER-SINGH R. K. G. *et al.* Placement effects on rice residue decomposition and nutrient dynamics on two soil types during wheat cropping in rice-wheat system in northwestern India. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 88, n. 3, p. 471-480, 2010. DOI:10.1007/s10705-010-9370-8

ZENG, Q.; BROWN, P. H. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. **Plant and Soil**. 221: 121-134, 2000.

ZIBILSKE, L.M.; BRADFORD, J.M.; SMART J.R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. **Soil and Tillage Research**, 66: 153–163, 2002. DOI:10.1016/S0167-1987(02)00023-5